

Д.М. Складанний, аспір.
Г.О. Статюха, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України "КПІ"

РОЗРОБКА ПАКЕТА ПРОГРАМ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОБАСТНОГО ПІДХОДУ

В роботі представлені результати розробки програмного пакета RODAP, спрямованого на обробку результатів експериментів з використанням робастного підходу Тагучі та його модифікацій. Наведено приклади розв'язання за допомогою розробленого пакета задач пошуку стабільних умов проведення технологічних процесів.

Вступ

Робастний підхід до аналізу технологічних процесів запропоновано доктором Генечі Тагучі [1]. Цей підхід з успіхом використовується у розвинених країнах для пошуку стабільних умов проведення технологічних процесів. Під робастним слід розуміти таке виробництво чи процес, в якому забезпечується відносна нечутливість цільових показників до факторів, керування якими неможливе або недоцільне. Відомі також модифікації робастного підходу, найбільш цікавою з яких, на думку авторів, є узагальнений лінеаризуючий підхід. Перераховані підходи алгоритмізовані, що дало можливість розробити програмне забезпечення для їх реалізації. Основою робастного підходу є експериментально-статистичне моделювання та планування експерименту [2]. План робастного експерименту має включати в себе контрольовані та неконтрольовані (шумові) чинники. Як контрольовані, так і шумові чинники контролюються в ході експерименту.

Зростаюча кількість робіт за темою робастного підходу Тагучі, що спостерігається в зарубіжній літературі [1, 3, 4], підтверджує високу ефективність цього підходу. Проте широке використання його гальмується, в тому числі і через відсутність належного програмного забезпечення.

Метою даної роботи є розробка пакета прикладних програм, що дозволить полегшити використання робастного підходу для аналізу технологічних процесів.

Робастний підхід

При обробці результатів експериментів за класичним підходом Тагучі [1, 3] використовується статистична характеристика, що називається "відношення сигнал-шум" (позначається S/N від англійського "signal-to-noise ratio"), яка позичена з теорії електричних мереж. S/N відношення – критерій якості роботи системи, за яким обираються рівні контролю та керування, при яких йде найкраще подолання шуму. В залежності від типу показника якості розрізняють три типи S/N відношень:

- найбільше – найкраще (larger the better);
- найменше – найкраще (smallest the better);
- номінальне – найкраще (nominal the best).

Для кожного з вказаних типів автором [1, 3] пропонується формула для розрахунку:

$$S/N_L = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right), \quad (1)$$

$$S/N_s = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right), \quad (2)$$

$$S/N_N = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \frac{\bar{y}^2}{S^2} \right), \quad (3)$$

де n – число рівнів шуму; y_i – значення показника якості при різних рівнях шумів; \bar{y} – середнє значення показника якості; S^2 – дисперсія значень показника якості при різних рівнях шумів.

Після проведення розрахунків значень S/N відношень будують діаграми значень S/N відношень та показника якості для кожного чинника і визначають такі рівні чинників, при яких S/N відношення максимальне.

В розширення цього підходу автори пропонують розглянути S/N відношення як додатковий показник якості процесу, побудувати для нього експериментально-статистичну модель та провести її оптимізацію. Це дозволить комплексно врахувати вплив технологічних чинників та точніше визначити рівні, при яких досягається найкраще подолання шумів.

Узагальнюючий лінеаризуючий підхід (“Generalized Linear Modeling Approach”) запропонований Jan Engel, A. Freek Huele в роботі [4]. За вихідні дані для побудови моделі був запропонований план робастного експерименту першого порядку як за контрольованими, так і за шумовими факторами. Метою методу є побудова моделі для показника якості і дисперсії показника якості. Суть підходу можна передати наступним алгоритмом:

1. Побудова загальної моделі. Для побудови моделі використовується метод найменших квадратів (МНК). У модель включаються регресори контрольованих факторів, а також регресори, що показують взаємодії всіх контрольованих факторів із шумовими факторами. Таким чином, будується модель першого порядку, що містить $(1 + n_1 + n_1 * n_2)$ коефіцієнтів, де n_1 – число контрольованих, n_2 – число шумових факторів.

2. Оцінка значущості коефіцієнтів. Оцінка значущості виконується одним з відомих методів. Після відкидання незначущих регресорів модель перераховується заново. Отримана в такий спосіб модель називається умовною моделлю для середнього. Якщо усі взаємодії контрольованих факторів із шумовими виявилися незначущими, даний метод не може бути застосовано.

3. Побудова умовної моделі дисперсії. Модель для дисперсії будується за тим же планом, що й умовна модель для середнього. Вид цієї моделі відповідає виду умовної моделі для середнього. За вихідну змінну використовуються логарифми квадратів відхилень між експериментальними значеннями і значеннями, що отримані за умовною моделлю для середнього $e_i = \log(y_i - \mu_i)^2$. Для даної моделі також проводиться оцінка значущості коефіцієнтів, і незначущі коефіцієнти відкидаються, після чого коефіцієнти рівняння перераховуються.

4. Перетворення умовної моделі для середнього. Умовна модель для середнього перераховується з урахуванням ваг експерименту. За ваги приймається зворотне значення експоненти значень моделі дисперсії. Потім модель для середнього перераховується за ваговим МНК. Отримана таким чином модель є новою умовною моделлю для середнього.

5. Ітераційний процес. Кроки 3 і 4 повторюються доти, поки не перестануть змінювати ваги. У результаті одержують уточнені умовної моделі для середнього і дисперсії.

6. Побудова остаточних моделей. Остаточна модель для середнього будується шляхом відкидання регресорів від умовної моделі для середнього, що показують взаємодію шумових і контрольованих факторів. Відкинуті регресори додаються в модель для дисперсії. При цьому взаємодії із шумовими факторами нівелюються. Отримані моделі будуть мати вигляд:

$$E(y) = b_0 + \sum b_i x_i, \quad (4)$$

$$Var(y) = \left(\sum b_i x_i\right)^2 + \exp\left(b_0^{(v)} + \sum b_i^{(v)} x_i^{(v)}\right), \quad (5)$$

де b_0 , b_i , b_{ij} – коефіцієнти умовної моделі для середнього; $b_0^{(v)}$, $b_i^{(v)}$ – коефіцієнти умовної моделі для дисперсії.

7. Оптимізація моделі для дисперсії. Оптимальне значення факторів, при яких система буде робастна стосовно шумових факторів, знаходиться шляхом мінімізації моделі для $Var(y)$. Значення самого показника якості при цих значеннях факторів можна розрахувати, використовуючи модель для $E(y)$.

Розробка програмного забезпечення

Розроблений авторами програмний пакет обробки результатів робастних експериментів одержав назву RODAP (від англ. RObust Design APproach). Пакет реалізовано на засадах об'єктно-орієнтованого програмування мовою Delphi. Даний пакет можна розглядати як доповнення до попередньо розробленої за участю авторів системи обробки результатів експериментів STAT-SENS [5].

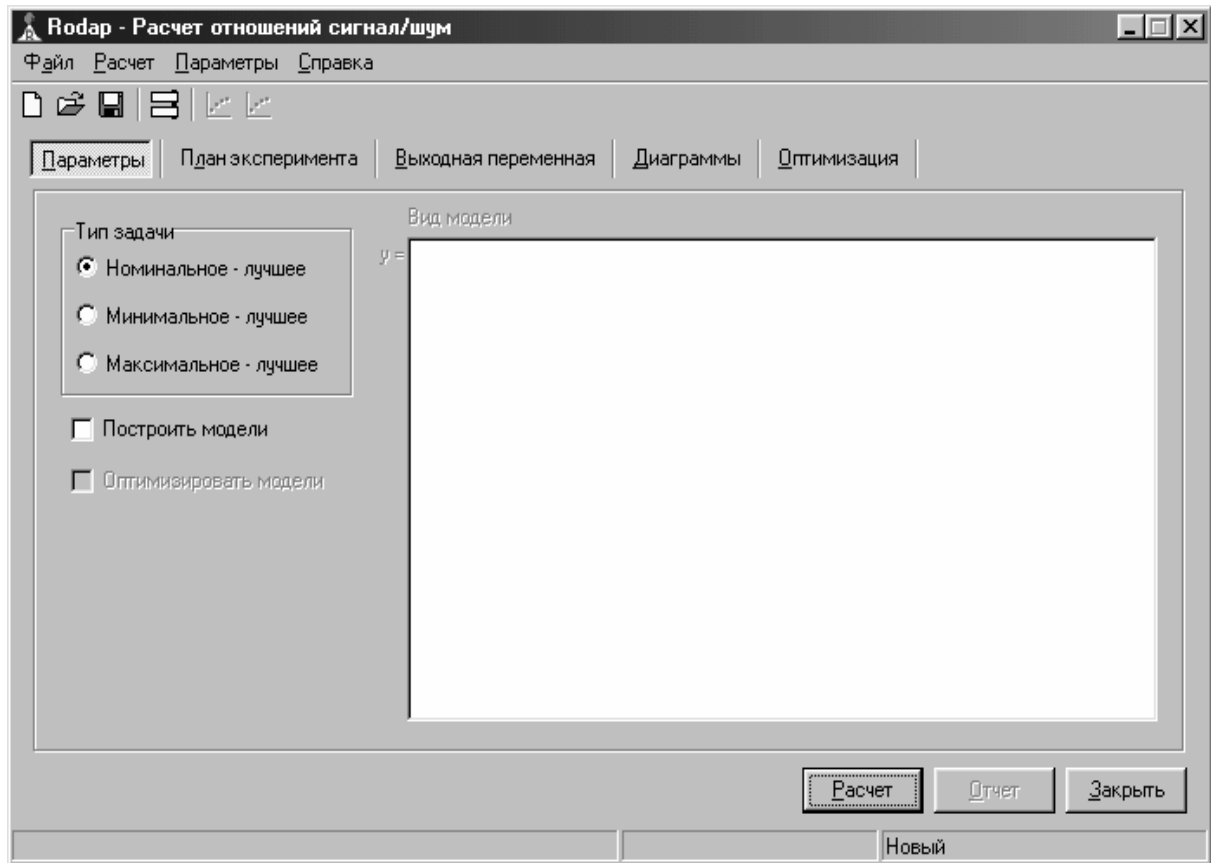


Рис. 1. Вікно “Розрахунок відношень сигнал/шум” програмного пакета RODAP

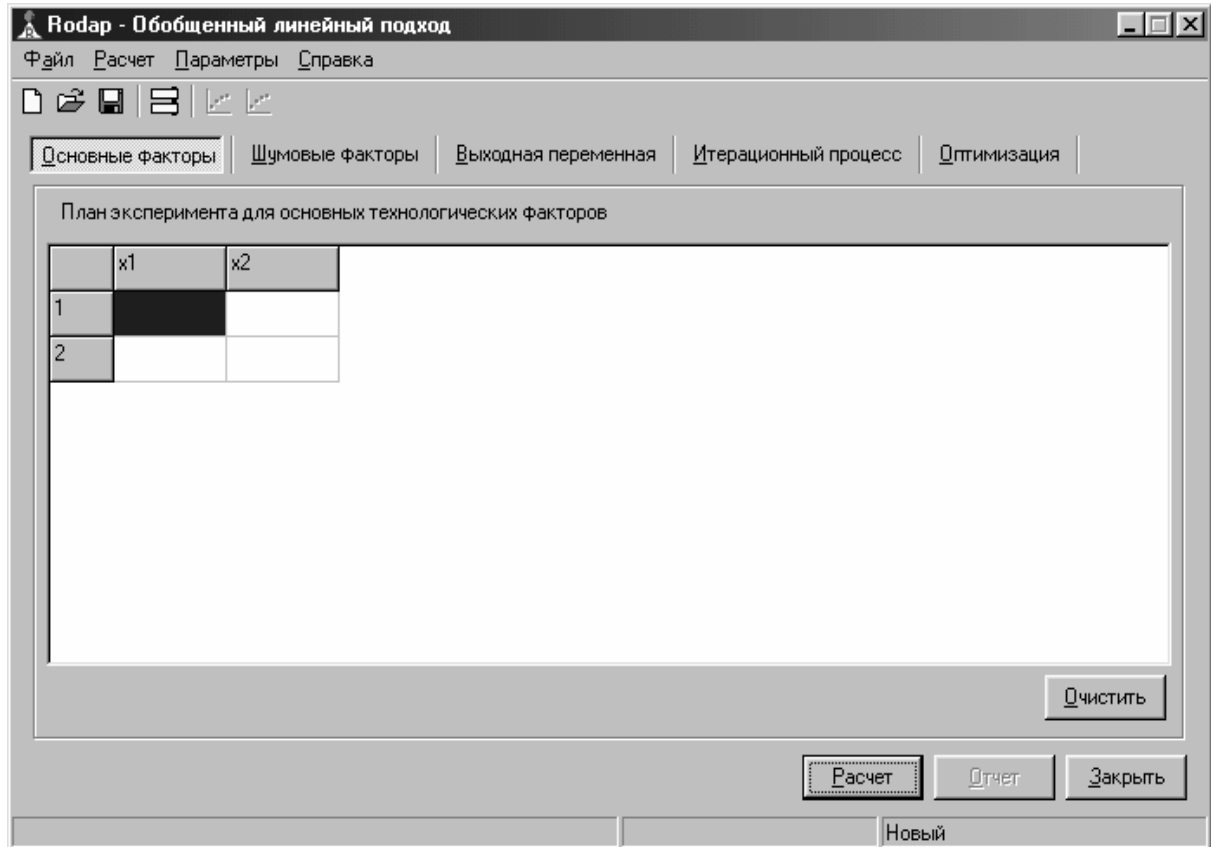


Рис. 2. Вікно “Узагальнюючий лінеаризуючий підхід” програмного пакета RODAP

Програмний пакет дозволяє вирішувати наступні задачі:

- вікно “Розрахунок відношень сигнал/шум” (рис. 1) дозволяє розрахунок відношень “сигнал-шум” та побудову діаграми, а також побудову експериментально-статистичної моделі для параметрів оптимізації та відношень “сигнал-шум” і проведення оптимізації моделей та сумісної оптимізації за двома критеріями – S/N відношення та показник якості;
- вікно “Узагальнюючий лінійний підхід”, зображене на рис. 2, дозволяє провести розрахунки за вказаним підходом.

Програмний пакет розроблений у відповідності до підходу, зазначеного у [5], має дружній інтерфейс, захищений від помилок користувача; передбачена можливість видачі звітів про результати роботи у вигляді текстового файлу та документа Microsoft Word, окреме збереження діаграм, передача даних між задачами та ін.

Приклади розв’язання технологічних задач

Пакет RODAP орієнтований на розв’язання технологічних задач. Для ілюстрації можливостей програмного пакета з обробки результатів за підходом Тагучі використані результати експериментів – одержання глазурованої керамічної плитки. При цьому проводилася трансформація чинників [6]. Чинники, що вводились в план експерименту, представлені в табл. 1. За неконтрольований чинник розглядався інтегральний шум різноманітної природи, що чинить вплив на якість одержаного продукту. Показником якості готового продукту (y) було прийнято міцність згину, що за стандартом має бути не менше 22 МПа.

Таблиця 1

Чинники, введені в план експерименту одержання керамічної плитки

Чинник	Визначення	Значення	
		нижній (-1)	верхній (+1)
X_1	відношення масових часток шлаку та глини (G_2/G_1)	0,15 / 0,80 = 0,1875	0,25 / 0,60 = 0,4166
X_2	відношення масових часток нефеліну та глини (G_3/G_1)	0,00 / 0,80 = 0,0	0,07 / 0,60 = 0,1167
X_3	відношення масових часток шамоту та глини (G_4/G_1)	0,00 / 0,80 = 0,0	0,10 / 0,60 = 0,1667
X_4	температура обпалювання, T	1010	1050

Базуючись на результатах попередніх технологічних і рецептурних особливостей моделюемого процесу, були обрані наступні межі для факторів: $0.60 < G_1 < 0.80$; $0.15 < G_2 < 0.25$; $0.00 < G_3 < 0.07$; $0.00 < G_4 < 0.10$; $1010 < T < 1050$ °C, де G_1, G_2, G_3, G_4 – масові частки глини, шлаку, нефеліну і шамоту у суміші відповідно; T – температура обпалювання.

Для проведення експерименту було обрано насичений D-оптимальний план Рехтшафтнера [7]. Матриця плану і результати експерименту представлені в табл. 2.

За результатами розрахунків програмним пакетом RODAP (тип S/N відношення “найбільше – найкраще”) було визначено рівні чинників, що відповідають максимальним значенням S/N відношень. Оптимальними рівнями чинників визначено: $x_1 = -1$; $x_2 = -1$; $x_3 = -1$; $x_4 = 0$, що відповідає температурі обпалення $T = 1030$ °C та складу керамічної маси $G_1 = 15\%$; $G_2 = 0\%$; $G_3 = 0\%$; $G_4 = 85\%$. При цих значеннях технологічних параметрів спостерігається висока (> 34 МПа) міцність готового продукту при максимальному подоланні інтегрального шуму.

З метою уточнення рівнів контрольованих чинників, використовуючи додаткові можливості програмного пакета, було побудовано експериментально-статистичні моделі у формі поліномів другого ступеня:

$$S / N = 30,44 - 0,35x_1 - 0,41x_2 - 0,21x_3 + 1,04x_4 - 0,03x_1x_2 + 0,36x_1x_3 + 0,20x_1x_4 + 0,10x_2x_3 - 0,26x_2x_4 - 0,30x_3x_4 + 0,71x_1^2 + 0,91x_2^2 + 0,56x_3^2 - 2,41x_4^2; \tag{6}$$

$$y = 33,69 - 1,28x_1 - 1,32x_2 - 1,24x_3 + 3,64x_4 - 0,39x_1x_2 + 1,39x_1x_3 + 0,61x_1x_4 + 0,08x_2x_3 - 1,10x_2x_4 - 0,94x_3x_4 + 2,33x_1^2 + 2,89x_2^2 + 2,36x_3^2 - 8,25x_4^2. \tag{7}$$

Таблиця 2

План експерименту і результати експерименту одержання керамічної плитки

№	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3
1	-1	-1	-1	-1	32,56	31,61	33,58
2	-1	+1	+1	+1	32,61	28,84	33,12
3	+1	-1	+1	+1	34,06	44,39	36,38
4	+1	+1	-1	+1	32,21	34,01	34,58
5	+1	+1	+1	-1	27,20	29,86	28,06
6	+1	+1	-1	-1	21,27	30,13	25,70
7	+1	-1	+1	-1	30,01	25,38	31,07
8	+1	-1	-1	+1	42,55	36,92	40,58
9	-1	+1	+1	-1	29,43	30,87	28,15
10	-1	+1	-1	+1	31,71	40,31	43,54
11	-1	-1	+1	+1	34,89	37,41	35,76
12	+1	0	0	0	33,58	34,52	36,16
13	0	+1	0	0	35,52	36,62	33,68
14	0	0	+1	0	32,24	37,39	34,81
15	0	0	0	+1	28,95	29,09	30,27

При оптимізації моделі (6) отримані значення : $x_1 = -1$; $x_2 = -1$; $x_3 = -0,91$; $x_4 = 0,19$, що відповідають технологічним параметрам $T = 1033$ °C; $G_1 = 15,69$ %; $G_2 = 0$ %; $G_3 = 0,63$ %; $G_4 = 83,68$ %, при яких очікується максимальне подолання шуму. При цих технологічних параметрах міцність керамічної плитки за моделлю (7) очікується 44,96 МПа.

Для ілюстрації можливостей програмного пакета при використанні узагальнюючого лінеаризуючого підходу використано результати експериментів лиття під тиском [4]. Показником якості готового продукту (y) було прийнято усадку виробів. Чинники, що введені до плану експерименту, представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Чинники, введені в план експерименту лиття під тиском.

Чинник	Визначення	Значення на рівнях	
		нижній (-1)	верхній (+1)
Контрольовані чинники			
X_1	час одного циклу процесу, $t_{ц}$, сек.	40	75
X_2	температура форми, $T_{ф}$, °C	20	70
X_3	товщина виробу, h , мм	0,75	3
X_4	зовнішній тиск, P , МПа	60	150
X_5	об'ємна швидкість заповнення форми, v , см ³ /сек.	52	85
X_6	час витримування під тиском, t_p , сек.	10	17
X_7	розмір литика, l , мм	4,5	6,0
Шумові чинники			
X_8	кількість повторно розмеленого продукту, %	0	4,5
X_9	кількість вологи, %	0,02	0,08
X_{10}	температура навколишнього середовища, °C	10	25

Матриця плану і результати експерименту представлені в табл. 4.

В результаті розрахунків програмним пакетом побудовано моделі для середнього значення дисперсії усадки:

$$E(y) = 2,28 + 0,46x_1 - 0,15x_4 - 0,25x_7, \tag{8}$$

$$Var(y) = (0,62x_3 - 0,58x_5)^2 + \exp(-3,54 + 1,61x_1). \tag{9}$$

Таблиця 4

План експерименту і результати експерименту лиття під тиском

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}			
								1	-1	-1	-1	-1	-1

2	-1	-1	-1	1	1	1	1
3	-1	1	1	-1	-1	1	1
4	-1	1	1	1	1	-1	-1
5	1	-1	1	-1	1	-1	1
6	1	-1	1	1	-1	1	-1
7	1	1	-1	-1	1	1	-1
8	1	1	-1	1	-1	-1	1

2.5	0.3	2.7	0.3
0.5	3.1	0.4	2.8
2.0	1.9	1.8	2.0
3.0	3.1	3.0	3.0
2.1	4.2	1.0	3.1
4.0	1.9	4.6	2.2
2.0	1.9	1.9	1.8

За результатами оптимізації моделей (8), (9) знайдено, що мінімальні значення усадки при мінімальній варіабельності спостерігаються при $x_3 = x_5$, $x_1 = x_4 = x_7 = -1$, що відповідає $t_{II} = 40$ сек., $P = 60$ МПа, $l = 4,0$ мм та показує лінійну залежність між h та v . Чинник x_6 (t_p) у вказаних межах мало впливає як на усадку, так і на стабільність процесу.

Висновки

Таким чином, за результатами проведеної роботи розроблено програмний пакет для обробки результатів робастних експериментів, що дає можливість отримувати додаткову інформацію з проведеного експерименту та давати технологічні рекомендації з проведення технологічних процесів з метою одержання стабільних заданих показників якості.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Taguchi G.* Taguchi on Robust Technology Development: Bringing Quality Engineering Upstream, ASME Press, New York. – 1993. – 293 p.
2. *Бондарь А.Г., Статюха Г.А.* Планирование эксперимента в химической технологии (основные положения, примеры и задачи). – К.: Высшая школа, 1976. – 183 с.
3. *Unal. R., Dean E.B.* Design for Cost and Quality: The Robust Design Approach. // Journal of Parametrics. – 1991. – Vol. 9, №1. – P. 324–334.
4. *Jan Engel, A. Freek Huele.* A Generalized Linear Modeling Approach to Robust Design // Technometrics. – 1996. – Vol. 38, № 4. – P. 365–372.
5. *Статюха Г.О., Петрань А.Г.* Розробка комп'ютерної системи підготовки та обробки даних у межах застосування експериментально-статистичної методології для хіміко-технологічних систем // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – №1. – 2000. – С. 100–106.
6. *Зидгинидзе И.Г.* Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
7. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: Справочник / Под ред. В.В. Налимова. – М.: Металлургия, 1982.

СКЛАДАННИЙ Денис Миколайович – аспірант кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- планування експерименту;
- робастні технологічні системи.

Тел, (044) 441-16-01, e-mail: sdn@xtf.ntu-kpi.kiev.ua

СТАТЮХА Геннадій Олексійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання;
- оптимізація складних систем;
- планування експерименту.

Тел, (044) 241-76-12, e-mail: statjuha@uprotel.net.ua

Подано 30.05.2002

Складаний Д.М., Статюха Г.О. Розробка пакета програм обробки результатів експериментів з використанням робастного підходу

Складаний Д.Н., Статюха Г.А. Разработка пакета программ обработки результатов экспериментов с использованием робастного подхода

Skladanny D.N., Statjukha G.A. Programming the software package for computing the experimental results using Taguchi's method

УДК 519.22 + 519.24

Разработка пакета программ обработки результатов экспериментов с использованием робастного подхода / Д.Н. Складанный, Г.А. Статюха

В работе представлены результаты разработки программного пакета RODAP направленного на обработку экспериментов с использованием робастного подхода Тагучи и его модификаций. Приведены примеры решения, при помощи разработанного пакета, задач поиска стабильных условий проведения технологических процессов.

УДК 519.22 + 519.24

Programming the software package for computing the experimental results using Taguchi's method / D.N. Skladannyi, G.A. Statjukha

In this research the results of programming the software package RODAP, which riddled at the computing the experimental data using Taguchi's method and its modifications are presented. The examples of decision the technological problems with an eye to determine the robust condition carrying the technological processes using created software package are showed.