

КРИЛИК ЛЮДМИЛА

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6642-754X>e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ДРОБОВОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ ДВОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ

В роботі застосовано дробовий факторний експеримент з метою зменшення кількості дослідів. Експериментальними зразками слугували ємнісні сенсори вологості двошарової структури, виготовлені на ситаловій підкладці. За критерієм Кохрена доведено, що дробовий факторний експеримент є відтворюваним. На основі розробленого рівняння регресії встановлено, що концентрація розчину солі NaCl суттєво впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості. Використовуючи критерій Стьюдента, визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії. Адекватність результатам факторного експерименту скоригованого рівняння регресії доведено за допомогою критерію Фішера. На основі рівняння регресії в масштабі реальних факторів, яке сприяє оптимізації параметрів виготовлення сенсора вологості, встановлено, що чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури залежить від таких факторів, як товщина захисного шару і концентрація розчину солі NaCl. Однак, на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури суттєво впливає концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl. Найбільша чутливість 2,46 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Враховуючи те, що товщина вологочутливого шару суттєво не впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості, товщину цього шару можна взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

Ключові слова: рівняння регресії, матриця планування, дробовий факторний експеримент, дробова репліка, фактор, відгук моделі, критерій Стьюдента, критерій Кохрена, критерій Фішера.

KRYLIK LYUDMILA

Vinnytsia National Technical University

PRACTICAL APPLICATION OF A FRACTIONAL FACTOR EXPERIMENT FOR ASSESSING THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF A CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR OF A TWO-LAYER STRUCTURE

The work uses a fractional factorial experiment in order to reduce the number of experiments. Capacitive humidity sensors of a two-layer structure made on a sital substrate served as experimental samples. Hygroscopic salt NaCl was used to create a moisture-sensitive layer that would perform the function of a dielectric. Solutions of this salt with concentrations of 0,89 mol/l and 5,33 mol/l were applied by spraying on the surface of capacitive humidity sensors with thicknesses of 5,0 μm and 10,0 μm . In order to prevent the drop of the dew point, a protective layer was created – it is a moisture-absorbing polymethyl methacrylate film with thicknesses of 40 μm and 80 μm . According to the Cochran's test, it is proved that the fractional factorial experiment is reproducible. Using regression analysis, a quantitative assessment of the influence of factors on the sensitivity of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure was carried out. Based on the developed regression equation, it was established that the concentration of the NaCl salt solution significantly affects the sensitivity of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure. Significant coefficients of the regression equation were determined using the Student's test. Adequacy of the adjusted regression equation to the results of the factorial experiment was proved using Fisher's test. Based on the regression equation on the scale of real factors, which contributes to the optimization of the humidity sensor manufacturing parameters, it was established that the sensitivity of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure depends on such factors as the thickness of the protective layer and the concentration of the NaCl salt solution. However, the sensitivity of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure is significantly affected by the concentration of the hygroscopic NaCl salt solution. The highest sensitivity of 2,46 nF/% is provided with the following optimal parameters of the manufacturing process of the capacitive humidity sensor of the two-layer structure: the concentration of the hygroscopic NaCl salt solution is 5,33 mol/l, the thickness of the protective layer is 80 μm . Considering that the thickness of the moisture-sensitive layer does not significantly affect the sensitivity of the capacitive humidity sensor, the thickness of this layer can be taken in the range from 5,0 μm to 10,0 μm .

Key words: regression equation, planning matrix, fractional factorial experiment, fractional replica, factor, model response, Student's test, Cochran's test, Fisher's test.

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

Розвиток економіки народного господарства України насамперед залежить від якості та ефективної дії засобів автоматичної діагностики та приладів неруйнівного контролю, вагоме місце серед яких займають сенсори вологості [1–5]. Для дослідження характеристик як чутливих елементів, так і контрольно-вимірювальних систем потрібно залучити експеримент, який посідає вагоме місце в науково-дослідній роботі. Важливим є питання ефективності його проведення. Підвищенню ефективності досліджень сприяє активний експеримент, оскільки він оснований на математичній теорії планування експерименту. Крім того, математичні моделі, розроблені на основі даних активного експерименту, можна застосовувати не тільки для прогнозування значень досліджуваного відгуку моделі, але й для керування процесом дослідження, а також для знаходження найкращих значень відгуку моделі та умов перебігу досліджуваного процесу. Нині методи експериментально-статистичного моделювання та планування експерименту широко використовуються в різних сферах діяльності людини [6–11].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Доведено, що повні факторні плани дають змогу найточніше вивчити механізм впливу факторів на досліджувану систему і сприяють формулюванню найбільш обґрунтованих висновків. В багатофакторних системах проведення повних факторних експериментів пов'язане із значними труднощами, тобто зі збільшенням кількості факторів розмір матриці планування та обсяг експерименту суттєво зростає. Водночас в рівнянні регресії значно збільшується кількість доданків, що описують взаємодії факторів. Дослідника цікавлять лише доданки, які описують фактори. Тому за великої кількості факторів нехтують деякою частиною рівняння регресії, що описує складні взаємодії факторів.

Для цього будують не повний план експерименту, а дробовий. Дробовий план факторного експерименту виходить з повного плану прирівнюванням лінійних ефектів до ефектів взаємодії. Кожне введене співвідношення зменшує план вдвічі. Тому, якщо повний план – типу 2^k і введено m співвідношень, то виходить дробовий план типу 2^{k-m} . Однак, скорочення кількості дослідів спричиняє появу кореляції між оцінками коефіцієнтів. Ця обставина не дозволяє окремо оцінювати ефекти факторів і ефекти взаємодії. Утворюються так звані змішані оцінки [9–11].

Постановка завдання

Метою цієї статті є практичне застосування дробового факторного експерименту (ДФЕ) задля зменшення кількості дослідів та кількісне оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури з використанням регресійного аналізу.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтувати доцільність застосування дробового факторного експерименту;
- 2) розробити план дробового факторного експерименту на основі матриці планування, використовуючи генерувальні співвідношення та визначальні контрасти;
- 3) використовуючи план дробового факторного експерименту, на основі регресійного аналізу провести кількісне оцінювання впливу таких факторів на відгук моделі: товщина вологочутливого шару; товщина полімерного покриття як захисного шару; концентрація розчину солі як адсорбувального матеріалу на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури;
- 4) зробити висновки з проведених досліджень.

Виклад основного матеріалу

В роботі [6] для оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури застосовано повний факторний експеримент типу 2^3 , який передбачав проведення 8 експериментів. З метою зменшення кількості експериментів застосуємо дробовий факторний експеримент, який є частиною від повного факторного експерименту. Взагалі, для коректного дослідження об'єкта за допомогою ДФЕ потрібно застосувати великий обсяг теоретичних відомостей про об'єкт дослідження для того, щоб визначити, яким впливом взаємодії факторів можна знехтувати.

Для дробових реплік застосуємо спеціальні алгебричні співвідношення, які називаються генерувальними співвідношеннями і визначальними контрастами. Такі алгебричні співвідношення сприятимуть виявленню змішаних ефектів [9–11].

Побудуємо план дробового факторного експерименту, тобто замість плану 2^3 використаємо його піврепліку – план 2^{3-1} . Введемо генерувальне співвідношення

$$x_3 = x_1 x_2. \quad (1)$$

Помножимо праву та ліву частини співвідношення (1) на нововведений фактор x_3 та використаємо умову $x_i^2 = 1$. Отримаємо:

$$x_3 \cdot x_3 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Визначальний контраст, який задає елементи першого стовпця матриці планування набуває вигляду:

$$+1 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (2)$$

Розв'язувальна здатність цієї піврепліки дорівнює трьом. Використовуючи визначальний контраст (2), одержимо систему змішаних оцінок для цієї дробової репліки в такий спосіб: праву та ліву частини співвідношення (2) помножимо на кожний фактор та взаємодії факторів. Змішані оцінки коефіцієнтів рівняння регресії задаються такими співвідношеннями:

$$x_1 = x_1^2 x_2 x_3 = x_2 x_3, \quad x_2 = x_1 x_2^2 x_3 = x_1 x_3, \quad x_3 = x_1 x_2 x_3^2 = x_1 x_2. \quad (3)$$

Для плану дробового факторного експерименту типу 2^{3-1} змішування оцінок набуває такого вигляду:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}, \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}, \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}.$$

Потрібно зазначити, що ДФЕ проводиться в припущенні, що лінійні ефекти є домінуючими і змішування оцінок ефектів не означає невизначеності. Зазвичай явище змішування оцінок прийнято записувати в символічній формі.

Матриця планування плану дробового факторного експерименту типу 2^{3-1} містить стовпці x_0 , x_1 , x_2 та x_3 . Для побудови рівняння регресії достатньо чотирьох дослідів, тобто $N = 4$, кількість прогонів $p = 3$.

В табл. 1 подано результати дробового факторного експерименту типу 2^{3-1} . Обробка результатів ДФЕ здійснюється в такий самий спосіб, як і для повнофакторного експерименту (ПФЕ).

Таблиця 1

Результати ДФЕ типу 2^{3-1}

X_1	X_2	X_3	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}
5,0	40	5,33	0,91	1,44	1,81
10,0	40	0,89	0,68	0,79	0,98
5,0	80	0,89	0,76	0,82	1,25
10,0	80	5,33	1,82	2,87	3,61

Експериментальними зразками слугували ємнісні сенсори вологості двошарової структури, виготовлені на ситаловій підкладці. Для створення вологочутливого шару, який виконував би функцію діелектрика застосовано гігроскопічну сіль NaCl. Розчини цієї солі з концентраціями 0,89 моль/л та 5,33 моль/л наносились шляхом розпилення на поверхню ємнісних сенсорів вологості товщинами 5,0 мкм та 10,0 мкм. З метою запобігання випадіння точки роси створено захисний шар – це вологопоглинальна плівка поліметилметакрилату товщинами 40 мкм та 80 мкм.

Для поточних розрахунків використаємо 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 адсорбувального матеріалу C , моль/л; відгук моделі y – чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури S_C , нФ/%.

Спочатку проведемо статистичну обробку результатів факторного експерименту, яка передбачає розрахунок значень дисперсії у кожному експерименті D_j , сумарне D_Σ та максимальне D_{\max} значення дисперсії. На основі отриманих значень виконаємо оцінювання відтворюваності експерименту за критерієм Кохрена [9], використовуючи вирази (4) – (8):

$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^p (y_{ij} - y_j)^2}{p-1}, \quad (4)$$

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

$$D_\Sigma = \sum_{j=1}^N D_j, \quad (5)$$

$$D_{\max} = \max_j D_j. \quad (6)$$

Спостережуване значення критерію Кохрена:

$$G = \frac{D_{\max}}{D_\Sigma}. \quad (7)$$

На основі даних табл. 1 обчислюють середні значення відгуку моделі:

$$y_j = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{ji}. \quad (8)$$

На основі виразів (4) – (8) отримано такі значення: максимальне значення дисперсії – $D_{\max} = 0,8091$; сумарне значення дисперсії – $D_\Sigma = 1,1084$; спостережуване значення критерію Кохрена – $G \approx 0,730$.

Перейдемо до визначення табличного значення критерію Кохрена $G_{кр}$. За рівня значимості $\alpha = 0,05$, кількості ступенів вільності $m = p - 1 = 3 - 1 = 2$, отримуємо табличне значення критерію Кохрена – $G_{кр} = 0,768$. Факторний експеримент є відтворюваним, тому що $G < G_{кр}$ ($0,730 < 0,768$). За виразом (9) обчислимо оцінку дисперсії генеральної сукупності:

$$D = \frac{1}{N} \sum_j D_j, \quad (9)$$

Оцінка дисперсії генеральної сукупності набуває значення – $D = 0,2771$.

Тепер перетворимо вхідні змінні X_i , які змінюються в межах ($X_{i\min}$, $X_{i\max}$), в нові змінні x_i – в межах (-1, +1) за формулою [9]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta_i}, \quad (10)$$

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

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

Потім перетворимо початкові змінні в допоміжні, які змінюються в області (-1; +1), використовуючи формули (10):

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

Розробимо матрицю планування ДФЕ (табл. 2) та обчислимо коефіцієнти рівняння регресії, використовуючи формули [9]:

$$b_0 = \frac{\sum y_i}{N}, \quad b_k = \frac{\sum y_i x_{ik}}{N}, \quad k = 1, \dots, N-1. \quad (12)$$

Таблиця 2

Матриця планування ДФЕ

2^{3-1}	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1 x_2$	y_j
1	+	-	-	+	1,39
2	+	+	-	-	0,82
3	+	-	+	-	0,94
4	+	+	+	+	2,77

Обчислені коефіцієнти рівняння регресії за формулами (12) мають такі значення:

$$b_0 = 1,48; \quad b_1 = 0,32; \quad b_2 = 0,38; \quad b_3 = 0,6.$$

Рівняння регресії набуває вигляду:

$$y^{pez} = 1,48 + 0,32x_1 + 0,38x_2 + 0,6x_3. \quad (13)$$

На основі отриманого рівняння регресії (13) можна зробити висновок, що на відгук моделі найбільший вплив має фактор x_3 , тобто концентрація розчину солі NaCl, ніж фактори: x_1 – товщина вологочутливого шару та x_2 – товщина захисного шару. В області проведення експериментів отримане рівняння регресії ДФЕ можна використовувати для наближених розрахунків відгуку моделі.

Враховуючи те, що експеримент є відтворюваним, проведемо наступний етап статистичної обробки результатів. Тобто оцінимо значущість коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стьюдента. За формулою (14) обчислимо спостережуване значення критерію Стьюдента [9]:

$$t_j = |b_j| \sqrt{\frac{N \cdot p}{D}}, \quad (14)$$

За рівня значимості $\alpha = 0,05$, числа ступенів вільності $m = N \cdot (p-1) = 4 \cdot (3-1) = 8$, табличне значення критерію Стьюдента – $t_{кр} = 2,31$.

Перейдемо до оцінювання значущості коефіцієнтів b_j , які набувають таких значень, за формулою (14):

$$t_0 = 9,74 > t_{кр} = 2,31 \rightarrow b_0 \text{ є значущим}; \quad t_1 = 2,11 < t_{кр} = 2,31 \rightarrow b_1 \text{ є незначущим};$$

$$t_2 = 2,5 > t_{кр} = 2,31 \rightarrow b_2 \text{ є значущим}; \quad t_3 = 3,95 > t_{кр} = 2,31 \rightarrow b_3 \text{ є значущим};$$

$$y^{pez} = 1,48 + 0,38x_2 + 0,6x_3. \quad (15)$$

Оскільки в рівнянні регресії є незначущі коефіцієнти, проведемо наступний етап статистичної обробки результатів факторного експерименту. Перевіримо за критерієм Фішера адекватність отриманого рівняння регресії результатам ДФЕ. Спочатку розрахуємо дисперсію адекватності за формулою [9]:

$$D_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_i^{pez})^2}{N - L}, \quad (16)$$

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

L – кількість значущих коефіцієнтів лінійної регресії.

Спостережуване значення критерію Фішера обчислимо за формулою [9]:

$$F = \frac{D_{ad}}{D}. \quad (17)$$

Врахуємо відповідні значення факторів у рівнянні (15) та обчислимо значення відгуку моделі в кожному експерименті. В табл. 3 подано обчислені значення y^{pez} результатів експериментів:

Значення відгуку моделі в кожному експерименті

2^{3-1}	x_2	x_3	y	y^{pez}
1	-	+	1,39	1,7
2	-	-	0,82	0,5
3	+	-	0,94	1,26
4	+	+	2,77	2,46

Визначимо значення адекватності дисперсії за формулою (16), враховуючи, що $N = 4$, $L = 2$:

$$D_{ad} = 0,199 .$$

Значення критерію Фішера обчислене за формулою (17) має вигляд:

$$F = 0,72 .$$

Критичне значення критерію Фішера за рівня значимості $\alpha = 0,05$ і кількості ступенів вільності $m_1 = N \cdot (p-1) = 4 \cdot (3-1) = 8$ та $m_2 = p-1 = 3-1 = 2$ дорівнює

$$F_{кр} = 19,37 .$$

Оскільки $F < F_{кр}$ ($0,72 < 19,37$), рівняння регресії (15) є адекватним результатам факторного експерименту. В рівнянні регресії (15) фактори x_2 та x_3 в кодованому вигляді. Використаємо вирази (11) і розкодуємо рівняння регресії (15). Рівняння регресії в масштабі реальних факторів має такий вигляд:

$$y^{pez} = -0,501 + 0,019X_2 + 0,27X_3 . \quad (18)$$

За допомогою рівняння регресії в масштабі реальних факторів (18) можна здійснити оптимізацію параметрів виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі. Критерій оптимізації параметрів виготовлення вологочутливого та захисного шарів емнісного сенсора вологості двошарової структури – це чутливість. На основі проведених експериментів встановлено, що чутливість емнісного сенсора вологості двошарової структури залежить від таких факторів, як товщина захисного шару і концентрація розчину солі NaCl. На чутливість емнісного сенсора вологості двошарової структури суттєво впливає концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl. Найбільша чутливість 2,46 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Враховуючи те, що товщина вологочутливого шару суттєво не впливає на чутливість емнісного сенсора вологості, товщину цього шару можна взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

Висновки з цього дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі

1. Ефективним засобом одержання математичної моделі досліджуваного об'єкта є повний факторний експеримент за кількості факторів більше 3. Зі збільшенням кількості факторів суттєво збільшується як точність моделі, так й кількість експериментів. Збільшення кількості експериментів призводить до великих затрат часу та коштів, тому за таких обставин доцільно застосувати ДФЕ. Однак, для коректного дослідження об'єкта за допомогою ДФЕ потрібно застосувати широкий спектр теоретичних відомостей про досліджуваний об'єкт для того, щоб визначити взаємодії факторів, впливом яких можна знехтувати. Саме цю інформацію потрібно застосувати для побудови реплік заданої дробовості з метою побудови апроксимувального полінома.

2. Розроблено план дробового факторного експерименту типу 2^{3-1} з метою зменшення кількості дослідів. За критерієм Кохрена доведено, що ДФЕ є відтворюваним. Використовуючи критерій Стьюдента визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії. Адекватність результатам факторного експерименту скоригованого рівняння регресії доведена за допомогою критерію Фішера.

На основі рівняння регресії в масштабі реальних факторів встановлено, що чутливість емнісного сенсора вологості двошарової структури залежить від таких факторів, як товщина захисного шару і концентрація розчину солі NaCl. Однак, на чутливість емнісного сенсора вологості двошарової структури суттєво впливає концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl. Найбільша чутливість 2,46 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення емнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Враховуючи те, що товщина вологочутливого шару не впливає суттєво на чутливість емнісного сенсора вологості, товщину цього шару можна взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

3. В подальших дослідженнях планується застосувати план дробового факторного експерименту за кількості факторів більше 3.

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. Крилик Л. В. Практичне застосування регресійного аналізу для оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури / Л. В. Крилик // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 3(321). – С. 109–114.
7. Павлюк К. В. Методичні підходи до розроблення нормативів і оцінки науково-дослідної праці на основі багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу / К. В. Павлюк // Наукові праці НДФІ. – 2020. – № 3(92). – С. 5–19.
8. Кучернюк П. В. Модель загроз безпеки в інформаційно-комунікаційних системах на основі регресійного аналізу / П. В. Кучернюк, А. О. Довгаль // Інформаційні та телекомунікаційні системи та технології, захист інформації. – 2017. – Вип. 22, № 2. – С. 79–84.
9. Стеценко І. В. Моделювання систем / І. В. Стеценко. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.
10. Горват А. А. Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel : навч. посіб. / А. А. Горват, О. О. Молнар, В. В. Мінкович. – Ужгород : Видавництво УжНУ «Говерла», 2019. – 160 с.
11. Гришук Ю. С. Основи наукових досліджень : навч. посіб. / Ю. С. Гришук. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – 232 с.

References

1. Hotra Z. Yu. Mikroelektronni sensory fizychnykh velychyn. Tom 2 / Z. Yu. Hotra. – Lviv : Liha-Pres, 2003. – 595 s.
2. Osadchuk V. S. Sensory volohosti / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2003. – 208 s.
3. Osadchuk V. S. Doslidzhennia yemnisnykh volohochutlyvykh elementiv / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk VPI. – 2002. – №5. – S. 65–71.
4. 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 tekhnologii. Mizhnarodnyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal. – 2006. – №2(12). – S. 222–227.
5. Osadchuk O. V. Matematychna model mikroelektronnoho avtoheneratornoho zasobu dlia vymiruvannia 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. – T. 32(71), № 4. – S. 289–296.
6. Krylyk L. V. Praktychne zastosuvannia rehresiinoho analizu dlia otsiniuvannia vplyvu faktoriv na chutlyvist yemnisnoho sensora volohosti dvoosharovoї struktury / L. V. Krylyk // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: «Tekhnichni nauky». – 2023. – № 3(321). – S. 109–114.
7. Pavliuk K. V. Metodychni pidkhody do rozroblennia normatyviv i otsinky naukovo-doslidnoi pratsi na osnovi bahatofaktornoho koreliatsiino-rehresiinoho analizu / K. V. Pavliuk // Naukovi pratsi NDFI. – 2020. – № 3(92). – S. 5–19.
8. 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 tekhnologii, zakhyst informatsii. – 2017. – Vyp. 22, №2. – S. 79–84.
9. Stetsenko I. V. Modeliuvannia system / I. V. Stetsenko. – Cherkasy : ChDTU, 2010. – 399 s.
10. Horvat A. A. Metody obrobky eksperymentalnykh danykh z vykorystanniam MS Excel : navch. posib. / A. A. Horvat, O. O. Molnar, V. V. Minkovych. – Uzhhorod : Vydavnytstvo UzhNU «Hoverta», 2019. – 160 s.
11. Hryshchuk Yu. S. Osnovy naukovykh doslidzhen: navch. posib. / Yu. S. Hryshchuk. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2008. – 232 s.