

ISSN 2307-5732

DOI 10.31891/2307-5732

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

2.2021

ВІСНИК

Хмельницького

національного

університету

Технічні науки

Technical sciences

SCIENTIFIC JOURNAL

HERALD OF KHMELNYTSKYI NATIONAL UNIVERSITY

2021, Issue 2, Volume 295

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, 2021, № 2(295)

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

Включено до науково-метричних баз:

Google Scholar	http://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=aIUP9OYAAAAAJ
Index Copernicus	http://jml2012.indexcopernicus.com/passport.php?id=4538&id_lang=3
Polish Scholarly Bibliography	https://pbn.nauka.gov.pl/journals/46221
CrossRef	http://doi.org/10.31891/2307-5732

Головний редактор	Скиба М. Є. , д.т.н., професор, заслужений працівник народної освіти України, член-кореспондент Національної академії педагогічних наук України, ректор Хмельницького національного університету
Заступник головного редактора	Синюк О. М. , д.т.н., професор кафедри машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем Хмельницького національного університету
Відповідальний секретар	Горященко С. Л. , 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., **Грабко В.В.**, д.т.н., **Диха О.В.**, д.т.н., **Защепкіна Н.М.**, 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., **Мясіщев О.А.**, д.т.н., **Нелін Є.А.**, д.т.н., **Павлов С.В.**, д.т.н., **Параска О.А.**, к.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., **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, **Бубуліс 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), **Любош Хес**, доктор наук (Польща), **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 № 17 від 27.05.2021 р.**

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

	(038-2) 67-51-08	web:	http://journals.khnu.km.ua/vestnik
e-mail:	visnyk.khnu@khmnu.edu.ua		http://lib.khnu.km.ua/visnyk_tup.htm
	visnyk.khnu@gmail.com		

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, 2021
© Редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету", 2021

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ

Г.Д. КОБИЩАН, Ю.О. БАСОВА, Л.М. ГУБА, А.С. ТКАЧЕНКО ОСОБЛИВОСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАНДАРТИЗАЦІЇ Й СЕРТИФІКАЦІЇ МИЙНИХ ЗАСОБІВ	7
Ю.С. СОКОЛАН, Л.В. КУЧЕРЕНКО АНАЛІЗ ДОСВІДУ ПЛАНУВАННЯ СИСТЕМИ БЛАГОУСТРОЮ ЖИТЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ	17
РОМАН КАМІНСЬКИЙ, НАТАЛІЯ ШАХОВСЬКА, БОГДАН ХУДОБА ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ТЕКСТІВ РІЗНИХ СТИЛІВ, ПОДАНИХ ЦІЛОЧИСЕЛЬНИМИ ЕКВІДИСТАНТНИМИ ПОСЛІДОВНОСТЯМИ КІЛЬКОСТІ ЛІТЕР У СЛОВАХ	26

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ,
СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

І.З. МАНУЛЯК, С.І. МЕЛЬНИЧУК, С.П. ВАЩИШАК, С.М. РУДАК РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ КОВЗНОЇ МЕДІАНИ НА ПЛІС ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ СЕНСОРІВ	35
Д.В. СТАЦЕНКО, Б.М. ЗЛОТЕНКО, С.Г. НАТРОШВІЛІ, Т.І. КУЛІК, С.А. ДЕМШОНКОВА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ ПРИМІЩЕНЬ	40
Т.В. СІЧКО МЕТОД РАНЖУВАННЯ НА ІНФОРМАЦІЙНО-ДОВІДКОВИХ САЙТАХ	45
О.В. БАРМАК, П.М. РАДЮК ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВІЗУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РЕНГЕНІВСЬКИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ПНЕВМОНІЇ	52
С.Т. БАРАСЬ, Л.В. КРУПЕЛЬНИЦЬКИЙ, О.В. ОНИЩУК ВИМІРЮВАННЯ ОПОРНОЇ ЧАСТОТИ ВУЗЬКОСМУГОВОГО РАДІОСИГНАЛУ ОБМЕЖЕНОЇ ТРИВАЛОСТІ	56
В.С. ЯКОВИНА, Б.В. УГРИНОВСЬКИЙ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМНИХ ПРОЦЕСІВ ТА КОРИСТУВАЦЬКИХ ДОДАТКІВ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ANDROID В КОНТЕКСТІ ЯВИЩА СТАРІННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	64
І.А. КОТОВ АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОТИАВАРІЙНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМОЮ НА ОСНОВІ ЛОГІКО-ІМОВІРНІСНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ПРОДУКЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ ПЕТРІ	71
В.Г. КРАСИЛЕНКО, Н.П. ЮРЧУК, Д.В. НІКІТОВИЧ ЗАСТОСУВАННЯ ІЗОМОРФНИХ МАТРИЧНИХ ПРЕДСТАВЛЕНЬ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОТОКОЛУ УЗГОДЖЕННЯ СЕКРЕТНИХ КЛЮЧІВ-ПЕРЕСТАНОВОК ЗНАЧНОЇ РОЗМІРНОСТІ ...	78
П.Г. РЕГІДА, І.А. КОМІСАРОВ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ ПЛАНУВАННЯ ОБЧИСЛЕНЬ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМУ БУЛЬБАШКОВОГО РОЗПОДІЛУ В РІЗНИХ ТОПОЛОГІЯХ	89
К.Р. СЕНІВА СПОСОБИ ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ В КОМП'ЮТЕРНИХ ІГРАХ	97
Ю.П. КРИВЕНЧУК, О.І. ГРИЦИК ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ВИБОРУ МАЙБУТНЬОЇ ПРОФЕСІЇ	101

Ю. П. КРИВЕНЧУК, С.В. ГЕЛЕТІЙ КОНЦЕПЦІЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕКСТУ В БІТОВУ КАРТУ З ВИКОРИСТАННЯМ БУДЬ-ЯКОГО ШРИФТУ	105
--	-----

Т.В. РОМАНЕНКО, Н.Г. РУСІНА ВИКОРИСТАННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ	109
--	-----

МАШИНОБУДУВАННЯ, МЕХАНІКА ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

М.Г. ЗАЛЮБОВСЬКИЙ, І.В. ПАНАСЮК ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНОГО МОМЕНТУ ОПОРУ ВЕДУЧОГО ВАЛУ ГАЛТУВАЛЬНОЇ МАШИНИ, СТВОРЕНОГО МАСОЮ СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА У РОБОЧІЙ ЄМКОСТІ	116
--	-----

О.О. ЯЛИНА ДІАГНОСТИКА І ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ	123
--	-----

В.Ю. ЯНІШЕВСЬКИЙ УНІВЕРСАЛЬНИЙ ГІДРАВЛІЧНИЙ ПРИВІД ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ	127
--	-----

М. І. СТАДНІК, А. А. ВИДМИШ, С. А. ШАРГОРОДСЬКИЙ, В. С. РУТКЕВИЧ САМООЧИСНИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ ЗАМКНУТИХ ГІДРОСИСТЕМ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ОБЛАДНАННЯ	130
---	-----

ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

М.С. СКИБА, О.В. МІСЯЦЬ, А.О. ПОЛЩУК, В.П. МІСЯЦЬ, М.М. РУБАНКА СИСТЕМА АДАПТИВНОГО ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ АСИНХРОННОГО ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПРИВОДУ РОТОРНОЇ ДРОБАРКИ	139
---	-----

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА, Ю.В. КИРИЧУК, Н.М. НАЗАРЕНКО, А.Г. ТКАЧУК АВТОМАТИЗОВАНИЙ ДВОКАНАЛЬНИЙ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГРАВИМЕТР АГС	147
---	-----

Г.І. БАРИЛО, І.І. ГЕЛЬЖИНСЬКИЙ, Р.Л. ГОЛЯКА, Т.А. МАРУСЕНКОВА, М.О. ХІЛЬЧУК ВБУДОВАНА СИСТЕМА КОНВЕРТЕРА НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ ОРГАНІЧНИХ СВІТЛОДІОДІВ	151
---	-----

О.В. ОСАДЧУК, В.С. ОСАДЧУК, Я.О. ОСАДЧУК ДОСЛІДЖЕННЯ СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ НА ОСНОВІ КВАНТОВОЇ ГЕТЕРОСТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ	156
---	-----

О.Ю. КІМСТАЧ, І.М. ІЛЛЯШЕНКО, А.О. ЖЕЖЕЛО МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА З УРАХУВАННЯМ АСИМЕТРІЇ МАГНІТОПРОВОДУ	165
--	-----

О.М. БЕЗВЕСІЛЬНА, М.В. ІЛЬЧЕНКО, С.С. КОТЛЯР КЛАСИФІКАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ ПРИЛАДОВИХ КОМПЛЕКСІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ	172
--	-----

О.Я. ВОЛОШАНЮК, О.В. НЕЧИПОРЕНКО ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕДУКЦІЙНО-ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ПРАЦЮЮЧИХ НА БАЗІ РІЗНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ	176
--	-----

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

М.В. ВАСИЛЬСВ, А.І. БРУНЕТКІН НАЛАШТУВАННЯ НЕЧІТКОГО АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗРІДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	187
--	-----

Ю.П. ЗАСПА

НЕЛІНІЙНА КОНТАКТНА ДИНАМІКА ТА АНТИСИМЕТРІЯ КОРПУСКУЛЯРНО-ВИХОР-ХВИЛЬОВИХ ФОРМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ТА ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛІВ У ФОНОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ КОМПЛЕКСНОГО ЕВКЛІДОВОГО ПРОСТОРУ. СПЕКТРИ ХІТОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ 193

В.І. ЛУЖАНСЬКИЙ, Л.В.КАРПОВА, А.І. ПОВХ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИГНАЛУ НА ВХОДІ ПРИЙМАЧА МОБІЛЬНОЇ СТАНЦІЇ ПРИ РІЗНИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ В УМОВАХ ЗАБУДОВИ МІСТА 206

А.Е. RUBANENKO, О.О. RUBANENKO, І.А. HUNKO, V.V. GASYCH

DETERMINATION OF RESIDUAL RESOURCE OF MEASURING CURRENT TRANSFORMERS USING FUZZY SIMULATION 214

О.О. РУБАНЕНКО, І.О. ГУНЬКО, В.В. ГАСИЧ, Д.О. ГРЕСЬКОВ, В.А. ПРЯДКО

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ НЕГАРАНТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ 220

ТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНОЇ, ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**І.О. ЗАСОРНОВА, О.С. ЗАСОРНОВ, Г.А. РПКА**

РОЗРОБКА КЛАСИФІКАТОРУ ЗАСТОСУВАННЯ QR-КОДІВ В ЛЕГКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ 226

І.Т. СОЛТИК

ПРИНЦИПИ ВИГОТОВЛЕННЯ ВКЛАДНИХ УСТІЛОК ІЗ ПІДПРОМ ДЛЯ УТЕПЛЕНОГО ВЗУТТЯ .. 234

А.В. АНТОНЕНКО, Т.В. БРОВЕНКО, О.В. ВАСИЛЕНКО,

Ю.В. ЗЕМЛІНА, Г.А. ТОЛОК, І.М. ГРИЩЕНКО
ВИКОРИСТАННЯ НЕТРАДИЦІЙНОЇ СИРОВИНИ У ТЕХНОЛОГІЇ ХОЛОДНИХ ЗАКУСОК 239

О.О. КОРОТИЧ, В.С. НЕЙМАК, А.М. ЗАЛІЗЕЦЬКИЙ, Н.М. ЗАЩЕПКИНА

РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ УДОСКОНАЛЕНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ ВІТРИНИ З АВТОМАТИЗОВАНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ 245

А.Л. СЛАВІНСЬКА, В.В. МИЦА

ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АСПЕКТ ГРУПУВАННЯ УНІФІКОВАНИХ ФОРМ РОБОЧОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА МОДЕЛЬ ВИРОБНИЧОГО ОДЯГУ 254

О.Г. СОКОЛОВСЬКА, Л.О. ВАЛЕВСЬКА

ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА КІНОА – ВАЖЛИВИЙ ЕТАП ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ 259

О.Л. ТКАЧУК

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДВАРЮВАННЯ КОТОНІНОВМІСНОЇ ТКАНИНИ 264

В.Ю. ЩЕРБАНЬ, А.К. ПЕТКО, О.З. КОЛИСКО, Ю.Ю. ЩЕРБАНЬ, Л.Є. ГАЛАВСЬКА

ПРОГРАМНІ МОДУЛІ ТА ПРОЦЕДУРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ПРОГРАМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАТЯГУ КЕВЛАРОВОЇ НИТКИ ПРИ В'ЯЗАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМУ РЕКУРСІЇ 271

**МАШИНОБУДУВАННЯ, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ****Б.С. БРАЦЛАВЕЦЬ**

РОЗРОБКА МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЗАГАРТОВАНИХ ГІЛІЗ ЦИЛІНДРІВ АВТОТРАКТОРНОЇ ТЕХНІКИ 275

В.І. БРЕДУН АНАЛІЗ РЕГІОНАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЯК ЕЛЕМЕНТУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ	278
--	-----

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

О. В. ОСАДЧУК, Л. В. КРИЛИК, Я. О. ОСАДЧУК, О. С. ЗВЯГІН МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЮ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ	282
--	-----

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

DOI 10.31891/2307-5732-2021-295-2-282-288

УДК 621.382

О. В. ОСАДЧУК, Л. В. КРИЛИК, Я. О. ОСАДЧУК, О. С. ЗВЯГІН

Вінницький національний технічний університет

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЮ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ
ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ**

Розроблено пристрій для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом HR202. На основі математичного моделювання електричних характеристик розробки отримано аналітичні вирази для функції перетворення та рівняння чутливості. Експериментально встановлено, що збільшення температури навколишнього середовища при діапазоні відносної вологості $W=30\div 85\%$ приводить до розширення діапазону генерації автогенераторного перетворювача вологості і до збільшення чутливості пристрою до вимірюваної величини – відносної вологості. Діапазон генерації автогенераторного перетворювача вологості при температурі $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ набуває значення 823 кГц (середнє значення чутливості – 16,18 кГц/%), а при температурі $T=50\text{ }^\circ\text{C}$ – 1323 кГц (середнє значення чутливості – 29,10 кГц/%). Для підтвердження теоретичних результатів схемотехнічного рішення розробленого пристрою проведено комп'ютерне моделювання в середовищі LTSpice. Результати математичного моделювання відповідають експериментальним даним.

Ключові слова: пристрій для вимірювання вологості, частотний перетворювач, вологочутливий резистивний елемент, функція перетворення, рівняння чутливості.

A. V. OSADCHUK, L. V. KRYLIK, I. A. OSADCHUK, O. S. ZVIAHIN

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsa, Ukraine

**MATHEMATICAL SIMULATION OF A DEVICE WITH FREQUENCY OUTPUT FOR MEASUREMENT OF
HUMIDITY**

The device for measuring humidity with a moisture-sensitive resistive element HR202 has been developed. The self-generating transducer is designed as a hybrid integrated circuit based on a bipolar transistor VT1 and a field-effect two-gate transistor VT2. The negative differential resistance, which is formed by the parallel connection of the impedance with a capacitive component at the collector electrodes of the bipolar transistor VT1, the drain of the field-effect transistor VT2 and inductance L1, leads to the occurrence of electrical oscillations in the circuit. When exposed to moisture on the sensitive resistive element RW, the capacitive component of the impedance at the electrodes of the transistor structure changes, which causes an effective change in the frequency of the oscillatory circuit. On the basis of mathematical modeling of electrical characteristics, analytical expressions for the transformation function and the sensitivity equation are obtained. It has been experimentally established that an increase in the ambient temperature in the range of relative humidity $W = 30 \div 85\%$ leads to an expansion of the generation range of the autogenerating humidity transducer, as well as to an increase in the sensitivity of the device to the measured value. The generation range of the autogenerating humidity transducer at a temperature of $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ acquires a value of 823 kHz (the average value of the sensitivity is 16.18 kHz / %), and at a temperature of $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$ - 1323 kHz (the average value of the sensitivity is 29.10 kHz / %).

To confirm the theoretical results of circuit solutions developed device in the computer modeling of LTSpice modeling environment. The studies were carried out at different temperatures (20°C, 30°C, 40°C, 50°C) in the range of change in the resistance of the moisture-sensitive resistive element from 1750 kOhm to 2.1 kOhm, which corresponds to an increase in the value of the relative air humidity from 30 % to 90 %.

The results of theoretical and experimental studies have shown that at the output there are periodic oscillations device for measuring the humidity rate which increases with increasing values of relative humidity. The obtained theoretical and experimental studies are in good agreement, the relative error does not exceed 2.5%.

Keywords: device for measuring humidity, frequency transducer, humidity-sensitive resistive element, conversion function, sensitivity equation.

Постановка проблеми

Важливою різновидністю вимірювальних перетворювачів є сенсори вологості. В Україні вимірювання вологості є одним із поширених напрямків вимірювань фізичних величин. Тому досить важливим завданням сучасного приладобудування та контрольно-вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання вологості для різних виробництв, створення вимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, які супроводжують вимірювальний процес [1–4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розробкою та створенням первинних перетворювачів вологості на сьогоднішній день займаються провідні спеціалісти світу, тому що вимірювання вологості в газовій суміші (повітрі) суттєво впливає на якість проведення технологічних процесів як в технології мікроелектроніки, так і в різноманітних галузях промисловості. Нині розроблено різноманітні варіанти сенсорів для контролю мікрОВОЛОГОСТІ газоподібних та рідких середовищ і відносної вологості в промислових приміщеннях. Принцип дії таких сенсорів базується на зміні електрофізичних параметрів (провідності, діелектричної проникності) вологочутливої плівки при фізичній сорбції пари води із навколишнього середовища [5].

Однак, незалежно від конструктивного виконання первинних перетворювачів їх метрологічні характеристики (поріг чутливості, точність, діапазон вимірювань, постійна часу тощо) визначаються

насамперед фізико-хімічними і адсорбційними властивостями використаного сорбенту, які залежать від технології формування плівки сорбенту.

Велике різноманіття технологічних процесів, що існують в промисловості та наукових дослідженнях, вимагають високоточного контролю відносної вологості середовища. Перспективним науковим напрямком в цій сфері є створення частотних пристроїв вимірювання вологості на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором, в розвиток теорії якого значний здобуток внесли вітчизняні та закордонні вчені. Саме використання частотного принципу перетворення «вологість-частота» в поєднанні з технологією мікроелектроніки сприяє підвищенню метрологічних та економічних показників перетворювачів вологості, виготовлених у вигляді гібридних інтегральних схем [6, 7].

Отже, розробка та практичне застосування таких пристроїв є актуальною задачею.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Встановлено, що технічний рівень сенсорних систем вологості залежить насамперед від технічних розробок перетворювача, а саме його чутливих елементів, конструктивного рішення, принципу дії та технології виготовлення [8 – 14]. Це мотивує для реалізації подальших досліджень.

Метою дослідження є розробка пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором (рис. 1). Експериментальним зразком слугував вологочутливий резистивний елемент HR202.

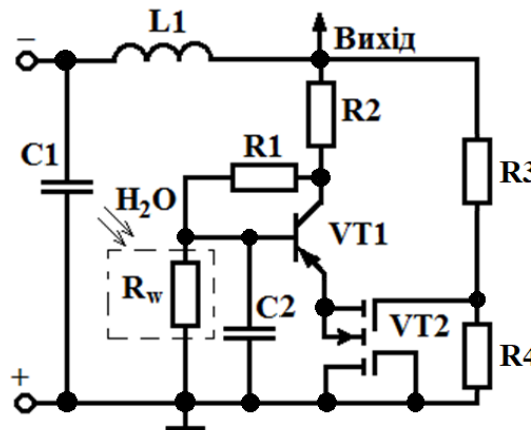


Рис. 1. Електрична схема пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості

Автогенераторний перетворювач розроблено у вигляді гібридної інтегральної схеми на основі біполярного транзистора VT1 та польового двозатворного транзистора VT2. Від'ємний диференціальний опір, який утворений паралельним включенням повного опору з ємнісною складовою на електродах колектор біполярного транзистора VT1, стік польового транзистора VT2 та індуктивності L1, приводить до виникнення електричних коливань в контурі. Два резистори R1, R2 та вологочутливий резистивний елемент R_w утворюють дільник напруги для живлення біполярного транзистора та створення позитивного зворотного зв'язку, а резистори R3 та R4 – для керування польового транзистора VT2. Крім того, електричне живлення біполярного VT1 та польового VT2 транзисторів залежить від величини зміни опору вологочутливого резистивного елемента R_w зі зміною вологості досліджуваного середовища. Проходженню змінного струму через джерело постійної напруги запобігає обмежувальний конденсатор C1. При дії вологи на вологочутливий резистивний елемент R_w змінюється ємнісна складова повного опору на електродах транзисторної структури, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру. Схема мікроелектронного частотного пристрою вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом HR202 (рис.1) була зібрана на біполярному транзисторі BC857C та польовому двозатворному транзисторі BF998. Режим транзисторів VT1 і VT2 по постійному струму був таким: струм у ланцюзі колектора транзистора VT2 дорівнює 3,55 мА, а напруга на колекторі – 5 В. Опори схеми мають такі значення R₁=2,2 кОм; R₂=10 Ом; R₃=8,2 кОм; R₄=5,6 кОм. Індуктивність автогенератора складає 100 мкГн. Цьому режиму, при вологості 30 %, відповідала частота генерації 1176,470 кГц. Описана схема генератора дозволяє одержати вихідну напругу до 45 В у широкому діапазоні частот. Нестабільність частоти дорівнює 1,87·10⁻⁴ Гц.

Без знання параметрів перетворювачів вологості неможливо їх створити, тому задача полягала в розробці математичної моделі, на основі рішення якої будуть визначені функція перетворення та рівняння чутливості.

На основі електричної схеми пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості (рис. 1), по колу позитивного зворотного зв'язку визначено рівняння, на основі якого отримано аналітичний вираз функції перетворення:

$$F = \frac{\pi \cdot R_w(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb} \pm \sqrt{\pi^2 \cdot R_w^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5}}{4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_w(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb}}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{де } K_1 &= 4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{eb}^2, \quad K_2 = -4 \cdot \pi^2 \cdot L_1^2 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{cb}^2 - 8 \cdot \pi^2 \cdot L_1^2 \cdot C_{eb} \cdot C_{cb}^2 \cdot C_{ds}, \\ K_3 &= -4 \cdot \pi^2 \cdot L_1^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2 + L_1 \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{cb}, \quad K_4 = 2 \cdot L_1 \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb} + L_1 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}, \\ K_5 &= 4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2. \end{aligned}$$

Позначення, які використовувались в аналітичних виразах, а саме: $R_W(W)$ – вологочутливий резистивний елемент; L_1 – індуктивність коливального контуру; C_{eb} – ємність р-п-переходу емітер-база; C_{cb} – ємність р-п-переходу колектор-база; C_{ds} – ємність стік-витік.

На основі виразу (1) теоретично розраховано та експериментально досліджено функції перетворення пристрою для вимірювання вологості. Експериментальні дослідження проводились при різних значеннях температури навколишнього середовища (рис. 2).

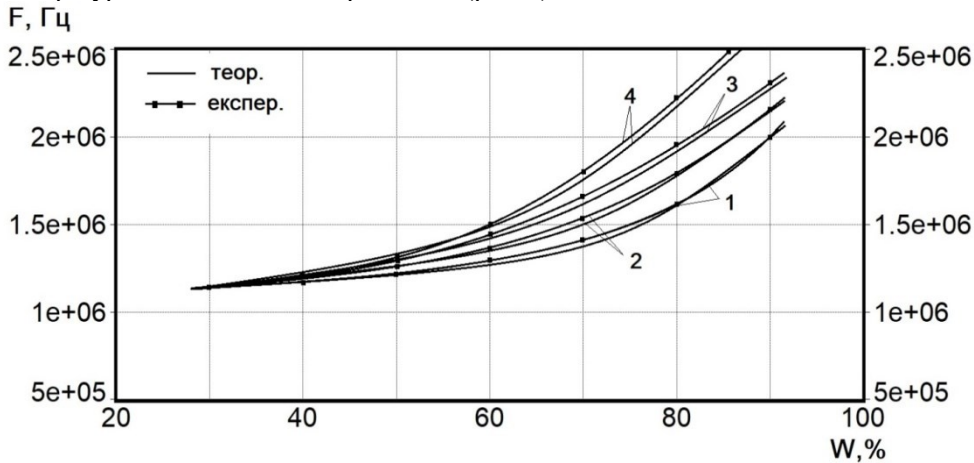


Рис. 2. Експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації від зміни відносної вологості повітря пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом: 1 – $T=20^\circ\text{C}$; 2 – $T=30^\circ\text{C}$; 3 – $T=40^\circ\text{C}$; 4 – $T=50^\circ\text{C}$

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що збільшення температури навколишнього середовища при діапазоні відносної вологості $W = 30 \div 85\%$ приводить до розширення діапазону генерації автогенераторного перетворювача вологості, що в свою чергу збільшує чутливість перетворювача при збільшенні температури навколишнього середовища. Таким чином, результати досліджень показали:

- 823 кГц ($T = 20^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- 1026 кГц ($T = 30^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- 1194 кГц ($T = 40^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- 1323 кГц ($T = 50^\circ\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$).

На основі рівняння (1) визначено аналітичний вираз рівняння чутливості (2) розробленого пристрою:

$$S_W^F = \frac{\pi \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb} \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W}\right) \pm \frac{M_1 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W}\right) + M_2 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W}\right) + M_3 \cdot \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W}\right)}{\sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5}}}{4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb}} - \frac{\pi \cdot R_W(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb} \pm \sqrt{\pi^2 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5} \left(\frac{\partial R_W(W)}{\partial W}\right)}{4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W^2(W) \cdot C_{eb} \cdot C_{ds} \cdot C_{cb}}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{де } M_1 &= \pi^2 \cdot R_W(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2, \\ M_2 &= 4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W(W) \cdot C_{cb} \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{eb}^2, \\ M_3 &= 4 \cdot \pi^2 \cdot L_1 \cdot R_W(W) \cdot C_{eb}^2 \cdot C_{ds}^2 \cdot C_{cb}^2. \end{aligned}$$

Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості та температури досліджуваного середовища розробленого пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом подано на рис. 3.

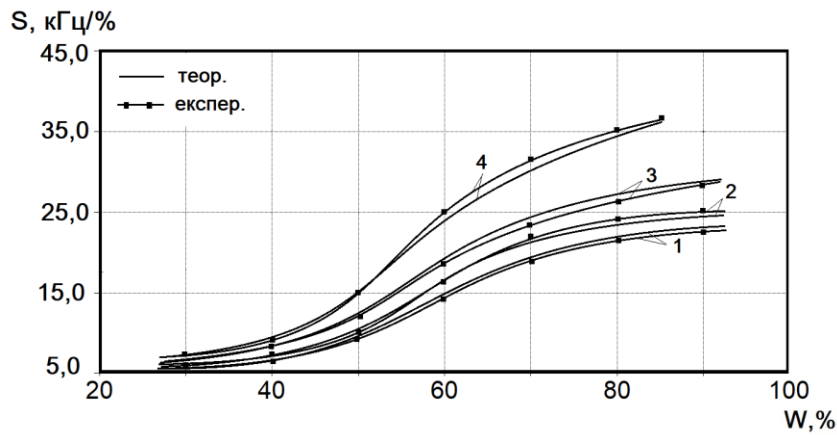


Рис. 3. Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом:
1 – $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$;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

З рис. 3 видно, що збільшення температури навколишнього середовища при діапазоні відносної вологості $W = 30 \div 85\%$ призводить до збільшення чутливості. Середні значення чутливості при різних температурах навколишнього середовища наведені нижче:

- від 5,02 кГц/° до 21,2 кГц/° ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- від 5,7 кГц/° до 24,9 кГц/° ($T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- від 7,2 кГц/° до 28,05 кГц/° ($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$);
- від 8,3 кГц/° до 37,4 кГц/° ($T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 30 \div 85\%$).

Для підтвердження теоретичних результатів та проведення експериментальних досліджень електричне коло мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом (рис. 1) було досліджене в середовищі схемотехнічного моделювання *LTSpice XVII* [15]. Дослідження проводились при різних температурах (20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C) в діапазоні зміни опору вологочутливого резистивного елемента від $R_W(W) = 1750\text{ кОм}$ до $R_W(W) = 2,1\text{ кОм}$, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 30% до 90%.

Так на рис. 4 наведено експериментальну залежність струму індуктивності від часу при 20 °C та 35%, 60%, 90% вологості.

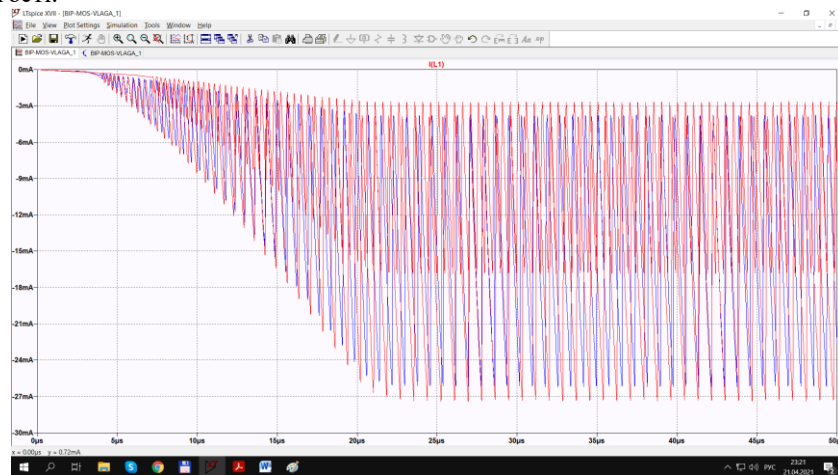


Рис. 4. Залежність струму індуктивності від часу при різних значеннях опору вологочутливого резистивного елемента в *LTSpice* при 20 °C та 35%, 60%, 90% вологості

На рис. 5 наведено промодельована вихідна змінна напруга мікроелектронного частотного перетворювача вологості при температурі 20 °C та відносній вологості 35%, 60%, 90%. Вихідна частота перетворювача при 35% складає 1176,47 кГц, при 60% складає 1265,822 кГц, а при 90% відносної вологості складає 2000,00 кГц.

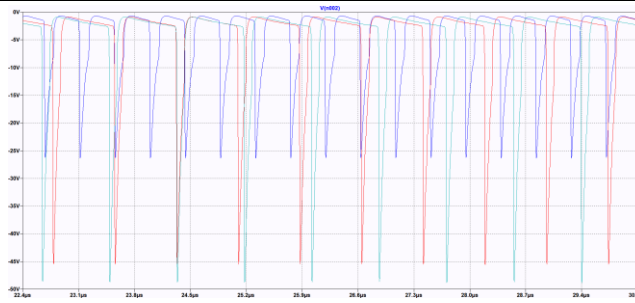


Рис. 5. Залежність вихідної змінної напруги в часі при різних значеннях опору вологочутливого резистивного елемента в LTSpice при 20 °C та 35%, 60%, 90% вологості

На рис. 6 наведено промодельована вихідна змінна напруга мікроелектронного частотного перетворювача вологості при температурі 50 °C та відносній вологості 35%, 60%, 85%. Вихідна частота перетворювача при 35% складає 1204,819 кГц, при 60% складає 1408,45 кГц, а при 85 % відносної вологості складає 2500,00 кГц.

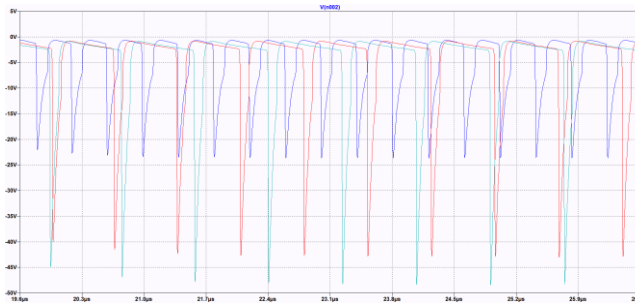


Рис. 6. Залежність вихідної змінної напруги в часі при різних значеннях опору вологочутливого резистивного елемента в LTSpice при 50 °C та 35%, 60%, 85% вологості

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень легко бачити, що на виході мікроелектронного частотного перетворювача вологості дійсно будуть існувати періодичні коливання частота яких буде збільшуватись зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Порівнявши отримані теоретичні та експериментальні значення частоти вихідного сигналу було встановлено, що відносна похибка не перевищує 2,5%.

Висновки. Розроблено пристрій з частотним виходом для вимірювання вологості з вологочутливим резистивним елементом HR202. Доведено, що електричні характеристики сенсорних систем вологості залежать як від конструктивних рішень пристрою для вимірювання вологості, так і від конструктивних та технологічних особливостей чутливого елемента.

Проведено математичне моделювання пристрою, на основі якого визначено аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості. Експериментально встановлено, що збільшення температури навколишнього середовища при діапазоні відносної вологості $W=30\div 85\%$ приводить до розширення діапазону генерації автогенераторного перетворювача вологості і до збільшення чутливості пристрою до вимірюваної величини – відносної вологості. Діапазон генерації автогенераторного перетворювача вологості при температурі $T=20$ °C набуває значення 823 кГц (середнє значення чутливості – 16,18 кГц/%), а при температурі $T=50$ °C – 1323 кГц (середнє значення чутливості – 29,10 кГц/%).

Для підтвердження теоретичних результатів схемотехнічне рішення розробленого пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості досліджено в середовищі моделювання LTSpice. Дослідження проводились при різних температурах (20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C) в діапазоні зміни опору вологочутливого резистивного елемента від $R_W(W)=1750$ кОм до $R_W(W)=2,1$ кОм, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 30% до 90%. Результати теоретичних та експериментальних досліджень показали, що на виході пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості існують періодичні коливання, частота яких збільшується зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Отримані теоретичні та експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 2,5%.

Література

1. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
2. Джексон Р. Г. Новейшие датчики / Р. Г. Джексон. – Москва : Техносфера, 2007. – 384 с.
3. Bozhi, Yang, Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes [Electronic resource] / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical. – 30 March 2006. – Vol. 114, – № 1. – P. 254 – 262. – Mode of access: https://biomems.me.columbia.edu/research/PDFs/jour/Bozhi_06_Compliant_Low-Cost_Humidity_Nanosensor.pdf

(date of access 10.05.2021). – Title from screen.

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 [Electronic resource] / 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. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/305522000_Design_and_Development_for_Capacitive_Humidity_Sensor_Applications_of_Lead-Free_CaMgFeTi-Oxides-Based_Electro-Ceramics_with_Improved_Sensing_Properties_via_Physisorption (date of access 10.05.2021). – Title from screen.

5. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review [Electronic resource] / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // *Sensors*. – 2014. – № 14. – P. 7881 – 7939. doi:10.3390/s140507881. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/262015128_Humidity_Sensors_Principle_Mechanism_and_Fabrication_Technologies_A_Comprehensive_Review/link/00b495368b08331ae9000000/download (date of access 10.05.2021). – Title from screen.

6. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor [Electronic resource] / 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. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/224088790_CMOS-MEMS_capacitive_humidity_sensor (date of access 10.05.2021). – Title from screen.

7. Осадчук В. С. Сенсори вологості : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2003. – 208 с.

8. Осадчук В. С. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. – 275 с.

9. Osadchuk A.V. Optical transducers with frequency output / A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov // *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017)*. – Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10445/104451X/Optical-transducers-with-frequency-output/10.1117/12.2280892.full?SSO=1> (date of access 10.05.2021). – Title from screen.

10. Osadchuk A.V. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors / A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, O.O. Seletska, P. Kisała, K. Nurseitova // *Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019)*. – Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11176/111761I/Theory-of-photoreactive-effect-in-bipolar-and-MOSFET-transistors/10.1117/12.2538264.full> (date of access 10.05.2021). – Title from screen.

11. Osadchuk A. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element / A. Osadchuk, V. Osadchuk, O. Seletska, L. Krylik // *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 95, Warszawa, Poland. – 2019. – NR 4. – P. 237 – 241. ISSN 0033-2097, doi:10.15199/48.2019.04.45. – Mode of access: <http://pe.org.pl/articles/2019/4/45.pdf> (date of access 10.05.2021). – Title from screen.*

12. Осадчук О. В. Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, Я. О. Осадчук // *Прикладні питання математичного моделювання*. – 2020. – Т. 3, № 2.1. – С. 206–215. – Режим доступу:

https://mkmm.org.ua/archive_mkmm/%D0%9F%D0%9F%D0%9C%D0%9C%20%D0%A2.3%20%E2%84%962%20%D0%A7.1.pdf (дата звернення 10.05.2021). – Назва з екрана.

13. Осадчук О. В. Математична модель мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. О. Селецька // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2019. – № 5(277). – С. 195–198. – Режим доступу: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/277-2019-5-t.pdf> (дата звернення 10.05.2021). – Назва з екрана.

14. Осадчук О.В. The radiomeasuring humidity sensor with the frequency output signal / О. В. Осадчук, О. С. Звягін, А. Ю. Савицький, С. В. Барабан, О. О. Селецька // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2016. – №6. – С. 216–218. – Режим доступу:

[http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_6/\(243\)%202016-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_6/(243)%202016-6-t.pdf) (дата звернення 10.05.2021). – Назва з екрана.

15. Володин В. Я. LTspice : компьютерное моделирование электронных схем / В. Я. Володин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.

References

1. Datchiki : spravocnoe posobie / pod obsh. red. V. M. Sharapova, E. S. Polishuka. – Moskva : Tehnosfera, 2012. – 624 s.
2. Dzhekson R. G. Novejshie datchiki / R. G. Dzhekson. – Moskva : Tehnosfera, 2007. – 384 s.
3. Bozhi, Yang. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes [Electronic resource] / Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti // *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. – 30 March 2006. – Vol. 114, – № 1. – P. 254 – 262. – Mode of access: https://biomems.me.columbia.edu/research/PDFs/jour/Bozhi_06_Compliant_Low-Cost_Humidity_Nanosensor.pdf (date of access 10.05.2021). – Title from screen.

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 [Electronic resource] / 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. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/305522000_Design_and_Development_for_Capacitive_Humidity_Sensor_Applications_of_Lead-Free_CaMgFeTi-Oxides-Based_Electro-Ceramics_with_Improved_Sensing_Properties_via_Physisorption (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
5. Hamid, Farahani. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review [Electronic resource] / Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon // *Sensors*. – 2014. – № 14. – P. 7881 – 7939. doi:10.3390/s140507881. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/262015128_Humidity_Sensors_Principle_Mechanism_and_Fabrication_Technologies_A_Comprehensive_Review/link/00b495368b08331ae9000000/download (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
6. Nathan, Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor [Electronic resource] / 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. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/224088790_CMOS-MEMS_capacitive_humidity_sensor (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
7. Osadchuk V. S. Sensory volohosti : monohrafiia / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk. – Vinnytsia : UNIVERSUM – Vinnytsia, 2003. – 208 s.
8. Osadchuk V. S. Reaktyvni vlastyvoli tranzystoriv i tranzystornykh skhem : monohrafiia / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk. – Vinnytsia : UNIVERSUM – Vinnytsia, 1999. – 275 s.
9. Osadchuk A.V. Optical transducers with frequency output / A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov // *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X* (2017). – Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10445/104451X/Optical-transducers-with-frequency-output/10.1117/12.2280892.full?SSO=1> (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
10. Osadchuk A.V. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors / A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, O.O. Seletska, P. Kisała, K. Nurseitova // *Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I* (2019). – Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11176/111761I/Theory-of-photoreactive-effect-in-bipolar-and-MOSFET-transistors/10.1117/12.2538264.full> (date of access 10.05.2021). – Title from screen.
11. Osadchuk A. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element» / A. Osadchuk, V. Osadchuk, O. Seletska, L. Krylik // *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 95, Warszawa, Poland. – 2019. – NR 4. – P. 237 – 241. ISSN 0033-2097, doi:10.15199/48.2019.04.45. – Mode of access: <http://pe.org.pl/articles/2019/4/45.pdf> (date of access 10.05.2021). – Title from screen.*
12. Osadchuk O. V. Matematychna model parametrychnoho peretvoriuvacha volohosti z chastotnym vykhodom / O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, Ya. O. Osadchuk // *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання. – 2020. – T. 3, № 2.1. – S. 206–215. – Rezhym dostupu: https://mkmm.org.ua/archive_mkmm/%D0%9F%D0%9F%D0%9C%D0%9C%20%D0%A2.3%20%E2%84%96%20%D0%A7.1.pdf (data zvernennia 10.05.2021). – Nazva z ekrana.*
13. Osadchuk O. V. Matematychna model mikroelektronnoho vymiriuvacha volohosti z chastotnym vykhodom / O. V. Osadchuk, L. V. Krylyk, O. O. Seletska // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2019. – № 5(277). – S. 195–198. – Rezhym dostupu: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/277-2019-5-t.pdf> (data zvernennia 10.05.2021). – Nazva z ekrana.*
14. Osadchuk O.V. The radiomeasuring humidity sensor with the frequency output signal / O. V. Osadchuk, O. S. Zviahin, A. Yu. Savytskyi, S. V. Baraban, O. O. Seletska // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2016. – №6. – S. 216–218. – Rezhym dostupu: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_6/\(243\)%202016-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2016/2016_6/(243)%202016-6-t.pdf) (data zvernennia 10.05.2021). – Nazva z ekrana.*
15. Volodin V. Ya. LTspice : kompyuternoe modelirovanie elektronnykh shem / V. Ya. Volodin. – SPb. : BHV-Peterburg, 2010. – 400s.

Надійшла/Paper received : 12.04.2021 р. Надрукована/Printed : 02.06.2021 р.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
<http://journals.khnu.km.ua/vestnik/support.htm>

Підп. до друку 28.05.2021 р. Ум. друк. арк. 41,08 Обл.-вид. арк. 39,08
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63