

Я.М. Кусий, *В.Г. Топільницький
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра технології машинобудування,
 *кафедра електронного машинобудування

МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ВИРОБІВ

© Кусий Я.М., Топільницький В.Г., 2012

У цій статті представлено алгоритм моделювання вібраційно-відцентрового зміцнення та його практична реалізація у середовищі Mathcad.

The calculation's algorithm of vibratory-centrifugal strengthening treatment and avtomatization calculation's program in Mathcad are suggested.

Постановка проблеми у загальному вигляді. У разі вирішення питань оптимізації технологічних процесів оброблення виробів і складання машин, забезпечення надійності та прогнозування довговічності виробів тощо у машинобудуванні широко використовуються методи математичного планування експериментів. Основне завдання цих методів – побудова математичних моделей для визначення впливу окремих факторів на параметри, які оптимізують, із одночасним скороченням матеріальних і фізичних витрат. Залежно від поставлених завдань і об'єктів досліджень розроблені різноманітні методи багатофакторних експериментів: відсіювальний експеримент, метод Бокса-Уілсона, симплекс-метод, повний факторний та дробових реплік тощо [1].

Зокрема, для комплексного вивчення основних технологічних факторів на фізико-механічні параметри якості поверхневого шару матеріалу важконавантажених деталей машин (мікротвердість, глибину зміцненого шару, ступінь нагартування) під час оброблення вібраційно-відцентровими зміцнювачами з електромагнітним приводом і побудови математичних моделей у вигляді поліноміальних залежностей параметрів оптимізації від параметрів варіювання доцільно використовувати метод факторного планування із використанням плану виду 2^k , де k – кількість факторів варіювання. Однак опрацювання результатів експериментальних досліджень пов'язане із громіздкістю розрахунків і значними витратами часу, тому комп'ютерне моделювання та автоматизація розрахунків на етапі оптимізації технологічних рішень має важливе значення під час дослідження фінішних і оздоблювально-викінчувальних операцій, реалізованих прогресивними методами, зокрема вібраційно-відцентровим зміцненням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У технології машинобудування залежності, що встановлюють зв'язок між параметрами оптимізації (геометричні та фізико-механічні параметри якості, складові зусилля тощо) та характеристиками технологічних процесів, описуються у вигляді степеневих математичних виразів. Зокрема, одержані нелінійні емпіричні залежності для визначення режимів різання у разі різних методів обробок: точіння, свердління, фрезерування тощо.

Тому вважаємо, що для оздоблювально-викінчувальної технологічної операції оброблення деталей машин вібраційно-відцентровим зміцненням нелінійні за факторами математичні залежності степеневого вигляду будуть адекватно описувати зв'язок між технологічними параметрами процесу та параметрами оптимізації, зокрема, фізико-механічними параметрами якості виробів. Після логарифмування степеневі моделі отримують рівняння регресії, для якої правомірно використовувати матриці планування експериментів:

$$Y = b_0 + \sum_p b_p \cdot X_p + \sum_{ij} b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{ijk} b_{ijk} \cdot X_i \cdot X_j \cdot X_k, \quad (1)$$

де Y – функція відклику математичної моделі; b_0 , b_p , b_{ij} та b_{ijk} – коефіцієнти регресії, X_p , X_i , X_j та X_k – кодоване позначення змінних факторів.

Під час побудови математичних моделей для забезпечення хорошої відтворюваності дослідів вибирають кількість повторних дослідів $r = 2$. Обчислюють коефіцієнти регресії із використанням середнього значення логарифмів показника оптимізації, отриманого на підставі реалізації двократних паралельних спостережень.

Повний факторний експеримент проводили згідно з планом 2^3 , у цьому разі основними технологічними параметрами вібраційно-відцентрового зміцнення прийнято жорсткість пружних систем $c_{звед.}$ (фактор X_1), масу робочих органів зміцнювача $m_{роб.}$ (фактор X_2), швидкість подачі V_S , (фактор X_3). Інші фактори стабілізовані: амплітуда коливань виконавчого органу зміцнювального пристрою $A = 1,5$ мм; сила струму на котушках електромагнітів $I = 1,0$ А; кількість проходів $n = 1$. Рівні варіювання факторів для плану типу 2^3 наведено у таблиці [1].

Рівні варіювання факторів для плану повного факторного експерименту типу 2^3

№ з/п	Характеристика фактора	Кодове позначення	Рівні варіювання		Інтервал варіювання
			Верхній	Нижній	
1	Зведена жорсткість ділянок пружних систем $c_{звед.}$, Н/м	X_1	$3,317 \cdot 10^5$	$7,471 \cdot 10^5$	$4,154 \cdot 10^5$
2	Маса робочих органів $m_{2(4)}$, кг	X_2	1,8	3,0	1,2
3	Швидкість подачі V_S , мм/хв	X_3	35	135	100

Сучасна комп'ютерна математика пропонує різноманітні інтегровані програмні системи та пакети програм для автоматизації математичних розрахунків: Evreka, Derive, Mathematika, Matlab, Maple тощо. Комп'ютерне моделювання та автоматизація розрахунків на етапі оптимізації технологічних рішень під час використання методу повного факторного експерименту для дослідження операцій технологічних процесів виготовлення виробів зменшує трудомісткість та громіздкість розрахунків.

Постановка завдання статті. Мета цієї роботи – розроблення алгоритму моделювання вібраційно-відцентрового зміцнення та його реалізація засобами прикладного програмного забезпечення.

Виклад основного матеріалу. На відміну від систем вищого рівня (Mathematika, Matlab, Maple) середовище Mathcad – це система комп'ютерної алгебри з класу систем автоматизованого проектування, що орієнтована на підготовку інтерактивних документів з обчисленнями та візуальним супроводом, відрізняється легкістю використання і використання для колективної роботи. Робота здійснюється в межах робочого аркуша, на якому рівняння та вирази відображуються графічно, на противагу текстового запису в мовах програмування. Відкрита архітектура додатка у поєднанні з підтримкою технологій .NET і XML дають змогу легко інтегрувати Mathcad практично в будь-які ІТ-структури та інженерні додатки. Система MathCAD, що має зручну для користувача-початківця оболонку, є ефективною для автоматизованих розрахунків і проведення чисельних та імітаційних експериментів, широко використовують у навчальному процесі і в практиці науково-експериментальних досліджень [2].

Як правило, алгоритм комп'ютерного моделювання та автоматизація розрахунків на етапі оптимізації технологічних рішень складається із двох блоків: блоку формування та введення відправних даних і блоку розрахунку. Досвід проведення розрахунків у середовищі MathCAD свідчить, що доцільніше блок формування та введення відправних даних розділити на два: 1) блок введення відправних даних; 2) блок аналізу відправних даних, подання відправних даних у зручному для опрацювання вигляді. Це дає змогу забезпечити системність розрахунків.

Отже, модернізований алгоритм комп'ютерного моделювання вібраційно-відцентрового зміцнення складається із таких блоків: блок введення відправних даних; блок аналізу та систематизації відправних даних; блок виконання розрахунків.

Фрагменти блоків програми “*Research work*” для моделювання вібраційно-відцентрового зміцнення, створеної у середовищі MathCAD за заданим алгоритмом, подано на рис. 1–3.

Блок 1. Представлення вихідних даних у зручному для опрацювання вигляді (ПФЕ типу 2^3).
- у кодованому вигляді

$$\begin{aligned}
 X0 &:= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} & X1 &:= \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} & X2 &:= \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} & X3 &:= \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 X1X2 &:= \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} & X1X3 &:= \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} & X2X3 &:= \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} & X1X2X3 &:= \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

- у числовому вигляді

$$\begin{aligned}
 X1_{числ} &:= \begin{pmatrix} 3.317 \cdot 10^5 \\ 7.471 \cdot 10^5 \\ 3.317 \cdot 10^5 \\ 7.471 \cdot 10^5 \\ 3.317 \cdot 10^5 \\ 7.471 \cdot 10^5 \\ 3.317 \cdot 10^5 \\ 7.471 \cdot 10^5 \end{pmatrix} & X2_{числ} &:= \begin{pmatrix} 1.8 \\ 1.8 \\ 3.0 \\ 3.0 \\ 1.8 \\ 1.8 \\ 3.0 \\ 3.0 \end{pmatrix} & X3_{числ} &:= \begin{pmatrix} 35 \\ 35 \\ 35 \\ 35 \\ 135 \\ 135 \\ 135 \\ 135 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 1. Формування блоку введення відправних даних для програми “*Research work*”

Блок 2. Аналіз та систематизація відправних даних.

3. Рівняння у кодованих змінних:

$$Y := b0 + b1 \cdot X1 + b2 \cdot X2 + b3 \cdot X3 + b12 \cdot X1 \cdot X2 + b13 \cdot X1 \cdot X3 + b23 \cdot X2 \cdot X3 + b123 \cdot X1 \cdot X2 \cdot X3$$

де $b0, b1, b2, b3, b12, b13, b23, b123$ - коефіцієнти регресії

4. Вибір кількості повторних дослідів.

При побудові математичної моделі необхідно забезпечити хорошу відтворюваність дослідів. Тому вибрано число повторних дослідів $r := 2$. Вибір визначається трудомісткістю проведення експериментів та обробленням отриманих результатів.

Отже, $r := 2$ Кількість дослідів $N := 8$

5. Числові значення досліджуваного фізичного параметра якості експериментальних зразків, симетрично розташованих на фрагменті виробу, представлені у числовому вигляді

$$\begin{aligned}
 x1_1 &:= \begin{pmatrix} 2120 \\ 2235 \\ 2085 \\ 2360 \\ 2085 \\ 2115 \\ 2145 \\ 2160 \end{pmatrix} & x1_2 &:= \begin{pmatrix} 2080 \\ 2190 \\ 2185 \\ 2430 \\ 1985 \\ 2065 \\ 2025 \\ 2130 \end{pmatrix} & x1_3 &:= \begin{pmatrix} 2085 \\ 2085 \\ 2225 \\ 2420 \\ 2105 \\ 2185 \\ 2035 \\ 2120 \end{pmatrix} & x1_4 &:= \begin{pmatrix} 2240 \\ 2195 \\ 2135 \\ 2410 \\ 2065 \\ 2145 \\ 2165 \\ 2110 \end{pmatrix} & x1_5 &:= \begin{pmatrix} 2165 \\ 2125 \\ 2125 \\ 2325 \\ 2065 \\ 2165 \\ 2065 \\ 2085 \end{pmatrix} & x1_6 &:= \begin{pmatrix} 2125 \\ 2145 \\ 2165 \\ 2380 \\ 2110 \\ 2195 \\ 2105 \\ 2115 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$x1\Sigma := x1_1 + x1_2 + x1_3 + x1_4 + x1_5 + x1_6$$

$$x1_{сер} := \frac{x1\Sigma}{6}$$

$$\begin{aligned}
 x1\Sigma &:= \begin{pmatrix} 12815 \\ 12975 \\ 12920 \\ 14325 \\ 12415 \\ 12870 \\ 12540 \\ 12720 \end{pmatrix} & x1_{сер} &:= \begin{pmatrix} 2135.83333 \\ 2162.5 \\ 2153.33333 \\ 2387.5 \\ 2069.16667 \\ 2145 \\ 2090 \\ 2120 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рис. 2. Фрагмент блоку введення відправних даних для програми “*Research work*”

9. Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена.

$$G1 := \frac{\max(S_{2_Y_1})}{S_{2\Sigma}} \quad G2 := \frac{\max(S_{2_Y_2})}{S_{2\Sigma}}$$

$$G := \max(G1, G2)$$

$$G = 0.346$$

$$f_{v_max} := r - 1 \quad f_{znam} := N$$

Для $f_{v_max} = 1$, $f_{znam} = 8$, $\alpha := 0.05$

За таблицею визначаємо критичне значення критерія Кохрена: $G_{крит} := 0.6798$

Оскільки $G = 0.346 < G_{крит} = 0.6798$ то гіпотеза про однорідність дисперсій приймається.

10. Перевірка значимості коефіцієнтів регресії.

$$S_{2_bi} := \frac{S_{2_Y_дисп}}{N-r} \quad S_{bi} := \sqrt{S_{2_bi}}$$

$$S_{2_bi} = 8.812 \times 10^{-6} \quad S_{bi} = 2.969 \times 10^{-3} \quad +$$

$$f_e := N \cdot (r - 1)$$

За таблицею визначаємо критичне значення критерія Стьюдента для $f_e = 8$, $\alpha := 0.05$

$$t_{крит} := 2.306$$

Половина довжини довірчого інтервалу:

$$\Delta bi := t_{крит} \cdot S_{bi}$$

$$\Delta bi = 0.00685$$

Коефіцієнт значимий, якщо $bi \geq \Delta bi$

Перевіряємо розраховані коефіцієнти регресії на значимість:

$$b0 = 7.6705 \quad b1 = 0.0205 \quad b2 = 0.011 \quad b3 = -0.0222$$

$$b12 = 0.005 \quad b13 = -0.0068 \quad b23 = -0.0097 \quad b123 = -0.0125$$

У нашому випадку значимими є такі коефіцієнти:

$$b0 = 7.6705 \quad b1 = 0.0205 \quad b2 = 0.011 \quad b3 = -0.0222 \quad b23 = -0.0097 \quad b123 = -0.0125$$

В інших коефіцієнтів їх значення менші половини довжини довірчого інтервалу. Тому ними можна знехтувати.

В результаті у кодованих змінних математична модель матиме вигляд:

$$Y = 7.6705 + 0.0205 \cdot X1 + 0.011 \cdot X2 - 0.0222 \cdot X3 - 0.0097 \cdot X2 \cdot X3 - 0.0125 \cdot X1 \cdot X2 \cdot X3$$

Рис. 3. Фрагмент блоку виконання розрахунків для програми “Research work” у середовищі MathCAD

Висновки. Розроблена у середовищі *MathCAD* програма “*Research work*” для комп’ютерного моделювання вібраційно-відцентрового зміцнення впроваджена у навчальний процес під час вивчення студентами спеціальностей 7.05020201, 8.05020201 “Технологія машинобудування” усіх форм навчання дисципліни “Технологічне забезпечення надійності деталей машин”.

1. Кусий Я.М. “Технологічне забезпечення фізико-механічних параметрів поверхневих шарів металевих довгомірних циліндричних деталей вібраційно-відцентровим зміцненням”: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Львів, 2002. – 260 с. 2. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Mathcad>.