

УДК 621.647.23

Ляшок А.В.

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ПЛАНУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПРОЦЕСУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РОЗПИЛЕННЯ В ТОНКОМУ ШАРІ

Ljashok A.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (Alichka_lav@ukr.net)

OF ULTRASOUND LIQUID SPRAYING IN A THIN LAYER

Розглянуті особливості методів планування експерименту. Складено квадратичне рівняння регресії для планування багатофакторного експерименту при дослідженні процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі, за допомогою якого можна адекватно визначити залежність цільової функції – залежність продуктивності ультразвукового розпилення від параметрів розпилювача та сигналу збудження. Встановлена кількість необхідних експериментів для конкретного випадку. Наведена матриця планування експерименту для функції відгуку – «продуктивність». Визначено оптимальні значення параметрів ультразвукового розпилення в тонкому шарі. Побудовано поверхні відгуків цільової функції – «продуктивність» в площинах параметрів впливу.

Ключові слова: ультразвукове розпилення, тонкий шар рідини, планування експерименту, багатофакторний експеримент.

Вступ

Ефективність сучасних мехатронних систем значною мірою залежить від параметрів існуючих виконавчих пристроїв та можливостей автоматизованого керування ними. Створення нових та вдосконалення існуючих пристроїв до систем автоматики вимагає проведення великої кількості експериментальних досліджень. Оптимізувати їх кількість та забезпечити необхідну достовірність отриманих результатів дозволяють математичні методи планування експерименту [1-3].

Планування експерименту може застосовуватись як для однофакторного експерименту, так і для багатофакторного [2, 4]. Планування однофакторного експерименту передбачає варіювання лише одного фактору на декількох рівнях. При цьому всі інші фактори залишаються незмінними. Тобто надається можливість дослідити залежність характеристик пристрою тільки від одного фактору. Це в подальшому може призвести до прийняття хибних рекомендацій та рішень.

При застосуванні планування в багатофакторному експерименті передбачається варіювання одночасно декількома параметрами. В цьому випадку планування дає можливість всебічно проаналізувати експеримент, визначити: величини задіяних факторів та їх якісний вплив на характеристики і т.п. Тобто, планування багатофакторного експерименту представляє собою розширений та більш раціональний підхід до проведення експериментальних досліджень складних процесів.

Метою статті є розгляд можливостей застосування однієї з відомих методик планування експерименту для визначення необхідної кількості випробувань при визначенні параметрів виконавчого пристрою, що забезпечує ультразвукове розпилення в тонкому шарі.

Основна частина

Попередні експериментальні дослідження дозволили виявити основні фактори, що впливають на продуктивність процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі при заданій частоті збудження розпилювача:

$$Q = f(p_{cm}, d_k, \mu), \quad (1)$$

де p_{cm} – тиск статичний, $\times 10^5$ Н/м²; d_k – дисперсність аерозолі, мкм; μ – кінематична в'язкість рідини, $\times 10^{-6}$ м²/с.

При плануванні необхідної кількості експериментів для функції відгуку – продуктивність за допомогою планування багатофакторного експерименту виду 2³ методом Бокса-Уілсона необхідно скласти рівняння регресії [1].

При виборі діапазонів варіювання факторів функції (1), передбачених планом експерименту, необхідно прослідкувати, щоб будь-яка їх сукупність могла бути реалізована і не приводила до протиріч. Для досягнення цих умов було проведено пошукові експерименти, щоб визначити область, в якій необхідні нам сполучення рівнів факторів були б реалізовані.

Оскільки всі вибрані фактори, які входять в функції (1), є величинами з різними розмірностями, і, відповідно, їх значення мають різні порядки, було проведено операцію кодування факторів, щоб отримати поверхню відгуку цієї функції, яка являє собою лінійне перетворення факторного простору [1] за формулою:

$$x_j = \frac{(\tilde{X}_j - \tilde{X}_{j0})}{I_j} \quad (2)$$

Після проведення пошукових експериментів як результат були встановлені наступні значення для кожного фактора: X_{j0} – основний рівень фактора; $X_{j\max}$, $X_{j\min}$ – верхній та нижній рівні фактора; $\alpha X_{j\max}$, $\alpha X_{j\min}$ – максимальний та мінімальний рівні фактора; α – зіркове плече; I_j – інтервал варіювання. Був також встановлений умовний масштаб для таких значень рівнів факторів: мінімальний –1, середній 0, максимальний +1 та зіркові значення –1,681, +1,681.

В табл. 1 приведені істинні значення факторів, які встановлені на основі проведення пошукових експериментів

Таблиця 1

Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-1,681	-1	0	+1	+1,681	
x_1 – тиск статичний, $\times 10^5$ Н/м ²	0	1,41	3,5	5,58	7	2,08
x_2 – дисперсність аерозолі, мкм	5	10,06	17,5	24,94	30	7,44
x_3 – кінематична в'язкість рідини, $\times 10^{-6}$ м ² /с.	0,2	0,565	1,1	1,635	2	0,535

Кількість дослідів для багатфакторного експерименту для квадратичної регресії визначалася за формулою

$$N = 2^k + 2k + N_0(k), \quad (3)$$

де k – кількість факторів; 2 – кількість рівнів варіювання; N_0 – кількість дослідів в центрі плану, $N_0(k) = N_0(3) = 6$.

Конкретно для випадку, що розглядається, $N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 6 = 20$ дослідів.

Для проведення ротатбельного центрального композиційного планування (РЦКП) другого порядку на основі повнофакторного експерименту виду 2^3 було складено матрицю планування експерименту, яку наведено в табл. 2.

Планувалося отримати наступну квадратичну регресійну модель із ефектами взаємодії 1-го порядку:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{33}x_3^2, \quad (4)$$

де y – цільова функція (продуктивність); $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{23}, b_{11}, \dots, b_{33}$ – коефіцієнти регресії.

Для визначення токових оцінок $b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{23}, b_{11}, \dots, b_{33}$ було застосовано метод найменших квадратів [4]:

$$B = Y\Phi^{-1}, \quad (5)$$

де $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}$ – матриця, що містить коефіцієнти регресії;

$\Phi = F^T F$ – інформаційна матриця Фішера;

$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_N \end{bmatrix}$ – матриця, що містить результати експериментів за матрицею планування (табл. 2);

Таблиця 2

Матриця планування експерименту

№ досліджу	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	17
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	53
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	23,3
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	43
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	50,53
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	66
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	30,93
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	35,91
9	+1	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	51,39
10	+1	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	0	23,34
11	+1	0	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	18
12	+1	0	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	0	47,61
13	+1	0	0	-1,681	0	0	0	0	0	+2,83	55
14	+1	0	0	+1,681	0	0	0	0	0	+2,83	40,9
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61
b_i	59,14391	-9,02858	7,554039	-5,18217	-3,34875	-4,40625	-5,74875	-7,34765	-8,95833	-3,60881	
β_i	-74,7386	15,66118	9,031608	57,12199	-0,21629	-3,9527	-1,44396	-1,69491	-0,16201	-12,5897	
t	102,3972	-23,5928	19,73966	-13,5417	-6,6975	-8,8125	-11,4975	-19,7158	-24,0377	-9,68346	$[t]=2,571$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,k} \\ 1 & x_{1,2} & \dots & x_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{N,1} & \dots & x_{N,k} \end{bmatrix} \text{ – матриця, що містить значення факторів } x_{ij}.$$

Тут: i – номер досліджу за матрицею планування, j – номер фактора); k – кількість факторів; N – кількість дослідів за матрицею планування (табл. 2).

Перевірка адекватності регресійної моделі виконується за критерієм Фішера [4]:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{\text{відт}}^2} \leq [F(f_1, f_2)], \quad (6)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності; $S_{\text{відт}}^2$ – дисперсія відтворюваності; $[F(f_1, f_2)]$ – критичне значення критерію Фішера, яке дорівнює значенню розподілу Фішера; $f_1 = N - d$ – кількість ступенів вільності дисперсії адекватності; $f_2 = N_0 - 1$ – кількість ступенів вільності дисперсії відтворюваності; d – кількість значимих коефіцієнтів регресії (4).

Розрахункове значення критерію F порівнювалося з критичним і при $F > [F(f_1, f_2)]$ регресійна модель вважалася неадекватною.

Дисперсія адекватності визначалася за формулою [4]

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{f_1} \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2, \quad (7)$$

де y_i – результат i -го досліджу, проведеному за матрицею планування; \tilde{y}_i – результат i -го значення досліджу, передбаченого за допомогою регресійної моделі (4).

За t -критерієм Стьюдента проводилася оцінка значимості коефіцієнтів регресії [4]:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{\text{відт}} \sqrt{c_{i,i}}} > [t(f_2)], \quad (8)$$

де $[t(f_2)]$ – критичне значення t -критерію Стюдента, яке дорівнює значенню розподілу Стюдента; $c_{i,j}$ – відповідний елемент матриці Φ^{-1} .

Порівнювалося розрахункове значення критерію t_i з критичним і при $|t| \leq [t(f_2)]$ i -й коефіцієнт регресії вважався незначним.

Кількість повторних дослідів в кожній точці плану експерименту визначається за формулою [5]

$$n \geq \frac{1 + \gamma + 2n_{\text{відк}}}{1 - \gamma}, \quad (9)$$

де γ – довірча ймовірність того, що похибка вимірювання знаходиться в допустимих межах; $n_{\text{відк}}$ – число вимірювань, що відкидається.

Згідно робіт [5, 6] довірча ймовірність при нормуванні квантильної оцінки результуючої та випадкової похибок вимірювальної техніки вибирається в межах (0,8...0,9). Тоді при $n_{\text{відк}} = 0$

$$n \geq \frac{1 + (0,8...0,9)}{1 - (0,8...0,9)} = 9...19.$$

В табл. 2 наведено матрицю планування експерименту для функції відгуку – «продуктивність».

Рівняння регресії для функції відгуку – «продуктивність», згідно проведеного багатofакторного експерименту для кодованих значень має вигляд:

$$y = 59,14 - 9,029x_1 + 7,554x_2 - 5,182x_3 - 3,349x_1x_2 - 4,406x_1x_3 - 5,749x_2x_3 - 7,348x_1^2 - 8,958x_2^2 - 3,609x_3^2 \quad (10)$$

За допомогою критерія Стюдента виявились значимими усі фактори, ефекти взаємодії 1-го порядку та квадратичні ефекти.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку – продуктивність має вигляд:

$$Q = 15,66 p_{cm} + 9,032 d_k + 57,12 \mu - 0,2163 p_{cm} d_k - 3,953 p_{cm} \mu - 1,444 d_k \mu - 1,695 p_{cm}^2 - 0,162 d_k^2 - 12, \mu^2 - 74,74 \quad (11)$$

При цьому $S_{\text{відм}}^2 = 2$; $S_{\text{ад}}^2 = 8,705$; $F = 3,352 < [F] = 4,784$. Відповідно регресійна модель (11) є адекватною. Коефіцієнт кореляції склав $R = 0,9942$, що свідчить про високу точність отриманих результатів.

На продуктивність, як видно із табл. 2, за критерієм Стюдента найбільше впливає тиск статичний, а найменше – кінематична в'язкість рідини.

Отримане рівняння регресії (11) дозволяє провести оптимізацію параметрів процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі з максимальними значеннями функції відгуку – «продуктивність».

В якості критерію оптимізації параметрів процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі було обрано продуктивність.

З експериментів видно, що продуктивність залежить від таких параметрів як тиск статичний, дисперсність аерозолі та кінематична в'язкість рідини.

Використовуючи пакет прикладних програм MathCAD було здійснено оптимізацію функції відгуку – «продуктивність» шляхом її максимізації.

Встановлено, що найбільша продуктивність 67,44 мл/хв забезпечується при таких оптимальних параметрах процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі: $p_{cm, \text{opt}} = 2,507 \cdot 10^5$ Н/м²; $d_{k, \text{opt}} = 23,97$ мкм; $\mu_{\text{opt}} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

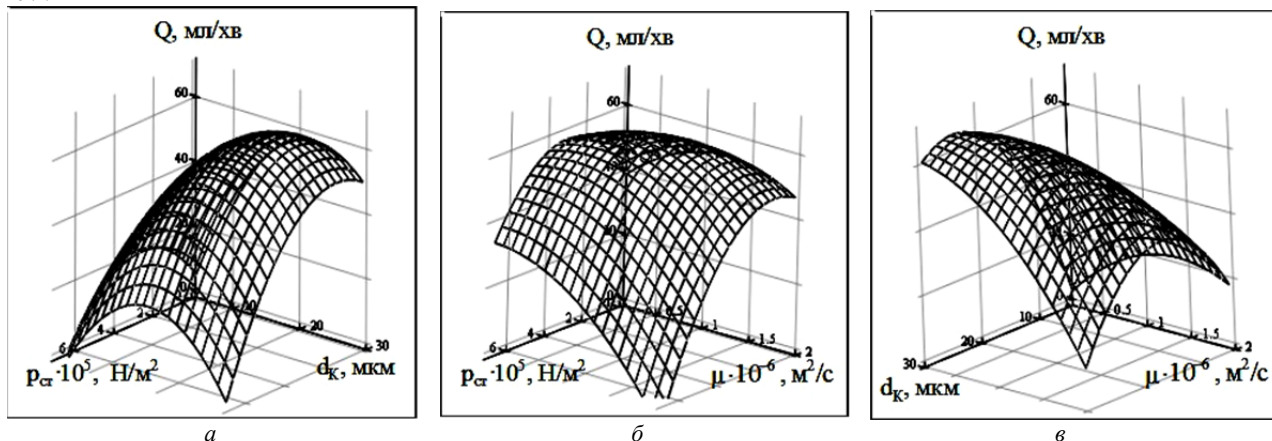


Рис. 1. Поверхні відгуків цільової функції – «продуктивність» в площинах параметрів впливу: а) $p_{cm} - d_k$; б) $p_{cm} - \mu$; в) $d_k - \mu$

На рис. 1 показано поверхні відгуків цільової функції – «продуктивність» та їх двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наглядно проілюструвати залежність даної цільової функції від окремих параметрів впливу.

Висновки

Завдяки застосуванню метода планування багатофакторного експерименту отримано квадратичне рівняння регресії, яке дає можливість адекватно описати залежність такої цільової функції, як продуктивність від основних параметрів впливу – статичного тиску, дисперсності аерозолу та кінематичної в'язкості рідини. Рівняння також може бути використане для математичного моделювання процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі.

Встановлено, що найбільше на продуктивність впливає статичний тиск, а найменше – кінематична в'язкість рідини.

Проведено параметричну оптимізацію цільової функції – «продуктивність», яка дозволила отримати оптимальні значення параметрів процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі. При цьому найбільша продуктивність 67,44 мл/хв забезпечується для таких оптимальних параметрів процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі: $p_{ст.опт} = 2,507 \cdot 10^5$ Н/м²; $d_{к.опт} = 23,97$ мкм; $\mu_{опт} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Побудовано поверхні відгуків цільової функції – «продуктивність» в площинах параметрів впливу, які дозволяють наглядно проілюструвати залежність даної цільової функції від окремих параметрів впливу.

Аннотация. Рассмотрены особенности методов планирования эксперимента. Составлено квадратичное уравнение регрессии для планирования многофакторного эксперимента при исследовании процесса ультразвукового распыления в тонком слое, с помощью которого можно адекватно определить зависимость целевой функции - зависимость производительности ультразвукового распыления от параметров распылителя и сигнала возбуждения. Установлено количество необходимых экспериментов для конкретного случая. Приведенная матрица планирования эксперимента для функции отклика - «производительность». Определены оптимальные значения параметров ультразвукового распыления в тонком слое. Построены поверхности откликов целевой функции - «производительность» в плоскостях параметров воздействия.

Ключевые слова: ультразвуковое распыление, тонкий слой жидкости, планирования эксперимента, многофакторный эксперимент.

Abstract. Considered features of methods of planning of experiment. Worked out a quadratic equation of regression for planning of many factors experiment at research of process of ultrasonic nebulized in a thin layer of liquid with which you can adequately to define dependence of objective function – dependence of the productivity of ultrasonic nebulized on the parameters of nebulizer and signal of excitation. The set amount of necessary experiments is for a concrete case. The resulted matrix of planning of experiment for the function of review is the «productivity». Determination the optimum values of ultrasonic nebulization in a thin layer. The surfaces of reviews of objective function – «productivity» are built in the planes of parameters of influence.

Keywords: ultrasonic nebulization, a thin layer of liquid, scheduling experiment, many factors experiment.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов) / В.В. Лавров, Н.А. Спирин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.
2. Налимов В.Н. Логические основания планирования эксперимента / В.Н. Налимов, Т.И. Голикова – М.: Металлургия, 1981. – 152с.
3. Славутский Л.А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента / Л.А. Славутский. – Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 2006. – 200 с.
4. Березюк О.В. Планування багатофакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів / О.В. Березюк // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 3 (55). – С. 92-97.
5. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отд-ние, 1983. – 320 с.
6. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 114 с.

References

1. Lavrov V.V., Spirin N.A. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhenernogo jeksperimenta: Konspekt lekcij (otdel'nye glavy iz uchebnika dlja vuzov) tehnologijah [Planning methods and results processing engineering experiment]. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2004, 257 p.
2. Nalimov V.N., Golikova T.I. Logicheskie osnovaniya planirovaniya jeksperimenta [Logical grounds of planning of experiment]. Moscow: Metallurgija, 1981, 152 p.
3. Slavutskij L.A. Osnovy registracii dannyh i planirovaniya jeksperimenta [Bases of datalogging and planning of experiment]. Cheboksary: Izd-vo ChGU, 2006, 200 p.
4. Berezjuk O.V. Planuvannya bagatofaktornogo eksperimentu dlja doslidzhennja vibracijnogo gidroprivodu ushil'nennja tverdih pobutovih vidhodiv. Vibracii v tehnici ta tehnologijah., 2009, no, 55 pp. 92-97.
5. Levshina E.S., Novickij P.V. Jelektricheskie izmerenija fizicheskih velichin: (Izmeritel'nye preobrazovateli). Ucheb. posobie dlja vuzov [Electric measurings of physical sizes: (Measurings transformers)]. Leningrad: Jenergoatomizdat. Leningrad. otd-nie, 1983, 320 p.
6. Novickij P.V., Zograf I.A. Ocenka pogreshnostej rezul'tatov izmerenij [Estimate of errors of results of measurings]. Leningrad: Jenergoatomizdat, 1985, 114 p.

Подана до редакції 05.09.2013