

УДК 621.391.26

Л.М. Віткін¹, В.У. Ігнаткін², В.А. Литвиненко²¹Держспоживстандарт України, Київ²Дніпродзержинський державний технічний університет, Дніпродзержинськ

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ І СИСТЕМ

Запропоновано методи комп'ютерної оптимізації параметрів напівпровідникового терморегулятора, формувача синхронізуючих імпульсів, турбінного витратоміра на основі експерименту та побудованих математичних моделей з застосуванням регресійного аналізу.

Ключові слова: планування експерименту, регресійний аналіз, обробка результатів.

Вступ

Більшість експериментальних задач у техніці технології формують як задачі екстремальні: визначення оптимальних умов процесу, оптимального складу композиції і т.ін., завдяки оптимальному розташуванню точок на факторному просторі і лінійному перетворенню координат вдається подолати недоліки класичного регресійного аналізу, зокрема, кореляцію між коефіцієнтами регресії [1 – 4].

Процес дослідження за звичай розбивається на окремі етапи. Інформація, одержана після кожного етапу, визначає стратегію експерименту.

Таким чином виникає можливість оптимального керування експериментом. При плануванні за схемою повного факторного експерименту (ПФЕ) реалізуються всі можливі комбінації факторів на всіх вибраних для дослідження рівнях. ПФЕ дозволяє одержувати кількісні оцінки основних ефектів і ефектів взаємодії. Ефекти, що цікавлять, визначаються з меншою помилкою, ніж за традиційних методів дослідження. Застосування ПФЕ значно підвищує ефективність експерименту.

Мета екстремального експерименту – пошук оптимальних режимів функціонування багатофакторних об'єктів. Проведення таких експериментів полягає в реалізації певної обчислювальної схеми визначення екстремумів невідомої функції відгуку на заданій множині точок факторного простору.

У загальному випадку функція відгуку є багатоекстремальною. У ній розглядаються процеси, залежні від багатьох чинників, в умовах, коли механізм цих процесів невідомий. У такому разі природно вдатися до представлення результатів спостережень поліноміальною моделлю. Щоб уникнути необхідності використання поліномів високого порядку, розробили покроковий метод вивчення поверхні відгуку, що нагадує ітераційний метод розв'язання задач обчислювальної математики. Дослідник спочатку ставить невелику серію дробових факторних експериментів (ДФЕ) для локального опису малої ділянки поверхні відгуку поліномом першого ступеня. Потім, використовуючи рівняння першого ступеня, знаходять напрям для руху поверхнею відгуку в самому “крутому” напрямі – напрямі

градієнта лінійного наближення. Якщо одного лінійного наближення недостатньо, то ставлять нову серію дослідів і знаходять новий напрям для руху поверхнею відгуку.

Такий покроковий процес продовжується доти, доки дослідник не визначить майже стаціонарну область, в якій лінійне наближення виявляється вже неможливим, так що поверхня відгуку описується поліномом другого, а іноді третього порядку. При такому підході до розв'язання задач оптимізації досягається висока концентрація дослідів у тій частині поверхні відгуків, яка переважно цікавить дослідника [5, 6].

Якщо математична модель не адекватна даним експерименту, то необхідно перейти до складнішої форми рівняння регресії або зменшити інтервал варіювання факторів в експерименті. Наприклад, якщо неадекватна лінійна модель, то слід лінійний поліном доповнити, ввівши в нього члени, відповідні ефектам взаємодії. Проте, при цьому потрібна реалізація декількох дослідів усередині області планування для перевірки гіпотези про адекватність.

Якщо модель другого порядку також не адекватна, то доводиться застосовувати ротатабельне планування третього порядку, яке тут не розглядається внаслідок його зайвої громіздкості. Ротатабельне планування третього порядку вимагає проведення порівняно великого числа дослідів, а аналіз відповідної поверхні досить складний. Тому в тих випадках, коли виникає питання про необхідність отримання моделі третього порядку, рекомендується вивчити можливість зниження порядку поліному шляхом перетворення незалежних змінних або параметрів оптимізації.

Метою даної роботи стало дослідження і оптимізація параметрів окремих технічних пристроїв, результати яких можна використовувати для вивчення інших складних багатофакторних пристроїв і систем.

Оптимізація параметрів напівпровідникового терморегулятора

Дослідження пристрою у разі застосування методів планування експерименту здійснюється за добре відпрацьованою схемою (планом). На вхід пристрою (“чорної скриньки”) подають вхідні сигнали, що імітують досліджувані режими роботи пристрою, а на виході пристрою реєструють сигнали відгуків, як

його реакцію на вхідні сигнали. Дослідник управляє експериментом за наперед відомим планом, задає і регулює рівні вхідних сигналів, здійснює контроль вихідних сигналів, проводить аналіз результатів експерименту і уточнює його план.

Для роботи технічних систем часто доводиться підтримувати температуру в заданих межах. Пристрої, які виконують ці функції, називаються терморегуляторами. Принцип роботи напівпровідникового терморегулятора полягає в наступному. За рівності температури в зоні розташування датчика температури з опорною (контрольною) температурою вимірювальний міст ВМ збалансований, і напруга на виході моста і терморегулятора дорівнює нулю ($U_{\text{ВИХ}} = 0$) (рис. 1).

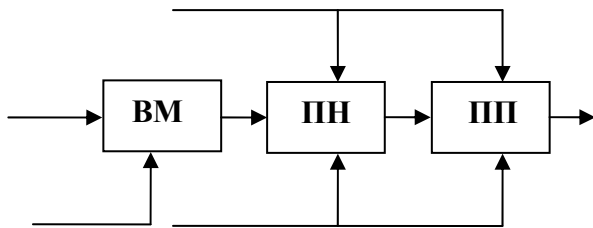


Рис. 1. Структурна схема терморегулятора

За відхилення температури повітряного середовища в зоні розташування датчика температури від встановленої (опорної) настає розбалансування вимірювального моста. Напруга розбалансу, пропорційна різниці температур між опорною і вимірюваною, поступає на вхід підсилювача напруги ПН, потім на крайовий підсилювач потужності ПП, на-

вантаження якого є виконавчий пристрій – регулятор температури.

Як незалежні змінні, що впливають на роботу терморегулятора, взяті узагальнені параметри: напруга живлення вимірювального моста U_M ; напруга живлення терморегулятора U_{II} ; температура повітряного середовища в зоні датчика температури t і опір навантаження терморегулятора R_H . Як параметр оптимізації обрано напругу на виході терморегулятора $U_{\text{ВИХ}}$.

Мета експерименту, що проводиться, – пошук оптимальних параметрів терморегулятора і режимів його роботи, за яких забезпечується висока чутливість до розбалансу ВМ при високих рівнях зовнішніх завад.

Для побудови залежностей

$$U_{\text{ВИХ}} = f(U_M, U_{II}, t, R_H) \text{ і } y = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$$

рівні і інтервали варіювання змінних приведені в табл.1, а матрицю планування і результати експерименту – в табл. 2 (досліди 1 – 16).

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання змінних

Незалежні змінні	Рівні варіювання			Інтервали варіювання Δi
	-1	0	+1	
$U_M, \text{В}$	1	3,5	6	2,5
$U_{II}, \text{В}$	10	13	16	3
$t, \text{°C}$	20	25	30	5
$R_H, \text{кОм}$	1,1	3,1	5,1	2

Примітка. У таблиці прийнято такі позначення: 0 – основний рівень; +1 – верхній рівень; -1 – нижній рівень.

Таблиця 2

Матриця планування та результати експерименту

Номер досліду	x_1	x_2	x_3	x_4	\bar{y}	\hat{y}	Номер досліду	x_1	x_2	x_3	x_4	\bar{y}	\hat{y}
1	-1	-1	-1	-1	3,88	4,18	17	-2	0	0	0	4,94	5,28
2	+1	-1	-1	-1	6,14	6,15	18	+2	0	0	0	8,08	7,83
3	-1	+1	-1	-1	7,37	7,27	19	0	-2	0	0	3,06	3,59
4	+1	+1	-1	-1	7,88	7,96	20	0	+2	0	0	8,02	7,65
5	-1	-1	+1	-1	5,53	5,43	21	0	0	-2	0	6,23	6,50
6	+1	-1	+1	-1	7,30	7,29	22	0	0	+2	0	7,96	8,07
7	-1	+1	+1	-1	7,87	7,87	23	0	0	0	-2	7,65	7,61
8	+1	+1	+1	-1	7,93	8,06	24	0	0	0	+2	7,87	7,93
9	-1	-1	-1	+1	4,32	4,13	25	0	0	0	0	7,74	7,77
10	+1	-1	-1	+1	6,55	6,50	26	0	0	0	0	7,79	7,77
11	-1	+1	-1	+1	7,48	7,41	27	0	0	0	0	7,80	7,77
12	+1	+1	-1	+1	8,03	8,10	28	0	0	0	0	7,77	7,77
13	-1	-1	+1	+1	5,77	5,61	29	0	0	0	0	7,72	7,77
14	+1	-1	+1	+1	7,39	7,46	30	0	0	0	0	7,71	7,77
15	-1	+1	+1	+1	7,88	7,84	31	0	0	0	0	7,73	7,77
16	+1	+1	+1	+1	7,97	8,02							

У результаті проведення експерименту і оброблення експериментальної інформації [1 – 3], одержане таке рівняння:

$$\bar{y} = 6,537 + 1,547x_1 + 0,123x_2 + 1,746x_3 + 0,066x_4 - 0,926x_1x_2 - 0,982x_1x_3 - 0,112x_2x_3 - 0,037x_3x_4 \quad (1)$$

$$\text{де } x_1 = (U_M - 3,5)/2,5; \quad x_2 = (U_{II} - 13)/3; \\ x_3 = (t - 2,5)/5; \quad x_4 = (R_H - 3)/2.$$

Оцінка значущості коефіцієнтів показала, що всі коефіцієнти при невідомих різні, тобто їх значення значно відрізняються. Це свідчить про те, що центр експерименту вибраний невірний. Цю версію підтверджує розв'язання рівнянь (2) за змінними x_1 :

$$\begin{aligned} 1,547 - 0,926x_2 - 0,982x_3 &= 0 \\ 0,123 - 0,926x_1 - 0,112x_3 &= 0 \\ 1,746 - 0,982x_1 - 0,112x_2 - 0,037x_4 &= 0 \\ 0,066 - 0,037x_3 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

де $x_{15} = 0,077$; $x_{25} = -0,164$;
 $x_{35} = 1,73$; $x_{45} = 4,97$.

Координати центру експерименту мають великий розкид (дуже далекі від точки з координатами (0; 0). Тому після уточнення центру експерименту (уточнення основних рівнів для змінних) і зміни інтервалу варіювання змінних проведено другу серію дослідів з використанням центрального композиційного ротатабельного планування (ЦКРП) другого порядку.

Рівні та інтервали варіювання незалежних змінних в новій серії дослідів наведено в табл.3, а матриця планування і результати експерименту – в табл. 2 (досліди 17 – 31).

Таблиця 3

Нові рівні та інтервали варіювання змінних

Незалежні змінні	Рівні варіювання					Інтервали варіювання Δ_i
	-2	-1	0	+1	+2	
$U_M, В$	1	2	3	4	5	1
$U_{II}, В$	14	12	10	8	6	2
$t, ^\circ C$	17	18	19	20	21	1
$R_H, кОм$	1	2	3	4	5	1

Примітка. У таблиці прийнято наступні позначення: 0 – основний рівень; +1 – верхній рівень; -1 – нижній рівень; +2 – максимальне значення незалежної змінної; -2 – мінімальне значення незалежної змінної.

Після оброблення експериментальної інформації і розрахунків коефіцієнтів регресій [1 – 3] одержано математичну модель терморегулятора:

$$\begin{aligned} \bar{y} = 7,7664 + 0,6375x_1 + 1,0117x_2 + 0,3925x_3 + \\ + 0,0796x_4 - 0,4188x_1x_2 - 0,1275x_1x_3 - 0,0088x_1x_4 - \\ - 0,2613x_2x_3 - 0,0525x_2x_4 - 0,0438x_3x_4 - \\ - 0,3020x_1^2 - 0,5387x_2^2 - 0,1255x_3^2 - 0,0174x_4^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Обчислення помилки у визначенні коефіцієнтів регресії [1 – 3] показало, що всі коефіцієнти в рівнянні (3), крім b_{14} і b_{44} значущі. Тому одержуємо математичну модель терморегулятора в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{y} = 7,7664 + 0,6375x_1 + 1,0117x_2 + \\ + 0,3825x_3 + 0,0796x_4 - 0,4188x_1x_2 - \\ - 0,1275x_1x_3 - 0,2613x_2x_3 - \\ - 0,0525x_2x_4 - 0,0438x_3x_4 - \\ - 0,302x_1^2 - 0,0538x_2^2 - 0,1255x_3^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Перевірка [1-3] показала, що $F_{0П} = 2,47$; $F_{0,95} = 4,22 (F_{0П} < F_{0,95})$, тобто рівняння (4) адекватно моделі другого порядку.

Рівняння (4) служить основою для аналізу функціонування терморегулятора і оптимізації його па-

раметрів. Покажемо рішення цієї задачі детальніше. Після диференціювання рівняння (4) за x_1 одержимо:

$$\begin{aligned} 0,6395 - 0,4188x_2 - 0,1275x_3 - 0,604x_1 &= 0; \\ 1,0117 - 0,4188x_1 - 0,2613x_3 - 0,0525x_4 - 1,0774 &= 0; \\ 0,3925 - 0,1275x_1 - 0,2613x_2 - 0,0438x_4 - 0,241x_3 &= 0; \\ 0,0796 - 0,0525x_2 - 0,043x_3 &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Розв'яжемо систему рівнянь (5) для центру експерименту:

$$\begin{aligned} x_{15} = 0,5690; x_{25} = 0,5306; x_{35} = 0,5616; \\ x_{45} = 1,0477; y_5 = 8,3822, \end{aligned}$$

або в іменованій формі [1 – 3]:

$$\begin{aligned} U_M = 2,437В; U_{II} = 8,939В; t = 18,438^\circ C; \\ R_H = 1,952кОм. \end{aligned}$$

Із аналізу рівняння (4) видно, що найбільший вплив на вихідний параметр терморегулятора надає параметр x_2 , а найменше – параметр x_4 , оскільки коефіцієнт регресії при ньому найменший. Для детальнішого дослідження впливу кожної із змінних x_i на вихідний параметр y_i побудуємо залежність $y_i = f(x_i)$ за фіксованих значень решти змінних x_{i+1} в центрі експерименту (рис. 2).

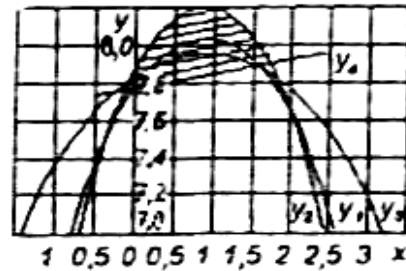


Рис. 2. Графік функції $y_i = f(x_i)$ для вибору зони стійкої роботи терморегулятора

Одержані криві для y_1, y_2, y_3 є набором парабол типу $y_1 = B_0 + B_2x_{12} + B_1x_{13}$ вершинами в точці центру експерименту, а для y_4 – пряма, що проходить через цей центр експерименту:

$$y_1 = 7,7664 + 0,6375x_1 - 0,3020x_{11},$$

(при $x_2 = x_3 = x_4 = 0$);

$$y_2 = 7,7664 + 1,0117x_2 - 0,5287x_{12},$$

(при $x_1 = x_3 = x_4 = 0$);

$$y_3 = 7,7664 + 0,3825x_3 - 0,1255x_{13},$$

(при $x_1 = x_2 = x_4 = 0$);

$$y_4 = 7,7664 + 0,0796x_4,$$

(при $x_1 = x_2 = x_3 = 0$).

Задавши величину y , по графіках можна визначити оптимальні значення незалежних змінних i , навпаки, задаючись значеннями x_i , можна визначити оптимальну величину y_{opt} . Крім того, по графіках можна встановити робочий діапазон терморегулятора, визначити параметри вимірювального моста,

знайти чутливість підсилювача напруги і вихідну потужність підсилювача.

При розв'язанні рівняння і визначенні для побудови графіків залежностей $y_i = f(x_i)$ рівняння (4) по черзі вводилися в пам'ять ЕОМ, задавалися значення змінних x_i і кроки визначення точок графіка. Машина видавала значення вихідного параметра при різних значеннях змінних, починаючи з $x_i = 0$, через встановлений інтервал (крок).

Оптимальні значення параметрів y_i і x_i знаходяться усередині заштрихованої області (рис. 2): $x_1 = 0...1,8$; $x_2 = 0...1,8$; $x_3 = 0...1,6$; $x_4 = 0...1,8$; $y = 7,8...8,2$, або в натуральній (іменованій) формі: $U_M = 3...4,8В$; $U_{II} = 6,4...10В$; $t = 19...20,8$; $R_H = 3...4,8кОм$.

Оптимізація параметрів формувача синхронізуючих імпульсів

Формувач імпульсів включає такі елементи (рис. 3): формувач імпульсів за тривалістю ФТ, формувач імпульсів за амплітудою ФА і емітерний повторювач ЕП.

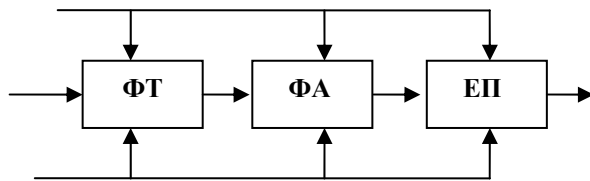


Рис. 3. Структурна схема формувача синхронізуючих імпульсів

Як незалежні змінні обрано U_1 – напругу живлення колекторних ланцюгів; U_2 – напругу зсуву і U_3 – вхідний сигнал (синхронізуючі імпульси, а як функція y – вихідна напруга пристрою). Задача полягає в тому, щоб одержати максимальну амплітуду вихідного сигналу з мінімальними спотвореннями, а також вибрати найкращі режими роботи пристрою.

Поставлену задачу доцільно вирішити в два етапи: на першому – провести експеримент з метою отримання математичної моделі досліджуваного пристрою; на другому – здійснити пошуки оптимальних значень його параметрів.

На першому етапі спочатку застосовується планування типу 2i (ПФЕ для трьох чинників). Після реалізації матриці планування, розрахунок коефіцієнта регресії [1 – 3] і оцінки їх значущості [1 – 3] одержано рівняння регресії у вигляді наступного полінома:

$$\bar{y} = 19,13 + 0,0116x_1 + 0,007x_2 + 0,004x_3 + 0,0074x_1x_2 - 0,006x_1x_3 \quad (6)$$

де $x_1 = (U_1 - 35)/1,5$; $x_2 = (U_2 + 5)/0,8$; $x_3 = (U_3 + 6)/0,6$.

Проте проведена перевірка показала, що це рівняння не є адекватним. Подальший його аналіз дозволив зробити висновок, що невірні були вибрані

центр експерименту (нормальні значення параметрів) і рівні варіювання незалежних змінних. Тому була поставлена нова серія дослідів в плані ЦКРП другого порядку з метою отримання нового рівняння. Значення незалежних змінних, їх рівні і інтервали варіювання наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Рівні і інтервали варіювання змінних

Незалежні змінні	Рівні варіювання					Інтервали варіювання Δ_i
	-1,68	-1	0	1	+1,68	
$U_1, В$	33	34	35,5	37	38,47	1,5
$U_2, В$	-3,65	-4,2	-5	-5,8	-6,35	0,8
$U_3, В$	5	5,4	6	6,6	7	0,6

Примітка. У таблиці прийнято наступні позначення: 0 – основний рівень; +1 – нижній рівень; +1,68 – максимальне значення незалежної змінної; -1,68 – мінімальне значення незалежної змінної.

Розрахунок коефіцієнтів регресії [1 – 3] дав такі результати:

$$b_0 = 19,136; \quad b_1 = 0,084; \quad b_2 = -0,0179; \\ b_3 = 0,0325; \quad b_{12} = 0,1036; \quad b_{23} = 0,00325; \\ b_{13} = -0,0803; \quad b_{11} = -0,05; \quad b_{22} = -0,0329; \\ b_{33} = 0,00659.$$

Довірчі інтервали для коефіцієнтів регресії з 95%-вою вірогідністю:

$$\Delta b_0 = t_{S\{b_0\}} = 0,037; \quad \Delta b_i = t_{S\{b_i\}} = 0,0312; \\ \Delta b_{ij} = t_{S\{b_{ij}\}} = 0,08; \quad \Delta b_{ii} = t_{S\{b_{ii}\}} = 0,0606.$$

Рівняння регресії пристрою приймає вигляд:

$$y = 19,13 + 0,084x_1 + 0,0325x_3 + 0,1036x_1x_2 - 0,0803x_1x_3 - 0,0829x_{i2} \quad (7)$$

перевірка адекватності одержаної моделі показала, що $F_{0П} = 4,2$;

$F_{0,95} = 5,05 (F_{0П} < F_{0,95})$ у зв'язку з тим, що $F_{0,95} = 5,05$, гіпотезу про адекватність рівняння (7) можна вважати вірною з 95%-вою вірогідністю.

Щоб одержати уявлення про геометричний образ отриманого рівняння і знайти оптимальні значення параметрів (другий етап задачі), доцільно провести канонічне перетворення рівняння. Для цього після диференціювання рівняння (7) за змінними x_i і розв'язання системи рівнянь:

$$0,084 + 0,1036x_2 - 0,0803x_3 = 0; \\ 0,1036x_1 - 0,1638x_2 = 0; \quad (8) \\ 0,0325 - 0,0803x_1 = 0.$$

Знайдемо координати нового центру: $x_{15} = 0,8065$; $x_{25} = 0,2519$; $x_{35} = 1,3658$. Після перенесення початку координат до нового центру і повороту осей на кут $\gamma = 76^\circ 45'$ отримаємо таке канонічне рівняння:

$$\bar{y} - 19,1751 = -0,0381x_{i1} + 0,0269x_{i2} - 0,0225x_i \quad (9)$$

Поверхня відгуку, що досліджується, відноситься до типу мінімакса: при русі у напрямі осі X_2 вихідна напруга збільшується, а у напрямі осей X_1 і X_3 – зменшується. Координати точки з найкращим значенням вихідного параметра $y = (19,24 \pm 0,61)$ В.

В є такими: $x_{01} = 1,587$; $x_{02} = 1,368$; $x_{03} = 0,252$. Цим координатам відповідають значення незалежних змінних $U_1 = 36,28$ В; $U_2 = -4,59$ В; $U_3 = 6,18$ В. При проведенні дослідження всі розрахунки виконувалися на ЕОМ. Проведено обчислення коефіцієнтів регресії, оцінку їх значущості, перевірку одержаних рівнянь на адекватність, а також знайдено оптимальні значення параметрів пристрою.

Атестація турбінного витратоміра

Відповідно до плану першого порядку було проведено атестацію турбінного витратоміра з метою оцінювання одночасного впливу на його систематичну похибку температури навколишнього середовища $T^\circ\text{C}$, кута "закручування" потоку вимірюваної рідини φ і кінематичної в'язкості вимірюваної рідини ν .

Відповідно до технічної документації на витратомір, на підставі необхідних умов вимірювань, було обрано такі діапазони значень величин впливу:

T від -400C до $+400\text{C}$; φ від 0 до $\frac{\pi}{2}$; ν від $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Отже, центри й інтервали варіювання величин впливу в процесі експериментів були рівні:

$$C_T = \frac{40 + (-40)}{2} = 0^\circ\text{C}; \lambda = \frac{40 - (-40)}{2} = 40^\circ\text{C};$$

$$C_\varphi = \frac{\pi}{4}; \lambda_\varphi = \frac{\pi}{4}; \lambda_\nu = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

І кодовані одиниці відповідних величин:

$$Z_T = Z_1 = \frac{T}{40}; Z_\varphi = Z_2 = \left(a - \frac{\pi}{4} \right) / \frac{\pi}{4};$$

$$Z_\nu = Z_3 = \frac{\nu - 5,5 \cdot 10^{-6}}{4,5 \cdot 10^{-6}}.$$

Результати експериментів, проведених відповідно до плану і рекомендацій, викладених вище (щодо числа повторних дослідів, рандомізації дослідів і т.ін.), наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Результати експериментів для атестації витратомірів

Номер досліді	Z_1	Z_2	Z_3	$Z_1 Z_2$	$Z_1 Z_3$	$Z_2 Z_3$	$Z_1 Z_2 Z_3$	$\Delta_{S_y}, \%$	$\bar{\Delta}_{S_y}, \%$
1	—	+	+	—	—	+	—	-10; -12; -11	-11,0
2	—	—	—	+	+	+	—	-18; -18; -17	-18,0
3	+	+	—	+	—	—	—	14; 13; 16	14,0
4	—	+	—	—	+	—	+	8,6; 9,1; 9,3	9,0
5	+	—	+	—	+	+	—	-16; -18; -16 -6,2; -	-17,0
6	+	+	+	+	+	+	+	6,4; -6,4	-6,4
7	—	—	+	+	—	—	+	-22; -24; -20	-22,0
8	+	—	—	—	—	+	+	8,0; 7,5; 8,5	8,0

Обробляємо результати експериментів за наведеною вище схемою.

1. Визначимо дисперсію дослідів по [1 – 3]:

$$\delta^2 [\Delta_S] \frac{1}{8 \cdot 2} = \left[\begin{aligned} &(1+1+0) + (0+0+1) + \\ &+(0+1+4) + (0,16+0,01+0,09) + \\ &+(1+1+1) + (0,04+0+0) + \\ &+(0+4+4) + (0+0,25+0,25) \end{aligned} \right] = 19,8/16 = 1,2$$

(додатки в круглих дужках відповідають відрядковим дисперсіям – дисперсіям кожного досліді, повторених 3 рази).

2. Розраховуємо значення коефіцієнтів інтерполяційної формули [1 – 3].

Відповідно до [1 – 3]:

$$g_0 = \frac{1}{8} (-11 - 18 + 14 + 9 - 17 - 6,4 - 22 + 8) = -5,4$$

(додатки в круглих дужках відповідають значенням взятим з останньої графі табл. 1);

$$g_1 = \left[\begin{aligned} &(-1) \cdot (-11) + (-1) \cdot (-18) + \\ &+(+1) \cdot (+14) + (-1) \cdot (+9) + \\ &+(+1) \cdot (-17) + (+1) \cdot (-6,4) + \\ &+(-1) \cdot (-22) + (+1) \cdot (+8) \end{aligned} \right] = 5,8$$

(додатки в квадратних дужках відповідають значенням Δ_{S_y} , в кожному досліді, помноженим на відповідну цьому досліді Z_3).

Аналогічно: $g_2 = 6,8$; $g_3 = -9,7$; $g_{12} = -2,8$; $g_{13} = -2,7$; $g_{23} = -1,4$; $g_{123} = 2,6$.

3. Перевіримо значущість коефіцієнтів. По таблиці квантилей розподілу Стьюдента для числа ступенів свободи $f = N \cdot (n - 1) = 8 \cdot 2 = 16$ і вірогідності $P = 0,95$ знайдемо табличний коефіцієнт Стьюдента $t_T = 2,12$.

Емпіричне відношення $t_0 = |g_0| / \delta [\Delta_S]$ для коефіцієнта g_0 дорівнює $t_0 = 5,4/1,1 \approx 5$.

Оскільки $t_0 = 5 > t_T = 2,12$, коефіцієнт g_0 приймаємо значущим.

Аналогічна перевірка решти коефіцієнтів дає: g_1 – значущий; g_2 – значущий; g_3 – значущий; g_{12} – значущий; g_{13} – значущий; g_{23} – незначущий; g_{123} – значущий.

Отже, знайдена інтерполяційна формула в кодових значеннях величин впливу (із значущими коефіцієнтами) має вигляд:

$$\Delta_S = -5,4 + 5,8Z_1 + 6,8Z_2 - 9,7Z_3 - 2,8Z_1Z_2 - 2,7Z_1Z_3 + 2,6Z_1Z_2Z_3.$$

Перевіримо адекватність цієї формули одержаним експериментальним даним. Підрахунок значень Δ_{Si} за інтерполяційною формулою для різних (відповідних приведеним в табл. 5) значень Z_1, Z_2, Z_3 дає такі результати (послідовність результатів відповідає послідовності дослідів): -11,2; -17,4; 14,2; 8,0; -17,6; -5,4; -23; 8,6.

Отже, дисперсія відхилення результатів розрахунку (за інтерполяційною формулою) від експериментальних даних дорівнює:

$$\delta_d^2 = \frac{1}{8-7} \left[\begin{array}{l} 0,2^2 + 0,6^2 + 0,2^2 + 1^2 + \\ + 0,6^2 + 1^2 + 1^2 + 0,6^2 \end{array} \right] = 4,2$$

(додатки в квадратних дужках відповідають $(\Delta_{Si} - \bar{\Delta}_{Si})$ для кожного i -го дослідів) і дисперсійне відношення: $F = \frac{4,2}{1,2} = 3,5$.

Табличне значення критерію Фішера F_T для числа ступенів свободи $f_1 = 1$, $f_2 = 16$ і ймовірності $P = 0,95$ дорівнює 4,5.

Оскільки $F = 3,5 < F_T = 4,5$, то прийемо, що одержана інтерполяційна формула адекватна експериментальним даним.

Використовуючи співвідношення [3] переходимо від інтерполяційної формули в кодованих одиницях до моделі в натуральних значеннях величин впливу:

$$\Delta_S = -0,350 + 0,375T + 6,8 \frac{\Phi}{\pi/4} - 2,160 \cdot 10^6 v - 0,150T \frac{\Phi}{\pi/4} - 0,030Tv + 0,014T \frac{\Phi}{\pi/4} v.$$

Одержана модель систематичної похибки дозволяє:

- оцінювати характеристики похибки Δ_S за випадкової зміни значень величин впливу;
- розраховувати поправки до результату вимірювання приладу за відомих значень величин впливу;
- визначати такі області значень величин впливу, де похибка Δ_S є мінімальною внаслідок ефектів взаємодії її складових.

Висновки

1. Запропоновано методи комп'ютерної оптимізації параметрів напівпровідникового терморегулятора, формувача синхронізуючих імпульсів, турбінного витратоміра на основі експерименту та побудованих математичних моделей з застосуванням регресійного аналізу для обчислення коефіцієнтів регресії, оцінки їх значущості, перевірки на адекватність.

2. Отримані результати досліджень, зокрема побудова моделі систематичної похибки, можуть бути використані для оптимізації параметрів складних багатофакторних пристроїв і систем.

Список літератури

1. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
2. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 254 с.
3. Зедгенидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгенидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
4. Брандт З. Статистические методы анализа наблюдений: пер. с англ. / З. Брандт. – М.: Мир, 1975. – 312 с.
5. Віткін Л.М. Модель оптимізації метрологічних характеристик средств измерительной техники предприятия / Л.М. Віткін, В.У. Ігнаткіє // Український метрологічний журнал. – 2007. – №4. – С. 3-6.
6. Віткін Л.М. Комп'ютерне коригування міжперіодичних інтервалів ЗВТ за критерієм мінімуму витрат / Л.М. Віткін, В.У. Ігнаткіє, В.А. Литвіненко // Системи обробки інформації. – 2008. – № 3(73). – С. 24-29.

Надійшла до редколегії 4.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

Л.М. Виткин, В.У. Игнаткин, В.А. Литвиненко

Предложены методы компьютерной оптимизации параметров полупроводникового терморегулятора, формирователя синхронизирующих импульсов, турбинного расходомера на основе эксперимента и построенных математических моделей с применением регрессионного анализа.

Ключевые слова: планирование эксперимента, регрессионный анализ, обработка результатов.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF QUALITY OF TECHNICAL DEVICES AND SYSTEMS

L.M. Vitkin, V.U. Ignatkin, V.A. Litvinenko

The methods of computer optimization of parameters of semiconductor thermoregulator are offered, reshaper of lock-on impulses, turbine flow-measuring apparatus on the basis of experiment and built mathematical models with the use of regressive analysis.

Keywords: planning of experiment, regressive analysis, treatment of results.