

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 32 (71) № 1 2021

Частина 2



Видавничий дім
«Гельветика»
2021

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дехтяр Анатолій Соломонович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

Дичко Аліна Олегівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій та дизайну;

Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 6 від 03.02.2021 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2021

ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАКЦІЙ У КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАХ СТАТИЧНО ВИЗНАЧЕНОГО ПРОСТОРОВОГО МЕХАНІЗМУ МАШИНИ ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ.....1

Кузьменко Т.М.

РОЛЬ ВХІДНОГО КОНТРОЛЮ В УПРАВЛІННІ ЯКІСТЮ ПРОДУКЦІЇ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ СПЕЦТЕХНІКИ.....7

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Андрєєва Т.В.

ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ ПРУЖНОЇ СТІЙКОЇ КОЛОНИ, НАВАНТАЖЕНОЇ ЗВЕРХУ.....13

ЕНЕРГЕТИКА

Козоровська К.А., Беглов К.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ БОРНОЇ КИСЛОТИ В ПЕРШОМУ КОНТУРІ АЕС ЯК НЕЛІНІЙНОГО ОБ'ЄКТА.....18

Максимова О.Б., Мінчев Д.С.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ МІСТА В УМОВАХ НАЯВНОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ.....24

Штепа Є.П.

ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ З БІРОТАТИВНИМ СИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ.....32

МЕТАЛУРГІЯ

Тесленко О.І.

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ОКРЕМИХ СКЛАДОВИХ ЧАСТИН ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ПРОДУКТІВ КОКСОХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА.....38

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Борисенко О.М., Логвінков С.М., Шабанова Г.М., Остапенко І.А.

ГЕОМЕТРО-ТОПОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБСОЛІДУСНОЇ БУДОВИ СИСТЕМИ $MgO - FeO - TiO_2$45

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Антоненко А.В., Бровенко Т.В., Василенко О.В., Земліна Ю.В., Толлок Г.А.,

Криворучко М.Ю., Грищенко І.М.

ТЕХНОЛОГІЯ БОРОШНЯНИХ СТРАВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗГЛЮТЕНОВОГО БОРОШНА.....50

Фролова Н.Е., Байбак С.В., Коваленко О.П., Лукіянишен К.О., Мухіна А.В., Кучерявий І.А.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЧАЙНИХ НАПОЇВ ВІДПОВІДНО ДО ПРИПИСІВ АЮРВЕДИЧНОЇ КУЛІНАРІЇ.....57

Ющенко Н.М., Голя А.В., Лиса Л.Б., Галушка С.А., Кохановська В.П.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НОВИХ ВИДІВ АЮРВЕДИЧНИХ ФЕРМЕНТОВАНИХ МОЛОЧНИХ НАПОЇВ.....63

ТРАНСПОРТ

| | |
|--|-----|
| Головіна О.В. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ КАР'ЄРНИХ АВТОСАМОСКИДІВ..... | 69 |
| Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Урум Н.С., Тришин В.В. ОЦІНКА ВПЛИВУ ВИЩИХ ГАРМОНІК У СИГНАЛАХ НАПРУГИ І СТРУМУ НА ТОЧНІСТЬ КОРЕЛЯЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНІВ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ..... | 74 |
| Євсєєв В.О., Бутко Р.В., Гончаров Є.І. СПЕЦІАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ЗАСОБИ СИЛ ОХОРОНИ ПРАВОПОРЯДКУ ІНОЗЕМНИХ ДЕРЖАВ: ЗАГОРОДЖУВАЛЬНІ МАШИНИ..... | 79 |
| Єманов В.В., Гармаш В.П., Споришев К.О. МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСЯГУ ВИХОДУ З ЛАДУ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ПІДРОЗДІЛІВ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ..... | 87 |
| Завальнюк О.П., Растьогіна Г.І., Завальнюк І.П., Нестеренко В.Б. АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАВАННЯ СУДЕН ЯК СКЛАДНИК ФОРМУВАННЯ СФЕРИ КОМПЕТЕНЦІЇ СУДНОВОГО ОФІЦЕРА-ЕЛЕКТРОТЕХНІКА..... | 92 |
| Кисельов В.Б., Прокудін Г.С., Поліщук В.П., Чупайленко О.А. ОРГАНІЗАЦІЯ НЕЗБАЛАНСОВАНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ..... | 100 |
| Круглий Д.Г. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУДНОБУДУВАННЯ ЯК ЗАПОРУКА ЦІЛІСНОСТІ ЕКОСИСТЕМИ УКРАЇНИ..... | 107 |
| Мединський Д.В. ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НАЗЕМНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ КОРАБЛІВ АВІАЦІЙНОЮ НАЗЕМНОЮ ТЕХНІКОЮ ДЛЯ ПЕРЕШКОДЖАННЯ ЗБІЙНИХ СИТУАЦІЙ В АЕРОПОРТУ..... | 113 |
| Павлова Н.Л., Шибасєв О.Г. ПРОЄКТНІ РІШЕННЯ З ОБГРУНТУВАННЯ ВАРІАНТУ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ МОРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ..... | 123 |
| Фомін О.В., Кара С.В., Прокопенко П.М., Горбунов М.І., Фомін В.В. КОМПЛЕКСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ..... | 129 |
| Фомін О.В., Ловська А.О. ВИЗНАЧЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПРИСКОРЕНЬ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ З В'ЯЗКИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ У ПОВЗДОВЖНІХ БАЛКАХ..... | 135 |
| Чумак М.О. СИСТЕМА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ НЕРЕГУЛЬОВАНИХ ПІШОХІДНИХ ПЕРЕХОДІВ..... | 141 |
| Шарай С.М., Рой М.П. ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ІЗ ЧАСОВИМИ ВІКНАМИ..... | 148 |

БУДІВНИЦТВО

| | |
|--|-----|
| Малєєв В.О., Безпальченко В.М. ДРЕНАЖ ЯК ТЕХНІЧНИЙ СКЛАДНИК ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДТОПЛЕННЯ ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ..... | 155 |
|--|-----|

ГЕОДЕЗІЯ

| | |
|--|-----|
| Сопова Н.В., Сопов Д.С., Хайнус Д.Д., Бузіна І.М., Кирпичова І.В., Лугова Т.М. ПЕРСПЕКТИВИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ В ЛУГАНСЬКІЙ ОБЛАСТІ..... | 164 |
|--|-----|

ЕЛЕКТРОНІКА

| | |
|--|-----|
| Василенко І.А., Брич К.А., Чупринов Є.В., Скиба М.І. РОЗРОБЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ КОМПОСТУВАННЯ ОРГАНІЧНОГО СКЛАДНИКА ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ..... | 170 |
|--|-----|

| | |
|---|-----|
| Осадчук О.В., Крилик Л.В., Звягін О.С., Осадчук Я.О. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ВОЛОГОЧУТЛИВИМ РЕЗИСТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ..... | 175 |
|---|-----|

| | |
|-----------------------------------|-----|
| ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ..... | 183 |
|-----------------------------------|-----|

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-2/28>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

Крилик Л.В.

Вінницький національний технічний університет

Звягін О.С.

Вінницький національний технічний університет

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ЧАСТОТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ВОЛОГОЧУТЛИВИМ РЕЗИСТИВНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Розроблено математичну модель мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом. Мікроелектронний частотний перетворювач вологості розроблено на основі транзисторної структури з від'ємним опором на основі польового двозатворного транзистора та біполярного транзистора. Від'ємний диференціальний опір, утворений паралельним включенням повного опору з ємнісною складовою частиною на електродах транзисторної структури та індуктивності, приводить до виникнення електричних коливань у контурі автогенератора. Використовуючи середовище Maple, ми довели адекватність розробленої математичної моделі. Встановлено, що на виході мікроелектронного частотного перетворювача вологості існують періодичні коливання, частота яких змінюється зі зміною опору вологочутливого резистивного елемента $R_W(W)$. Так, при $R_W(W)=10$ кОм частота $F=827,7$ кГц, при $R_W(W)=13$ кОм частота $F=953,1$ кГц, а при $R_W(W)=16$ кОм частота $F=1054,5$ кГц, напруга живлення 5 В. Для підтвердження теоретичних результатів схемотехнічне рішення мікроелектронного частотного перетворювача вологості досліджено в середовищі моделювання LTSpice. Дослідження проводилися в діапазоні зміни опору вологочутливого резистивного елемента від $R_W(W)=10$ кОм до $R_W(W)=16$ кОм, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 20% до 90%. За результатами моделювання в середовищі LTSpice встановлено, що зі збільшенням опору вологочутливого резистивного елемента від 10 кОм ($W=20\%$) до 16 кОм ($W=90\%$) частота сигналу збільшується від 826,4 кГц до 1052,6 кГц. Результати теоретичних та експериментальних досліджень показали, що на виході мікроелектронного частотного перетворювача вологості існують періодичні коливання, частота яких збільшується зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Отримані теоретичні й експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 1,8%.

Ключові слова: частотний перетворювач вологості, вологочутливий резистивний елемент, від'ємний диференціальний опір, періодичні коливання, частота.

Постановка проблеми. Сучасне виробництво потребує точного виконання технології та широкого застосування автоматизації виробничих процесів. Крім того, стан сучасної вітчизняної економіки суттєво визначається успішним розв'язанням питань створення й освоєння серійного випуску автоматичних засобів технічної діагностики, приладів контролю, систем перевірки якості продукції, контролю параметрів доквілля тощо. Ефективність вищезгаданого комплексу технічних засобів залежить від якості первинних перетворювачів, які є основними чутливими органами вимірю-

вальної апаратури [1; 2, с. 255–273, с. 336–360; 3, с. 42–51, с. 397–407; 4–8].

Важливим різновидом вимірювальних перетворювачів є сенсори вологості. В Україні вимірювання вологості є одним із поширених напрямів вимірювань фізичних величин. Це зумовлено потужним промисловим і науково-технічним потенціалом країни та великим різноманіттям промислових галузей (наприклад, металургія, енергетика, машинобудування тощо), ефективність яких значною мірою залежить від точності вимірювань вологості, температури та інших

характеристик. Тому досить важливим завданням сучасного приладобудування та вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання вологості стосовно різних виробництв, створення вимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, які супроводжують вимірювальний процес [9, с. 10–19, с. 124–125].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Новим напрямом у розробці та створенні мікроелектронних перетворювачів вологості є дослідження у сфері частотних перетворювачів вологості на основі транзисторних структур із від’ємним опором. Частотні перетворювачі поєднують як простоту, так і універсальність, які властиві аналоговим пристроям, а також точність і завадостійкість, характерні для перетворювачів із кодовим виходом.

Дослідження цього напрямку показали, що реактивні властивості та від’ємний опір нерозривно пов’язані між собою, а багатофункціональність і простота радіоелектронних пристроїв на основі транзисторних структур із від’ємним опором є перспективою їх практичного використання. Крім того, застосування принципу перетворення «вологість – частота» на основі транзисторних структур із від’ємним опором суттєво знижує собівартість систем контролю й управління, дозволяє зменшити масогабаритні розміри перетворювача, підвищити не тільки чутливість, а й точність перетворення інформативного сигналу – відносної вологості навколишнього середовища – в частоту [10, с. 235–267; 11–16, с. 6–8; 17].

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення та дослідження математичної моделі мікроелектронного частотного перетворювача вологості на основі транзисторної структури з від’ємним диференціальним опором, вологочутливим елементом якої слугує резистор на основі органічного полімеру. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі: 1) провести аналіз наявних наукових джерел та обґрунтувати переваги застосування реактивних властивостей напівпровідникових структур із від’ємним опором; 2) розрахувати електричні характеристики мікроелектронного частотного перетворювача вологості, у яких враховано залежність реактивних властивостей напівпровідникових структур із від’ємним опором від впливу відносної вологості навколишнього середовища; 3) зробити висновки із проведеного дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Метою дослідження є розробка нового мікроелек-

тронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом на основі органічного полімеру. На рис. 1 подана електрична схема нового схемотехнічного рішення.

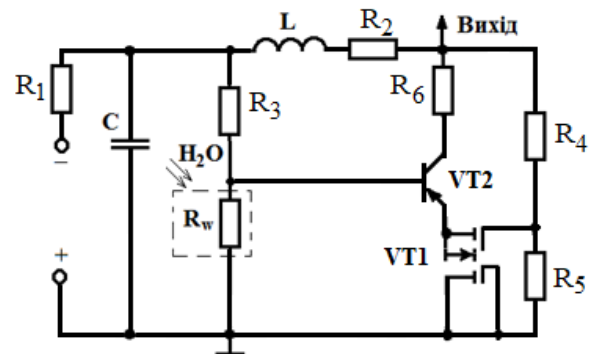


Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом

Мікроелектронний частотний перетворювач вологості розроблено на основі транзисторної структури з від’ємним опором на основі польового двозатворного транзистора $VT1$ та біполярного транзистора $VT2$. За допомогою джерела постійної напруги створюється такий режим роботи, коли від’ємний диференціальний опір, утворений паралельним включенням повного опору з ємнісною складовою частиною на електродах колектор біполярного транзистора $VT2$, стоку польового двозатворного транзистора $VT1$ та індуктивності L , приводить до виникнення електричних коливань у контурі. Дільники напруги утворюють резистори R_3 і вологочутливий резистор R_w , а також R_4 і R_5 , які забезпечують живлення схеми за постійним струмом. Електричне живлення біполярного транзистора $VT2$ 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. Резистори R_1 , R_2 та R_6 виконують функції навантаження. За дії вологи на вологочутливий резистор R_w змінюється ємнісна складова частина повного опору на електродах транзисторної структури на основі транзисторів $VT1$ і $VT2$, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

Для експериментального дослідження схема мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом на основі органічного полімеру (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 6,5 мА, а напруга на колекторі – 5 В. Опори схеми мають значення $R_2=0,1$ Ом; $R_3=12$ кОм; $R_4=8,2$ кОм; $R_5=5,6$ кОм; $R_6=100$ Ом. Індуктивність автогенератора становить 100 мкГн. Цьому режиму, за нульової вологості, відповідає частота генерації 760 кГц. Описана схема генератора дозволяє одержати вихідну напругу до 45 В у широкому діапазоні частот. Нестабільність частоти дорівнює $2 \cdot 10^{-4}$ Гц.

Для визначення електричних характеристик мікроелектронного частотного перетворювача вологості, у яких враховано залежність реактивних властивостей напівпровідникових структур із від'ємним опором від впливу відносної вологості навколишнього середовища, розроблено еквівалентну схему перетворювача, яку подано на рис. 2.

Для зручності розрахунків, об'єднавши струми I_f і I_r у $I_{bt} = (I_f - I_r) / Q_B$, а також скориставшись методом змінних стану, на рис. 3. подано перетворену еквівалентну схему розробки.

На основі вибраних напрямків струмів було складено систему рівнянь Кірхгофа:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_L = i_{R_b} R_b + i_3 R_3 - i_L R_2 - i_{R_c} (R_c + R_6) - U_{C_c}, \\ i_{R_{ds}} = \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}}, \\ i_{C_d} = \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g}, \\ i_{R_b} = \frac{i_2 R_W - U_{C_c} - U_{C_{ds}} - i_{R_d} R_d - i_{R_c} (R_e + R_s)}{R_b}, \\ i_{C_{ds}} = i_{R_d} + i_{C_d} + I_{pt} - i_{R_{ds}}, \\ i_{R_c} = \frac{i_4 R_4 - U_{C_c} - U_{C_s} - U_{C_e} - i_{R_e} (R_e + R_s)}{R_c + R_6}, \\ i_{R_d} = \frac{U_{C_d} + i_5 R_5 + i_{C_d} R_g}{R_d}, \\ i_{R_e} = i_{R_c} + i_{R_b}, \\ i_{C_s} = I_{pt} + i_{R_c} - i_{R_{ds}} - i_{C_{ds}}, \\ i_3 = i_1 - i_L, \\ i_{C_c} = I_{bt} + i_{R_c} - I_{dr}, \\ i_{C_e} = I_{bt} + i_{R_e} + I_{df}, \\ i_5 = i_4 + i_{C_s} + i_{C_d}, \\ i_2 = i_3 - i_{R_b}, \\ i_4 = i_L - i_{R_c}, \\ i_1 = \frac{-(U + i_3 R_3 + i_2 R_W)}{R_d}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де R_1 – внутрішній опір джерела постійної напруги; R_2, R_6 – навантажувальні опори; R_3, R_4, R_5 – опори дільників напруги; $R_b, R_e, R_c, R_g, R_d, R_s$ – об'ємні опори бази, емітера, колектора, затвору, стоку та витоку; R_{ds} – опір стік – витік; C_e, C_c – ємності емітерного та колекторного переходів; C_d, C_s, C_{ds} – ємності затвор – стік, затвор – витік і стік – витік; R_W – вологочутливий резистор; L – індуктивність; U – джерело живлення постійної напруги; I_{pt} – струм польового транзистора; I_{dr}, I_{df} – струми внутрішніх переходів база – колектор і база – емітер; I_f, I_r – прямий і зворотний струми біполярного транзистора.

Вважаючи заданими значення відповідних напруг на ємностях і струм через індуктивність, розв'яжемо систему рівнянь (1) відносно $U_L, i_{C_{ds}}, i_{C_d}, i_{C_s}, i_{C_e}, i_{C_c}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_L = A_{13} \cdot R_b + \left(\frac{-U + i_L \cdot (R_W + R_3) + A_{13} \cdot R_W}{A_6} \right) \cdot R_3 - i_L \cdot (R_3 + R_2) - A_{15} \cdot A_1 - U_{C_c}, \\ i_{C_d} = \frac{U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}}{R_g}, \\ i_{C_{ds}} = A_{14} + \frac{A_3}{R_g} + I_{pt} - \frac{U_{C_{ds}}}{R_{ds}}, \\ i_{C_s} = 2I_{pt} + A_{15} + A_{13} - A_{14} + \frac{A_3}{R_g} - \frac{2U_{C_{ds}}}{R_{ds}}, \\ i_{C_c} = I_{bt} + A_{15} - I_{dr}, \\ i_{C_e} = I_{bt} + A_{15} + A_{13} + I_{df}, \end{array} \right. \quad (2)$$

де

$$\begin{aligned} A_1 &= R_e + R_s, \quad A_2 = R_c + R_6, \quad A_3 = U_{C_s} - U_{C_{ds}} - U_{C_d}, \\ A_4 &= -U_{C_c} - U_{C_{ds}}, \quad A_5 = -U_{C_c} - U_{C_s} - U_{C_e}, \\ A_6 &= R_d + R_3 + R_W, \quad A_7 = A_1 + A_2 + R_4, \\ A_8 &= -A_6 A_7 R_b + R_W^2 A_7 - R_W A_7 A_6 - A_2^2 A_6 - A_2 A_6 A_7, \\ A_9 &= R_W A_7 U - A_4 A_6 A_7 + A_2 A_6 A_5, \\ A_{10} &= -R_W^2 A_7 \cdot i_L - R_3 A_7 R_W \cdot i_L + i_L \cdot R_W A_7 A_6 + i_L \cdot A_2 A_6 R_4, \\ A_{11} &= \frac{i_L R_4 + A_5}{A_7}, \quad A_{12} = \frac{-A_2}{A_7}, \\ A_{13} &= \frac{A_{10} \cdot i_L + i_{R_d} \cdot R_d A_6 A_7 + A_9}{A_8}, \\ A_{14} &= -\frac{U_{C_d} A_8 + i_L \cdot R_5 A_8 + i_L \cdot R_5 A_{10} + R_5 A_9 + A_3 A_8}{-A_8 R_d + R_5 R_d A_6 A_7 - R_5 A_8}, \\ A_{15} &= A_{11} A_{13} A_{12}. \end{aligned}$$

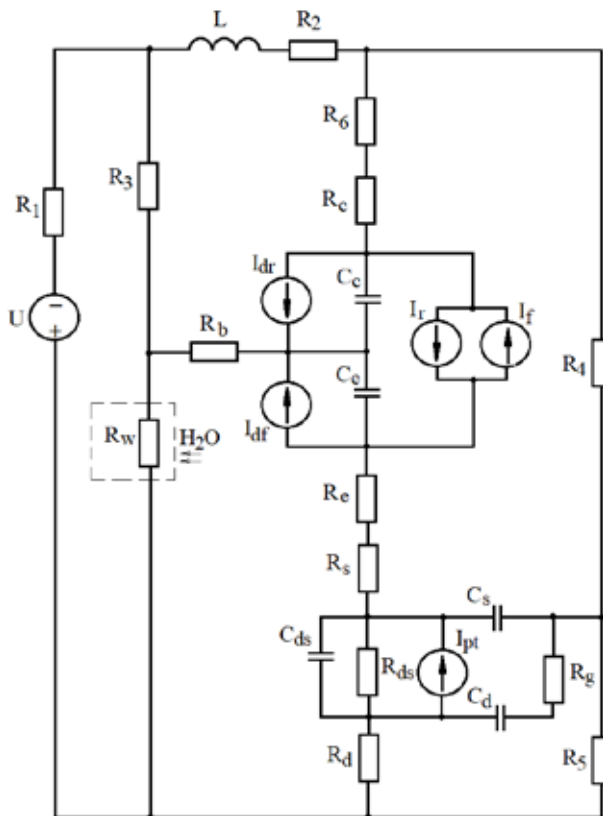


Рис. 2. Еквівалентна схема мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом

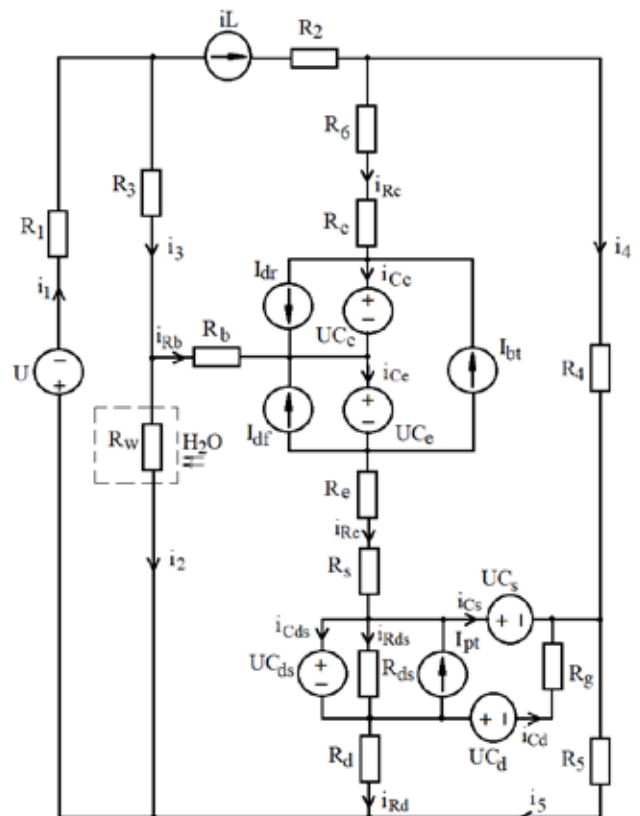


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом

Проведемо заміну у лівій частині рівнянь системи рівнянь (2) відповідно до виразів, які описують струми в ємностях $i_c(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt}$ і напруги в індуктивностях $U_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$ [16, с. 52–59], а також врахуємо, що всі напруги та струми в системі змінюються в часі:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = A_{13} \cdot R_b + \left(\frac{-U + i_L(t) \cdot (R_w + R_3) + A_{13} \cdot R_w}{A_6} \right) \times \\ \times R_3 - i_L(t) \cdot (R_3 + R_2) - A_{15} \cdot A_1 - U_{C_c}(t), \\ C_d \frac{dU_{C_d}(t)}{dt} = \frac{U_{C_s}(t) - U_{C_{ds}}(t) - U_{C_d}(t)}{R_g}, \\ C_{ds} \frac{dU_{C_{ds}}(t)}{dt} = A_{14} + \frac{A_3}{R_g} + I_{pt} - \frac{U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}}, \\ C_s \frac{dU_{C_s}(t)}{dt} = 2I_{pt} + A_{15} + A_{13} - A_{14} + \frac{A_3}{R_g} - \frac{2U_{C_{ds}}(t)}{R_{ds}}, \\ C_c \frac{dU_{C_c}(t)}{dt} = I_{bt} + A_{15} - I_{dr}, \\ C_e \frac{dU_{C_e}(t)}{dt} = I_{bt} + A_{15} + A_{13} + I_{df}. \end{cases} \quad (3)$$

Система рівнянь (3) є нелінійною, оскільки містить у собі нелінійні елементи, а саме джерела струмів I_{pt} , I_{dr} , I_{df} , $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$ та ємності C_e , C_c [16, с. 57]:

$$I_f = I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{VT \cdot NF}} - 1 \right), \quad I_r = I_S \left(e^{\frac{V_{BC}}{VT \cdot NR}} - 1 \right), \quad (4)$$

$$I_{df} = \frac{I_f}{BF}, \quad I_{dr} = \frac{I_r}{BR}, \quad (5)$$

$$I_{pt} = \begin{cases} 0, & V_{GS} - V_{TO} \leq 0; \\ \beta \cdot (V_{GS} - V_{TO})^2, & V_{GS} - V_{TO} \leq V_{DS}; \\ \beta \cdot V_{DS} \cdot [2 \cdot (V_{GS} - V_{TO}) - V_{DS}], & V_{GS} - V_{TO} > V_{DS}, \end{cases} \quad (6)$$

де I_S – струм насичення біполярного транзистора; V_{BE} , V_{BC} – напруги на внутрішніх точка база – емітер, база – колектор; VT – температурний потенціал; NF , NR – коефіцієнти неідеальності в нормальному та інверсному режимах; BF , BR – максимальні коефіцієнти передачі струму за схемою із загальним емітером у нормальному та інверсному режимах; QB – коефіцієнт неідеальності переходів біполярного транзистора; V_{TO} – порогова напруга; β – крутизна прохідної харак-

теристики; V_{GD} , V_{GS} , V_{DS} – напруги на внутрішніх точках затвор – стік, затвор – витік і стік – витік.

Ємності біполярного транзистора мають дифузійну та бар'єрну складові частини. Розглянемо окремо ємність колекторного переходу C_c [16, с. 58]:

$$C_c = C_{c,dif} + C_{c,bar}, \quad C_{c,dif} = \frac{(I_r + I_s) \cdot TR}{VT \cdot NR}, \quad (7)$$

$$C_{c,bar} = \begin{cases} \frac{CJC}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{V_{JC}}\right)^{MJC}}, & V_{BC} < 0; \\ CJC, & V_{BC} \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Ємність емітерного переходу C_e запишеться як [16, с. 58]:

$$C_e = C_{e,dif} + C_{e,bar}, \quad C_{e,dif} = \frac{(I_f + I_s) \cdot TF}{VT \cdot NF}, \quad (9)$$

$$C_{e,bar} = \begin{cases} \frac{CJE}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{V_{JE}}\right)^{MJE}}, & V_{BE} < 0; \\ CJE, & V_{BE} \geq 0, \end{cases} \quad (10)$$

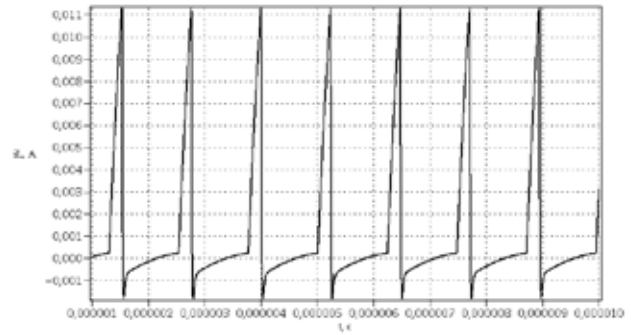
де $C_{c,dif}$, $C_{c,bar}$, $C_{e,dif}$, $C_{e,bar}$ – дифузійні та бар'єрні ємності колекторного й емітерного переходів; V_{JE} , V_{JC} – контактна різниця потенціалів переходів; TF , TR – час переносу заряду через базу в нормальному та інверсному режимах; MJE , MJC – коефіцієнти плавності переходів; CJE , CJC – ємність емітерного і колекторного переходів за нульового зміщення.

Система рівнянь (3) є динамічною математичною моделлю мікроелектронного частотного перетворювача вологості, яка дозволяє визначити значення напруги та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу.

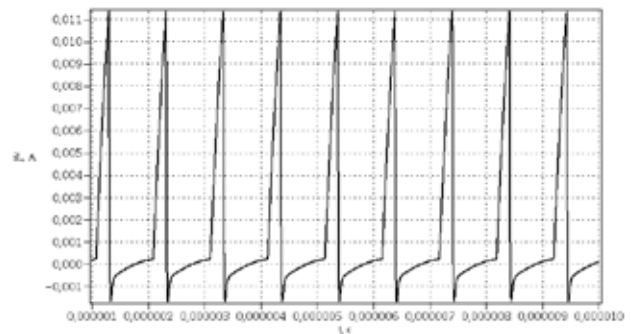
Для перевірки адекватності розробленої моделі написано програму для розрахунку параметрів схеми в середовищі *Maple*. Розрахунок показує, що на виході мікроелектронного частотного перетворювача вологості дійсно будуть періодичні коливання (рис. 4), частота яких змінюватиметься зі зміною опору вологочутливого резистивного елемента $R_W(W)$.

Так, при $R_W(W) = 10$ кОм частота $F = 827,7$ кГц, при $R_W(W) = 13$ кОм частота $F = 953,1$ кГц, а при $R_W(W) = 16$ кОм частота $F = 1054,5$ кГц, при цьому напруга живлення $U = 5$ В.

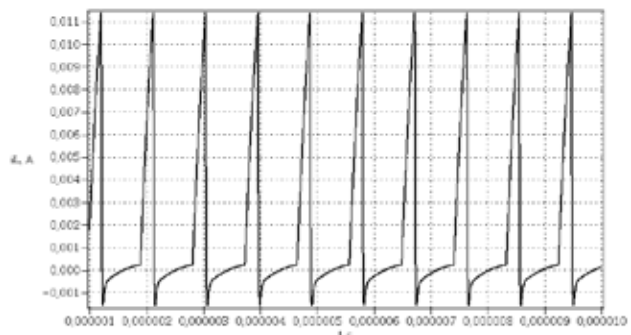
Для підтвердження теоретичних результатів і проведення експериментальних досліджень електричне коло мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом (рис. 1) було досліджене



$$R_W(W) = 10 \text{ kOhm}, \quad F = 827,7 \text{ kHz}$$



$$R_W(W) = 13 \text{ kOhm}, \quad F = 953,1 \text{ kHz}$$



$$R_W(W) = 16 \text{ kOhm}, \quad F = 1054,5 \text{ kHz}$$

Рис. 4. Зміна струму індуктивності від часу за різних значень опору вологочутливого резистивного елемента

в середовищі схемотехнічного моделювання *LTSpice*. Дослідження проводилися в діапазоні зміни опору вологочутливого резистивного елемента від $R_W(W) = 10$ кОм до $R_W(W) = 16$ кОм, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 20% до 90%.

За результатами моделювання в середовищі *LTSpice*, через індуктивність протікає гармонічний струм (рис. 6). Підрахувавши частоту струму індуктивності, можна побачити, що зі збільшенням опору вологочутливого резистивного елемента від 10 кОм ($W = 20\%$) до 16 кОм ($W = 90\%$) частота сигналу збільшується від 826,4 кГц до 1052,6 кГц.

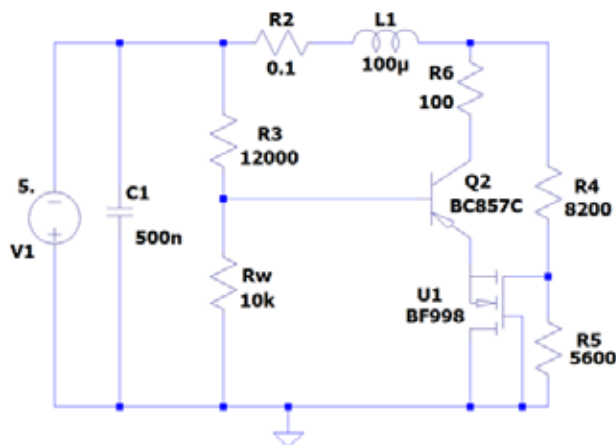


Рис. 5. Електрична схема мікроелектронного частотного перетворювача вологості у *LTSpice*

Так, на рис. 7 наведено експериментальну залежність струму індуктивності від часу за відносної вологості повітря $W = 55\%$, що відповідає значенню опору вологочутливого резистивного елемента $R_w(W) = 13\text{ кОм}$, частота вихідного сигналу дорівнює $F = 951,5\text{ кГц}$.

На рис. 8 наведено експериментальну залежність струму індуктивності від часу за відносної вологості повітря $W = 90\%$, що відповідає значенню опору вологочутливого резистивного елемента $R_w(W) = 16\text{ кОм}$, частота вихідного сигналу дорівнює $F = 1052,6\text{ кГц}$.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень можна побачити, що на виході мікроелектронного частотного пере-

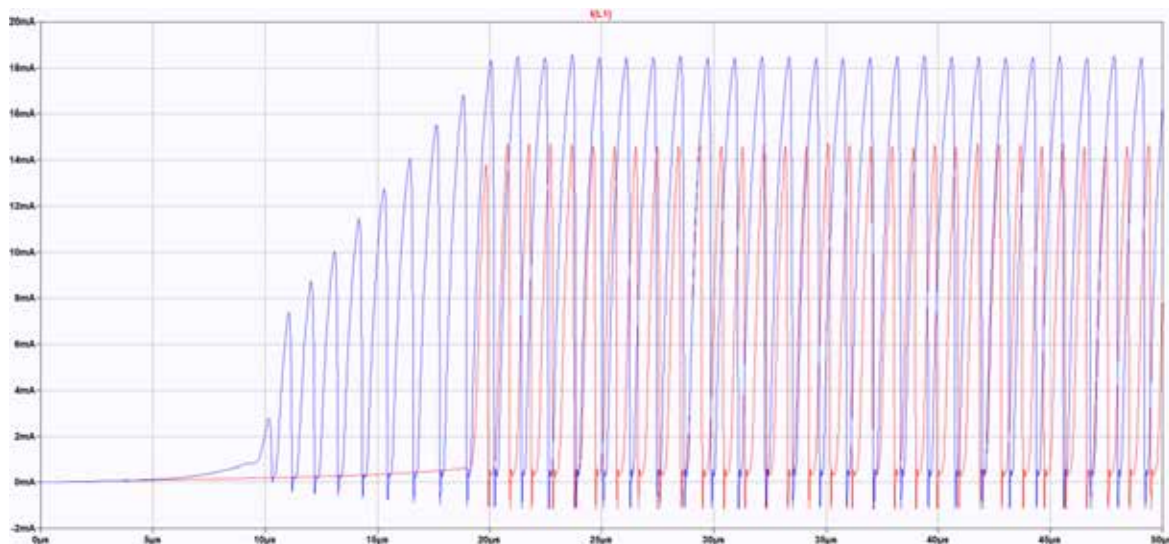


Рис. 6. Експериментальна залежність струму індуктивності від часу за різних значень опору вологочутливого резистивного елемента у *LTSpice*

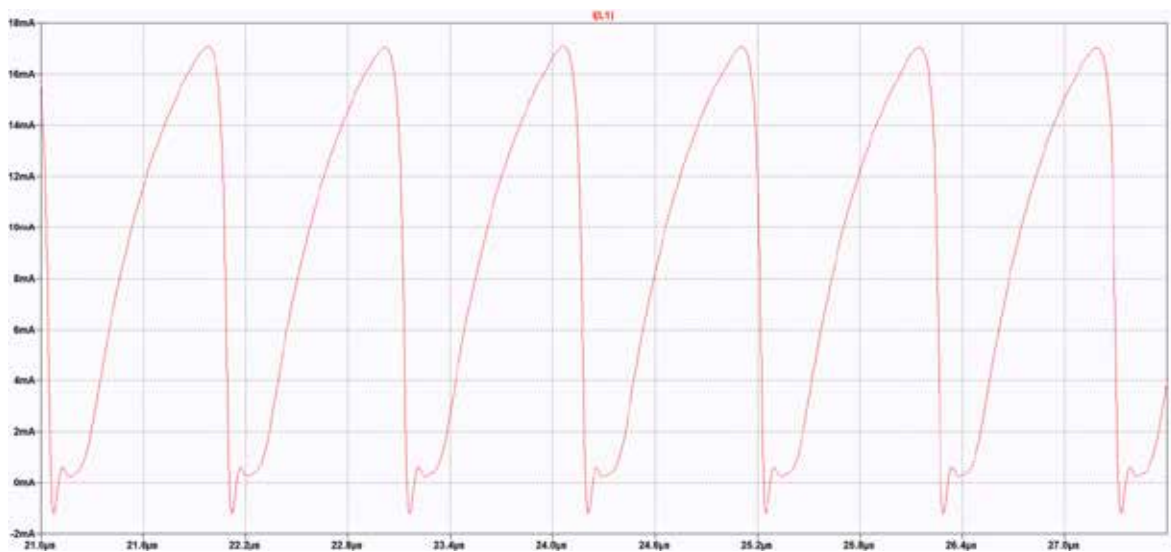


Рис. 7. Експериментальна залежність струму індуктивності від часу за відносної вологості повітря $W = 55\%$

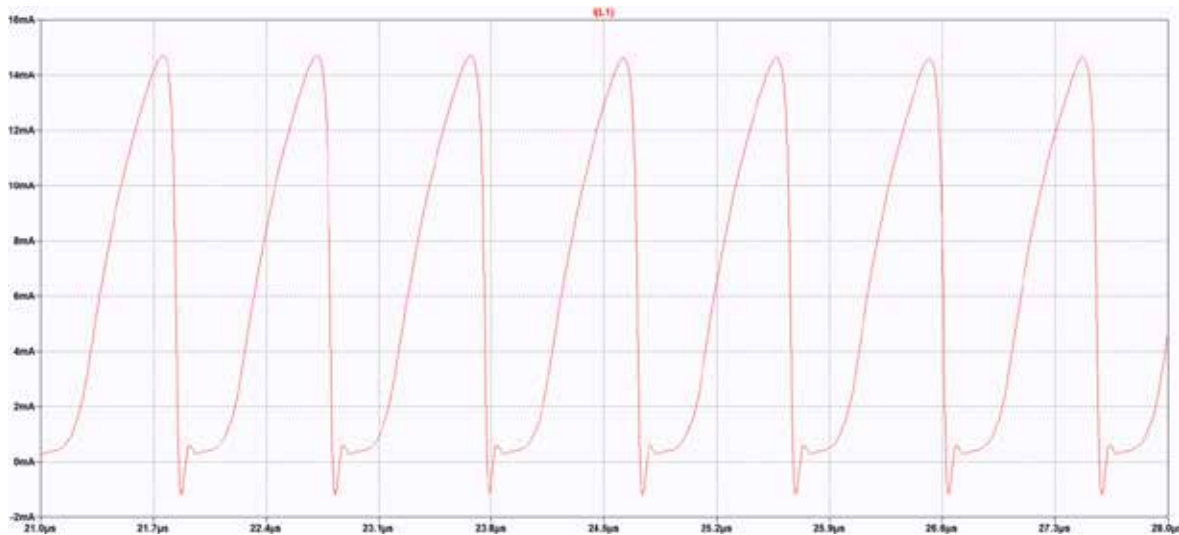


Рис. 8. Експериментальна залежність струму індуктивності від часу за відносної вологості повітря $W = 90\%$

творювача вологості дійсно існуватимуть періодичні коливання, частота яких збільшуватиметься зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Порівнявши отримані теоретичні й експериментальні значення частоти вихідного сигналу, ми встановили, що відносна похибка не перевищує 1,8%.

Висновки. Розроблено математичну модель мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом. Використовуючи середовище Maple, ми довели адекватність розробленої математичної моделі. Встановлено, що на виході мікроелектронного частотного перетворювача вологості існують періодичні коливання, частота яких змінюється зі зміною опору вологочутливого резистивного елемента $R_w(W)$. Так, при $R_w(W) = 10$ кОм частота $F = 827,7$ кГц, при $R_w(W) = 13$ кОм частота $F = 953,1$ кГц, а при $R_w(W) = 16$ кОм частота $F = 1054,5$ кГц, напруга живлення $U = 5$ В.

Для підтвердження теоретичних результатів розробку досліджено в середовищі схемотехнічного моделювання LTSpice. Дослідження проводилися в діапазоні зміни опору вологочутливого резистивного елемента від $R_w(W) = 10$ кОм до $R_w(W) = 16$ кОм, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 20% до 90%. За результатами моделювання в середовищі LTSpice встановлено, що зі збільшенням опору вологочутливого резистивного елемента від 10 кОм ($W = 20\%$) до 16 кОм ($W = 90\%$) частота сигналу збільшується від 826,4 кГц до 1052,6 кГц.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень показали, що на виході мікроелектронного частотного перетворювача вологості існують періодичні коливання, частота яких збільшуватиметься зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Отримані теоретичні й експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 1,8%.

Список літератури:

1. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nanoporous 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. Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2014. № 14. P. 7881–7939.
5. Mario Pelino, Carlo Cantalini. Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Elec. Comp.* 1994. Vol. 16. P. 69–87.
6. Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman. 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. № 16. P. 1135.

7. Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of microelectromechanical system*. 2010. Vol. 19. № 1. P. 183–191.
8. Zhi, Chen, Chi Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. 2005. Vol. 3. P. 274–295.
9. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В. Сенсори вологості : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2003. 208 с.
10. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Вінниця : «Універсум-Вінниця», 1999. 275 с.
11. 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 SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2019. 111761I.
12. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, 2017, 104451X.
13. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Селецька О.О. Математична модель мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. № 5 (277). С. 195–198.
14. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Осадчук Я.О. Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом. *Прикладні питання математичного моделювання*. Т. 3. № 2.1. 2020. С. 206–215.
15. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Звягін О.С. Проблеми вимірювання вологості нафтопродуктів та метод підвищення його точності. *Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління*. 2010. № 1 (27). С. 135–139.
16. Осадчук В.С. Осадчук О.В., Звягін О.С. Частотні перетворювачі для контролю вологості нафтопродуктів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2014. 152 с.
17. Осадчук О.В., Звягін О.С., Савицький А.Ю., Барабан С.В., Селецька О.О. The radiomeasuring humidity sensor with the frequency output signal. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2016. № 6. С. 216–218.

Osadchuk A.V., Krylik L.V., Zviahin O.S., Osadchuk I.A. MATHEMATICAL MODEL OF A MICROELECTRONIC HUMIDITY TRANSDUCER WITH A HUMIDITY-SENSITIVE RESISTIVE ELEMENT

A mathematical model has been developed for a microelectronic frequency humidity transducer with a humidity-sensitive resistive element. The microelectronic frequency transducer of humidity is developed on the basis of a transistor structure with a negative resistance on a field-effect two-gate transistor and a bipolar transistor. The negative differential resistance, formed by the parallel connection of the impedance with the capacitive component on the electrodes of the transistor structure and inductance, leads to the occurrence of electrical oscillations in the oscillator circuit. Using the Maple environment, the adequacy of the developed mathematical model has been proved. It was found that at the output of the microelectronic frequency transducer of humidity there are periodic oscillations, the frequency of which changes with a change in the resistance of the humidity-sensitive resistive element $R_W(W)$. So, with $R_W(W)=10\text{ kOhm}$ the frequency is $F=827.7\text{ kHz}$, with $R_W(W)=13\text{ kOhm}$ the frequency is $F=953.1\text{ kHz}$, and with $R_W(W)=16\text{ kOhm}$ the frequency is $F=1054.5\text{ kHz}$, while the supply voltage is 5 V . To confirm the theoretical results of the circuitry solution of the microelectronic frequency transducer of humidity, they were investigated in the LTSpice simulation environment. The studies were carried out in the range of changes in the resistance of a humidity-sensitive resistive element from 10 kOhm to 16 kOhm , which corresponds to an increase in the value of the relative air humidity from 20% to 90%. According to the results of modeling in the LTSpice environment, it was found that with an increase in the resistance of the humidity-sensitive resistive element from 10 kOhm ($W=20\%$) to 16 kOhm ($W=90\%$) the output frequency increases from 826.4 kHz to 1052.6 kHz . The results of theoretical and experimental studies have shown that at the output of the microelectronic frequency transducer of humidity there are periodic oscillations, the frequency of which increases with an increase in the value of the relative humidity of the air. The obtained theoretical and experimental studies are in good agreement, the relative error does not exceed 1.8%.

Key words: frequency transducer of humidity, humidity-sensitive resistive element, negative differential resistance, periodic oscillations, frequency.

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 32 (71) № 1 2021

Частина 2

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 15,54. Ум. друк. арк. 22,79. Зам. № 0321/81

Підписано до друку 04.02.2021. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.