УДК 621.928.4:621.921.1:621.922.34

Г.А. Петасюк, к.т.н., с.н.с.
О.У. Петасюк, пров. інж.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
НАН України

АЛГОРИТМ БАГАТОВАРІАНТНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ПОБУДОВИ ТА АНАЛІЗУ ЕМПІРИЧНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Пропонується багатоваріантний підхід до побудови та аналізу емпіричних математичних моделей. Розроблений на базі такого підходу алгоритм передбачає автоматичну комп'ютерну генерацію апроксимуючих залежностей, визначення робочих параметрів одержаних математичних моделей та аналіз їх адекватності за одним із запропонованих критеріїв. Створено і апробовано на практиці комп'ютерне програмне забезпечення, наводяться приклади одержаних з його допомогою емпіричних математичних моделей.

Вступ. Згідно з [1] математичні моделі визначаються як наближений опис певного класу явищ зовнішнього світу, виражений за допомогою математичної символіки. Як основний кількісній показник таких моделей приймається їх адекватність, яка визначає глибину та об'єктивність одержуваних з їх допомогою знань. Математична модель реальної системи є її формалізованим описом, який дозволяє вивчити систему математичними методами. Звичайно така модель складається із сукупності співвідношень (рівнянь, нерівностей, логічних умов, формул тощо), які визначають характеристики стану системи залежно від її параметрів, вхідних сигналів, початкових умов та часу.

У питанні побудови математичних моделей досліджуваних процесів і явищ можна виділити два підходи, умовно назвавши їх як фундаментальний та феноменологічний. Перший із них передбачає застосування фундаментальних законів природи для встановлення взаємозв'язку між параметрами процесів чи об'єктів, що вивчаються. Цей підхід вимагає широкого знання фактів, що належать до досліджуваних процесів та глибокого проникнення в їх сутність. При такому підході взаємозв'язок між параметрами (факторами) процесу записується у вигляді алгебраїчних, інтегральних, диференціальних, скінченно-різницевих чи інших співвідношень. Отримані таким чином математичні моделі не обтяжені будь-якими обмеженнями (або є

© Г.А. Петасюк, О.У. Петасюк, 2005

незначними) на область зміни значень параметрів процесу та адекватні відносно одержуваних з їх допомогою результатів. Але на практиці розробка подібних моделей є досить складним завданням, яке у багатьох випадках не може бути вирішене.

При феноменологічному підході абстрагуються від глибокого з'ясування законів взаємозв'язку основних факторів процесу. Суть цього підходу зводиться до заміни дійсних залежностей згаданого взаємозв'язку наближеними алгебраїчними, в обумовленому розумінні близькими до дійсних. Побудова цих наближених залежностей здійснюється на базі наявних емпіричних знань про процес у вигляді експериментальних даних, певним чином зафіксованої кількісної характеристики деякого частинного його стану. Як інструмент побудови емпіричних математичних моделей застосовується математичний апарат апроксимації, інтерполяції та регресійного аналізу. При такому підході отримують всеохоплюючі (з погляду прийняття до уваги незалежних факторів процесу) математичні моделі у вигляді алгебраїчних залежностей. Область застосування цих залежностей визначається межами зміни параметрів процесу при проведенні дослідів, пов'язаних з одержанням необхідних експериментальних даних. Головним недоліком емпіричних математичних моделей є те, що їм властивий наближений характер. Ступінь їх адекватності значним чином залежить від вдалого вибору виду апроксимуючої залежності, об'єму експериментальних даних, використаних для визначення параметрів моделі, та інших обставин. Але, незважаючи на зазначені недоліки та труднощі, пов'язані з одержанням експериментальних даних, цей підхід знаходить широке застосування на практиці. Плідний розвиток в 70-ті роки минулого століття одержав один із його напрямків, пов'язаний з побудовою емпіричних математичних моделей на базі стратегії оптимальної організації дослідів, що одержав назву планування експерименту [2].

Планування експерименту є потужним і ефективним методом одержання емпіричних математичних моделей. Як інструмент побудови в даному випадку використовується методичний апарат регресійного аналізу в сукупності з процедурою лінеаризації [3]. Проте, незважаючи на високий рівень теоретичної розробленості такого підходу, відкритим залишається питання про вибір виду апроксимуючої залежності. Цей вибір є чи не найвпливовішим чинником адекватності одержуваних емпіричних математичних моделей. Що стосується власне задачі вибору оптимальної апроксимуючої залежності, то на сьогодні вона не має жодного наукового обґрунтування. Тому в очікуванні розв'язання цієї складної

теоретичної задачі на практиці немає іншого підходу, як користуватися методом перебору різних варіантів цих залежностей. Сказане вище меншою мірою стосується однофакторних математичних моделей. Апроксимація таких експериментальних даних, як метод побудови емпіричних математичних моделей, успішно розв'язується за допомогою програмних засобів сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій (EXEL, ORIGIN, MatLab та ін.). Але і тут постановка задачі не передбачає пошуку найбільш адекватної емпіричної математичної моделі. І якщо, затративши чимало часу, користувач шляхом перебору в ручному режимі все ж таки зможе досягти поставленої цілі, то при переході до двох і більше незалежних факторів зробити це вказаним методом практично не можливо. У зв'язку із цим актуальними є розробка і автоматизація алгоритмів синтезу апроксимуючих залежностей та їх кількісного аналізу, вибору високоінформаційних критеріїв адекватності одержуваних емпіричних математичних моделей. Саме на досягнення такої мети і спрямована ця робота.

Основна частина. В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України створена комп'ютерна програмна система автоматизованої багатоваріантної побудови та аналізу емпіричних математичних моделей (ЕММО). Ядро системи ЕММО складає оригінальний алгоритм, який ґрунтується на методології лінеаризації [3] базових функціональних залежностей і орієнтований на максимальне використання великих обчислювальних можливостей сучасної комп'ютерної техніки. В розробленому алгоритмі акцент робиться не на планування (організацію) експерименту, хоча це також важливий самостійний аспект побудови емпіричних математичних моделей, а на пошук таких апроксимуючих залежностей, які найбільш адекватно описують наявні експериментальні дані. Для загального розуміння суті використовуваного підходу важливо наголосити, що він не протиставляється організації експерименту, а доповнює її. Алгоритм передбачає автоматичну генерацію та лінеаризацію апроксимуючих залежностей для використання їх як емпіричних математичних моделей, селективний аналіз кожної нової моделі на предмет її адекватності, автоматичне запам'ятовування та оновлення інформації по 10-ти найбільш адекватних моделях із сукупності одержаних на момент виконання чергового кроку генерації. Як метод генерації використовується проста та подвійна суперпозиції в базові функціональні залежності. Такими прийняті такі основні класи залежностей: раціональні, дробово-раціональні, степеневі та показникові. В загальному вигляді вони можуть бути записані так:

$$y = a_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n x_n \,, \tag{1}$$

$$y = \left[a_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n x_n \right]^{-1} \,, \tag{2}$$

$$y = a_0 \cdot \prod_{n=1}^{N} x_n^{a_n} \,, \tag{3}$$

$$y = a_0 \cdot \prod_{n=1}^{N} a_n^{x^n} \,. \tag{4}$$

Тут x_n і a_o, a_n (n = 1, ..., N) – аргументи та невідомі коефіцієнти апроксимуючих залежностей відповідно, N – число аргументів. Проста суперпозиція здійснюється за допомогою функцій виду $G(x_n, t_n) = x_n^{t_n} = X_n$ ($t_n > 0$) підстановкою $X_n \rightarrow x_n$; подвійна – функціями $F_1(u) = u$, $F_2(u) = u^{-1}$, $F_3(u) = lg(u)$, $F_4(u) = [lg(u)]^{-1}$ та підстановкою $F_k(X_n) \rightarrow X_n$ (k = 1, 2, 3, 4). Подвійна суперпозиція здійснюється тільки в апроксимуючі залежності (1), (2). При такому підході на базі залежностей (1–4) генерується множина лінеаризованих апроксимуючих залежностей, загальне представлення яких має вигляд:

$$y = a_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n F_k \left[G(x_n, t_n) \right], \; k = 1, 2, 3, 4; \tag{5}$$

$$y = \left\{ a_0 + \sum_{n=1}^{N} a_n F_k \left[G(x_n, t_n) \right] \right\}^{-1}, \; k = 1, 2, 3, 4; \tag{6}$$

$$y = a_0 \cdot \prod_{n=1}^{N} \left[G(x_n, t_n) \right]; \tag{7}$$

$$y = a_0 \cdot \prod_{n=1}^{N} a_n^{G(x_n, t_n)} \,. \tag{8}$$

Методом лінеаризації рівняння (5, 6) зводяться до одного із лінійних рівнянь вигляду:

$$Y = A_0 + \sum_{n=1}^{N} A_n \cdot Z_{nk} \,, \tag{9}$$

де $Y = y$ для рівняння (1) і $Y = y^{-1}$ у випадку рівняння (2); $A_n = a_n$ (n = 0, …, N), $Z_{nk} = F_k \left[G(x_n, t_n) \right]$ (k = 1, 2, 3, 4).

Залежності (7, 8) після лінеаризації набувають вигляду:

$$Y = A_0 + \sum_{n=1}^{N} A_n \cdot Z_n \,. \tag{10}$$

Тут $Y = \lg(y)$, $A_o = \lg(a_o)$ і прийняті такі позначення: $Z_n = \lg(x_n)$, $A_n = t_n a_n$

($n = 1, \ldots, N$) у випадку рівняння (3) та $Z_n = x_n$, $A_n = t_n \lg(a_n)$ ($n = 1, \ldots, N$) у випадку рівняння (4). Визначення невідомих коефіцієнтів a_o, a_n ($n = 1, \ldots, N$) в рівняннях (1–4) базується на використанні мінімізаційної процедури методу найменших квадратів [4].

Критерії оцінки адекватності й добору моделей. Будемо розрізняти теоретичну і практичну оцінку адекватності емпіричних математичних моделей. Перша з них проводиться на сукупності наявних експериментальних даних, на якій проводилось визначення невідомих коефіцієнтів апроксимуючої залежності. Для зручності викладання таку сукупність експериментальних даних на далі називатимемо базовою. Невідомі коефіцієнти після встановлення їх числових значень, наслідуючи [5], будемо називати робочими параметрами моделі, а саму процедуру їх визначення – задачею її ідентифікації.

Теоретичну адекватність одержуваних емпіричних математичних моделей нами пропонується оцінювати такими характеристиками, як середньоквадратичне чи середньолінійне відхилення розрахункових значень залежної змінної від фактичних (Δ^c), надійність (n) та тенденція (t) прогнозування. Оскільки в практиці порівняльного аналізу емпіричних математичних моделей на кількісному рівні ці критерії не є усталеними (крім, можливо, першого), то дамо стисле пояснення їх суті та алгоритму визначення відповідних показників.

Після визначення робочих параметрів моделі проводиться розрахунок (прогноз) значень залежного фактора досліджуваного процесу за відповідними йому незалежними факторами. Ця операція проводиться для кожного із M експериментальних значень залежного фактора. При цьому кожний раз фіксується квадратичне (Δ) та лінійне (σ) відхилення прогнозованих (y_i) значень залежного фактора від точних (Y_i). Перше із них обчислюється як $\Delta = (y_i - Y_i)^2$, друге – $|y_i - Yi|$. Проводиться порівняння y_i і Y_i. З'ясовується, чи задовольняє y_i одну з умов:

1) $Y_i - \delta \le y_i \le Y_i + \delta$, де δ - допустиме відхилення;
2) 2) $y_i > Y_i \pm \varepsilon$; $y_i < Y_i \pm \varepsilon$; $y_i = Y_i \pm \varepsilon$,

де ε – допустима похибка прогнозування залежного фактора. При цьому здійснюється накопичення кількості випадків позитивного виконання кожного із цих співвідношень. Для відповідних сум вводяться позначення: M_δ, M^+, M^- та $M^=$ відповідно. Тоді надійність прогнозування визначається як вирахуване у відсотках відношення M_δ до загальної (M) кількості спостережень, тобто $n = (M_\delta / M) \cdot 100$, (%). Тенденція прогнозування є якісною характеристикою і зводиться до переваги завищення, заниження чи збігу результатів прогнозування

залежної змінної в порівнянні з точним (експериментальним) її значенням при заданій допустимій похибці ε. При $M^+ > M^-$ і $M^+ > M^=$ має місце тенденція до завищення результатів прогнозування, при $M^- > M^+$ і $M^- > M^=$ – тенденція до їх заниження, при $M^= > M^+$ і $M^= > M^-$ – тенденція до точного прогнозування в межах прийнятої допустимої похибки ε. Показники тенденції прогнозування для кожного із вказаних трьох її випадків визначаються як $t^+ = M^+/M$, $t^- = M^-/M$, $t^= = M^=/M$ відповідно. Екстремальні значення введених таким чином характеристик надійності та тенденції прогнозування в розглядуваному алгоритмі прийняті як критерії теоретичної оцінки адекватності одержуваних математичних моделей, а саме:

– мінімум середньоквадратичного ($\Delta^c_{\min}$) чи середньолінійного ($\sigma^c_{\min}$) відхилення розрахункових значень залежної змінної від фактичних на множині проаналізованих моделей;

– максимум показника надійності прогнозування при заданому рівні допустимої похибки (ризику);

– екстремум потрібного характеру (до завищення, до заниження, до співпадіння) тенденції прогнозування.

Обчислення числових значень критеріїв проводиться, як уже зазначалось, на сукупності наявних експериментальних даних після визначення невідомих коефіцієнтів a_o, a_n (n = 1, ..., N).

Функціональні можливості та програмно-методичне забезпечення. Аргументи функціональних залежностей (1–4) ототожнюються з незалежними факторами процесу, який аналізується. У створеному комп'ютерному програмному забезпеченні реалізується варіант побудови та аналізу емпіричних математичних моделей з числом робочих параметрів до 7-ми включно. Такі моделі описують процеси, число незалежних факторів яких не перевищує 6. Якщо в конкретних задачах, що розв'язуються, кількість незалежних факторів менше вишевказаного обмежувального їх значення, то утворені „вакантні" місця можуть заповнюватись додатковими так званими квазінезалежними змінними, функціонально зв'язаними з основними. За такою схемою можна враховувати, наприклад, ефекти здвоєного впливу незалежних факторів. Значення введених таким чином нових незалежних змінних визначаються аналітично за залежностями, які виражають прийняті при здвоєнні зв'язки. Завдяки цьому збільшується число робочих параметрів одержуваних моделей, а з ними – і додаткові можливості при пошуку найбільш адекватних із них.

Для практичної реалізації розробленого алгоритму створено і апробовано на розв'язанні конкретних задач комп'ютерне програмне

забезпечення. Програмне забезпечення має розгалужену структуру і складається з 28-ми логічно зв'язаних програмних модулів на алгоритмічній мові ФОРТРАН. Початковими даними для побудови емпіричних математичних моделей з використанням даного програмного забезпечення служать: кількість факторів, які описують процес, число експериментальних даних і їх значення, тип апроксимуючої залежності, вигляд функцій суперпозиції з відповідними їм показниками степеня. Значення останніх двох груп параметрів можуть задаватися або одноразово (тоді генерується одна апроксимуюча залежність), або з перебором всіх передбачених варіантів за типом апроксимуючих залежностей і за видом функцій подвійної суперпозиції для заданого інтервалу значень показників степеня функцій простої суперпозиції (тоді генерується множина апроксимуючих залежностей). Передбачений автоматичний селективний аналіз одержуваних моделей із збереженням довідкової інформації – за 10-тьма найбільш адекватними із них. Робота з програмою реалізується в формі діалогу. Нижче подаються найбільш цікаві приклади із практики застосування комп'ютерної програмної системи ЕММО. Вони стосуються сфери діагностики порошків надтвердих матеріалів і процесів алмазно-абразивної обробки.

Приклади одержаних математичних моделей

1. Оцінка якості обробленої поверхні. В роботі [6] проводилось експериментальне вивчення впливу параметрів алмазної обробки вуглеситалу шліфуванням на якість обробленої поверхні. Незалежними параметрами цього процесу виступали: швидкість поздовжньої подачі (x_1, мм/хв.), глибина шліфування (x_2, мм) та поперечна подача (x_3, мм/хід). Залежною змінною служила шорсткість обробленої поверхні, яка оцінювалась параметром R_z, мкм. Межі й дискретність зміни незалежних параметрів були такими: швидкість поздовжньої подачі – 0,5, 1,0, 2,0, 4,0, 6,0; глибина шліфування – 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5; поперечна подача – 0,2, 1,0, 3,0, 8,0. В результаті реалізації цієї схеми випробувань було одержано 97 наборів значень параметра R_z. Всі вони разом із відповідними значеннями незалежних змінних наведені в цитованій вище роботі [6]. На базі цих експериментальних даних і використовуючи створену комп'ютерну програмну систему ЕММО проводилась побудова емпіричної математичної моделі цього процесу. Наявні експериментальні дані розділялись на дві групи. До першої було включено 92 набори експериментальних даних, за якими проводилась ідентифікація моделі та визначення її робочих параметрів. П'ять наборів, що залишилися, слугували контрольними і використовувались для перевірки

теоретичних оцінок адекватності одержаних моделей. Було побудовано і проаналізовано 668168 математичних моделей. Як міра адекватності приймався мінімум середньоквадратичного відхилення розрахункових значень залежної змінної від фактичних у кожній із точок спостережень. Одержана в результаті найбільш адекватна емпірична математична модель має вигляд:

$$y = \left\{ 0{,}3952 - 0{,}05053 \cdot x_1^{0,5} + \frac{0{,}2152}{x_2^{2,75} \cdot 10^4} - 0{,}003268 \cdot x_3^{1,75} \right\}. \quad (8)$$

Значення показників введених характеристик для моделі (8) склали: $\Delta^c_{\min} = 9{,}18\ \%$, $n = 78{,}25\ \%$ (при допустимому 5%-ному відхиленні), $t^+ = 0{,}3478$, $t^- = 0{,}4457$ при похибці прогнозування $\varepsilon = 0{,}1\ \%$. Перевірка вказаних теоретичних значень цих характеристик здійснювалась на контрольному наборі експериментальних даних (табл. 1) і підтвердила їх достовірність.

Таблиця 1

Результати прогнозування ($y_{прогн}$) залежної змінної (y) на контрольному наборі експериментальних даних за математичною моделлю (8)

x_1	x_2	x_3	y	$y_{\text{прогн.}}$	Відносна похибка, %
0,20	0,10	0,50	2,72	2,6058	4,1968
1,00	0,20	1,00	2,81	2,9135	3,6826
3,00	0,10	2,00	2,92	3,2379	10,0886
0,20	0,30	4,00	2,98	2,9740	0,2006
8,00	0,30	4,00	5,06	4,6313	8,4725

2. Методика експериментально-аналітичного визначення висоти зерен стандартних шліфпорошків синтетичних алмазів. У роботі [7] описана методика опосередкованого експериментально-аналітичного визначення висоти (h, мкм) зерен стандартних за ДСТУ-3295 шліфпорошків синтетичних алмазів, виходячи із середніх значень їх довжини (a, мкм) та ширини (b, мкм). Основу методики складає одержана із використанням комп'ютерної програмної системи ЕММО емпірична математична модель:

$$h = 2085{,}3 - 663{,}06 \cdot a^{0,3} + 147{,}32 \cdot \sqrt{b} + 95{,}991 \cdot (a/b)^{3,25} - \\ -353{,}38 / \left[\log(2ab/(a+b))\right]^{0,2}. \quad (9)$$

У процесі пошуку найбільш адекватної математичної моделі (9) було згенеровано 254324 апроксимуючих залежності, аналіз адекватності яких проводився за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення. Визначення робочих параметрів

моделей здійснювалось на об'ємі вибірки, рівному 67 вимірам. Надійність прогнозування за моделлю (9) при допустимому 5 %-ному відхиленні склала 61,19 %, з невеликим перебільшенням тенденції до заниження прогнозування (тенденція до заниження $t^- = 0{,}4776$, тенденція до завищення – $t^+ = 0{,}4328$).

Модель (9) апробована на опублікованих в науково-технічній літературі експериментальних даних за розмірними характеристиками шліфпорошків синтетичних алмазів. Зокрема, згідно з [8] середнє значення висоти зерен шліфпорошка АСР (АС4) 100/80, одержане шляхом прямого вимірювання за методикою [9], склало 78 мкм при середніх значеннях довжини і ширини зерен, рівних 158 мкм та 113 мкм відповідно. Розрахункове ж значення цього розмірного параметра за формулою (9) для вказаних значень a и b дає $h = 75{,}11$ мкм. Похибка визначення, як показує аналіз, дорівнює 3,7 %, що є цілком прийнятним для практичних застосувань у даній сфері.

3. Методика неруйнівного визначення динамічної міцності шліфпорошків синтетичних алмазів. Динамічна міцність шліфпорошків синтетичних алмазів є однією з найважливіших їх характеристик. Найбільше поширення у світовій практиці при випробуваннях на динамічну міцність здобув метод, який реалізується на приладах типу „Friatester" [10]. За своєю суттю цей метод є руйнівним. Безпосередня його реалізація дуже трудомістка, відзначається значною тривалістю проведення випробувань і передбачає наявність складного у використанні та дорогого устаткування.

У роботі [11] описана експрес-методика неруйнівного визначення показника динамічної міцності (F, у.о.) шліфпорошків синтетичних алмазів. Основним алгоритмічним елементом запропонованої методики є математичні моделі взаємозв'язку показника динамічної міцності з показником статичної міцності (Н) та коефіцієнтом форми зерен шліфпорошка. Емпіричні математичні моделі розроблялися для кожної із шести зернистостей, для яких за стандарту ДСТУ 3292-95 передбачається контроль показника динамічної міцності. Визначення робочих параметрів емпіричних математичних моделей, що генерувалися при цьому, здійснювалось на наборі експериментальних даних в кількості 90×98 точок спостережень для кожної із зернистостей (від 200/160 до 630/500). В результаті роботи з комп'ютерною автоматизованою системою ЕММО для марок та зернистостей, які аналізувались, були одержані найбільш адекватні математичні моделі. Деякі з них подаються тут:

$$F = 0{,}0087 + 13{,}0337 \cdot p^{0{,}5} - 20{,}2233 \cdot \kappa_{\phi}^{2}$$

– для зернистості 200/160; (10)

$$F = \sqrt{p^{1,771}} \cdot (0{,}8484)^{\kappa_\phi^{2,5}}$$

– для зернистості 250/200; (11)

$$F = \frac{1}{0{,}5818 \cdot p^{-0,9} - 0{,}0202 \cdot \kappa_\phi^{-0,5}}$$

– для зернистості 400/315. (12)

Аналіз адекватності математичних моделей проводився за критерієм мінімуму средньоквадратичного відхилення розрахункових значень залежної змінної від фактичних на наборі наявних експериментальних даних для кожної апроксимуючої залежності. Ці мінімальні значення $\Delta^c_{\min}$ для зернистостей, за якими проводився аналіз, склали: 200/160 – 7,59 %; 250/200 – 8,05 %; 315/250 – 8,92 %; 400/315 – 10,00 %; 500/400 – 13,59 %; 630/500 – 10,78 %. Як бачимо, відносна похибка визначення динамічної міцності за одержаними математичними моделями знаходиться в межах 7,6÷13,6 %. Така похибка відповідає вимогам стандарту ДСТУ 3292-95, який є загальнодержавним нормативним документом на порошки синтетичних алмазів і дозволяє 20-ти відсоткове відхилення результатів визначення показника динамічної міцності користувачем від тих, що містяться в технічному паспорті на порошок.

Висновки. Розроблений алгоритм багатоваріантної побудови та аналізу емпіричних математичних моделей і створена на його основі комп'ютерна програмна система ЕММО дозволяють одержувати високоадекватні математичні моделі досліджуваних технологічних процесів. Зазначені методичні засоби інваріантні щодо досліджуваних процесів та об'єктів. Нарівні з опосередкованими методами діагностики характеристик порошків із надтвердих матеріалів вивченням процесів алмазно-абразивної обробки методом математичного моделювання вони з успіхом можуть бути застосовані і в інших сферах прикладних досліджень.

Темою наступних досліджень у цьому напрямку буде з'ясування інформаційного потенціалу та порівняльне дослідження співвідношення запропонованих критеріїв адекватності, вироблення практичних рекомендацій з їх вибору.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Математическая энциклопедия: В 5 томах. – Т. 3. / Под ред. И.М. Виноградова. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 1184 с.
2. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование

эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. *Львовский Е.Н.* Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
4. *Бахвалов Н.С.* Численные методы. – М.: Наука, 1973. – 632 с.
5. *Рыжиков Ю.И.* Решение научно-технических задач на персональном компьютере. – СанктПетербург: КОРОНАпринт, 2000. – 271 с.
6. *Плешивцев Н.В., Курис И.М., Лобай А.А., Сидоренко В.А.* Алмазная обработка углеситалла // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 4. – С. 72–76.
7. *Богатирьова Г.П., Никитин Ю.И., Петасюк Г.А.* Експериментально-аналитический метод определения висоты зерен шлифпорошков из синтетических алмазов // Дисперсні системи: Тези доповідей. – Одеса: Астропринт, 2002 – С. 36–37.
8. *Сердюк В.М.* Исследование работоспособности алмазов различных марок при шлифовании твердых сплавов: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. – Харьков, 1973. – 23 с.
9. *Никитин Ю.И., Уман С.М., Коберниченко Л.В., Мартынова Л.М.* Порошки и пасты из синтетических алмазов. – Киев: Наук. думка, 1992. – 284 с.
10. *N.G. Belling*. Friatester and Diamond strength: a review // Industrial Diamond Review. – 1992. – V. 52. – № 3. – Pp. 133–137.
11. *Новиков Н.В., Никитин Ю.И., Петасюк Г.А.* Экспресс-метод неразрушающего контроля динамической прочности шлифпорошков синтетических алмазов // Сверхтвердые материалы. – 2001. – № 2. – С. 58–65.

ПЕТАСЮК Григорій Андрійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу фізико-хімічних основ технології дисперсних надтвердих матеріалів Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

– дослідження та діагностика характеристик дисперсних надтвердих матеріалів методами математичного моделювання та інформаційно-комп'ютерних технологій;

– дослідження впливу напружено-деформованого стану відрізних алмазних кругів на їх експлуатаційну характеристику, показники та якість обробки.

Тел. (д.): (044) 412-53-74.

ПЕТАСЮК Ольга Улянівна – провідний інженер лабораторії кристалографічних досліджень.

Наукові інтереси:

– чисельні методи.

Тел. (д.): (044) 412-53-74.

Подано 09.04.2005

Петасюк Г. А., Петасюк О. У. Алгоритм багатоваріантної комп'ютерної побудови та аналізу емпіричних математичних моделей технологічних процесів**.**

Петасюк Г. А., Петасюк О. У. Алгоритм многовариантного компьютерного построения и анализа эмпирических математических моделей технологических процессов.

Petasyuk G. A., Petasyuk O. U. Algorithm for multivariant computer-aided model construction and analysis of empirical mathematical models of manufacturing processes.

УДК 621.928.4:621.921.1:621.922.34

Алгоритм багатоваріантної комп'ютерної побудови та аналізу емпіричних математичних моделей технологічних процесів / Г. А. Петасюк, О. У. Петасюк.

Пропонується багатоваріантний підхід до побудови та аналізу емпіричних математичних моделей. Розроблений на базі такого підходу алгоритм передбачає автоматичну комп'ютерну генерацію апроксимуючих залежностей, визначення робочих параметрів одержаних математичних моделей та аналіз їх адекватності по одному із запропонованих критеріїв. Створено і апробовано на практиці комп'ютерне програмне забезпечення, приводяться приклади одержаних з його допомогою емпіричних математичних моделей.

УДК 621.928.4:621.921.1:621.922.34

Алгоритм многовариантного компьютерного построения и анализа эмпирических математических моделей технологических процессов / Г. А. Петасюк, О. У. Петасюк.

Предлагается многовариантный подход к вопросу построения и анализа эмпирических математических моделей. Разработанный на базе такого подхода алгоритм предусматривает автоматическую компьютерную генерацию аппроксимирующих зависимостей, определение рабочих параметров полученных математических моделей и анализ их адекватности по одному из предложенных критериев. Создано и апробировано на практике компьютерное программное обеспечение, приводятся примеры полученных с его использованием эмпирических математических моделей.

УДК 621.928.4:621.921.1:621.922.34

Algorithm for multivariant computer-aided model construction and analysis of empirical mathematical models of manufacturing processes / G. A. Petasyuk, O. U. Petasyuk.

The paper presents a multivariant approach to the question of empirical mathematical models construction and analysis. Developing on such approach base algorithm provides for automatic computer-aided generation of approximation relationships, definition of operational characteristics of derived mathematical models and analysis of their adequacy by one of the suggested criterions. Software support is created and approved in practice, we give examples of empirical mathematical models obtained by this software.