

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

5.2019

---

# ВІСНИК

**Хмельницького**

**національного**

**університету**

**Технічні науки**

---

**Technical sciences**

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2019, Issue 5, Volume 277

Хмельницький

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

Затверджений як фахове видання (перереєстрація)  
Наказ МОН 04.07.2014 № 793

*Засновано в липні 1997 р.*

*Виходить 6 разів на рік*

---

**Хмельницький, 2019, № 5 (277)**

---

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

Включено до науково-метричних баз:

<b>Google Scholar</b>	<a href="http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aIUP9OYAAAAJ">http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&amp;user=aIUP9OYAAAAJ</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>РИНЦ</b>	<a href="http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650">http://elibrary.ru/title_about.asp?id=37650</a>
<b>Polish Scholarly Bibliography</b>	<a href="https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221">https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221</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, ректор 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>Голова редакційної колегії серії "Технічні науки"</b>	<b>Бойко Ю.М.</b> , д.т.н., професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки, начальник науково-дослідної частини Хмельницького національного університету
<b>Відповідальний секретар</b>	<b>Гуляєва В. О.</b> , завідувач відділом інтелектуальної власності і трансферу технологій 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., **Грабко В.В.**, д.т.н., **Диха О.В.**, 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., **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., **Мясіщев О.А.**, д.т.н., **Нелін Є.А.**, д.т.н., **Павлов С.В.**, д.т.н., **Параска О.А.**, к.т.н., **Прохорова І.А.**, д.т.н., **Рогатинський Р.М.**, д.т.н., **Горошко А.В.**, д.т.н., **Сарібекова Д.Г.**, д.т.н., **Семенко А.І.**, д.т.н., **Славінська А.Л.**, д.т.н., **Сорокати Р.В.**, 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., **Ясній П.В.**, д.т.н., професор, **Бубулєс Альгімантас**, доктор наук (Литва), **Елсаєд Ахмед Ельнашар**, доктор наук (Єгипет), **Кальчинські Томаш**, доктор наук (Польща), **Коробко Євгенія Вікторівна**, д.т.н. (Білорусія), **Лунтовський Андрій Олегович**, 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 № 12 від 26.06.2019 р.**

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

<b>т</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@gmail.com">visnyk.khnu@gmail.com</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.  
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
Серія КВ № 9722 від 29 березня 2005 року

© Хмельницький національний університет, 2019  
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2019

## ЗМІСТ

**МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ**

<b>М. Є. СКИБА, Н. М. СТЕЧИШИНА, Н. К. МЕДВЕДЧУК, М. С. СТЕЧИШИН, В. В. ЛЮХОВЕЦЬ</b> БЕЗВОДНЕВЕ АЗОТУВАННЯ У ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ .....	7
<b>Ю. В. БАТЫГИН, С. А. ШИНДЕРУК, Е. А. ЧАПЛЫГИН, А. А. КОРЯК, А. В. ДОВГИЙ</b> ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА С ВНЕШНИМ БИФИЛЯРНЫМ СОЛЕНОИДОМ. РАСЧЁТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ .....	13
<b>Ю. В. САВИЦЬКИЙ</b> ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГЛИБОКОГО ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТОЧНИХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «СТАКАН». ЧАСТИНА 1 .....	19
<b>Р. В. АМБАРЦУМЯНЦ, С. А. РОМАШКЕВИЧ, А. П. ЛИПИН</b> КИНЕТОСТАТИКА ГРУППЫ АССУРА ЧЕТВЕРТОГО КЛАССА ВТОРОГО ПОРЯДКА С ОДНОЙ ПОСТУПАТЕЛЬНОЙ ПАРОЙ .....	24
<b>О. І. МАЛАКОВ, С. А. БУРЛАКА, Ю. О. МИХАЛЬОВА</b> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ЗМІШУВАЧІВ .....	30

**ТЕХНОЛОГІЇ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

<b>А. Л. СЛАВІНСЬКА</b> ПІВСТОЛІТТЯ ОСВІТНЬО-НАУКОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ КАФЕДРИ ТЕХНОЛОГІЇ І КОНСТРУЮВАННЯ ШВЕЙНИХ ВИРОБІВ ХМЕЛЬНИЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ .....	34
<b>С. Г. КУЛЕШОВА</b> ПЕРЦЕПТИВНИЙ ПІДХІД ДО ОЗНАК ВІЗУАЛІЗАЦІЇ В МОДЕЛЮВАННІ ПРОЕКТНОГО РІШЕННЯ ОДЯГУ .....	40
<b>О. М. ЛУЩЕВСЬКА, Л. В. БУХАНЦОВА, Л. В. КРАСНЮК, О. М. ТРОЯН, О. Й. ЯНЦАЛОВСЬКИЙ</b> УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ АДАПТИВНОГО БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ОДЯГУ .....	47
<b>А. Л. СЛАВІНСЬКА О. П. СИРОТЕНКО</b> ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ В ОРНАМЕНТАХ УКРАЇНСЬКОЇ НАЦІОНАЛЬНОЇ ВИШИВКИ .....	57
<b>І. О. ЗАСОРНОВА, О. С. ЗАСОРНОВ, В. С. КОСТЮК</b> ВИБІР ВИДІВ АПЛІКАЦІЙ ДЛЯ ОЗДОБЛЕННЯ КОЛЕКЦІЇ «READY TO RAIN», ВИКОНАНОЇ В СТИЛІ SPORTCASUAL .....	64
<b>Е. А. ЕЛЬНАШАР, О. В. ЗАХАРКЕВИЧ, А. В. СЕЛЕЗНЬОВА, С. Г. КУЛЕШОВА</b> ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ БАЗИ ДАНИХ ОДЯГУ МЕДИЧНОГО ПЕРСОНАЛУ .....	70
<b>О. М. ДОМБРОВСЬКА, В. В. МИЦА</b> ПЕРЕДПРОЕКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМЕНОГО ОДЯГУ КУХАРІВ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА .....	77
<b>Л. В. КРАСНЮК, О. М. ТРОЯН, О. О. ЮЗЮК</b> ПРОЕКТУВАННЯ ОДЯГУ З РУКАВОМ ПОКРОЮ РЕГЛАН З ПІДВИЩЕНИМ РІВНЕМ СТАТИЧНОЇ ВІДПОВІДНОСТІ .....	81

<b>А. Л. СЛАВІНСЬКА, О. П. СИРОТЕНКО, Т. В. ПАШКО</b> ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ УНІВЕРСАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ШТАНІВ НА ОСНОВІ АНТРОПОМЕТРИЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ЗОН .....	88
<b>О. А. ДІТКОВСЬКА</b> АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РИНКУ ДИТЯЧОГО ЗИМОВОГО ОДЯГУ ВІДОМИХ БРЕНДІВ .....	92
<b>М. О. КУЩЕВСЬКИЙ, Ю. В. КОШЕВКО</b> ВПЛИВ РІДИННО-АКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	99
<b>О. П. КИЗИМЧУК, Л. М. МЕЛЬНИК, М. Ю. ГУСАР, А. А. ЛАТИШОВА</b> ВЛАСТИВОСТІ ТРИКОТАЖНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОМПРЕСІЙНИХ ВИРОБІВ .....	103
<b>О. В. ПАХОЛЮК, Г. О. ПУШКАР, І. С. ГАЛИК, Б. Д. СЕМАК</b> ПРОБЛЕМИ ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ БІОСТІЙКОСТІ ТЕКСТИЛЬНИХ ЦЕЛЮЛОЗОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ .....	109
<b>Т. А. НАДОПТА, І. Т. СОЛТИК, О. А. МИХАЙЛОВСЬКА</b> ПРИНЦИПИ АНАЛІТИЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ БАЗОВОЇ ОСНОВИ ДЕТАЛЕЙ ВЕРХУ ВЗУТТЯ .....	114
<b>Т. М. ЛИПСЬКИЙ</b> ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРЕСИВНИХ 3D ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ВЗУТТЯ ЗА ІНДИВІДУАЛЬНИМ ЗАМОВЛЕННЯМ .....	120
<b>Н. В. ПЕРВАЯ, О. А. АНДРЕЄВА, І. І. ЛОШКАРЬОВА</b> СУЧАСНІ ТРЕНДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ РІДИННОГО ОЗДОБЛЕННЯ ШКІРИ .....	126
<b>С. О. БУЗИНА, І. О. СІДАК</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ КОСМЕТИЧНИХ МИЙНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВОЛОССЯ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ СУДОВО-ТОВАРОЗНАВЧИХ ЕКСПЕРТИЗ .....	134
<b>Т. В. ІВАНІШЕНА, О. О. ІВАНІШЕНА</b> ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БЕЗПЕЧНОСТІ ПАКУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ .....	142
<b>РАДІОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ</b>	
<b>О. С. ПИВОВАР, В. Д. БИДЮК, Я. В. ВЕРЖБИЦЬКИЙ</b> МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДУ НЕЛІНІЙНОЇ РЕАКЦІЇ У СЕГМЕНТОВАНИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ .....	147
<b>І. І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, А. В. ТКАЧУК</b> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОГЕРЕНТНО-ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕМЕНТАРНИХ КОДІВ .....	152
<b>Т. М. МАНСУРОВ, Г. И. ГУЛИЕВА, Э. Т. МАНСУРОВ</b> РАЗРАБОТКА ФОТОННОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА КВАНТОВ И МЕТОДА РАСЧЕТА ЕГО ПАРАМЕТРОВ .....	159
<b>О. В. ОСАДЧУК, В. В. МАРТИНЮК, Т. І. СИДОРУК, М. В. ЄВСЄЄВА</b> СЕНСОР НА ОСНОВІ ГЕТЕРОМЕТАЛІЧНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ СПОЛУКИ КУПРУМУ(II) З N,N'-БІС(САЛЦИЛІДЕН)ТІОСЕМИКАРБАЗИДОМ .....	169
<b>О. О. РУБАНЕНКО, В. П. ЯНОВИЧ, І. О. ГУНЬКО</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ПОШКОДЖЕННЯ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ .....	176
<b>Л. В. КАРПОВА1, О. О. БОЙКО, І. І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ</b> МОДЕЛЮВАННЯ НВЧ ПРИСТРОЇВ І АНТЕН В ЗАДАЧАХ ЇХ АНАЛІЗУ, СИНТЕЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ .....	180

<b>О. В. МАЗУРЕЦЬ</b> МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО ФОРМУВАННЯ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ .....	189
<b>О. В. ОСАДЧУК, Л. В. КРИЛИК, О. О. СЕЛЕЦЬКА</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ВИМІРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ .....	195
<b>В. І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Л. В. КАРПОВА, Т. С. ШЕВЧУК</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТУЖНОСТІ СИГНАЛУ НА ВХОДІ ПРИЙМАЧА МОБІЛЬНОЇ СТАНЦІЇ ВІД ПАРАМЕТРІВ БАЗОВОЇ СТАНЦІЇ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНО МОЖЛИВОГО РАДІУСА ЗОНИ ВПЕВНЕНОГО ПРИЙОМУ В МЕРЕЖІ LTE .....	199
<b>О. В. МАЗУРЕЦЬ, О. Ю. ТИМУШ, А. П. ФЕДОРКО</b> ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ТЕМАТИЧНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕКСТОВИХ ПОВІДОМЛЕНЬ .....	203
<b>І. С. ПЯТІН, В. В. МІШАН, О. О. КУХАРЕЦЬ</b> СИСТЕМА ЗВ'ЯЗКУ З QPSK МОДУЛЯЦІЄЮ І СИНХРОНІЗАЦІЄЮ НЕСУЧОЇ .....	211
<b>В. Т. КОНДРАТОВ</b> ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕТРОЛОГИЯ: МАГНИТОПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ И ИНФОРМАЦИИ СКВОЗЬ МАТЕРИАЛ ИЛИ ВЕЩЕСТВО. ЧАСТЬ 8. ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПРОВОДЯЩИХ И СЛАБО ПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ .....	218
<b>В. С. ПЕТРУШАК</b> РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ПОШУКУ МАКСИМАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ .....	230
<b>В. І. СТЕЦЮК, В. В. МЕДВЕДЬ</b> ПРОЕКТУВАННЯ СУЧАСНИХ ШИРОКОСМУГОВИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ .....	235
<b>В. О. ПАРХОМЕНКО, В. П. РОЙЗМАН, А. В. ГОРОШКО</b> АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИЙ МЕТОД НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ І ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ КОМПАУНДОВАНИХ КОНДЕНСАТОРІВ .....	239
<b>Д. Ю. ЗУБЕНКО, О. Н. ПЕТРЕНКО, В. О. ОРЛОВ</b> ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЗОВНІШНЬОГО ВЕНТИЛЯТОРА ОХОЛОДЖЕННЯ В ЕЛЕКТРОДВИГУНІ ВИСОКОЇ НАПРУГИ .....	243
<b>Л. О. КОВТУН, Р. ФРАНЧУК, В. М. ТКАЧУК</b> ВИБІР АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ НАВЧАЛЬНОЇ СИСТЕМИ .....	248
<b>А. С. СВЕРСТЮК, О. А. БАГРІЙ-ЗАЯЦЬ, А. Б. ГОРКУНЕНКО, З. В. МАЙХРУК, О. В. МОЙСЕЄНКО</b> РОЗРОБКА КІБЕРФІЗИЧНИХ БІОСЕНСОРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	252
<b>К. Л. ГОРЯЩЕНКО, О. В. ШЕВЧУК</b> ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖ В СТАНДАРТІ TMN .....	258
<b>ОБМІН ПРАКТИЧНИМ ДОСВІДОМ, ТЕХНОЛОГІЯМИ ТА ОБГОВОРЕННЯ</b>	
<b>О. О. РУБАНЕНКО, В. П. ЯНОВИЧ, А. А. ВИДМИШ</b> АНАЛІЗ РОБОТИ ВДЕ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ ТА ШЛЯХИ КОМПЕНСАЦІЇ ЇХ НЕСТАБІЛЬНОСТІ .....	264

---

<b>О. В. BURYKIN, J. V. MALOHULKO, K. O. POVSTIANKO</b> OPTIMIZATION OF CONNECTION SCHEMES AND OPERATING MODES FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES IN LOCAL ELECTRIC SYSTEMS .....	270
<b>Р. В. ХИНЕВИЧ, Д. Є. ЄРМОЛЕНКО, О. Л. ЯВОРСЬКИЙ</b> ВІЗУАЛЬНІ ПЛАТФОРМИ ЯК СПОСІБ ПРОСУВАННЯ ВЛАСНОЇ ФОТОТВОРЧОСТІ ТА ВЗАЄМОДІЇ З АУДИТОРІЄЮ .....	275
<b>С. Л. БУКОЄМСЬКИЙ</b> АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ПІДТРИМКИ ПАРКІВ ТЕХНІКИ ДПСУ .....	281
<b>Ю. П. ЗАСПА</b> СИЛЬНА, СЛАБКА ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СКЛАДОВІ МАСИ ЕЛЕКТРОНА, ПРОТОНА ТА НЕЙТРОНА, РОЗРАХОВАНІ ЗА УМОВИ ВИРІВНЮВАННЯ ВІДПОВІДНИХ ЕЛЕКТРОЗАРЯДОВИХ ТА МАГНІТНОЗАРЯДОВИХ РАДІУСІВ ЦИХ ПСЕВДОЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК .....	288
<b>О. І. ХИЖАН, В. К. БУХТІЯРОВ, Л. О. КОВШУН</b> МЕТОДОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО НАВЧАЛЬНОГО КУРСУ З ДИСЦИПЛІНИ ФІЗИЧНА І КОЛОЇДНА ХІМІЯ .....	291
<b>В. І. БУЛЬБА, С. В. МИХАЛКІВ</b> МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ ТЯГОВОГО РЕДУКТОРА ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ .....	296

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ВИМІРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ

Розроблено мікроелектронний вимірювач вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202. Виконано математичне моделювання характеристик розробленого вимірювача вологості, в тому числі отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості. Досліджено вплив температури на характеристики мікроелектронного вимірювача вологості, в результаті чого встановлено, що зі зростанням температури діапазон відносної вологості та частота генерації розробленого мікроелектронного вимірювача вологості зменшується. Зокрема, найбільшу чутливість вимірювач вологості має при температурі 20 °С, а середнє значення чутливості при температурі 20 °С в діапазоні вимірювання відносної вологості 20÷95% дорівнює 45 кГц/%. Результати моделювання підтверджено отриманими експериментальними даними.

Ключові слова: вимірювач вологості, вологочутливий резистор, функція перетворення, рівняння чутливості.

A. V. OSADCHUK, L. V. KRYLIK, O. O. SELETSKA

Vinnitsia National Technical University

## MATHEMATICAL SIMULATION OF THE MICROELECTRONIC MEASUREMENT DEVICE OF HUMIDITY WITH A FREQUENCY OUTPUT SIGNAL

A microelectronic humidity meter with a frequency output signal that includes humidity-sensitive resistor HR202 has been developed. The self-oscillating meter is developed using a transistor structure with negative resistance based on field-effect double-gate and bipolar transistors. Negative differential resistance, which is formed by parallel connection of the inductance and the impedance with a capacitive component on the electrodes of the emitter and collector of the bipolar transistor, causes the occurrence of electrical oscillations in the circuit. The voltage divider is formed by two resistors, one of which is moisture-sensitive. In addition, the electric power supply of field-effect and bipolar transistors depends on the magnitude of the variation of the resistance in the moisture-sensitive resistor with a changing of the humidity in the studied environment. The protective capacitor prevents the flowing of AC through a direct voltage source. Consequently, at the moisture-sensitive resistor, the capacitive component of the impedance of the electrodes emitter and collector of the bipolar transistor is changing, that results to an effective change in the frequency of the oscillatory circuit. Mathematical simulation of the measuring device is carried out, that enabled to obtain the analytical expressions of the transfer function and the sensitivity equation. It has been experimentally and theoretically determined that the range of relative humidity and the generation frequency of the developed microelectronic humidity meter decreases, with increasing temperature. The developed humidity meter has the highest sensitivity at a temperature of 20 °C. The average sensitivity at a temperature of 20 °C within the range of measuring relative humidity of 20 ÷ 95% is 45 kHz /%.

Keywords: meter of humidity, humidity sensitive resistor, transfer function, equation of sensitivity.

### Вступ

Відомо, що вологість відіграє істотну роль у кожній частині Землі в біології та автоматизованих виробничих процесах. Для того, щоб мати бажану атмосферу навколишнього середовища, необхідно контролювати, визначати та регулювати вологість навколишнього середовища в різних умовах, при зміні значень температури від низьких до високих, або в сумішах з іншими газами, за допомогою точних та непрямих сенсорів. Насправді необхідність захисту навколишнього середовища призвела до розширення різноманітності розробок сенсорів вологості на основі використання фізико-хімічних методів за наявності органічних, неорганічних або гібридних матеріалів. Прогрес сенсорних систем вологості включає в себе значні зусилля щодо покращення розробок перетворювача, зокрема його чутливих елементів, конструктивного рішення, принципу дії та технології виготовлення [1–6]. У зв'язку з цим ключовими характеристиками для досягнення потрібної величини ефективності, оптимізації поверхні, простоти процесу виробництва та інвестиційних витрат є матеріали перетворювача, а також наявність відповідних технологій виробництва, вільний вибір геометричних властивостей приладу.

Використання первинних перетворювачів вологості в частотних пристроях, в яких вологість перетворюється у частоту, дозволяє значно підвищити чутливість та точність вимірювання, спростити схеми подальшої обробки інформації. А застосування принципу перетворення «вологість – частота» на основі транзисторних структур з від'ємним опором, дає змогу виключити використання АЦП при обробці сигналів, що знижує собівартість систем контролю та управління, дозволяє підвищити не тільки чутливість, а й точність перетворення інформативного сигналу – відносної вологості навколишнього середовища в частоту [7–10].

Отже, розробка та впровадження їх в практику на тепер є актуальною задачею.

### Теоретичні та експериментальні дослідження

Метою дослідження є розробка нового мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором на основі органічного полімеру (рис. 1) [11], а також вплив нового схемотехнічного рішення та температури досліджуваного середовища на чутливість до вимірювального параметра та діапазон вимірювання відносної вологості.

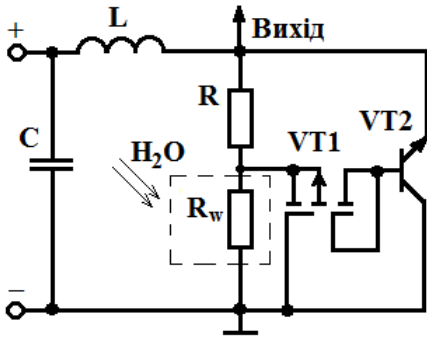


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом

Автогенераторний вимірювач розроблено на основі транзисторної структури з від’ємним опором на основі польового двозатворного транзистора VT1 та біполярного транзистора VT2. Від’ємний диференціальний опір, який утворений паралельним включенням повного опору з емісною складовою на електродах емітер та колектор біполярного транзистора VT2 та індуктивності L, приводить до виникнення електричних коливань в контурі. Дільник напруги утворюють два резистора, один з яких вологочутливий  $R_w$ . Крім того, електричне живлення польового VT1 та біполярного транзисторів VT2 залежить від величини зміни опору вологочутливого резистора  $R_w$  зі зміною вологості досліджуваного середовища. Обмежувальний конденсатор C запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги. При наступній дії вологи на

вологочутливий резистор  $R_w$  змінюється емісна складова повного опору на електродах емітер та колектор біполярного транзистора VT2, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

Експериментальним зразком слугував вологочутливий резистор HR202 на основі органічного полімеру. Дослідження і вивчення полімерних сенсорів вологості тривали протягом останніх чотирьох десятиліть та використовувались в промисловості. Більшість з цих сенсорів розроблялись на основі тонких плівок пористих полімерів [2] та застосовують принципи реєстрації, подібні до принципів сенсорів на основі металооксидних керамічних сенсорів. Робота сенсорів ґрунтується на фізичному та хімічному поглинанні води плівками та конденсації в присутності капілярних пор, а отже, і зміні деяких фізичних та електричних властивостей перетворювача. Величина зміни об’ємної провідності або діелектричної проникності залежить від внутрішніх властивостей.

На основі електричної схеми мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом (рис. 1) з вологочутливим резистором HR202, використовуючи метод Ляпунова [12], по колу позитивного зворотного зв’язку отримано рівняння, на основі якого визначено аналітичний вираз функції перетворення:

$$F = \frac{\pi \cdot R_w(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2} \pm \sqrt{\pi^2 \cdot R_w^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2 + H_1 - H_2 + H_3 + H_4 + H_5}}{4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_w(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}}, \quad (1)$$

$$\text{де } H_1 = 4 \cdot \pi^2 \cdot R_w^2(W) \cdot L \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2;$$

$$H_2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L^2 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2;$$

$$H_3 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_w^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}^2;$$

$$H_4 = L \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}^2 + L \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds};$$

$$H_5 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_w^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}.$$

У вище наведених аналітичних виразах використовувались такі позначення:  $R_w(W)$  – вологочутливий резистор;  $L$  – індуктивність коливального контура;  $C_{eb}$  – ємність р-п-переходу емітер-база;  $C_{ds}$  – ємність стік-витік;  $C_{gs}$  – ємність затвор-витік.

Використовуючи вираз (1) теоретично розраховано та експериментально досліджено функції перетворення розробленого мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202 для різних значень температур досліджуваного середовища (рис. 2).

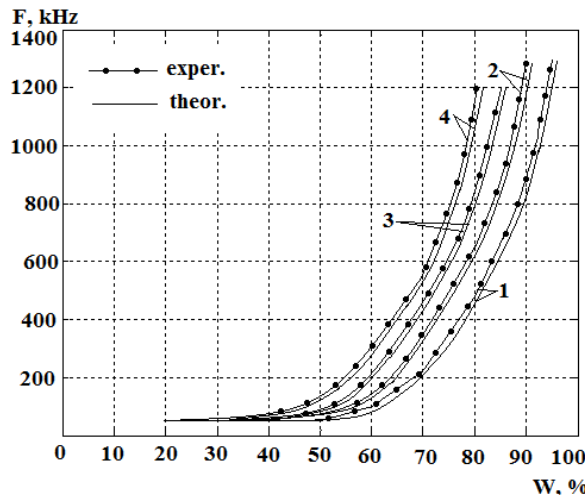


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації від зміни відносної вологості повітря мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202: 1 – T=20 °C; 2 – T=30 °C; 3 – T=40 °C; 4 – T=50 °C



З рис. 2 видно, що температура суттєво впливає на діапазон відносної вологості досліджуваного середовища. Із зростанням температури діапазон відносної вологості досліджуваного середовища та частота генерації розробленого мікроелектронного вимірювача вологості зменшується. Діапазони зміни частоти генерації розробленого мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом (рис. 1) та відносної вологості досліджуваного середовища набувають таких значень:

- 1250 кГц ( $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 20 \div 95\%$ );
- 1250 кГц ( $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 20 \div 90\%$ );
- 1150 кГц ( $T = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 20 \div 85\%$ );
- 1150 кГц ( $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W = 20 \div 80\%$ ).

Аналітичний вираз рівняння чутливості (2) нового схемотехнічного рішення визначено на основі рівняння (1):

$$S_W^F = \frac{\pi \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2} \left( \frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) \pm \frac{D_1 \cdot \left( \frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) + D_2 \cdot \left( \frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) + D_3 \cdot \left( \frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right) + D_4 \cdot \left( \frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right)}{\sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2 + H_1 - H_2 + H_3 + H_4 + H_5}} - \frac{\pi \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2} \pm \sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2 + H_1 - H_2 + H_3 + H_4 + H_5} \left( \frac{\partial R_W(W)}{\partial W} \right)}{4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}}, \quad (2)$$

де  $D_1 = \pi^2 \cdot R_W(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2$ ;  $D_2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}^2$ ;  
 $D_3 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds} \cdot C_{gs2}^2$ ;  $D_4 = 4 \cdot \pi^2 \cdot L \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{gs2}$ .

На рис. 3 подано експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості та температури досліджуваного середовища розробленого мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202.

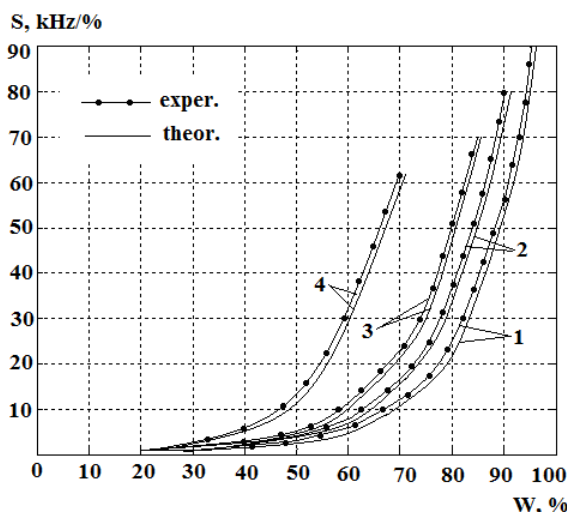


Рис. 3. Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202: 1 –  $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T=30\text{ }^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T=40\text{ }^\circ\text{C}$ ; 4 –  $T=50\text{ }^\circ\text{C}$

З рис. 3 видно, що чутливість розробленого вимірювача вологості з вологочутливим резистором HR202:

- в діапазоні вимірювання  $W = 20 \div 95\%$  при  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$  змінюється від 1 до 90 кГц/%;
- в діапазоні вимірювання  $W = 20 \div 90\%$  при  $T = 30\text{ }^\circ\text{C}$  змінюється від 1 до 80 кГц/%;
- в діапазоні вимірювання  $W = 20 \div 85\%$  при  $T = 40\text{ }^\circ\text{C}$  змінюється від 1 до 70 кГц/%;
- в діапазоні вимірювання  $W = 20 \div 80\%$  при  $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$  змінюється від 1 до 65 кГц/%;

Отже, можна зробити висновок, що нова розробка має найбільшу чутливість до вимірювального параметра – вологості при  $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Висновки

Розроблено мікроелектронний вимірювач вологості з частотним виходом з вологочутливим резистором HR202. Проведено математичне моделювання розробки, на основі якого визначено аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості. Експериментально та теоретично встановлено, що

температура суттєво впливає на діапазон відносної вологості досліджуваного середовища. Із зростанням температури діапазон відносної вологості та частота генерації розробленого мікроелектронного вимірювача вологості зменшується. Найбільшу чутливість вимірювач вологості має при  $T = 20^\circ\text{C}$ . Середнє значення чутливості при  $T = 20^\circ\text{C}$  в діапазоні вимірювання  $W = 20 \pm 95\%$  дорівнює  $45 \text{ кГц}/\%$ .

Аналіз проведених теоретичних і експериментальних досліджень показав, що математична модель описує поведінку мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом з похибкою  $\pm 1,5\%$ .

### Література

1. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical. – 30 March 2006. – Vol. 114. – № 1. – P. 254–262.
2. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // Sensors. – 2014. – № 14. – P. 7881–7939. doi: 10.3390/s140507881.
3. Mario, Pelino. Principles and applications of ceramic humidity sensors / Mario Pelino, Carlo Cantalini // Active and Passive Elec. Comp. – 1994. – Vol. 16. – P. 69–87.
4. Ashis, Tripathy. 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 / Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman // Sensors. – 2016. – № 16. – P. 1135. doi:10.3390/s16071135.
5. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor / Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder // Journal of microelectromechanical system. – february 2010. – Vol. 19. – № 1. – P. 183–191. doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036584.
6. Zhi, Chen. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms / Zhi Chen, Chi Lu // Sensor Letters. – 2005. – Vol. 3. – P. 274 – 295. doi:10.1166/sl.2005.045.
7. Бабаян Р. Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом / Р. Р. Бабаян // Приборы и системы управления. – 1996. – № 11. – С. 24 – 26.
8. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем : монографія / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 1999. – 275 с.
9. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / [О. В. Осадчук]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2000. – 303 с.
10. Сенсори вологості : монографія / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик]. – Вінниця : «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2003. – 208 с.
11. Пат. № 116661 України. МПК(2017.01) G01N 27/00. Пристрій для вимірювання вологості / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В., Селецька О. О., Мартинюк В. В., Білилівська О. П. – № u2016 13449 ; заявл. 27.12.2016 ; опубл. 25.05.2017. Бюл. № 10.
12. Каяцкас А. А. Основы радиоэлектроники / Каяцкас А. А. – М. : Высшая школа, 1988. – 464 с.

### References

1. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical. – 30 March 2006. – Vol. 114. – № 1. – P. 254–262.
2. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // Sensors. – 2014. – № 14. – P. 7881–7939. doi: 10.3390/s140507881.
3. Mario, Pelino. Principles and applications of ceramic humidity sensors / Mario Pelino, Carlo Cantalini // Active and Passive Elec. Comp. – 1994. – Vol. 16. – P. 69–87.
4. Ashis, Tripathy. 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 / Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman // Sensors. – 2016. – № 16. – P. 1135. doi:10.3390/s16071135.
5. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor / Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder // Journal of microelectromechanical system. – february 2010. – Vol. 19. – № 1. – P. 183–191. doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036584.
6. Zhi, Chen. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms / Zhi Chen, Chi Lu // Sensor Letters. – 2005. – Vol. 3. – P. 274–295. doi:10.1166/sl.2005.045.
7. Babayan R. R. Preobrazovateli neelektricheskikh velichin s chastotnym vyxodom, *Pribory i sistemy upravleniya*. 1996. No. 11, pp. 24–26.
8. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V. Reaktyvni vlastyivosti tranzystoriv i tranzystornykh skhem : monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia», 1999, 275 p.
9. Osadchuk O. V. Mikroelektronni chastotni peretvoriuvachi na osnovi tranzystornykh struktur z vidiemnym oporom: monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia», 2000, 303 p.
10. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Krylyk L. V. Sensory volohosti: monohrafiia. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia», 2003, 208 p.
11. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Krylyk L. V., Seletska O. O., Martyniuk V. V., Bilylivska O. P. *Prystrii dlia vymiruvannia volohosti*. Pat. No.116661 Ukrainy, MPK (2017.01) G01N 27/00, Issue 10.
12. Kayatskas A. A. Osnovy radyoelektroniki. Moskva, Vysshaya shkola, 1988, p. 464.

Рецензія/Peer review : 22.05.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Петрук В. Г.