

КРИЛИК ЛЮДМИЛА

Вінницький національний технічний університет

ORCID ID: 0000-0001-6642-754X

e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ ДВОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ

В роботі для оптимізації параметрів виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури застосовано метод планування багатofакторного експерименту з регресійним аналізом впливу фактора. За критерієм Кохрена на основі статистичної обробки результатів факторного експерименту доведено, що факторний експеримент є відтворюваним. Розроблено рівняння регресії, на основі якого встановлено, що концентрація розчину солі, яку використано для створення вологочутливого шару, суттєво впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури. За критерієм Стьюдента визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії. За критерієм Фішера доведено, що скориговане рівняння регресії є адекватним результатам факторного експерименту. Рівняння регресії в масштабі реальних факторів сприяє оптимізації параметрів створення ємнісного сенсора вологості двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі – «чутливість». Встановлено, що найбільша чутливість 2,36 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація адсорбуючого матеріалу NaCl – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Зважаючи на те, що товщина вологочутливого шару не впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості, товщину цього шару доцільно взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

Ключові слова: рівняння регресії, матриця планування, повнофакторний експеримент, фактор, відгук моделі, критерій Стьюдента, критерій Кохрена, критерій Фішера.

KRYLIK LYUDMILA

Vinnytsia National Technical University

PRACTICAL APPLICATION OF REGRESSION ANALYSIS FOR INFLUENCE ASSESSMENT OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR OF THE TWO-LAYER STRUCTURE

In the work, the method of planning a multifactorial experiment with regression analysis of the influence of the factor was used to optimize the manufacturing parameters of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure. Capacitive humidity sensors of a two-layer structure, made on a sital substrate with a size of 0.7×0.9 mm, served as experimental samples. A copper film is applied to the surface of the substrate, which forms covers of capacitive elements in the form of a meander. The moisture-sensitive layer in such a structure is a hygroscopic NaCl salt, which performs the function of a dielectric. To create a moisture-sensitive layer, solutions of hygroscopic salt NaCl with concentrations of 0.89 mol/l and 5.33 mol/l were used, which were applied by spraying on the surface of capacitive humidity sensors with thicknesses of 5.0 μm and 10.0 μm. A moisture-absorbing polymethylmethacrylate film with thicknesses of 40 μm and 80 μm served as a protective layer. According to the Cochran criterion, on the basis of statistical processing of the results of the factorial experiment, it is proved that the factorial experiment is reproducible. A regression equation was developed based on which it was established that the concentration of the salt solution used to create the moisture-sensitive layer significantly affects the sensitivity of the capacitive moisture sensor of the two-layer structure. According to the Student's criterion, significant coefficients of the regression equation were determined. According to Fisher's criterion, it is proved that the adjusted regression equation is adequate to the results of the factorial experiment. The regression equation on the scale of real factors contributes to the optimization of the manufacturing parameters of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure with the maximum value of the model's response function – "sensitivity". It was established that the highest sensitivity of 2.36 nF/% is provided with the following optimal parameters of the manufacturing process of a capacitive humidity sensor of a two-layer structure: the concentration of the adsorbing material NaCl is 5.33 mol/l, the thickness of the protective layer is 80 μm. Considering the fact that the thickness of the moisture-sensitive layer does not affect the sensitivity of the capacitive humidity sensor, it is advisable to take the thickness of this layer in the range from 5.0 μm to 10.0 μm.

Keywords: regression equation, planning matrix, full-factorial experiment, factor, model response, Student's criterion, Cochran's criterion, Fisher's criterion.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сучасному етапі розвитку науково-технічного прогресу висувуються підвищені вимоги до характеристик сенсорів фізичних величин, оскільки від рівня їхнього розвитку залежить ефективна робота контрольно-вимірювальних систем в цілому.

Одним із поширених напрямків вимірювання параметрів навколишнього середовища є вимірювання вологості, оскільки вміст води в повітрі суттєво впливає на якість проведення технологічних процесів в різноманітних галузях промислової індустрії. Крім того, розробка нових та удосконалення існуючих конструктивних рішень з метою покращення метрологічних характеристик як сенсора, так і контрольно-вимірювальних систем потребує проведення значної кількості експериментальних досліджень [1–5]. Зважаючи на те, що проведення експериментів є вартісним та тривалим процесом, при їх підготовці доцільно застосовувати математичний апарат, а саме, математичне планування експерименту [6–12].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Натепер методи наукових досліджень умовно поділяються на: теоретичні, теоретико-експериментальні та експериментальні. Реалізація яких потребує узагальненого накопиченого досвіду, розробці теорії та проведення численних експериментів для підтвердження теорії. Потрібно зауважити, що проведення експериментів – це тривалий та вартісний процес досліджень. Тому, з метою мінімізації кількості експериментів, доцільно застосовувати математичний апарат, а саме, математичне планування експериментів. Основою якого є методи математичного статистичного моделювання, до яких відносять регресійний та дисперсійний аналізи.

Регресійний аналіз є вагомим інструментом у прийнятті ефективних рішень для вирішення різного кола завдань, а саме, він сприяє кількісному оцінюванню впливу факторів на відгук моделі. Дисперсійний аналіз сприяє якісному оцінюванню впливу факторів на відгук моделі. Ефективність яких зростає при застосуванні експериментів за багатофакторними планами [6–12].

Постановка завдання

Метою роботи є оцінювання, за допомогою регресійного аналізу, впливу на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури таких факторів:

- товщина вологочутливого шару;
- товщина полімерного покриття, як захисного шару;
- концентрація розчину солі, як адсорбуючого матеріалу.

Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати доцільність застосування багатофакторного плану експерименту;
- 2) розробити багатофакторний план експерименту на основі матриці планування;
- 3) використовуючи регресійний аналіз впливу фактора провести оцінювання впливу таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина полімерного покриття, як захисного шару; концентрація розчину солі, як адсорбуючого матеріалу на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури;
- 4) зробити висновки з проведених досліджень.

Виклад основного матеріалу

Проведені дослідження ємнісних вологочутливих елементів, створених на основі гігроскопічної солі NaCl довели, що основним недоліком вологочутливих шарів таких елементів є те, що вони здатні працювати тільки в обмеженому діапазоні відносної вологості нижче точки роси [3]. Тому для вирішення цієї проблеми виникла ідея створення захисного полімерного покриття з метою запобігання випадіння точки роси [4].

Для експерименту були використані ємнісні сенсори вологості двошарової структури (м. Вінниця, Україна, ВНТУ), виготовлені на ситаловій підкладці розміром $0,7 \times 0,9$ мм. На поверхню підкладки нанесено плівку міді, яка утворює обкладки ємнісних елементів у вигляді меандра. Вологочутливим шаром в такій конструкції є гігроскопічна сіль NaCl, яка виконує функцію діелектрика. З метою створення вологочутливого шару, використовувались розчини гігроскопічної солі NaCl з концентраціями 0,89 моль/л та 5,33 моль/л, які наносились шляхом розпилення на поверхню ємнісних сенсорів вологості товщинами 5,0 мкм та 10,0 мкм. Захисним шаром слугувала вологопоглинальна плівка поліметилметакрилату товщинами 40 мкм та 80 мкм.

Проведена серія експериментів, в результаті яких досліджувалась залежність чутливості ємнісного сенсора вологості двошарової структури від впливу таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина полімерного покриття, як захисного шару; концентрація розчину солі, як адсорбуючого матеріалу (гігроскопічна сіль NaCl).

Для розрахунків приймемо такі позначення: фактор X_1 – товщина вологочутливого шару d , мкм; фактор X_2 – товщина захисного шару d , мкм; фактор X_3 – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу C , моль/л; відгук моделі y – чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури S_C , нФ/%.

Для трьох факторів кількість експериментів – $2^3 = 8$, тобто $N = 8$.

При проведенні повного факторного експерименту типу 2^3 при кількості прогонів $p = 3$ отримані такі значення відгуку моделі y_{ij} (табл. 1):

Результати повного факторного експерименту типу 2^3

X_1	X_2	X_3	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}
5,0	40	0,89	0,38	0,48	0,54
10,0	40	0,89	0,42	0,53	0,6
5,0	80	0,89	0,57	0,62	0,75
10,0	80	0,89	0,68	0,78	0,82
5,0	40	5,33	0,75	0,86	0,91
10,0	40	5,33	0,83	0,95	1,25
5,0	80	5,33	0,97	1,78	2,82
10,0	80	5,33	1,89	2,95	3,78

Проведемо статистичну обробку результатів факторного експерименту. Розрахуємо значення дисперсії у кожному експерименті D_j , сумарне D_Σ та максимальне D_{\max} значення дисперсії на основі яких за критерієм Кохрена виконаємо оцінювання відтворюваності експерименту [12]:

$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^p (y_{ij} - y_j)^2}{p-1}, \quad (1)$$

де y_{ij} – i -е спостереження відгуку моделі в j -му експерименті;

$$D_\Sigma = \sum_{j=1}^N D_j, \quad (2)$$

$$D_{\max} = \max_j D_j. \quad (3)$$

Спостережуване значення критерію Кохрена обчислюють за формулою:

$$G = \frac{D_{\max}}{D_\Sigma}. \quad (4)$$

Використовуючи дані табл. 1, середні значення відгуку моделі обчислимо в такий спосіб:

$$y_j = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{ji}. \quad (5)$$

За формулами (1)–(4) обчислимо спостережуване значення критерію Кохрена: максимальне значення дисперсії: $D_{\max} = 0,9$; сумарне значення дисперсії: $D_\Sigma = 1,85$; спостережуване значення критерію Кохрена: $G \approx 0,486$.

Наступним кроком статистичної обробки результатів факторного експерименту є визначення табличного значення критерію Кохрена G_{kp} . При рівні значимості $\alpha = 0,05$, кількості ступенів вільності $m = p - 1 = 3 - 1 = 2$, маємо $G_{kp} = 0,516$. Оскільки $0,486 < 0,516$ ($G < G_{kp}$) можна зробити висновок, що факторний експеримент є відтворюваним. Оцінкою дисперсії генеральної сукупності є величина

$$D = \frac{1}{N} \sum_j D_j, \quad (6)$$

яка набуває значення: $D = 0,23$.

Спочатку, при проведенні експериментів за багатофакторним планом, перетворюють вхідні змінні X_i , що змінюються в межах ($X_{i\min}$, $X_{i\max}$), в нові змінні x_i – в межах (-1, +1) за формулою [12]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta_i}, \quad (7)$$

де $X_{i0} = \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}$, $\Delta_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}$.

Область проведення експериментів (табл. 1) $X_1 \in (5,0; 10,0)$, $X_2 \in (40; 80)$, $X_3 \in (0,89; 5,33)$

За формулами (7) перетворимо початкові змінні в допоміжні, які змінюються в області (-1;1):

$$x_1 = \frac{X_1 - 7,5}{2,5}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 60}{20}, \quad x_3 = \frac{X_3 - 3,11}{2,22}. \quad (8)$$

Складемо матрицю планування повнофакторного експерименту (ПФЕ) (див. табл. 2) та визначимо коефіцієнти рівняння регресії.

Обчислимо коефіцієнти рівняння регресії на основі даних матриці планування ПФЕ (табл. 2) за такими формулами [12]:

$$b_0 = \frac{\sum y_i}{N}, \quad b_k = \frac{\sum y_i x_{ik}}{N}, \quad k = 1, \dots, N-1. \quad (9)$$

Таблиця 2

Матриця планування ПФЕ

2^3	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_j
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,47
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,52
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,65
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,76
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,84
6	+	+	-	+	-	+	-	-	1,01
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1,86
8	+	+	+	+	+	+	+	+	2,87

Коефіцієнти рівняння регресії набувають таких значень:

$$b_0 = 1,12; \quad b_1 = 0,17; \quad b_2 = 0,41; \quad b_3 = 0,52; \quad b_4 = 0,11; \quad b_5 = 0,13; \quad b_6 = 0,31; \quad b_7 = 0,1.$$

В результаті рівняння регресії має вигляд:

$$y^{pez} = 1,12 + 0,17x_1 + 0,41x_2 + 0,52x_3 + 0,11x_1x_2 + 0,13x_1x_3 + 0,31x_2x_3 + 0,1x_1x_2x_3. \quad (10)$$

З отриманого рівняння регресії (10) видно, що фактор x_3 – концентрація розчину солі NaCl спричиняє на відгук моделі набагато більший вплив ніж фактори: x_1 – товщина вологочутливого шару; x_2 – товщина захисного шару та їх сумісний вплив. Отже, отримане рівняння регресії можна використовувати для наближених розрахунків відгуку моделі в області проведення експериментів.

Оскільки експеримент є відтворюваним, то перейдемо до наступного етапу статистичної обробки результатів. А саме, проведемо оцінювання значущості коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стьюдента. Спостережуване значення критерію Стьюдента обчислимо за формулою [12]:

$$t_j = |b_j| \sqrt{\frac{N \cdot p}{D}}, \quad (11)$$

При рівні значимості $\alpha = 0,05$, числі ступенів вільності $m = N \cdot (p-1) = 8 \cdot (3-1) = 16$, табличне значення критерію Стьюдента – $t_{kp} = 2,12$.

Проведемо оцінювання значущості коефіцієнтів b_j за формулою (11):

$$\begin{aligned} t_0 = 11,45 > t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_0 \text{ є значущим;} & t_1 = 1,74 < t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_1 \text{ є незначущим;} \\ t_2 = 4,2 > t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_2 \text{ є значущим;} & t_3 = 5,3 > t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_3 \text{ є значущим;} \\ t_4 = 1,12 < t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_4 \text{ є незначущим;} & t_5 = 1,33 < t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_5 \text{ є незначущим;} \\ t_6 = 3,17 > t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_6 \text{ є значущим;} & t_7 = 1,02 < t_{kp} = 2,12 &\rightarrow b_7 \text{ є незначущим.} \end{aligned}$$

Скориговане рівняння регресії за критерієм Стьюдента має вигляд:

$$y^{pez} = 1,12 + 0,41x_2 + 0,52x_3 + 0,31x_2x_3. \quad (12)$$

Зважаючи на те, що в рівнянні регресії є незначущі коефіцієнти, перейдемо до третього етапу статистичної обробки результатів факторного експерименту. Перевіримо адекватність отриманого рівняння регресії результатам експерименту за критерієм Фішера. Для цього розраховують дисперсію адекватності за формулою [12]:

$$D_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_i^{pez})^2}{N - L}, \quad (13)$$

де y_i^{pez} – обчислене за регресійним рівнянням значення i -го експерименту,

L – кількість значущих коефіцієнтів лінійної регресії.

Спостережуване значення критерію Фішера визначають за формулою [12]:

$$F = \frac{D_{ad}}{D}. \quad (14)$$

Підставимо відповідні значення факторів у рівняння (12) і визначимо значення відгуку моделі в кожному експерименті, обчислене за рівнянням регресії. Обчислені значення y^{pez} заносимо у таблицю (табл. 3) результатів експериментів:

Значення відгуку моделі в кожному експерименті

2^3	x_2	x_3	y	y^{pez}
1	-	-	0,47	0,5
2	-	-	0,52	0,5
3	+	-	0,65	0,7
4	+	-	0,76	0,7
5	-	+	0,84	0,92
6	-	+	1,01	0,92
7	+	+	1,86	2,36
8	+	+	2,87	2,36

Визначимо значення адекватності дисперсії за формулою (13), враховуючи, що $N = 8$, $L = 4$:

$$D_{ad} = 5 \cdot 10^{-3}.$$

Значення критерію Фішера обчислене за формулою (14) має вигляд:

$$F = 0,02.$$

Критичне значення критерію Фішера при рівні значимості $\alpha = 0,05$ і кількості ступенів вільності $m_1 = N \cdot (p-1) = 8 \cdot (3-1) = 16$ та $m_2 = p-1 = 3-1 = 2$ дорівнює

$$F_{кр} = 19,41.$$

Оскільки $F < F_{кр}$, рівняння регресії (12) визнається адекватним результатам факторного експерименту.

Фактори x_2 та x_3 входять до рівняння регресії (12) у кодованому вигляді. Розкодуємо рівняння регресії (12), використовуючи вирази (8) і отримаємо остаточне рівняння регресії в масштабі реальних факторів, яке має такий вигляд:

$$y^{pez} = 0,46 - 0,001X_2 - 0,18X_3 + 0,01X_2X_3. \quad (15)$$

Рівняння регресії в масштабі реальних факторів (15) сприяє оптимізації параметрів виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі – «чутливість». Критерієм оптимізації параметрів виготовлення вологочутливого та захисного шарів емнісного сенсора вологості двошарової структури є чутливість. З експериментів видно, що чутливість емнісного сенсора вологості двошарової структури залежить від таких факторів: товщина захисного шару та концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу. Однак, суттєво впливає на чутливість емнісного сенсора вологості двошарової структури концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl. Встановлено, що найбільша чутливість 2,36 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація адсорбуючого матеріалу – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Оскільки товщина вологочутливого шару не впливає на чутливість емнісного сенсора вологості, товщину цього шару доцільно взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Для оптимізації параметрів виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури, застосовано метод планування багатofакторного експерименту в поєднанні з регресійним аналізом впливу фактора. За критерієм Кохрена на основі статистичної обробки результатів факторного експерименту доведено, що факторний експеримент є відтворюваним. Розроблено рівняння регресії на основі якого встановлено, що концентрація розчину солі, яку використано для створення вологочутливого шару суттєво впливає на чутливість емнісного сенсора вологості. За критерієм Стюдента визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії. За критерієм Фішера доведено, що скориговане рівняння регресії є адекватним результатам факторного експерименту.

2. Отримане рівняння регресії в масштабі реальних факторів сприяє оптимізації параметрів виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі – «чутливість». Встановлено, що найбільша чутливість 2,36 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація адсорбуючого матеріалу – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Зважаючи на те, що товщина вологочутливого шару не впливає на чутливість емнісного сенсора вологості, товщину цього шару доцільно взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

3. В подальших дослідженнях планується застосувати дробовий план факторного експерименту.

Література

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Том 2 / З. Ю. Готра. – Львів : Ліга-Прес, 2003. – 595 с.
2. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця :

УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 208 с.

3. Осадчук В. С. Дослідження ємнісних вологочутливих елементів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник ВПІ. – 2002. – № 5. – С. 65–71.

4. Осадчук В. С. Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Міжнародний науково-технічний журнал. – 2006. – № 2(12). – С. 222–227.

5. Осадчук О. В. Математична модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін, Я. О. Осадчук // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021. – Т. 32(71), № 4. – С. 289–296.

6. Левченко Д. В. Вибір та обґрунтування математичного плану 6-ти факторного експерименту при дослідженні пускових якостей ДВЗ / Д. В. Левченко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – № 2. – С. 86–92.

7. Крилик Л. В. Застосування регресійного аналізу в процесі оцінювання впливу фактора на чутливість ємнісного сенсора вологості / Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 4(311). – С. 119–124.

8. Ляшок А. В. Планування багатфакторного експерименту при дослідженні процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі / А. В. Ляшок // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2013. – № 3. – С. 13–17.

9. Павлюк К. В. Методичні підходи до розроблення нормативів і оцінки науково-дослідної праці на основі багатфакторного кореляційно-регресійного аналізу / К. В. Павлюк // Наукові праці НДФІ. – 2020. – № 3(92). – С. 5–19.

10. Аксьончиков С. О. Регресійний аналіз тенденцій розвитку кібератак / С. О. Аксьончиков, І. В. Смельянова, К. Д. Маркова, І. І. Сватовський // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2017. – Вип. 36. – С. 5–13.

11. Кучернюк П. В. Модель загроз безпеки в інформаційно-комунікаційних системах на основі регресійного аналізу / П. В. Кучернюк, А. О. Довгал // Інформаційні та телекомунікаційні системи та технології, захист інформації. – 2017. – Вип. 22, № 2. – С. 79–84.

12. Стеценко І. В. Моделювання систем / І. В. Стеценко. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.

References

- Hotra Z. Yu. Mikroelektronni sensory fizychnykh velychyn. Tom 2 / Z. Yu. Hotra. – Lviv : Liha-Pres, 2003. – 595 s.
- Osadchuk V. S. Sensory volohosti / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2003. – 208 s.
- Osadchuk V. S. Doslidzhennia yemnisnykh volohochutlyvykh elementiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk VPI. – 2002. – № 5. – С. 65–71.
- Osadchuk V. S. Yemnisnyi sensor volohosti hrebintsevoi struktury na osnovi polimernykh materialiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. Mizhnarodnyi naukovotekhnichnyi zhurnal. – 2006. – № 2(12). – С. 222–227.
- Osadchuk O. V. Matematychna model mikroelektronnoho avtoheneratornoho zasobu dlia vymiryuvannia volohosti / O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, O. S. Zviahin, Ya. O. Osadchuk // Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky. – 2021. – Т. 32(71), № 4. – С. 289–296.
- Levchenko D. V. Vybir ta obgruntuvannia matematychnoho planu 6-ty faktornoho eksperymentu pry doslidzhenni puskovykh yakoste DVZ / D. V. Levchenko // Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia. – 2021. – № 2. – С. 86–92.
- Krylyk L. V. Zastosuvannia rehresiinoho analizu v protsesi otsiniuvannia vplyvu faktora na chutlyvist yemnisnoho sensora volohosti / L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – 2022. – № 4(311). – С. 119–124.
- Liashok A. V. Planuvannia bahatofaktornoho eksperymentu pry doslidzhenni protsesu ultrazvukovoho rozpylennia v tonkomu shari / A. V. Liashok // Visnyk NTUU «KPI». Serii: mashynobuduvannia. – 2013. – № 3. – С. 13–17.
- Pavliuk K. V. Metodychni pidkhody do rozroblennia normatyviv i otsinky naukovodoslidnoi pratsi na osnovi bahatofaktornoho korelyatsiino-rehresiinoho analizu / K. V. Pavliuk // Naukovi pratsi NDFI. – 2020. – № 3(92). – С. 5–19.
- 1) Aksonchikov S. O. Rehresiinyi analiz tendentsii rozvytku kiberatak / S. O. Aksonchikov, V. Yemelianova, K. D. Markova, I. I. Svatovskiy // Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni
- V. N. Karazina. Serii: Mat. modeliuvannia. Informatsiini tekhnolohii. Avtomatyzovani systemy upravlinnia. – 2017. – Vyp. 36. – С. 5–13.
- Kucherniuk P. V. Model zahroz bezpeky v informatsiino-komunikatsiinykh systemakh na osnovi rehresiinoho analizu / P. V. Kucherniuk, A. O. Dovhal // Informatsiini ta telekomunikatsiini systemy ta tekhnolohii, zakhyst informatsii. – 2017. – Vyp. 22, № 2. – С. 79–84.
- Stetsenko I. V. Modeliuvannia system / I. V. Stetsenko. – Cherkasy : ChDTU, 2010. – 399 s.