

Міністерство освіти і науки України

Херсонський національний технічний університет

# **ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

## **Т. 3, № 2.1**

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Херсонського національного технічного університету  
(протокол № 8 від 29 червня 2020 року)

---

Журнал включений до Реєстру наукових фахових видань України категорії Б  
на підставі Наказу МОН України від 17 березня 2020 року № 409.

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:  
Google Scholar, Index Copernicus International Journal Master List,  
CiteFactor Academic Scientific Journals, National Library of Ukraine (Vernadsky).

**Херсон 2020**

## Редакційна рада

### Головний редактор

Тулученко Г.Я.

д.т.н., професор, завідувач кафедри вищої математики і математичного моделювання Херсонського національного технічного університету.

### Заступники головного редактора

Розов Ю.Г.

д.т.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, перший проректор Херсонського національного технічного університету.

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. П. Могили.

### Відповідальний секретар

Омельчук А.А.

к.т.н., доцент кафедри інтелектуальних управляючих та обчислювальних систем Університету державної фіскальної служби України (м. Ірпінь, Київська обл.)

## Члени редакційної колегії за спеціальностями:

### Іноземні фахівці

Бабічев С.А.

д.т.н., доцент, (Чехія)

Гучек П.Й.

д.т.н., доцент, (Польща)

## 113 – Прикладна математика

Андрейцев А.Ю.

к.ф.-м.н., доцент

Астіоненко І.О.

к.ф.-м.н., доцент

Гвоздева І.М.

д.т.н., професор

Гнатушенко Вікт.В.

д.т.н., доцент

Ляшенко В.П.

д.т.н., професор

Миргород В.Ф.

д.т.н., доцент

Різник В.В.

д.т.н., професор

Стрельнікова О.О.

д.т.н., професор

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., професор

## 122 – Комп'ютерні науки

Борисенко В.Д.	д.т.н., професор
Ванін В.В.	д.т.н., професор
Вірченко Г.А.	д.т.н., професор
Гнатушенко В.В.	д.т.н., професор
Гумен О.М.	д.т.н., професор
Корчинський В.М.	д.т.н., професор
Литвиненко В.І.	д.т.н., професор
Мартин Є.В.	д.т.н., професор
Найдиш А.В.	д.т.н., професор
Несвідомін В.М.	д.т.н., професор
Пилипака С.Ф.	д.т.н., професор
Тулученко Г.Я.	д.т.н., професор
Устенко С.А.	д.т.н., професор
Шоман О.В.	д.т.н., професор

## 126 – Інформаційні системи та технології

Аль-Амморі А.Н.	д.т.н., професор
Баклан І.В.	к.т.н., доцент
Бень А.П.	к.т.н., доцент
Левикін В.М.	д.т.н., професор
Литвиненко О.І.	к.т.н., доцент
Мороз Б.І.	д.т.н., професор
Стеценко І.В.	д.т.н., професор
Шерстюк В.Г.	д.т.н., професор

## 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Алексєєв М.О.	д.т.н., професор
Бардачов Ю.М.	д.т.н., професор
Головко В.І.	д.т.н., професор
Кондратець В.О.	д.т.н., професор
Мещеряков Л.І.	д.т.н., професор
Омельчук А.А.	к.т.н.
Осадчий С.І.	д.т.н., професор
Рожков С.О.	д.т.н., професор
Рудакова Г.В.	д.т.н., професор

## Інші спеціальності

Мельник І.В.	д.т.н., професор
Розов Ю.Г.	д.т.н., професор

ISSN 2618-0332

Министерство образования и науки Украины

Херсонский национальный технический университет

# **ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

## **Т. 3, № 2.1**

Рекомендовано к печати Ученым советом  
Херсонского национального технического университета  
(протокол № 8 от 29 июня 2020 года)

---

Журнал включен в Реестр научных специализированных изданий Украины  
категории Б на основании Приказа МОН Украины от 17 марта 2020 года № 409.

Журнал включен в наукометрические базы, электронные библиотеки и репозитории:  
Google Scholar, Index Copernicus International Journal Master List,  
CiteFactor Academic Scientific Journals, National Library of Ukraine (Vernadsky).

**Херсон 2020**

## **Редакционный совет**

### **Главный редактор**

Тулученко Г.Я.

д.т.н., профессор, заведующая кафедрой высшей математики и математического моделирования Херсонского национального университета.

### **Заместители главного редактора**

Розов Ю.Г.

д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, первый проректор Херсонского национального технического университета.

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, профессор кафедры интеллектуальных информационных систем Черноморского национального университета им. П. Могилы.

### **Ответственный секретарь**

Омельчук А.А.

к.т.н., доцент кафедры интеллектуальных управляющих и вычислительных систем Университета государственной фискальной службы Украины (г. Ирпень, Киевская обл.)

## **Члены редакционной коллегии по специальностям:**

### **Иностранные специалисты**

Бабичев С.А.

д.т.н., доцент, (Чехия)

Гучек П.И.

д.т.н., доцент, (Польша)

### **113 – Прикладная математика**

Андрейцев А.Ю.

к.ф.-м.н., доцент

Астионенко И.А.

к.ф.-м.н., доцент

Гвоздева И.М.

д.т.н., профессор

Гнатушенко Викт.В.

д.т.н., доцент

Ляшенко В.П.

д.т.н., профессор

Миргород В.Ф.

д.т.н., доцент

Ризнык В.В.

д.т.н., профессор

Стрельникова Е.А.

д.т.н., профессор

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., профессор

## 122 – Компьютерные науки

Борисенко В.Д.	д.т.н., профессор
Ванин В.В.	д.т.н., профессор
Вирченко Г.А.	д.т.н., профессор
Гнатушенко В.В.	д.т.н., профессор
Гумен Е.Н.	д.т.н., профессор
Корчинский В.М.	д.т.н., профессор
Литвиненко В.И.	д.т.н., профессор
Мартин Е.В.	д.т.н., профессор
Найдыш А.В.	д.т.н., профессор
Несвидомин В.Н.	д.т.н., профессор
Пилипака С.Ф.	д.т.н., профессор
Тулученко Г.Я.	д.т.н., профессор
Устенко С.А.	д.т.н., профессор
Шоман О.В.	д.т.н., профессор

## 126 – Информационные системы и технологии

Аль-Аммори А.Н.	д.т.н., профессор
Баклан И.В.	к.т.н., доцент
Бень А.П.	к.т.н., доцент
Левыкин В.М.	д.т.н., профессор
Литвиненко Е.И.	к.т.н., доцент
Мороз Б.И.	д.т.н., профессор
Стеценко И.В.	д.т.н., профессор
Шерстюк В.Г.	д.т.н., профессор

## 151 – Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии

Алексеев М.А.	д.т.н., профессор
Бардачев Ю.Н.	д.т.н., профессор
Головко В.И.	д.т.н., профессор
Кондратец В.А.	д.т.н., профессор
Мещеряков Л.И.	д.т.н., профессор
Омельчук А.А.	к.т.н.
Осадчий С.И.	д.т.н., профессор
Рожков С.А.	д.т.н., профессор
Рудакова А.В.	д.т.н., профессор

## Другие специальности

Мельник И.В.	д.т.н., профессор
Розов Ю.Г.	д.т.н., профессор

ISSN 2618-0332

Ministry of Education and Science of Ukraine

Kherson National Technical University

# **APPLIED QUESTIONS OF MATHEMATICAL MODELLING**

## **V. 3, № 2.1**

Recommended for publication by the Academic Council of  
Kherson National Technical University  
(Minutes № 8 on 29th June 2020)

---

The journal is included in the Register of scientific specialized publications of Ukraine of category B on the basis of Minutes of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated March 17, 2020 № 409.

The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories: Google Scholar, Index Copernicus International Journal Master List, CiteFactor Academic Scientific Journals, National Library of Ukraine (Vernadsky).

**Kherson 2020**

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

Tuluchenko H.Ya.

Professor, Doctor of Engineering Science, Head of the Department of Higher Mathematics and Mathematical Modelling of Kherson National Technical University.

### Deputies Editor-in-Chief

Rozov Yu.H.

Doctor of Engineering Science, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, First Vice-Rector of Kherson National Technical University.

Khomchenko A.N.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Professor at the Department of Intelligent Information Systems of the Petro Mohyla Black Sea National University.

### Executive Secretary

Omelchuk A.A.

Ph.D., Associate Professor at the Department of Intelligent Control and Computing Systems of University of State Fiscal Service of Ukraine (Irpin, Kyiv region).

## Members of Editorial Board by specialities:

### Foreign Specialists

**Babichev S.A.**

Doctor of Engineering Science, Associate Professor, (Czech Republic)

**Guchek P.Y.**

Doctor of Engineering Science, Associate Professor, (Republic of Poland)

## 113 – Applied Mathematics

**Andreytsev A.Yu.**

Ph.D., Associate Professor

**Astionenko I.O.**

Ph.D., Associate Professor

**Hvozdeva I.M.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Hnatushenko Vikt.V.**

Doctor of Engineering Science, Associate Professor

**Liashenko V.P.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Myrhorod V.F.**

Doctor of Engineering Science, Associate Professor

**Riznyk V.V.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Strelnikova O.O.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Khomchenko A.N.**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor



## 122 – Computer Science

<b>Borysenko V.D.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Vanin V.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Virchenko H.A.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Hnatushenko V.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Humen O.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Korchynskyi V.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Lytvynenko V.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Martyn Ye.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Naidysh A.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Nesvidomin V.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Pylypaka S.F.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Tuluchenko H.Ya.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Ustenko S.A.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Shoman O.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor

## 126 – Information Systems and Technologies

<b>Al-Ammori A.N.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Baklan I.V.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Ben A.P.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Levykin V.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Lytvynenko O.I.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Moroz B.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Stetsenko I.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Tomashevskyi V.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Sherstiuk V.H.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor

## 151 – Automation and Computer Integrated Technologies

<b>Aleksieiev M.O.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Bardachov Yu.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Holovko V.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Kondratets V.O.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Meshcheriakov L.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Omelchuk A.A.</b>	Ph.D.
<b>Osadchyi S.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Rozhkov S.O.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Rudakova H.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor

## Other Specialties

<b>Melnyk I.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Rozov Yu.H.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor

**Професору**  
***Хомченко***

*Анатолію Никифоровичу*

**80 років**

***Вітаємо!***



Відомому вченому, людині, що має заслужений авторитет у наукових колах України, талановитому педагогу, який за період своєї багаторічної педагогічної та наукової діяльності виховав цілу плеяду молодих вчених і створив власну наукову школу, опублікував велику кількість науково-дослідних праць як в Україні, так і за її межами, доктору фізико-математичних наук, професору Хомченку Анатолію Никифоровичу 7 вересня 2020 року виповнюється 80 років.

Анатолій Никифорович народився 7 вересня 1940 року у місті Миколаєві у родині службовців. У 1955 році, після закінчення семи класів середньої школи, вступив до технікуму залізничного транспорту. У 1959-1962 рр проходив службу у лавах Радянської Армії. Після демобілізації, у тому ж році Анатолій Никифорович вступив до Одеського державного університету на механіко-математичний факультет.

Багаторічну педагогічну діяльність Анатолій Никифорович розпочав у 1965 році у технікумі залізничного транспорту в м. Миколаєві викладачем теоретичної механіки. З 1968 року працював викладачем кафедри вищої математики Миколаївського кораблебудівного інституту (МКІ). У 1969 році він вступив до аспірантури, після закінченні якої 4 січня 1973 року успішно захистив у Саратовському політехнічному інституті кандидатську дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 01.023 – теорія пружності та пластичності на тему: "Деякі питання коливань та прогинів ортотропних оболонок під дією локалізованих навантажень". З

1975 року Анатолій Никифорович – доцент кафедри вищої математики Івано-Франківського інституту нафти і газу (ІФІНГ). 28 лютого 1991 року Анатолій Никифорович захищає у Казанському державному університеті докторську дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла на тему: "Дискретні моделі та ймовірнісні схеми у механіці тіл, що деформуються ". Ідеї, викладені у дисертаційній роботі, стали основою його наукових досліджень на наступні роки.

У 1993 році Хомчено А.Н. очолює кафедру прикладної математики та математичного моделювання Херсонського індустріального інституту. Це була одна із перших в Україні кафедр із такою назвою, після чого цю ініціативу підхопили інші вищі навчальні заклади України.

З 2012 року Анатолій Никифорович живе у місті Миколаїв і працює у Чорноморському національному університеті ім. П. Могили. До жовтня 2019 року він очолював кафедру прикладної і вищої математики, а з листопада 2019 року працює професором кафедри інтелектуальних інформаційних систем ЧНУ ім. П. Могили.

Людина дивовижної життєвої сили та енергії, Анатолій Никифорович пройшов усі сходинки становлення як вчений та педагог. Його вирізняють надзвичайна доброзичливість та увага до аспірантів і молодих вчених. У професора багато учнів, яких він увів у науковий світ: 16 із них стали кандидатами наук, 3 – докторами наук. Учений перебуває у постійному русі, генерує все нові і нові наукові ідеї. У його арсеналі понад чотириста наукових публікацій.

Анатолій Никифорович як для студентів, так і для колег є прикладом відповідального ставлення до справи і наукової допитливості, вражає енциклопедична глибина його знань у області історії математики, біографій вчених-математиків та бібліографії, що робить його лекції надзвичайно цікавими та пізнавальними.

Улюбленим дітищем Анатолія Никифоровича стала міжнародна конференція з математичного моделювання, яка проводиться у ХНТУ під його керівництвом з 1996 року.

За вагомий внесок у розвиток науки та вищої освіти у нашій країні 15 серпня 2000 року професор Хомченко А.Н. був нагороджений почесним знаком "Відмінник освіти України", а у 2003 році наказом Президента України № 1136 від 2 жовтня йому присвоєно почесне звання "Заслужений діяч науки і техніки України".

Анатолія Никифоровича вирізняють чудові людські чесноти: порядність, працьовитість, відповідальність, делікатність, скромність.

Колеги, учні і друзі від усієї душі вітають Улюбленого Вчителя, Шановного Колегу і просто Чудову Людину з прекрасним Ювілеєм. Бажають йому міцного здоров'я, творчих успіхів та нових наукових досягнень.

Оргкомітет МКММ-2020

Редакційна колегія журналу ППММ

## ЗМІСТ

<b>БЛАЖЕВСЬКИЙ С.Г., ЛЕНЮК О.М., НІКІТІНА О.М., ШИНКАРИК М.І.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДОМ ГІБРИДНОГО ІНТЕГРАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ТИПУ БЕССЕЛЯ-ЕЙЛЕРА-БЕССЕЛЯ НА ПОЛЯРНІЙ ОСІ .....	18
<b>БРАІЛОВ О.Ю., ПАНЧЕНКО В.І.</b> КОМБІНОВАНА ГЕОМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ В ОПТИМІЗАЦІЙНОМУ ПІДХОДІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕДОСТУПНОЇ ТОЧКИ ОБ'ЄКТА .....	27
<b>ВАЛЬКО Н.В., БОЛГАРІН Т.О., ВАЛЬКО К.В.</b> АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХУ ДЛЯ АВТОНОМНОГО РУХУ БЕЗПЛОТНОГО ТРАНСПОРТУ ПО ЛІНІЇ .....	39
<b>ВАХНЕНКО В.О., ВЕНГРОВИЧ Д.Б., МІЩЕНКО О.В.</b> ДІАГНОСТИКА СТРУКТУРОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА ДОВГИМИ НЕЛІНІЙНИМИ ХВИЛЯМИ: ТЕОРЕТИЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ .....	49
<b>ВОРОНЕНКО С.В., СУББОТІН О.В., ЛЕБЕДЕНКО Ю.О., РУДАКОВА Г.В.</b> АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУДНОВОЮ КОМПЛЕКСНОЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ ТУРБОКОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ .....	60
<b>ГАЛЬЧЕНКО А.В., ЧОПОРОВ С.В.</b> КОДУВАННЯ ДАНИХ В АЛГОРИТМАХ ЗАПЕРЕЧУВАННОГО ШИФРУВАННЯ .....	72
<b>МИРГОРОД В.Ф., ГВОЗДЕВА І.М., ЛЕЩЕНКО В.В., ТУМОЛЬСКИЙ А.П., А.Г. КАЛУЄВ</b> ПРОБЛЕМИ АЕРОДИНАМІЧНОЇ СТАЛОСТІ І МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРНОГО ТИПУ .....	80
<b>ГРИЦИК В.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ УНІФІКАЦІЇ СТАНДАРТНИХ ПОРОГОВИХ МЕТОДІВ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ .....	88
<b>ЄВГРАШКІНА Г.П., ХАРИТОНОВ М.М.</b> ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗ СОЛЬОВИХ РЕЖИМІВ ЗРОШУВАНИХ ЗЕМЕЛЬ В АРІДНИХ РЕГІОНАХ .....	99
<b>КАГАДІЙ Т.С., ШПОРТА А.Г., БІЛОВА О.В., ЩЕРБИНА І.В.</b> НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ШАРУВАТОЇ ОСНОВИ З ПІДКРІПЛЮЮЧИМ ЕЛЕМЕНТОМ .....	107
<b>КАШТАН В.Ю., ГНАТУШЕНКО В.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗЛИТТЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ВИСОКОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗРІЗНЕННЯ .....	117
<b>КЛОЧАН А.С.</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОСАДКИ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН .....	128
<b>КОВИЛІН Є.Р., ВОЛКОВСЬКИЙ О.С.</b> КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦІЇ ВІДПОВІДЕЙ У ПОШУКОВІЙ СИСТЕМІ НА ОСНОВІ НЕСТРУКТУРОВАНОЇ БАЗИ ЗНАНЬ .....	142
<b>КОРЧИНСЬКИЙ В.М., СВИНАРЕНКО Д.М.</b> ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ТА РАДІОМЕТРИЧНОГО РОЗРІЗНЕННЯ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ НА ОСНОВІ ЇХ АНАЛІТИЧНИХ СИГНАЛІВ .....	156
<b>КУЗЬМИЧ В.І., КУЗЬМИЧ Л.В., САВЧЕНКО О.Г.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ПРЯМОЛІНІЙНОГО ТА ПЛОСКОГО РОЗМІЩЕННЯ ТОЧОК МЕТРИЧНОГО ПРОСТОРУ .....	165
<b>МИХАЙЛУЦА О.М., ПОЖУЄВ А.В.</b> ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В НАВЧАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ВИКЛАДАННЯ ЖИВОПИСУ .....	174
<b>МИРГОРОД В.Ф., ГВОЗДЕВА І.М.</b> ОЦІНКА ПОТУЖНОСТІ ДЕЯКИХ НЕПАРАМЕТРИЧНИХ КРИТЕРІЇВ ТРЕНДУ .....	184
<b>ОСАДЧИЙ С.І., ДЯЧЕНКО М.М.</b> ЗБІР ТА ПЕРВИННА ОБРОБКА ДАНИХ З СИСТЕМИ ARDUPILOT ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ КВАДРОКОПТЕРУ .....	197
<b>ОСАДЧУК О.В., КРИЛИК Л.В., ОСАДЧУК Я.О.</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ .....	206
<b>ПРОЛІСКО Е.Е., ШУТЬ В.Н., КОЗИНСЬКИЙ А.А.</b> УПРАВЛІННЯ ПЕРЕВІЗНИМ ПРОЦЕСОМ В МІСЬКІЙ ПАСАЖИРСЬКІЙ ТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ .....	216
<b>РЕДЧИЦЬ Д.О., ТАРАСОВ С.В., ТАРАСОВ А.С., МОІСЕЄНКО С.В.</b> ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПОТОКІВ ХОЛОДНОЇ ПЛАЗМИ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ .....	224
<b>РОЖКОВ С.О., ХЛОПЕНКО М.Я., ТИМОФЕЄВ К.В., ТЕРНОВА Т.І., СОКОЛОВ А.С.</b> ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ТЕОРІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ. МЕТОДИ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛІЗІ СЦЕНИ .....	235
<b>СОКОЛОВА Н.О., БЄЛОВ А.С.</b> РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІoT-СИСТЕМИ НА АПАРАТНІЙ ПЛАТФОРМІ ARDUINO .....	251
<b>СТЕГАНЦЕВ Є.В.</b> КЛАСИФІКАЦІЯ КРИВИХ ДРУГОГО ПОРЯДКУ ЗА ЇХ ПРООБРАЗАМИ ПРИ СТЕРЕОГРАФІЧНІЙ ПРОЕКЦІЇ .....	260

<b>ТРОХИМЧУК П.П.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНОГО ОПТИЧНОГО ПРОБОЮ В ТВЕРДИХ ТІЛАХ .....	269
<b>УСОВ А.В., СІКІРАШ Ю.Є.</b> МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ ВИРОБІВ ІЗ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	280
<b>ЧОПОРОВА О.В., ЛІСНЯК А.О.</b> ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КВАДРАТНОЇ ПЛАСТИНКИ .....	290
<b>ЯРЕЦКА Н.О., РАМСЬКИЙ А.О.</b> ВПЛИВ ПОЧАТКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА КОНТАКТНУ ВЗАЄМОДІЮ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ЦІЛЬЦЕВОГО ШТАМПА ТА ПІВПРОСТОРУ .....	300

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>БЛАЖЕВСКИЙ С.Г., ЛЕНЮК О.М., НИКИТИНА О.М., ШИНКАРИК Н.И.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ГИБРИДНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТИПА БЕССЕЛЯЭЙЛЕРА-БЕССЕЛЯ НА ПОЛЯРНОЙ ОСИ .....	18
<b>БРАИЛОВ А.Ю., ПАНЧЕНКО В.И.</b> КОМБИНИРОВАННАЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ОПТИМИЗАЦИОННОМ ПОДХОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕДОСТУПНОЙ ТОЧКИ ОБЪЕКТА .....	27
<b>ВАЛЬКО Н.В., БОЛГАРИН Т.А., ВАЛЬКО К.В.</b> АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТА ПО ЛИНИИ .....	39
<b>ВАХНЕНКО В.А., ВЕНГРОВИЧ Д.Б., МИЩЕНКО А.В.</b> ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРИРОВАННОЙ СРЕДЫ ДЛИННЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛНАМИ: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ .....	49
<b>ВОРОНЕНКО С.В., СУББОТИН А.В., ЛЕБЕДЕНКО Ю.А., РУДАКОВА А.В.</b> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТУРБОКОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ .....	60
<b>ГАЛЬЧЕНКО А.В., ЧОПОРОВ С.В.</b> КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ В АЛГОРИТМАХ ОТРИЦАЕМОГО ШИФРОВАНИЯ .....	72
<b>МИРГОРОД В.Ф., ГВОЗДЕВА И.М., ЛЕЩЕНКО В.В., ТУМОЛЬСКИЙ А.П., КАЛУЕВ А.Г.</b> ПРОБЛЕМЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРНОГО ТИПА .....	80
<b>ГРИЦИК В.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ УНИФИКАЦИИ СТАНДАРТНЫХ ПОРОГОВЫХ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ .....	88
<b>ЕВГРАШКИНА Г.П., ХАРИТОНОВ Н.Н.</b> ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ СОЛЕВЫХ РЕЖИМОВ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ В АРИДНЫХ РЕГИОНАХ .....	99
<b>КАГАДИЙ Т.С., ШПОРТА А.Г., БЕЛОВА О.В., ЩЕРБИНА И.В.</b> НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СЛОИСТОГО ОСНОВАНИЯ С ПОДКРЕПЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ .....	107
<b>КАШТАН В.Ю., ГНАТУШЕНКО В.В.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СЛИЯНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ .....	117
<b>КЛОЧАН А.Е.</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ .....	128
<b>КОВЫЛИН Е.Р., ВОЛКОВСКИЙ О.С.</b> КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ОТВЕТОВ В ПОИСКОВОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ .....	142
<b>КОРЧИНСКИЙ В.М., СВИНАРЕНКО Д.Н.</b> ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО И РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ .....	156
<b>КУЗЬМИЧ В.И., КУЗЬМИЧ Л.В., САВЧЕНКО А.Г.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО И ПЛОСКОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК МЕТРИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА .....	165
<b>МИХАЙЛУЦА Е.Н., ПОЖУЕВ А.В.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЧЕБНОЙ СИСТЕМЕ ПРЕПОДАВАНИЯ ЖИВОПИСИ .....	174
<b>МИРГОРОД В.Ф., ГВОЗДЕВА И.М.</b> ОЦЕНКА МОЩНОСТИ НЕКОТОРЫХ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ТРЕНДА .....	184
<b>ОСАДЧИЙ С.И., ДЯЧЕНКО М.Н.</b> СБОР И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИЗ СИСТЕМЫ ARDURILOT ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ КВАДРОКОПТЕРА .....	197
<b>ОСАДЧУК А.В., КРИЛИК Л.В., ОСАДЧУК Я.А.</b> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ .....	206
<b>ПРОЛИСКО Е.Е., ШУТЬ В.Н., КОЗИНСКИЙ А.А.</b> УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ В ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ .....	216
<b>РЕДЧИЦ Д.А., ТАРАСОВ С.В., ТАРАСОВ А.С., МОИСЕЕНКО С.В.</b> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ .....	224
<b>РОЖКОВ С.А., ХЛОПЕНКО Н.Я., ТИМОФЕЕВ К.В., ТЕРНОВАЯ Т.И., СОКОЛОВ А.Е.</b> ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ .....	235

<b>СОКОЛОВА Н.О., БЕЛОВ А.С.</b> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ IoT-СИСТЕМЫ НА АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЕ ARDUINO.....	251
<b>СТЕГАНЦЕВ Е.В.</b> КЛАССИФИКАЦИЯ КРИВЫХ ВТОРОГО ПОРЯДКА ПО ИХ ПРООБРАЗАМ ПРИ СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ .....	260
<b>ТРОХИМЧУК П.П.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ .....	269
<b>УСОВ А.В., СИКИРАШ Ю.Е.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	280
<b>ЧОПОРОВА О.В., ЛИСНЯК А.А.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КВАДРАТНОЙ ПЛАСТИНКИ .....	290
<b>ЯРЕЦКАЯ Н.А., РАМСКИЙ А.А.</b> ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КОЛЬЦЕВОГО ШТАМПА И ПОЛУПРОСТРАНСТВА .....	300

---



---

**CONTENTS**


---



---

<b>BLAZHEVSKIY S.G., LENYUK O.M., NIKITINA O.M., SHYNKARYK M.I.</b> MODELING OF DYNAMIC PROCESSES BY THE METHOD OF HYBRID INTEGRAL TRANSFORM OF BESSEL-EULER-BESSEL TYPE ON THE POLAR AXIS .....	18
<b>BRAILOV A.Yu., PANCHENKO V.I.</b> THE COMBINED GEOMETRICAL MODEL IN THE OPTIMIZING APPROACH TO DETERMINATION THE PARAMETERS OF AN INACCESSIBLE POINT OF AN OBJECT .....	27
<b>VALKO N.V., BOLGARIN T.O., VALKO K.V.</b> ALGORITHM FOR DETERMINING THE PATH FOR AUTONOMOUS MOVEMENT OF UNMANNED VEHICLES ALONG THE LINE .....	39
<b>VAKHNENKO V.O., VENGROVICH D.B., MICHCHENKO O.V.</b> THE DIAGNOSTICS OF A STRUCTURED MEDIUM BY LONG NONLINEAR WAVES: THEORETICAL JACTIFICATION .....	49
<b>VORONENKO S.V., SUBBOTIN O.V., LEBEDENKO Yu.O., RUDAKOVA H.V.</b> ANALYSIS OF THE CONTROL SYSTEM EFFICIENCY OF THE SHIP INTEGRATED ELECTRICITY INSTALLING TURBO WITH THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS .....	60
<b>HALCHENKO A.V., CHOPOROV S.V.</b> THE DATA ENCODING IN DENIABLE ENCRYPTION ALGORITHMS .....	72
<b>MYRHOROD V., HVOZDEVA I., LESHCHENKO V., TUMOLSKYI A., KALUEV A.</b> PROBLEMS OF AERODYNAMIC STABILITY AND A MATHEMATICAL MODEL OF A WIND POWER PLANT OF TURBOGENERATOR TYPE .....	80
<b>HRYTSYK V.V.</b> RESEARCH OF IMAGE SEGMENTATION METHODS FOR THEIR UNIFICATION .....	88
<b>YEVGRASHKINA G.P., KHARYTONOV M.M.</b> AN ENVIRONMENT ASSESSMENT, MODELLING AND FORECAST OF THE SALTED REGIMES OF IRRIGATED ARABLE LANDS IN ARID REGIONS .....	99
<b>KAGADIY T.S., SHPORTA A.H., BILOVA O.V., SCHERBINA I.V.</b> STRESSED-STRAINED STATE OF A LAYERED BASIS WITH A FASTENING ELEMENT .....	107
<b>KASHTAN V.J., HNATUSHENKO V.V.</b> AN INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF PAN-SHARPENING METHODS OF HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES .....	117
<b>KLOCHAN A.Ye.</b> MATHEMATICAL MODEL OF THE AIRCRAFT'S POLARIMETRIC LANDING SYSTEM .....	128
<b>KOVYLIN Y.R., VOLKOVSKY O.S.</b> COMPUTER MODEL OF RESPONSE GENERATION IN THE SEARCH SYSTEM BASED ON AN UNSTRUCTED KNOWLEDGE BASE .....	142
<b>KORCHYNSKYI V.M., SVYNARENKO D.M.</b> IMPROVED SPATIAL AND RADIOMETRIC RESOLUTION OF MULTISPECTRAL DIGITAL REMOTE SENSING IMAGES BASED ON THEIR ANALYTICAL SIGNALS .....	156
<b>KUZ'MICH V.I., KUZMICH L.V., SAVCHENKO O.G.</b> SIMULATION OF RECTILINEAR AND FLAT PLACEMENT OF POINTS OF METRIC SPACE .....	165
<b>MIKHAILUTSA O.M., POZHUYEV A.V.</b> THE USE OF COMPUTER TECHNOLOGY IN THE EDUCATIONAL SYSTEM OF TEACHING PAINTING .....	174
<b>MYRHOROD V.F., HVOZDEVA I.M.</b> ASSESSMENT OF POWER OF SOME NON-PARAMETRIC TREND CRITERIA .....	184
<b>OSADCHY S.I., DJACHENKO M. M.</b> ACQUISITION AND PRIMARY PROCESSING OF DATA FROM THE ARDUPILOT SYSTEM FOR IDENTIFICATION OF THE QUADROCOPTER DYNAMICS MODEL .....	197
<b>OSADCHUK A.V., KRILIK L.V., OSADCHUK I.A.</b> MATHEMATICAL MODEL OF A PARAMETRIC HUMIDITY TRANSDUCER WITH A FREQUENCY OUTPUT .....	206
<b>PROLISKO E.E., SHUTS V.N., KOZINSKY A.A.</b> MANAGING THE TRANSPORTATION PROCESS IN THE CITY PASSENGER TRANSPORT SYSTEM .....	216
<b>REDCHYTS D.O., TARASOV S.V., TARASOV A.S., MOISEENKO S.V.</b> NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY COLD PLASMA STREAMS OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN AIR .....	224
<b>ROZHKOVA S., KHLOPENKO M., TIMOFEEV K., TERNOVA T., SOKOLOV A.</b> INFORMATION TECHNOLOGIES IN THEORY RECOGNITION OF IMAGES. METHOD OF CONSTRUCTING MODELS AT SCENE ANALYSIS .....	235
<b>SOKOLOVA N.O., BIELOV A.S.</b> DEVELOPMENT OF IOT-SYSTEM SOFTWARE ON ARDUINO HARDWARE PLATFORM .....	251
<b>STEGANTSEV E.V.</b> THE CLASSIFICATION OF THE CONICS ACCORDING TO THEIR INVERSE IMAGES IN THE STEREOGRAPHIC PROJECTION .....	260



<b>TROKHIMCHUCK P. P.</b> MODELLING OF THE DIRECT LASER-INDUCED OPTICAL BREAKDOWN IN SOLID .....	269
<b>USOV A.V., SIKIRASH Yu.Ye.</b> MODELING OF THERMOPHYSICAL PROCESSES AT THE MECHANICAL PROCESSING OF PRODUCTS FROM STRUCTURALLY INHOMOGENEOUS MATERIALS .....	280
<b>CHOPOROVA O. V., LISNIAK A. O.</b> THE USE OF A GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE PARAMETERS OF THE NEURAL NETWORK IN PREDICTING THE STRESS-STRAIN STATE OF A SQUARED PLATE .....	290
<b>YARETSKA N.O., RAMSKY A.O.</b> INFLUENCE OF INITIAL STRESSES ON CONTACT INTERACTION OF PRE-STRESSED ANNULAR STAMP AND HALF SPACE .....	300

УДК 621.382

О.В. ОСАДЧУК, Л.В. КРИЛИК, Я.О. ОСАДЧУК  
Вінницький національний технічний університет**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА  
ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

*Розроблено математичну модель частотного параметричного перетворювача вологості з ємнісними елементами виготовленими на основі: NaCl+полімер, NaCl; BaCl<sub>2</sub>+полімер, BaCl<sub>2</sub>, а також ємнісних елементів виготовленими на основі комплексних сполук. Параметричний перетворювач вологості з частотним виходом розроблено на основі біполярної транзисторної структури, що утворює активну індуктивність з динамічним від'ємним опором, яка з вологочутливим конденсатором C<sub>W</sub> утворює коливальний контур перетворювача. Математичне моделювання та експериментальні дослідження показали, що в діапазоні відносної вологості від 30 % до 100 %, діапазон зміни ємності для вологочутливого елемента на основі NaCl становить від  $0,030 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двошарової структури на основі NaCl+полімер – від  $0,125 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. Для вологочутливого елемента на основі BaCl<sub>2</sub> – діапазон зміни ємності становить від  $0,060 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двошарової структури на основі BaCl<sub>2</sub>+полімер – від  $0,130 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. На основі експериментальних досліджень встановлено, що на чутливість сенсора впливає склад комплексних сполук, а саме найчутливішим в діапазоні вологості від 7 % до 27 % є ємнісний елемент виготовлений на основі гетерометалевої комплексної сполуки II, яка містить два атома стибію. Чутливість такого ємнісного елемента набуває значення 285 пФ/%. Залежність ємності від відносної вологості, в діапазоні від 30 % до 75 %, практично лінійна, а чутливість дорівнює 135 пФ/%. В діапазоні 75...95 % спостерігається різке зростання чутливості аж до 450 пФ/% для всіх ємнісних елементів виготовлених на основі гетерометалевих комплексних сполук I – IV. На основі математичного моделювання отримано графічні залежності функції перетворення та чутливості частотного параметричного перетворювача вологості. Найбільша чутливість частотного параметричного перетворювача вологості для зміни вологості навколишнього середовища становить 62...107 кГц/%.*

*Ключові слова: частотний перетворювач вологості; вологочутливий ємнісний елемент; від'ємний диференційний опір; функція перетворення; рівняння чутливості.*

А.В. ОСАДЧУК, Л.В. КРИЛИК, Я.А. ОСАДЧУК  
Вінницький національний технічний університет**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ВЛАЖНОСТИ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ**

*Разработана математическая модель частотного параметрического преобразователя влажности с емкостными элементами изготовленными на основе: NaCl + полимер, NaCl; BaCl<sub>2</sub> + полимер, BaCl<sub>2</sub>, а также емкостных элементов изготовленных на основе комплексных соединений. Параметрический преобразователь влажности с частотным выходом разработан на основе биполярной транзисторной структуры, что образует активную индуктивность с динамическим отрицательным сопротивлением, которая с влагочувствительным конденсатором образует колебательный контур преобразователя. Математическое моделирование и экспериментальные исследования показали, что в диапазоне относительной*

влажності от 30% до 100%, діапазон змінення ємкості для вологочувствительного елемента на основі NaCl складає от  $0,030 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двохшлойной структури на основі NaCl+полімер – от  $0,125 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. Для вологочувствительного елемента на основі BaCl<sub>2</sub> – діапазон змінення ємкості складає от  $0,060 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двохшлойной структури на основі BaCl<sub>2</sub>+полімер – от  $0,130 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. на основі експериментальних досліджень установлено, що на чувствительність сенсора впливає склад комплексних сполучень, а іменно чувствительного в діапазоні вологості от 7% до 27% являється ємкостной елемент, котрий виготовлен на основі гетеро-металлического комплексного сполучення II, содержить два атома сурьми. Чувствительність такого ємкостного елемента має значення 285 пФ/%. Зависимость ємкості от относительной вологості в діапазоні от 30% до 75%, практично лінійная, а чувствительність равна 135 пФ/%. В діапазоні 75...95% наблюдается різкий ріст чувствительності до 450 пФ/% для всіх ємкостных елементів, виготовлених на основі гетеро-металлических комплексних сполучень I - IV. На основі математического моделювання отримані графічні зависимости функції перетворення і чувствительності частотного параметрического перетворювача вологості. Найбільша чувствительність частотного параметрического перетворювача вологості от змінення вологості оточуючої середовища складає 62...107 кГц/‰.

Ключевые слова: частотный перетворювач вологості; вологочувствительный ємкостной елемент; отрицательное дифференциальное сопротивление; функция перетворення; уравнения чувствительности.

A.V. OSADCHUK, L.V. KRILIK, I.A. OSADCHUK  
Vinnytsia National Technical University

### MATHEMATICAL MODEL OF A PARAMETRIC HUMIDITY TRANSDUCER WITH A FREQUENCY OUTPUT

*A mathematical model of a frequency parametric humidity transducer with capacitive elements based on: NaCl+polymer, NaCl; BaCl<sub>2</sub>+polymer, BaCl<sub>2</sub>, as well as capacitive elements based on complex compounds. A parametric humidity transducer with a frequency output is developed on the basis of a bipolar transistor structure, which forms an active inductance with dynamic negative resistance, which forms an oscillatory circuit of the transducer with a humidity-sensitive capacitor. Mathematical modeling and experimental studies have shown that in the range of relative humidity from 30% to 100%, the range of capacitance change for a humidity sensitive element based on NaCl is from  $0.030 \cdot 10^{-8}$  F to  $3.9 \cdot 10^{-8}$  F, and for a two-layer structure based on NaCl+polymer - from  $0.125 \cdot 10^{-8}$  F to  $3.9 \cdot 10^{-8}$  F. For a moisture sensitive element based on BaCl<sub>2</sub> – the range of capacitance change is from  $0.060 \cdot 10^{-8}$  F to  $3.9 \cdot 10^{-8}$  F, and for a two-layer structure based on BaCl<sub>2</sub>+polymer - from  $0.130 \cdot 10^{-8}$  F to  $3.9 \cdot 10^{-8}$  F. On the basis of experimental studies it was found that the composition of complex compounds affects the sensitivity of the sensor, namely, the sensitive in the humidity range from 7% to 27% is a capacitive element, which is made on the basis of a hetero-metallic complex compound II, contains two antimony atoms. The sensitivity of such a capacitive element is 285 pF/‰. The capacitance versus relative humidity in the range from 30% to 75% is almost linear, and the sensitivity is 135 pF/‰. In the range of 75...95%, there is a sharp increase in sensitivity up to 450 pF/‰ for all capacitive elements based on hetero-metallic complex compounds I – IV. On the basis of mathematical modeling, graphical dependences of the conversion function and sensitivity of the frequency parametric humidity*

*transducer are obtained. The highest sensitivity of the frequency parametric humidity transducer from changes in the ambient humidity is 62 ... 107 kHz/%.*

*Keywords: frequency transducer of humidity; humidity sensitive; capacitive element; negative differential resistance; transformation function; sensitivity equations.*

### **Постановка проблеми**

В останні роки вдосконалення технологій виробництва сенсорів фізичних величин відбувалося за рахунок швидкісних, малопотужних та недорогих мікроелектронних інтегральних схем подальшої обробки, сучасних методів отримання та обробки інформативних сигналів, а також досягнення технологій мікромініатюризації [1–2]. Послідовне підвищення якості та надійності первинних параметричних перетворювачів фізичних величин потрібне для комерційної конкурентоспроможності. На даний час методи моделювання та автоматизованого проектування успішно використовуються для прогнозування та покращення вихідних параметрів радіоелектронних схем первинних параметричних перетворювачів перед впровадженням у масове виробництво, даючи можливість заощадити час і підвищити якість [3]. Мікромініатюризація сенсорних пристроїв надає численні переваги, такі як низький гістерезис, пакетне оброблення, простота інтеграції в поєднанні із наступним зменшенням витрат. Широке застосування параметричних первинних сенсорів вологості знайшли як в інтелектуальних системах так і в різних галузях промислової індустрії.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Використання первинних перетворювачів вологості в частотних пристроях, в яких вологість перетворюється у частоту, дозволяє значно підвищити чутливість, точність вимірювання вологості, спростити схеми подальшої обробки інформації [4–6]. В цьому випадку необхідно використовувати вологочутливий елемент у вигляді ємності, який є найоптимальнішим за сукупністю параметрів. Він забезпечує широкий діапазон вимірювань, високу надійність та низьку вартість при використанні мікроелектронної технології, яка дозволяє розробляти ємності планарного типу тонкоплівковим методом [7–8]. Завдяки цьому маємо мініатюрні габарити чутливого елемента, можливість розташування на кристалі спеціалізованої інтегральної схеми обробки сигналу [9–11]. Таким чином, для вимірювання вологості ємнісний метод є одним із найкращих.

### **Мета дослідження**

Метою роботи є розроблення та дослідження математичної моделі автогенераторного параметричного перетворювача на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, яка враховує його ємнісні та індуктивні властивості. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі: 1) провести аналіз та отримати аналітичний вираз для визначення залежності ємності вологочутливого елемента гребінцевої структури із захисним полімерним покриттям від відносної вологості навколишнього середовища; 2) отримати аналітичну залежність ємності вологочутливих елементів, виготовлених на основі комплексних сполук, від відносної вологості навколишнього середовища; 3) визначити залежність резонансної частоти параметричного перетворювача вологості від параметрів схеми, а також отримати аналітичну залежність частоти від зміни вологості, при якій в коливальній системі генератора повністю компенсуються втрати енергії за рахунок від'ємного диференційного опору; 4) зробити висновки по проведеному дослідженню.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Метою роботи є розробка нового параметричного перетворювача вологості з частотним виходом з вологочутливим ємнісним елементом. Схема генератора синусоїдальних коливань на основі складового транзистора приведена на рис. 1. Він складається з підсилювача потужності, резонатора, що визначає частоту генерації, і ланцюга зворотного зв'язку. Підсилювач утворений транзисторами VT1 і VT2. Вхідний опір складового транзистора в схемі із загальною базою має індуктивний характер і разом із ємністю  $C_1$  утворить коливальний контур, що є резонатором. Для складового транзистора коефіцієнт підсилення по струму у визначеному частотному діапазоні має значення більше одиниці, що приводить до позитивного значення коефіцієнта зворотного зв'язку [4, 6]. Зворотний зв'язок по напрузі виявляється в складовому транзисторі сильніше, ніж в одиночному транзистора і це значною мірою полегшує самозбудження схеми.

Для експериментального дослідження схема параметричного перетворювача вологості (рис.1) була зібрана на транзисторній збірці BC847BDW1. Режим транзисторів VT1 і VT2 по постійному струму був таким: струм у ланцюзі емітера транзистора VT1 дорівнює 5,5 мА, а в ланцюзі емітера VT2 дорівнює 2,5 мА, напруга на колекторі – 5 В. Зовнішній базовий опір дорівнював 6 кОм. Цьому режиму відповідала частота генерації 760 кГц. При даній величині напруг живлення і опорів, схема генератора працювала в нормальному режимі, що відповідає синусоїдальній формі вихідної напруги. Описана схема генератора дозволяє одержати вихідну напругу до 15 В у широкому діапазоні частот. Нестабільність частоти дорівнює  $2 \cdot 10^{-4}$  Гц.

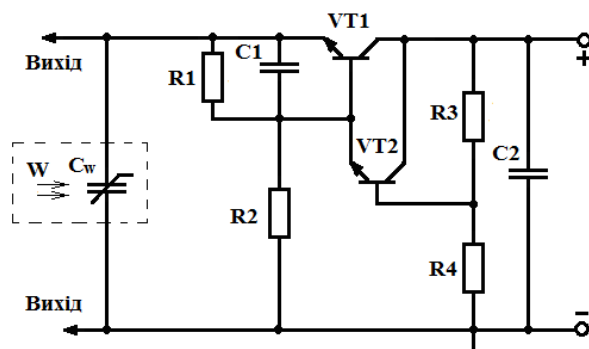


Рис. 1. Електрична схема перетворювача вологості з частотним виходом

Параметричний перетворювач вологості з частотним виходом розроблено на основі біполярної транзисторної структури (VT1, VT2), що утворює активну індуктивність з динамічним від'ємним опором, яка з вологочутливим конденсатором  $C_w$  утворює коливальний контур перетворювача. Конденсатор  $C_1$  та резистор  $R_3$  утворюють фазозсувне коло. За допомогою джерела постійної напруги схема вводиться в режим, коли на електродах емітер першого біполярного транзистора VT1 та база другого біполярного транзистора VT2 виникає динамічний від'ємний опір, який приводить до виникнення електричних коливань в контурі.

Резистори  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  та  $R_4$  забезпечують живлення схеми за постійним струмом, причому електричне живлення біполярної транзисторної структури (VT1, VT2) залежить від величини зміни ємності вологочутливого конденсатора  $C_w$  зі зміною вологості навколишнього середовища. Крім того, блокувальний конденсатор  $C_2$  запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги. При дії вологи на вологочутливий конденсатор  $C_w$  змінюється ємнісна складова повного

опору на електродах емітер першого біполярного транзистора VT1 та база другого біполярного транзистора VT2, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

В попередніх роботах авторами статті були проведені дослідження ємнісних вологочутливих елементів гребінцевої структури, створених на основі гігроскопічних солей  $NaCl$  та  $BaCl_2$  із захисним полімерним покриттям. Залежність ємності вологочутливого елемента від відносної вологості навколишнього середовища можна описати таким виразом:

$$C = \left( \begin{array}{l} \theta^a \lg \varepsilon_{\text{соли}} + \varepsilon_{\text{пол}} \left( 1 + \frac{(1-\xi)}{1 - \frac{(1-\xi)}{3} + \frac{\varepsilon_{\text{пол}}}{\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{\text{пол}}}} \right) + \varepsilon_{II} + \\ + \delta k \left( \frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) (1 - \theta^b) \lg \varepsilon_{H_2O} \end{array} \right) \varepsilon_0 l [2A_1(N-1) + A_2], \quad (1)$$

де  $\theta = \frac{S_M \sigma_{\text{соли}}}{S_M \sigma_{\text{соли}} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}}}$ ;  $\xi = \frac{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}}}{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}} + V_{H_2O}}$ ;

$$A_1 = 3(d_{II} / a)^{0,25} (b / d_{II})^{0,44}; \quad A_2 = 0,77b / [(2N - 1)(a + b)] + 0,41.$$

$S_M$  – площа меандру, мм<sup>2</sup>;  $\sigma_{\text{соли}}$  – товщина сольового покриття, мкм;  $G$  – маса сухого повітря, г [12];  $\chi$  – величина, яка враховує зв'язок між масовим відношенням вологи і тиском пари [12];  $\rho_{H_2O}$  – густина води, г/см<sup>3</sup>;  $\varepsilon_{\text{соли}}$  – діелектрична проникність солі;  $\varepsilon_{\text{пол}}$  – діелектрична проникність поліметилметакрилату;  $S_{\text{пол}}$  – площа поліметилметакрилату;  $d_{\text{пол}}$  – товщина шару поліметилметакрилату;  $V_{H_2O}$  – об'єм води;  $\varepsilon_{H_2O}$  – діелектрична проникність води;  $\varepsilon_{II}$  – діелектрична проникність підкладки;  $\delta$  – відносна маса водяної пари по відношенню до сухого повітря при однакових тисках і температурах;  $k = 1 \div 5$ ;  $b = 0,5 \div 1$  при умові, що  $a < b$ ;  $p_s$  – тиск насиченої пари при температурі  $T$ ; Па;  $A$  – психрометрична стала, яка при  $T_w = 20$  °С становить 0,00064;  $P$  – тиск повітря 101,325 кПа (760 мм рт.ст.);  $T$  – температура навколишнього середовища, °С;  $T_w$  – температура вологого термометра, °С;  $\varepsilon_0$  – діелектрична стала вакууму, Ф/м;  $l, a, b$  – величини, які враховують геометрію конденсатора, мм;  $N$  – число секцій.

На основі аналітичного виразу (1) отримано графічні залежності ємності вологочутливого елемента від відносної вологості, які подано на рис. 2.

З графіків (див. рис. 2) видно, що в діапазоні відносної вологості від 30 % до 100 %, діапазон зміни ємності для вологочутливого елемента на основі  $NaCl$  становить від  $0,030 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двошарової структури на основі  $NaCl$ +полімер – від  $0,125 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф. Для вологочутливого елемента на основі  $BaCl_2$  – діапазон

зміни ємності становить від  $0,060 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф, а для двошарової структури на основі  $BaCl_2$ +полімер – від  $0,130 \cdot 10^{-8}$  Ф до  $3,9 \cdot 10^{-8}$  Ф.

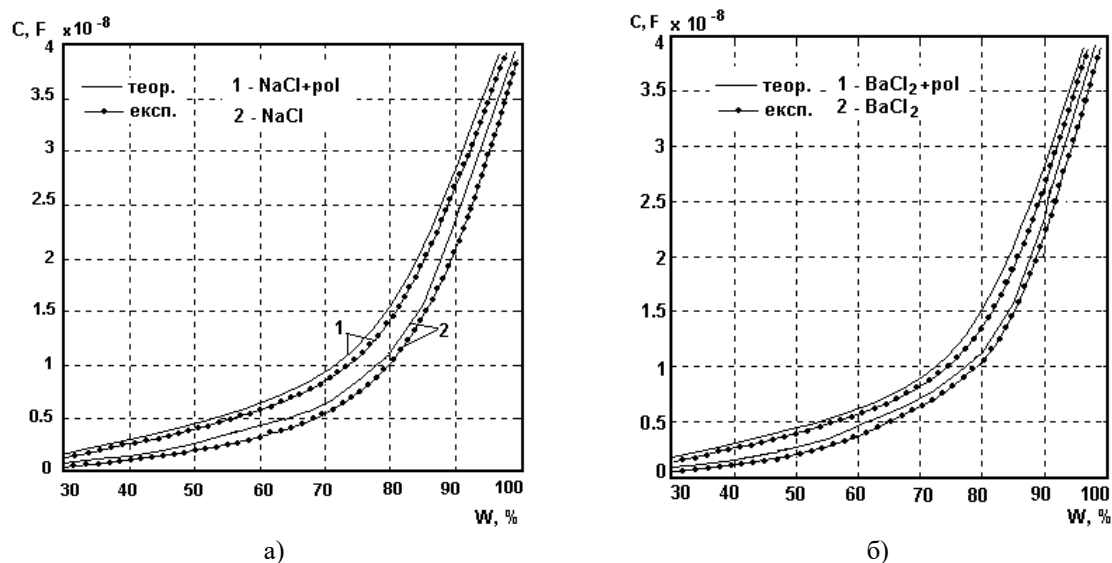


Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності ємності вологочутливих елементів від зміни відносної вологості повітря, виготовлених: а – на основі  $NaCl$ +полімер та  $NaCl$ ; б – на основі  $BaCl_2$ +полімер та  $BaCl_2$ .

Експериментальні дослідження показали, що створення захисного шару з метою запобігання випадіння точки роси зменшило діапазон зміни ємності [12]. Крім того, ці вологочутливі елементи працюють тільки в обмеженому діапазоні відносної вологості нижче точки роси. Тому для вирішення цієї проблеми, як вологочутливий шар ємнісного елемента, було використано гетерометалеві комплексні сполуки – стибій або бісмутвмісні діоксиди ніколу (II). Ці сполуки практично нерозчинні в спиртах, ацетоні, бензині, погано розчинні в диметилформаміді і диметилсульфоксиді. Однак є гігроскопічними і змінюють забарвлення із зміною відносної вологості навколишнього середовища [12].

Залежність ємності вологочутливих елементів, виготовлених на основі комплексних сполук, від відносної вологості навколишнього середовища можна описати таким виразом:

$$C = \left( \Omega^a \lg \varepsilon_{K.C.} + \varepsilon_{II} + 1 + \delta k \left( \frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) \right) (1 - \Omega^b) \lg \varepsilon_{H_2O} \varepsilon_0 l [2A_1(N - 1) + A_2], \quad (2)$$

де 
$$\Omega = \frac{S_M \sigma_{K.C.}}{S_M \sigma_{K.C.} + \frac{G \chi}{\rho_{H_2O}}};$$

$\sigma_{K.C.}$  – товщина нанесеного шару комплексної сполуки, мкм;  $\varepsilon_{K.C.}$  – діелектрична проникність комплексної сполуки.

На основі аналітичного виразу (2) отримано графічні залежності ємності вологочутливого елемента, виготовлених на основі комплексних сполук, від відносної вологості, які подано на рис. 3.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що на чутливість сенсора впливає склад комплексних сполук, а саме найчутливішим в діапазоні вологості від 7 % до 27 % є ємнісний елемент виготовлений на основі гетерометалевої комплексної сполуки II, яка містить два атома стибію. Чутливість такого ємнісного елемента набуває значення 285 пФ/%. Залежність ємності від відносної вологості, в діапазоні від 30 % до 75 %, практично лінійна, а чутливість дорівнює 135 пФ/%. В діапазоні 75...95 % спостерігається різке зростання чутливості аж до 450 пФ/% для всіх ємнісних елементів виготовлених на основі гетерометалевих комплексних сполук I – IV.

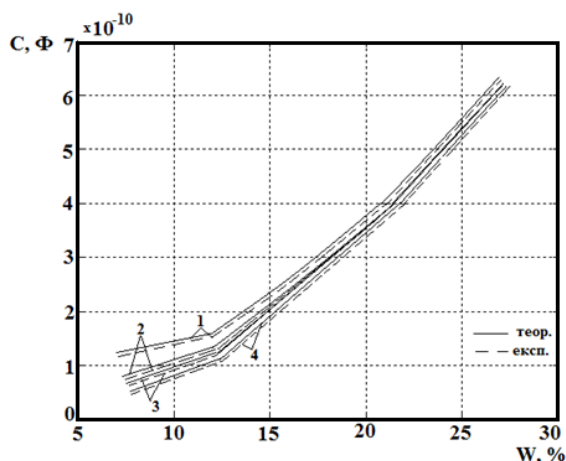


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні залежності ємності від відносної вологості повітря в діапазоні 7...27% для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

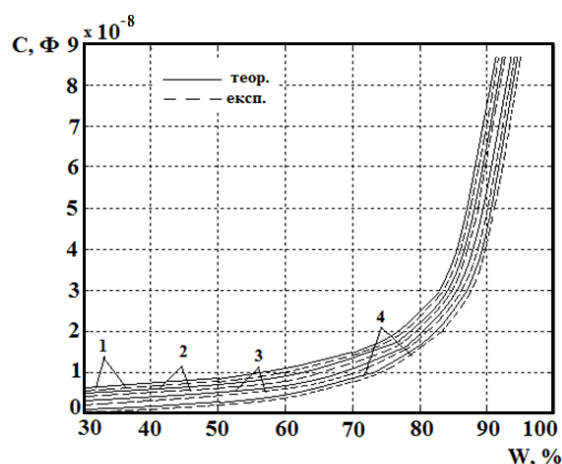


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності ємності від відносної вологості повітря в діапазоні 30...95% для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

На основі електричної схеми перетворювача вологості з частотним виходом (рис.1) з вологочутливим конденсатором, використовуючи метод Ляпунова [13], по колу позитивного зворотного зв'язку отримано рівняння, на основі якого визначено аналітичний вираз функції перетворення:

$$F = \frac{-6C_W(W) \pm 2\sqrt{9C_W^2(W) - 4R_{B2}^2C_{EB2}^2 - 4R_{B1}^2C_{EB1}^2}}{2\pi(4R_{B2}^2C_{EB2}^2 + 4R_{B1}^2C_{EB1}^2)}, \quad (3)$$

де  $C_W(W)$  – ємність вологочутливого конденсатора;  $C_{EB1}$ ,  $C_{EB2}$  – ємності  $p-n$  переходів емітер-база біполярних транзисторів VT1 та VT2;  $R_{B1}$ ,  $R_{B2}$  – опір бази біполярних транзисторів VT1 та VT2.

Чутливість параметричного перетворювача вологості з частотним виходом з вологочутливим ємнісним елементом визначається на підставі виразу (3) і описується рівнянням

$$S_W^F = \frac{-6\left(\frac{\partial}{\partial W} C_W(W)\right) \pm 18 \frac{C_W(W) \left(\frac{\partial}{\partial W} C_W(W)\right)}{\sqrt{9C_W^2(W) - 4R_{B2}^2C_{EB2}^2 - 4R_{B1}^2C_{EB1}^2}}}{2\pi(4R_{B2}^2C_{EB2}^2 + 4R_{B1}^2C_{EB1}^2)}. \quad (4)$$



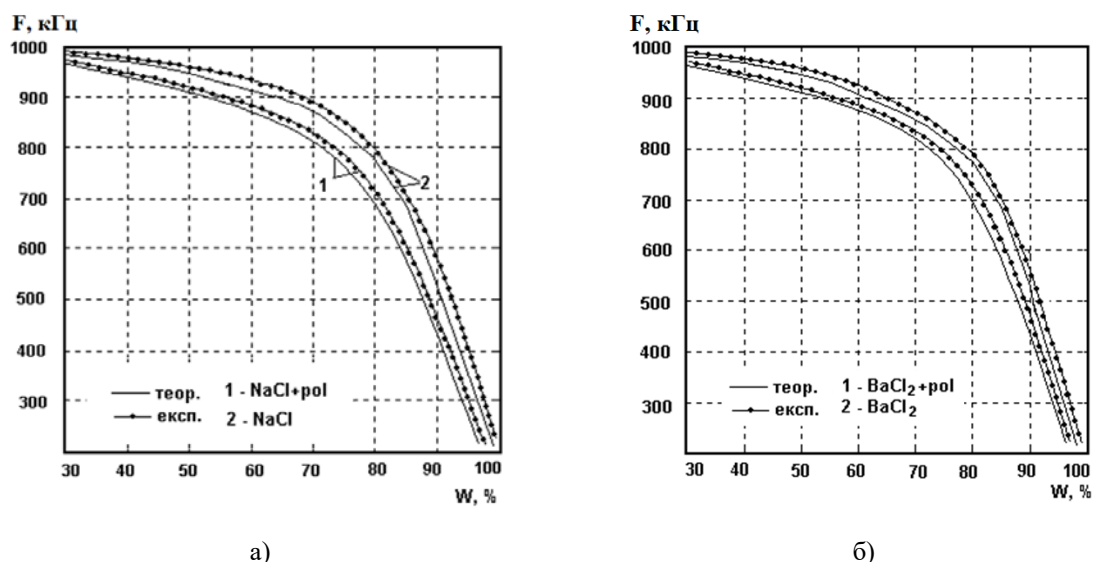


Рис. 5. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача вологості з вологочутливими елементами, виготовлених: а – на основі NaCl+полімер та NaCl; б – на основі BaCl<sub>2</sub>+полімер та BaCl<sub>2</sub>.

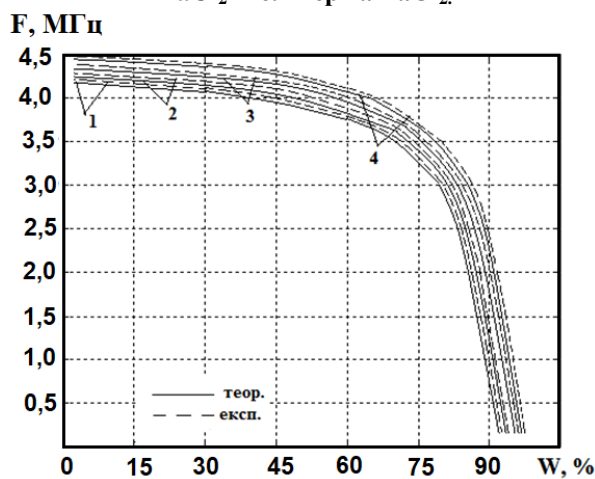


Рис. 6. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача вологості в діапазоні 7...95 % з ємнісними елементами виготовленими на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

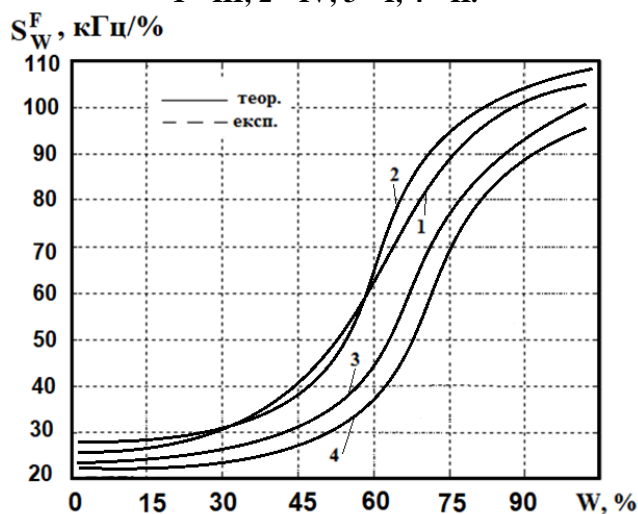


Рис. 7. Теоретичні залежності чутливості перетворювача вологості від відносної вологості повітря в діапазоні 7...95 % з ємнісними елементами виготовленими на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

Графік залежності частоти генерації параметричного перетворювача вологості з частотним виходом від зміни вологості навколишнього середовища наведено на рис.5 та рис.6, а залежність чутливості параметричного перетворювача вологості з вологочутливим ємнісним елементом подано на рис. 7. Як видно з графіка, найбільша чутливість параметричного перетворювача вологості з частотним виходом для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук (IV) та лежить у діапазоні від 60 до 95 % відносної вологості повітря і становить 62...107 кГц/%.

### Висновки

Розроблено математичну модель частотного параметричного перетворювача вологості з ємнісними елементами виготовленими на основі:  $NaCl$ +полімер,  $NaCl$ ;  $BaCl_2$ +полімер,  $BaCl_2$ , а також ємнісних елементів виготовленими на основі комплексних сполук. На основі математичного моделювання отримано графічні залежності функції перетворення та чутливості частотного параметричного перетворювача вологості. Найбільша чутливість частотного параметричного перетворювача вологості для зміни вологості навколишнього середовища становить 62...107 кГц/%.

### Список використаної літератури

1. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes. *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006. Vol. 114. № 1. P. 254–262.
2. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. Москва: Техносфера, 2007. 384 с.
3. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012. 624 с.
4. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винница: «Универсум-Винница», 1999. 275 с.
5. Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Osadchuk I. A., Seletska O. O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of Photoreactive Effect in Bipolar and MOSFET Transistors. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. Vol. 11176. (Poland, Wilga, May 27 – June 2, 2019), pp. 11176I-1–11176I-12.
6. Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Osadchuk I. A., Kolimoldayev Maksat, Komada Paweł, Mussabekov Kanat. Optical Transducers with Frequency Output. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*. Vol. 10445. (Poland, Wilga, May 28 – June 6, 2017), pp. 10445-129–10445-132.
7. Farahani H., Wagiran R., Hamidon M. N. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2014. Vol. 14. Issue 5. P. 7881–7939.
8. Pelino M., Cantalini C. Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Electronic Components*. 1994. Vol. 16. P. 69–87.
9. Tripathy Ashis, Pramanik Sumit, Manna Ayan, Bhuyan Satyanarayan, Shah Nabila Farhana Azrin, Radzi Zamri, Osman Noor Azuan Abu. Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca, Mg, Fe, Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption. *Sensors*. 2016. Vol. 16. Issue 7. P. 1135-1–135-18.
10. Lazarus Nathan, Bedair Sarah S., Lo Chiung-C., Fedder Gary K. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of Microelectromechanical System*. 2010. Vol. 19, № 1. P. 183 –191.
11. Zhi, Chen, Chi Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. 2005. Vol. 3. № 4. P. 274 –295.

12. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В. Сенсори вологості: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2003. 208 с.
13. Каяцкас А. А. Основы радиоэлектроники. Москва: Высшая школа, 1988. 464 с.

#### References

1. Bozhi, Yang, Burak, Aksak, Qiao, Lin, & Metin Sitti. (2006). Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes. *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. **114**, 1, 254–262.
2. Dzhekson, R. G. (2007). *Novejshie datchiki*. Moskva: Tekhnosfera.
3. Sharapova, V. M., & Polishhuka, E. S. (Eds.) (2012). *Datchiki: Spravochnoe posobie*. Moskva: Tekhnosfera.
4. Osadchuk, V. S., & Osadchuk, O. V. (1999). *Reaktyvni vlastyvoli tranzystoriv i tranzystornykh skhem: monohrafiia*. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia».
5. Osadchuk, A. V., Osadchuk, V. S., Osadchuk, I. A., Seletska, O. O., Kisala, P., & Nurseitova, K. (2019). Theory of Photoreactive Effect in Bipolar and MOSFET Transistors. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. Vol. 11176. (Poland, Wilga, May 27 – June 2, 2019), pp. 111761I-1–111761I-12.
6. Osadchuk, A. V., Osadchuk, V. S., Osadchuk, I. A., Kolimoldayev, Maksat, Komada, Paweł, & Mussabekov, Kanat. (2017). Optical Transducers with Frequency Output. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*. Vol. 10445. (Poland, Wilga, May 28 – June 6, 2017), pp. 10445-129–10445-132.
7. Farahani, H., Wagiran, R., & Hamidon, M. N. (2014). Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. **14**, 5, 7881–7939.
8. Pelino M., & Cantalini C. (1994). Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Electronic Components*. 16, 69–87.
9. Tripathy, Ashis, Pramanik, Sumit, Manna, Ayan, Bhuyan, Satyanarayan, Shah, Nabila Farhana Azrin, Radzi, Zamri, & Osman, Noor Azuan Abu. (2016). Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca, Mg, Fe, Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption. *Sensors*. **16**, 7, 1135-1–135-18.
10. Lazarus, Nathan, Bedair, Sarah S., Lo, Chiung-C., & Fedder, Gary K. (2010). CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of Microelectromechanical System*. **19**, 1, 183 –191.
11. Zhi, Chen, & Chi Lu. (2005). Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. **3**, 4, 274 –295.
12. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., & Krylyk L. V. (2003). *Sensory volohosti: monohrafiia*. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia».
13. Kayatskas, A. A. (1988). *Osnovy radyoe lektroniki*. Moskva, Vysshaya shkola.

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6662-9141.

Крилик Людмила Вікторівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Вінницького національного технічного університету, e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com.

Осадчук Ярослав Олександрович – к.т.н., доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com.

# ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Відповідальний за випуск	Хомченко Анатолій Никифорович, д.ф.-м.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України
Технічний редактор	Литвиненко Олена Іванівна к.т.н., доцент
Макетування	Омельчук Антон Анатолійович

Свідоцтво про державну реєстрацію засобу масової інформації –  
серія КВ № 23529-13369Р от 03.08.2018

Підписано до друку 29.08.2020 р. Формат 60x84/8 Папір офсетний.  
Ум. друк. аркушів 36,1. Замовлення № 9/0820. Наклад 120 прим.

© Херсонський національний технічний університет 2020

---

Адреса редакції: 73008, м. Херсон, Бериславське шосе, 24, корп. 3,  
каб. 425, тел. (0552) 32-69-95. E-mail: aqmm@kntu.net.ua

Видавництво та друк: «ОЛДІ-ПЛЮС»  
73034, м. Херсон, вул. Паровозна, 46-а  
E-mail: office@oldiplus.com  
Свід. ДК № 6532 від 13.12.2018 р.