

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

5.2022

---

# ВІСНИК

**Хмельницького**

**національного**

**університету**

**Технічні науки**

---

**Technical sciences**

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2022, Issue 5, Volume 313

Хмельницький

**ВІСНИК  
ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
серія: Технічні науки**

Затверджений як фахове видання категорії «Б»,  
РІШЕННЯ АТЕСТАЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ № 1643 ВІД 28.12.2019 та №409 від 17.03.2020

*Засновано в липні 1997 р.*

*Виходить 6 разів на рік*

---

**Хмельницький, 2022, № 5(313)**

---

**Засновник і видавець: Хмельницький національний університет  
(до 2005 р. – Технологічний університет Поділля, м. Хмельницький)**

Наукова бібліотека України ім. В.І. Вернадського [http://nbuv.gov.ua/j-tit/Vchnu\\_tekh](http://nbuv.gov.ua/j-tit/Vchnu_tekh)

Включено до науково-метричних баз:

<b>Google Scholar</b>	<a href="http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aUP9OYAAAAAJ">http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aUP9OYAAAAAJ</a>
<b>Index Copernicus</b>	<a href="http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&amp;id_lang=3">http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&amp;id_lang=3</a>
<b>Polish Scholarly Bibliography</b>	<a href="https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221">https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221</a>
<b>CrossRef</b>	<a href="http://doi.org/10.31891/2307-5732">http://doi.org/10.31891/2307-5732</a>

<b>Головний редактор</b>	<b>Скиба М. Є.</b> , д.т.н., професор, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету
<b>Заступник головного редактора</b>	<b>Синюк О. М.</b> , д.т.н., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету
<b>Відповідальний секретар</b>	<b>Горященко С. Л.</b> , к.т.н., доцент кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету

**Ч л е н и р е д к о л е г і ї**

*Технічні науки*

**Березненко С.М.**, д.т.н., **Бойко Ю.М.**, д.т.н., **Говорущенко Т.О.**, д.т.н., **Гордєєв А.І.**, д.т.н., **Горященко С. Л.**, к.т.н., **Грабко В.В.**, д.т.н., **Диха О.В.**, д.т.н., **Защепкіна Н.М.**, д.т.н., **Рубаненко О. О.**, д.т.н., **Захаркевич О.В.**, д.т.н., **Злотенко Б.М.**, д.т.н., **Зубков А.М.**, д.т.н., **Каплун П.В.**, д.т.н., **Карташов В.М.**, д.т.н., **Кичак В.М.**, д.т.н., **Любош Хес**, д.т.н., (Чехія), **Мазур М.П.**, д.т.н., **Мандзюк І.А.**, д.т.н., **Мартинюк В.В.**, д.т.н., **Мельничук П.П.**, д.т.н., **Місяць В.П.**, д.т.н., **Малогоулко Ю. В.**, к.т.н., **Мясіщев О.А.**, д.т.н., **Нелін Є.А.**, д.т.н., **Павлов С.В.**, д.т.н., **Параска О.А.**, д.т.н., **Рогатинський Р.М.**, д.т.н., **Горошко А.В.**, д.т.н., **Сарібекова Ю.Г.**, д.т.н., **Семенко А.І.**, д.т.н., **Славінська А.Л.**, д.т.н., **Харжевський В.О.**, д.т.н., **Шинкарук О.М.**, д.т.н., **Шклярський В.І.**, д.т.н., **Щербань Ю.Ю.**, д.т.н., **Бубулєс Альгімантас**, доктор наук (Литва), **Елсаєд Ахмед Ельнашар**, доктор наук (Єгипет), **Кальчинські Томаш**, доктор наук (Польща), **Лунтовський Андрій**, д.т.н. (Німеччина), **Матушевський Мацей**, доктор наук (Польща), **Мушлевський Лукаш**, доктор наук (Польща), **Мушял Януш**, доктор наук (Польща), **Натріашвілі Тамаз Мамієвич**, д.т.н., (Грузія), **Попов Валентин**, доктор природничих наук (Німеччина)

<i>Технічний редактор</i>	Горященко К. Л., к.т.н.
<i>Редактор-коректор</i>	Броженко В. О.

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,  
протокол № 3 від 27.10.2022 р.**

**Адреса редакції:** редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету"  
Хмельницький національний університет  
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

<b>☎</b>	(038-2) 67-51-08	<b>web:</b>	<a href="http://journals.khnu.km.ua/vestnik">http://journals.khnu.km.ua/vestnik</a>
<b>e-mail:</b>	<a href="mailto:visnyk.khnu@khmnu.edu.ua">visnyk.khnu@khmnu.edu.ua</a>		<a href="http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm">http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm</a>

Зареєстровано Міністерством України у справах преси та інформації.  
Свідцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
**Серія КВ № 24922-14862ПР від 12 липня 2021 року**

© Хмельницький національний університет, 2022  
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2022

## ЗМІСТ

<b>ОЛІЙНИК Г.</b> ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЛАКОФАРБОВОЇ ПРОДУКЦІЇ МАРКИ «BECKERS» .....	9
<b>БОЙКО С., КОТОВ О., ВИШНЕВСЬКИЙ С., ЩОКІН В., ГУСАРОВА О.</b> АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ АВІАЦІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ .....	13
<b>ГУНЬКО І.В., ГРИБИК Р.І.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ГРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ З РОЗРОБКОЮ РЕКОМЕНДАЦІЇ ПІДБОРУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ .....	18
<b>БАСИСТЮК О., МЕЛЬНИКОВА Н.</b> МУЛЬТИМОДАЛЬНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ЗВУКОВИХ І ТЕКСТОВИХ ДАНИХ .....	22
<b>ЄФРЕМОВА О., ІВАНШЕНА Т., ПІЩУК Т., ТРУХІНА О., ЄФРЕМОВА Ю.</b> СУЧАСНИЙ СТАН ПОВОДЖЕННЯ З ПОЛІМЕРНИМИ ВІДХОДАМИ .....	26
<b>БАБИЧ А., КЕРНЕС В., ТКАЧЕНКО Д.</b> ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ 3D ДРУКУ В ДИЗАЙНІ ЧОЛОВІЧОГО КОСТЮМУ .....	32
<b>БАБИЧ А., ГАРАНІНА О., МОСКОВА О.</b> ФОРМУВАННЯ АСОРИМЕНТУ ЧОЛОВІЧОГО ВЗУТТЯ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМИ І КОЛЬОРУ НА ОСНОВІ МАРКЕТИНГОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	37
<b>КАМІНСЬКИЙ Р., ШАХОВСЬКА Н., ХУДОБА Б.</b> ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ГРУПУВАННЯ ОПЕРАТОРСЬКОГО ПЕРСОНАЛУ ПОШУКОВИХ СИСТЕМ В СЕНСІ СТРЕСОСТІЙКОСТІ .....	42
<b>МИРОНІУК О., БАКЛАН Д., ГЛУХОВСЬКИЙ В.</b> ОСОБЛИВОСТІ ЗМОЧУВАННЯ ГІДРОФОБІЗОВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ТЕКСТУРОВАНИХ ФЕМТОСЕКУНДНИМ ЛАЗЕРОМ .....	52
<b>НОВОСАД М.-Р.</b> АСИСТЕНТ ПАРКУВАННЯ ЯК МОДУЛЬ СИСТЕМИ РОЗУМНОГО МІСТА .....	56
<b>ПЕДЯШ В.</b> МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ОТН З КВАДРАТУРНОЮ АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ .....	61
<b>МИХАЙЛОВА Н., ПРИВАЛА В.</b> ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА СПЕЦІАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ІЗОЛЮЮЧИХ КОСТЮМІВ .....	66
<b>БОЛОТІНА В.</b> АНАЛІЗ НАЯВНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ НАУКОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ СПІВРОБІТНИКІВ ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ .....	71
<b>ДАНИЛКОВИЧ А., САНГІНОВА О.</b> ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНЕ ФОРМУВАННЯ ЛИМАРНО-СІДЕЛЬНОЇ ШКІРИ .....	77
<b>СОКОЛАН Ю., МІЛЬКО В., ТКАЧУК В., СОКОЛАН К.</b> РОЗРОБКА САЕ-СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ЗНОШУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ В УМОВАХ ПЕРЕКОСУ ОСЕЙ ВАЛА І ВТУЛКИ .....	82

<b>КАТЕНІН В., САМОЙЛЕНКО Н.</b> СУЧАСНИЙ СТАН ОПЕРАЦІЙ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ В УКРАЇНІ .....	89
<b>ШЛІНГ А., ПАСЬКО А.</b> РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СЛОВНИКА ДЛЯ ЧАТ-БОТУ КАТАЛОГУ ОСВІТНИХ ПОСЛУГ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ .....	94
<b>БАБІЙ С., МОШНОРІЗ М., ПРОЦЕНКО Д., ПАЯНОК О., ЖУКОВ О.</b> МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДЙОМНОЇ ЛЕБІДКИ КРАНА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB .....	99
<b>БАГРІЙ О.</b> ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІТЕРАЦІЙНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПЛОСКОЇ ФІЗИЧНО НЕЛІНІЙНОЇ ЗАДАЧІ .....	108
<b>БОЙКО Ю., ПЯТІН І., МОКРИЦЬКИЙ А.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ .....	113
<b>КРИЛИК Л.</b> ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ З МЕТОЮ ЯКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ .....	122
<b>ГАЛИШ В., РАДОВЕНЧИК Я., ГОМЕЛЯ М., РАДОВЕНЧИК В.</b> ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ПІДСІТКОВИХ ВОД ДЛЯ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ В ЦЕЛЮЛОЗНО-ПАПЕРОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ .....	128
<b>ГОРДІЄНКО К., РАДОВЕНЧИК Я., КРИСЕНКО Т., РАДОВЕНЧИК В.</b> ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИСАДЖЕННЯ ІОНІВ КАЛЬЦІЮ З РОЗВЕДЕНИХ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ У ВИГЛЯДІ ФОСФАТІВ .....	134
<b>ГОРОХОВ І., КУЛІШ І., АСАУЛЮК Т., САРІБЄКОВА Ю.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ АНТИМІКРОБНОЇ ОБРОБКИ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИГНІЧУВАННЯ БАКТЕРІАЛЬНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ІЗ ДОВКІЛЛЯ .....	141
<b>ГОРОХОВ І., КУЛІШ І., АСАУЛЮК Т., САРІБЄКОВА Ю.</b> ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБРОБКИ АНТИМІКРОБНИМИ СКЛАДАМИ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ПОБУТІ ТА ГРОМАДСЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ .....	146
<b>ЗАЛЮБОВСЬКИЙ М., ПАНАСЮК І.</b> РОЗРОБКА ВИСОКОПРОДУКТИВНОЇ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ ЗІ СКЛАДНИМ ПРОСТОРОВИМ РУХОМ ДВОХ РОБОЧИХ ЄМКОСТЕЙ .....	152
<b>ЗАСПА Ю.</b> АНТИСИМЕТРІЯ ТА КАВІТАЦІЙНІ ТОПОЛОГІЧНІ РОЗРИВИ КОМПЛЕКСНОГО ПРОСТОРУ Й ІНЕРТНОЇ МАСИ В ОСНОВІ ЕКСИМЕРНИХ СИСТЕМ КВАНТОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ОБМІННОГО ІНЕРЦІЙНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ. МОНОМЕРНА РІВНОВАГА ТА УТВОРЕННЯ РЕЧОВИНИ ....	159
<b>КОВАЛЬ В., ОРОБЧУК Б., ОСАДЦА Я., КОСТИК Л.</b> АВТОМАТИЗОВАНА ВИМІРЮВАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ .....	168
<b>КРИВЕНЧУК Ю., ВАСИЛИК Р.</b> РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕРАКТИВНОГО ГРАФІЧНОГО ЗАСТОСУНКУ КОЛЬОРИЗАЦІЇ ЗОБРАЖЕННЯ	174
<b>КУДЛАЙ С., БОНДАРЕНКО Н., БОНДАРЕНКО В.</b> ПОБУДОВА ТА ВЕРІФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОГО ЕКВАЛІЗЕРА .....	178
<b>ПЕЛИК Л., ОСТАПЧУК О., ПЕЛЕХ Ю.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗМІШАНИХ ТКАНИН ДЛЯ СПЕЦОДЯГУ ТИПУ «RIPSTOP» .....	185

КРИЛИК Людмила

Вінницький національний технічний університет

ORCID ID: 0000-0001-6642-754X

e-mail: [lyudmila.krylik@gmail.com](mailto:lyudmila.krylik@gmail.com)

## ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОФАКТОРНОГО ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ З МЕТОЮ ЯКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА ВОЛОГОСТІ

З метою якісного оцінювання впливу на чутливість ємнісного сенсора вологості таких факторів як товщина вологочутливого шару, концентрація розчину солі NaCl, як адсорбуючого матеріалу та їх сумісного впливу, застосовано багатofакторний дисперсійний аналіз. Розроблено багатofакторний план у випадку двох якісних факторів. Результати досліджень отримано на основі порівняння факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Порівняння факторної та залишкової дисперсії проводилось за величиною критерію Фішера. Використовуючи багатofакторний дисперсійний аналіз встановлено, що на відгук моделі, а саме чутливість ємнісного сенсора вологості вагомий вплив має фактор – концентрація розчину солі NaCl. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера, а саме  $22,77 > 4,75$  ( $F > F_{кр}$ ). Вплив таких факторів як товщина вологочутливого шару та сумісний вплив товщини вологочутливого шару та концентрації розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора. Використовуючи дисперсійний аналіз впливу фактора доведено, що незалежно від конструктивного виконання ємнісних сенсорів вологості, концентрація розчину солі, яку використано для створення вологочутливого шару суттєво впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості.

Ключові слова: багатofакторний дисперсійний аналіз, фактор, відгук моделі, критерій Фішера, чутливість, ємнісний сенсор вологості.

KRYLIK Lyudmila

Vinnytsia National Technical University

## APPLICATION OF MULTIFACTOR DISPERSION ANALYSIS WITH THE PURPOSE OF QUALITATIVE ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR

In order to qualitatively assess the influence of such factors as the thickness of the moisture-sensitive layer, the concentration of the NaCl salt solution as an adsorbing material and their combined effect on the sensitivity of the capacitive humidity sensor, a multivariate dispersion analysis was used. Capacitive humidity sensors served as experimental samples. Capacitive humidity sensors are made on a  $0.7 \times 0.9$  mm sital substrate. A copper film is applied to the surface of the sital substrate, which forms the covers of the capacitive humidity sensors in the form of a meander with the appropriate geometry of  $7.85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1.2 \cdot 10^{-6}$  m. In such a design, the moisture-sensitive layer is hygroscopic salt, which serves as a dielectric. To create a moisture-sensitive film, solutions of hygroscopic salt NaCl with concentrations of 0.89 mol/l and 5.33 mol/l were used. They were applied to the surface of capacitive humidity sensors with a spray gun at a distance of 40-50 cm with thicknesses of 5.0  $\mu$ m and 10.0  $\mu$ m. A multifactor plan was developed in the case of two qualitative factors. The research results were obtained on the basis of the comparison of the factor variance, which is due to the influence of the factor, and the residual variance, which is due to the influence of random causes. Factorial and residual variance were compared using the value of Fisher's test. Using multivariate dispersion analysis, it was found that the concentration of the NaCl salt solution has a significant influence on the response of the model, namely the sensitivity of the capacitive humidity sensor. In this case, the value of Fisher's criterion observed in the experiment significantly exceeds the critical value of Fisher's criterion, namely  $22.77 > 4.75$  ( $F > F_{cr}$ ). The influence of such factors as the thickness of the moisture-sensitive layer and the combined effect of the thickness of the moisture-sensitive layer and the concentration of the salt solution is insignificant, i.e. the difference in the response values of the model is related to its random nature rather than to the change in the value of the factor. Using the dispersion analysis of the influence of the factor, it was proved that regardless of the design of the capacitive humidity sensors, the concentration of the salt solution used to create the moisture-sensitive layer significantly affects the sensitivity of the capacitive humidity sensor.

Keywords: multivariate variance analysis, factor, model response, Fisher criterion, sensitivity, capacitive humidity sensor.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Як відомо, сучасне виробництво потребує точного та якісного виконання технології виробництва та широкого застосування автоматизації виробничих процесів. Ефективність засобів технічної діагностики, приладів контролю, систем перевірки якості продукції, контролю параметрів довкілля тощо, передусім, залежить від якості первинних перетворювачів, які є основними чутливими органами виміральної апаратури. Важливою різновидністю яких є сенсори вологості [1–6]. Крім того, якість управління такою складною системою, значно зростає при застосуванні математичної статистики як інструменту дослідницької роботи.

Застосування методів математичної статистики сприяє систематизації, обробці та аналізу результатів явищ, які спостерігаються. Статистичні моделі широко використовують для діагностики стану об'єктів дослідження, при вивченні причинно-наслідкового механізму та динаміки досліджуваних явищ і

процесів, моніторингу кон'юнктури ринку, при прогнозуванні та прийнятті різного кола рішень. До найважливіших розділів математичної статистики відносять: статистичні ряди розподілу, оцінення параметрів розподілу, закони розподілу вибіркового характеру, дисперсійний, регресійний, кореляційно-регресійний аналіз тощо [7–14].

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

В теорії планування експерименту виділяють тактичне та стратегічне планування. Тактичне планування допомагає визначити умови проведення одного експерименту, а стратегічне планування – серії експериментів. Стратегічне планування факторних експериментів передбачає застосування як регресійного аналізу, так і дисперсійного аналізу. Регресійний аналіз та дисперсійний аналіз є сукупністю статистичних методів. Однак, регресійний аналіз забезпечує кількісне оцінювання впливу фактора. Такий тип аналізу допомагає визначити, який з факторів спричиняє найбільший вплив, а який найменший вплив. І взагалі як потрібно змінювати значення факторів, щоб досягти збільшення або зменшення значення відгуку моделі на задану величину. Тобто, застосовуючи регресійний аналіз можна оптимізувати параметри виготовлення як пристроїв, так і технологічних процесів в різних сферах промислової індустрії [7–10, 14].

Дисперсійний аналіз спочатку був розроблений для статистичної обробки агрономічних дослідів [11]. Нині він широко застосовується в різних сферах діяльності людини [12–14]. У спеціальній літературі дисперсійний аналіз часто називають ANOVA (від англійської назви *analysis of variance*). Вперше цей метод було розроблено Р. Фішером в 1925 р. Дисперсійний аналіз застосовується для якісного оцінювання впливу факторів.

Метою дисперсійного аналізу є визначення впливу фактора на рівні «впливає» або «не впливає». Основне запитання, на яке дає відповідь дисперсійний аналіз впливу фактора, формулюється так: різниця у значеннях відгуку моделі, отриманих при різних значеннях фактора обумовлена випадковістю чи пояснюється виключно дією фактора? Розрізняють однофакторний та багатофакторний дисперсійний аналіз. Однофакторний дисперсійний аналіз виконується для з'ясування впливу одного фактора на відгук моделі (результат) у випадках, коли неможливо провести порівняльні спостереження вихідної величини при наявності фактора і без нього (контрольна група) та набрати відповідні статистичні дані.

Крім того, на практиці виникає потреба дослідити вплив декількох факторів. Результат можна отримати, дослідивши вплив кожного фактора окремо. Але кількість експериментів при такому підході швидко зростає зі збільшенням кількості факторів, щоб уникнути цього проводять експерименти за багатофакторними планами з урахуванням сумісного впливу факторів [12, 14].

Отже, розробка багатофакторного плану експерименту у випадку якісних факторів є актуальною задачею.

### Постановка завдання

Метою роботи є застосування дисперсійного аналізу для оцінювання якісного впливу на чутливість ємнісного сенсора вологості таких факторів:

- товщини вологочутливого шару;
- концентрації розчину солі, як адсорбуючого матеріалу;
- сумісного впливу товщини вологочутливого шару та концентрації розчину солі.

Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі:

- 1) провести аналіз наукових джерел та обґрунтувати доцільність застосування багатофакторного експерименту у випадку якісних факторів;
- 2) розробити багатофакторний план експерименту у випадку якісних факторів;
- 3) використовуючи дисперсійний аналіз впливу фактора провести оцінювання впливу таких факторів: товщини вологочутливого шару; концентрації розчину солі, як адсорбуючого матеріалу; сумісного впливу товщини вологочутливого шару та концентрації розчину солі на чутливість ємнісного сенсора вологості;
- 4) зробити висновки з проведених досліджень.

### Виклад основного матеріалу

Експериментальними зразками слугували ємнісні сенсори вологості (м. Вінниця, Україна, ВНТУ). Досліджувалась залежність чутливості ємнісних сенсорів вологості від впливу таких факторів: товщини вологочутливого шару, концентрації розчину солі (гігроскопічна сіль NaCl) та сумісного впливу товщини вологочутливого шару та концентрації розчину солі.

Ємнісні сенсори вологості виготовлені на ситаловій підкладці розміром 0,7×0,9 мм. На поверхні ситалової підкладки нанесена плівка міді, яка утворює обкладки ємнісних сенсорів вологості у вигляді меандру з відповідною геометрією  $7,85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1,2 \cdot 10^{-6}$  м [4]. В такій конструкції вологочутливим шаром є гігроскопічна сіль, яка слугує діелектриком. Для створення вологочутливої плівки використовувались розчини гігроскопічної солі NaCl з концентраціями 0,89 моль/л та 5,33 моль/л, які наносились на поверхню ємнісних сенсорів вологості пульверизатором на відстані 40 – 50 см товщинами 5,0 мкм та 10,0 мкм.

Для розрахунків використаємо такі позначення: фактор  $A$  – товщина вологочутливого шару  $d$ , мкм;  $A_1$  – нижній рівень фактора  $A$ ;  $A_2$  – верхній рівень фактора  $A$ ; фактор  $B$  – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу  $C$ , моль/л;  $B_1$  – нижній рівень фактора  $B$ ;  $B_2$  – верхній рівень фактора  $B$ ;  $AB$  – сумісний вплив фактора  $A$  та фактора  $B$ ; відгук моделі  $y$  – чутливість ємнісного сенсора вологості  $S_C$ , пФ/%.

Для двох факторів кількість експериментів буде  $2^2$ , тобто  $N = 4$ .

Потрібно провести оцінювання впливу факторів  $A$ ,  $B$  та  $AB$  на чутливість ємнісного сенсора вологості за такими даними факторного експерименту (табл. 1):

Таблиця 1

**Результати факторного експерименту**

	$d = 5,0$ мкм	$d = 10,0$ мкм
$C = 0,89$ моль/л	5,2; 4,8; 6,7; 7,8	6,1; 5,0; 7,5; 8,4
$C = 5,33$ моль/л	10,1; 16,2; 25,3; 30,7	32,5; 28,1; 38,5; 49,0

Для кожного фактора маємо два рівня, отже  $q = 2$  та вісім прогонів, тобто  $p = 8$ . Результати експериментів, які подано в таблиці, відповідають багатофакторному плану у випадку двох якісних факторів (табл. 2).

Таблиця 2

**Результати багатофакторного плану у випадку двох якісних факторів**

$2^2$	$A_1$	$A_2$	Дисперсійний аналіз	
			дисперсія	кількість ступенів вільності
$B_1$	5,2; 4,8; 6,7; 7,8	6,1; 5,0; 7,5; 8,4	фактор $A$ фактор $B$ фактор $AB$	1 1 1
$B_2$	10,1; 16,2; 25,3; 30,7	32,5; 28,1; 38,5; 49,0	залишкова	15-3=12
	$p = 8$	$N_{np} = 16$	загальна	16-1=15

Для оцінювання впливу факторів проведемо багатофакторний дисперсійний аналіз. Основна ідея дисперсійного аналізу полягає в порівнянні факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Якщо різниця між цими дисперсіями значна, то фактор здійснює вплив на відгук моделі  $y$ .

Для цього розраховують значення факторної дисперсії  $S_{факт}$ , залишкової дисперсії  $S_{залиш}$  за такими формулами [14]:

$$S_{факт} = p \cdot \sum_{j=1}^2 (\bar{y}_j - \bar{y})^2, \tag{1}$$

$$S_{залиш} = \sum_{i=1}^p (y_{i1} - \bar{y}_1)^2 + \sum_{i=1}^p (y_{i2} - \bar{y}_2)^2, \tag{2}$$

де  $y_j$  – спостереження відгуку моделі в  $j$ -ому експерименті;

$y_{i1}, y_{i2}$  –  $i$ -е спостереження відгуку моделі нижнього та верхнього рівня факторів.

Середні значення спостережень обчислюються за такими формулами [14]:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{ij}, \quad \bar{y} = \sum_{j=1}^2 \bar{y}_j. \tag{3}$$

Факторна  $d_{факт}$  та залишкова дисперсії  $d_{залиш}$  з врахуванням кількості ступенів вільності обчислюються за формулами [14]:

$$d_{факт} = S_{факт}, \quad d_{залиш} = \frac{S_{залиш}}{2 \cdot (p-1)}. \tag{4}$$

У формулах (4) в знаменнику виразу стоїть кількість ступенів вільності. Порівняння факторної та залишкової дисперсії, які спостерігаються в експерименті проводять за величиною критерію Фішера [14]:

$$F = \frac{d_{факт}}{d_{залиш}}. \tag{5}$$

Оцінювання впливу факторів  $A$ ,  $B$  та  $AB$  за дисперсійним аналізом будемо проводити за виразами

(1) – (5).

Для фактора  $A$  маємо такі розрахунки:

$$\overline{y_{A_1}} = 13,35; \quad \overline{y_{A_2}} = 21,888; \quad \overline{y_A} = 17,619;$$

$$S_{\text{факт}} = 291,58978; \quad S_{\text{залиш}} = 2762,68875;$$

$$d_{\text{факт}} = S_{\text{факт}} = 291,58978; \quad d_{\text{залиш}} = \frac{S_{\text{залиш}}}{12} = 230,22406.$$

Потрібно зауважити, що в знаменнику залишкової дисперсії стоїть кількість ступенів вільності 12, а не 14, як в однофакторному дисперсійному аналізі.

Значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті:

$$F = 1,27.$$

Критичне значення критерію Фішера (при кількості ступенів вільності знаменника 12):

$$F_{\text{кр}} = 4,75.$$

Оскільки  $F < F_{\text{кр}}$  ( $1,27 < 4,75$ ), то вплив фактора  $A$  є незначущим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора.

Для фактора  $B$  маємо такі результати:

$$\overline{y_{B_1}} = 6,438; \quad \overline{y_{B_2}} = 28,8; \quad \overline{y_B} = 17,619;$$

$$S_{\text{факт}} = 2000,23618; \quad S_{\text{залиш}} = 1053,91875;$$

$$d_{\text{факт}} = S_{\text{факт}} = 2000,23618; \quad d_{\text{залиш}} = 87,82656.$$

Для багатфакторного плану у випадку двох якісних факторів кількість ступенів вільності 12.

Значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті:

$$F \square 22,77.$$

Критичне значення критерію Фішера (при кількості ступенів вільності знаменника 12):

$$F_{\text{кр}} = 4,75.$$

Оскільки  $F > F_{\text{кр}}$  ( $22,77 > 4,75$ ), то вплив фактора  $B$  є значущим. Різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана зі зміною значення фактора і не може бути спричинена тільки її випадковим характером.

Для фактора  $AB$  отримано такі значення:

$$\overline{y_{AB_1}} = 21,575; \quad \overline{y_{AB_2}} = 13,663; \quad \overline{y_{AB}} = 17,619;$$

$$S_{\text{факт}} = 250,39898; \quad S_{\text{залиш}} = 2803,81375;$$

$$d_{\text{факт}} = S_{\text{факт}} = 250,39898; \quad d_{\text{залиш}} = 233,65115.$$

Для багатфакторного плану у випадку двох якісних факторів кількість ступенів вільності 12.

Значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті:

$$F = 1,07.$$

Критичне значення критерію Фішера (при кількості ступенів вільності знаменника 12):

$$F_{\text{кр}} = 4,75.$$

Оскільки  $F < F_{\text{кр}}$  ( $1,07 < 4,75$ ), то вплив фактора  $AB$  є незначущим.

Результати досліджень отримано на основі порівняння факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Порівняння факторної та залишкової дисперсії проводилось за величиною критерію Фішера. Використовуючи багатфакторний дисперсійний аналіз встановлено, що на відгук моделі, а саме чутливість ємнісного сенсора вологості вагомий вплив має фактор  $B$  – концентрація розчину солі  $\text{NaCl}$ . В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера, а саме  $22,77 > 4,75$  ( $F > F_{\text{кр}}$ ). Вплив факторів  $A$ ,  $AB$ , а саме товщини вологочутливого шару та сумісного впливу товщини вологочутливого шару і концентрації розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора ( $F < F_{\text{кр}}$ ).

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Встановлено, що методи математичної статистики сприяють систематизації, обробці та аналізу результатів досліджуваних явищ. До найважливіших розділів математичної статистики відносять:



статистичні ряди розподілу, оцінка параметрів розподілу, закони розподілу вибірових характеристик, дисперсійний, регресійний, кореляційно-регресійний аналіз тощо. Дисперсійний аналіз застосовується для якісного оцінювання впливу факторів. Використовуючи його в багатофакторному аналізі явищ, які виникають при проведенні різного роду технологічних процесів, а також у дослідницькій роботі можна отримати реальну картину, що демонструє вплив кожного фактора в різних умовах, які створюються змінами різних за своєю природою факторів. Крім того, дисперсійний аналіз дає змогу об'єктивно пояснити складну взаємодію таких факторів.

2. Використовуючи дисперсійний аналіз впливу фактора доведено, що незалежно від конструктивного виконання ємнісних сенсорів вологості, концентрація розчину солі, яку використано для створення вологочутливого шару суттєво впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості. Результати досліджень отримано на основі порівняння факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Порівняння факторної та залишкової дисперсії проводилось за величиною критерію Фішера. Використовуючи багатофакторний дисперсійний аналіз встановлено, що на відгук моделі, а саме чутливість ємнісного сенсора вологості вагомий вплив має фактор  $B$  – концентрація розчину солі NaCl. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера, а саме  $22,77 > 4,75$  ( $F > F_{кр}$ ). Вплив факторів  $A$ ,  $AB$ , а саме товщини вологочутливого шару та сумісного впливу товщини вологочутливого шару і концентрації розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора ( $F < F_{кр}$ ).

3. В подальших дослідженнях планується застосувати багатофакторний експеримент у випадку трьох якісних факторів. Експериментальним зразком слугуватиме ємнісний сенсор вологості з двошаровою структурою, нижнім шаром є гігроскопічна сіль, а верхнім – полімер.

### 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 резистивних вологочутливих елементів / В. С. Осадчук, Л. В. Крилик // Вісник ВПІ. – 2001. – №6. – С. 148–152.
4. 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.
5. 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.
6. Осадчук О. В. Ємнісні сенсори вологості на основі стибій або бісмутовмісних діоксидів ніколу (II) / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 1(221). – С. 131 – 135.
7. Ляшок А. В. Планування багатофакторного експерименту при дослідженні процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі / А. В. Ляшок // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2013. – № 3. – С. 13–17.
8. 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.
9. Аксьончиков С. О. Регресійний аналіз тенденцій розвитку кібератак / С. О. Аксьончиков, І. В. Ємельянова, 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.
10. 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.
11. Самарець Н. М. Використання інформаційних технологій у статистичному аналізі даних для аграрних підприємств / Н. М. Самарець, Є. М. Харченко, Н. О. Чорна // АГРОСВІТ. – 2013. – № 20. – С. 14–20.
12. Шуть О. Теоретико-методологічні аспекти статистичних досліджень / О. Шуть // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Економіка і управління». – 2012. – Вип. 22–21, Ч. 2. – 305–311.
13. Єріна А. М. Поєднання моделей регресійного і дисперсійного аналізу в соціально-економічних дослідженнях/ А. М. Єріна // Наукові записки НаУКМА. Серія: Економічні науки. – 2000. – Том 18. – С.12–17.
14. Стеценко І. В. Моделювання систем / І. В. Стеценко. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 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 rezystyvnykh volohochutlyvykh elementiv / V. S. Osadchuk, L. V. Krylyk // Visnyk VPI. – 2001. – №6. – S.148–152.
4. 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.
5. 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 naukovo-tekhnichnyi zhurnal. – 2006. – № 2(12). – S. 222–227.
6. Osadchuk O. V. Yemnisni sensory volohosti na osnovi stybii abo bismutvmsnykh dioksymativ nikolu (II) / O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, M. V. Yevsieieva // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – 2015. – № 1(221). – S. 131 – 135.
7. Liashok A. V. Planuvannia bahatofaktornoho eksperymentu pry doslidzhenni protsesu ultrazvukovoho rozpylennia v tonkomu shari / A. V. Liashok // Visnyk NTUU «KPI». Serii mashynobuduvannia. – 2013. – №3. – S. 13–17.
8. 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.
9. Aksonchikov S. O. Rehresiinyi analiz tendentsii rozvytku kiberatak / S. O. Aksonchikov, I. 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. – S. 5–13.
10. 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, zakhyt informatsii. – 2017. – Vyp. 22, №2. – S. 79–84.
11. Samarets N. M. Vykorystannia informatsiinykh tekhnolohii u statystychnomu analizi danykh dlia ahramykh pidpryiemstv / N. M. Samarets, Ye. M. Kharchenko, N. O. Chorna // AHROSVIT. – 2013. – № 20. – S. 14–20.
12. Shut O. Teoretyko-metodolohichni aspekty statystychnykh doslidzen / O. Shut // Zbirnyk naukovykh prats DETUT. Serii «Ekonomika i upravlinnia». – 2012. – Vyp. 22–21, Ch. 2. – 305–311.
13. Yerina A. M. Poiednannia modelei rehresiinoho i dyspersiinoho analizu v sotsialno-ekonomichnykh doslidzhenniakh/ A. M. Yerina // Naukovi zapysky NaUKMA. Serii: Ekonomichni nauky. – 2000. – Tom 18. – S.12–17.
14. Stetsenko I. V. Modeliuvannia system / I. V. Stetsenko. – Cherkasy : ChDTU, 2010. – 399 s.

Надійшла/Paper received : 13.09.2022 р.    Надрукована/Printed :01.11.2022 р.