

ISSN 2618-0332 (print)
ISSN 2618-0340 (online)

Міністерство освіти і науки України

Херсонський національний технічний університет

ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Т. 9, № 1

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 14 від 26 травня 2026 року)

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

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



Видавничий дім
«Гельвестика»
2026

Редакційна колегія

Головний редактор

Астіоненко Ігор Олександрович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

Заступники головного редактора

Шерстюк Володимир Григорович, доктор технічних наук, професор, проректор з навчальної роботи, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

Литвиненко Олена Іванівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та фізико-математичних дисциплін, Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Члени редакційної колегії

Аксак Наталія Георгіївна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем і технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

Алексєєв Михайло Олександрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

Бабічев Сергій Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики, Херсонський державний університет, м. Херсон, Україна; професор кафедри інформатики, Університет Яна Євангеліста Пуркіне в Усті над Лабем, м. Усті-над-Лабем, Чехія

Вороненко Марія Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем, Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна

Гурський Якуб (Górski Jakub), доцент кафедри робототехніки і мехатроніки, Факультет механічної інженерії та робототехніки, Університет AGH в Кракові, Польща

Гучек Петро (Guchek Petro), доктор технічних наук, доцент, Школа комп'ютерних наук і технологій, Університет VIZJA, м. Варшава, Польща

Дудченко Олег Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та фізико-математичних дисциплін, Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна

Козел Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету інформаційних технологій та дизайну, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

Мацуї Анатолій Миколайович, доктор технічних наук, професор, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Приходько Сергій Борисович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

Редчиць Дмитро Олександрович, доктор фізико-математичних наук, професор, директор, Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна

Рудакова Ганна Володимирівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

Скарга-Бандурова Інна (Skarga-Bandurova Inna), доктор наук, професор, доцент кафедри штучного інтелекту, Школа інженерії, обчислювальної техніки та математики, Університет Оксфорд Брукс, м. Оксфорд, Велика Британія

Стеценко Інна Вячеславівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Стрельнікова Олена Олександрівна, доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Інститут енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, м. Харків, Україна

ISSN 2618-0332 (print)
ISSN 2618-0340 (online)

Ministry of Education and Science of Ukraine

Kherson National Technical University

APPLIED QUESTIONS OF MATHEMATICAL MODELLING

V. 9, № 1

Recommended for publication by the Academic Council
of Kherson National Technical University
(Minutes No 14 on 26 May 2026)

The journal is included in the List of Scientific Professional Publications of Ukraine (Category "B")
in accordance with Order No. 409 of the Ministry of Education and Science of Ukraine
dated March 17, 2020

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



Publishing House
"Helvetica"
2026

Editorial Board

Editor-in-Chief

Astionenko Ihor, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Informatics and Computer Sciences, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

Deputies Editors-in-Chief

Sherstiuk Volodymyr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Academic Work, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

Lytvynenko Olena, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Physical and Mathematical Disciplines, Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Editorial board members

Axak Nataliia, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Aleksieiev Mykhailo, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Babichev Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics, Kherson State University, Kherson, Ukraine; Professor of the Department of Informatic, Jan Evangelista Purkyně University in Ústí nad Labem, Ústí nad Labem, Czech Republic

Voronenko Mariia, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems, Odessa Polytechnic National University, Odessa, Ukraine

Górski Jakub, Dr Eng., Assistant Professor, Department of Robotics and Mechatronics, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, AGH University of Krakow, Krakow, Poland

Guchek Petro, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, School of Computer Science & Technologies, VIZJA University, Warsaw, Poland

Dudchenko Oleh, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Physical and Mathematical Disciplines, Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine

Kozel Viktor, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Information Technology and Design, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

Matsui Anatolii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Prykhodko Serhii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software for Automated Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Redchyts Dmytro, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Rudakova Hanna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation, Robotics and Mechatronics, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

Skarga-Bandurova Inna, Doctor of Science, Professor, Associate Professor of the Department of Artificial Intelligence, School of Engineering, Computing and Mathematics (ECM), Oxford Brookes University, Oxford, United Kingdom

Stetsenko Inna, Doctor of Technical Sciences, Professor , Professor of the Department of Computer Science and Software Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Strelnikova Olena, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, Anatolii Pidhornyi Institute of Power Machines and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

ЗМІСТ

А. Г. БОРИСЕНКО, Р. С. ЮРКОВ, В. С. БЕЙЦУН ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛОПРИЙМАЛЬНОМУ КАНАЛІ СОНЯЧНОЇ ПАРАБОЛОЦИЛІНДРИЧНОЇ СИСТЕМИ З НАНОРІДИНОЮ В ЯКОСТІ ТЕПЛОНОСІЯ.....	13
Є. В. ВЕСКОВ, С. О. ДОВГИЙ, Д. О. РЕДЧИЦЬ ПОРІВНЯННЯ СХЕМ АПРОКСИМАЦІЇ КОНВЕКТИВНИХ ДОДАНКІВ В РІВНЯННЯХ НАВ'Є-СТОКСА В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ OPENFOAM.....	22
Т. О. ГОРЕЛІКОВА, О. В. ЧОПОРОВА ВИСОКОЕНТРОПІЙНІ ВИПАДКОВІ ЧИСЛА ЯК ОСНОВА КРИПТОГРАФІЧНОЇ БЕЗПЕКИ: КВАНТОВИЙ ПІДХІД.....	37
О. М. GUMEN, М. А. KRASNOPOLSKA INFORMATION RESOURCES IN THE MANAGEMENT SYSTEM OF JOINT-STOCK COMPANY COMMERCIAL BANK "PRIVATBANK".....	50
К. Г. ДЕГТЯРЬОВ, Д. В. КРЮТЧЕНКО, А. С. КОЛОДЯЖНИЙ, Т. Г. ВІХТИНСЬКА, О. О. СТРЕЛЬНИКОВА МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПЛЕСКАНЬ РІДИНИ В РЕЗЕРВУАРАХ ІЗ ПЛАВУЧОЮ КРИШКОЮ-ПЛАСТИНОЮ З ВІЛЬНИМ КРАЄМ.....	56
Г. А. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ, С. О. ПЕТРИК ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА ВЕКТОРНИХ МЕТРИК 3D-ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБЛИЧЧЯ В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ ОКЛЮЗІЙ.....	69
Є. І. ДОНЧЕНКО, О. В. РАЗЖИВІН, В. В. МАСИК УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА ЄМНІСНОГО ДАТЧИКА ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ.....	81
Є. А. ДРОЗДОВА, В. М. КОЗЕЛ, О. В. ІВАНЧУК АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ ДАНИХ НА ОСНОВІ ДЕРЕВА МЕРКЛА.....	91
К. В. ДУДКІН, Г. Я. ПРОКОФ'ЄВА, В. Ф. ІРОДОВ ЕВОЛЮЦІЙНИЙ АЛГОРИТМ ЛЕКСИКОГРАФІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ТРУБЧАСТИХ ГАЗОВИХ НАГРІВАЧІВ.....	105
М. Б. ЄДИНОВИЧ, Т. О. КУЗЬМІНА, О. І. СОЛОГУБОВ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БПЛА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МОДЕЛІ REINFORCEMENT LEARNING.....	111
Т. В. ЗАЙЦЕВА ОЦІНЮВАННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ У СУДНОПЛАВСТВІ НА ОСНОВІ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ.....	120
С. В. ІНОСОВ, О. В. БОНДАРЧУК, М. І. САМОЙЛЕНКО, В. Ю. ЛУЦЕНКО ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ ДВОТЕМПЕРАТУРНОМУ РЕЖИМІ ОПАЛЕННЯ.....	132
Р. О. КАШМАР DESIGNING LOSS FUNCTIONS FOR TRANSFORMER-BASED TIME ESTIMATION IN AI PROJECT.....	139
В. Ю. КАШТАН, В. В. ГНАТУШЕНКО НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА АЕРОКОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДИФІКОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ YOLOV8 ТА ЧАСТОТНО-ПРОСТОРОВИХ ОЗНАК.....	148
Ю. В. КЛЕБАН, Л. О. ЛЕПСЬКА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ВАЖЛИВОСТІ ОЗНАК У ЗАДАЧІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН НА ВТОРИННОМУ РИНКУ ЖИТЛА З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	161

Є. І. ДОНЧЕНКО, О. В. РАЗЖИВІН, В. В. МАСИК
Донбаська державна машинобудівна академія

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА ЄМНІСНОГО ДАТЧИКА ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

Робота присвячена удосконаленню ємнісного датчика вологості ґрунту з метою підвищення точності вимірювання та стабільності характеристик в різноманітних умовах експлуатації. Актуальність дослідження зумовлена широким застосуванням датчиків у системах автоматичного поливу, сільському господарстві та задачах моніторингу стану ґрунту, де вірогідність вимірювання напряму впливає на ефективність керування ресурсами та врожайність. Традиційні датчики вологості мають певні недоліки, пов'язані з неоднорідністю ґрунту, що при високих показниках вологості ґрунту може вносити нелінійність в характеристику датчика через нерівномірний розподіл чутливого об'єму, що, в свою чергу, призводить до зниження точності вимірювань.

В рамках цієї роботи було запропоновано конструктивне рішення, засноване на впровадженні симетричної конструкції обкладок чутливого елемента датчика вологості ґрунту. Запропонована симетрична конструкція дозволяє значно знизити вплив нерівномірного розподілу чутливого об'єму вимірюваного середовища та збільшити сам чутливий об'єм. Це сприяє підвищенню стабільності вихідного сигналу та зменшенню похибки вимірювань при зміні умов навколишнього середовища. За рахунок збільшення чутливого об'єму досягається підвищення чутливості датчика вологості ґрунту.

В ході дослідження було проведено аналіз конструкції чутливого елемента існуючого ємнісного датчика вологості ґрунту, проведено комп'ютерне моделювання електростатичного поля, на основі якого виявлено основне джерело похибки та зумовлена необхідність модернізації. Розроблена конструкція чутливого елемента з симетричним компланарним конденсатором, виконано комп'ютерне моделювання електростатичного поля, проведено порівняльний аналіз результатів моделювання існуючого чутливого елемента та запропонованого. Математичне моделювання підтвердило, що запропонована вдосконалена конструкція генерує симетричну форму електростатичного поля незалежно від середовища. Це дозволило збільшити абсолютну чутливість датчика в 1.65 рази (на 65.3 %) та забезпечити ідеально лінійну залежність ємності. Зокрема, розрахункова приведена похибка від нелінійності зменшилася з 3.2 % (для існуючого прототипу) до 0.0 % у всьому діапазоні вимірювань (від сухого ґрунту до 100 % вологості).

Практична значимість роботи полягає у можливості застосування розробленого чутливого елемента в удосконалених датчиках вологості ґрунту, які в свою чергу можна застосовувати в системах автоматичного контролю вологості ґрунту, включаючи інтелектуальні системи поливу та агротехнічні комплекси. Запропонований підхід може бути використаний при подальшому розвитку сенсорних систем та створенні більш точних та надійних вимірювальних пристроїв.

Ключові слова: компланарний конденсатор, Elcut, ємність, симетрична схема, ємнісний датчик вологості ґрунту.

Ye. I. DONCHENKO, O. V. RAZZHIVIN, V. V. MASYK
Donbas State Engineering Academy

IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF THE SENSING ELEMENT OF A CAPACITIVE SOIL MOISTURE SENSOR

This work focuses on improving a capacitive soil moisture sensor to increase measurement accuracy and ensure stable performance under various operating conditions. The research is highly relevant due to the widespread use of such sensors in automatic irrigation systems, agriculture, and soil monitoring, where measurement reliability directly affects resource management efficiency and crop yields. Traditional moisture sensors have drawbacks related to soil heterogeneity. At high moisture levels, this can introduce nonlinearity into the sensor's response due to a non-uniform distribution of the sensing volume, which ultimately reduces measurement accuracy.

This paper proposes a design solution based on implementing a symmetrical configuration of the sensing element's electrodes. The proposed symmetrical design significantly reduces the impact of the non-uniform distribution of the sensing volume within the measured medium and increases the sensing volume itself. This enhances the stability of the output signal and minimizes measurement errors caused by environmental changes. Furthermore, the expanded sensing volume increases the overall sensitivity of the soil moisture sensor.

During the study, the sensing element design of an existing capacitive soil moisture sensor was analyzed. Computer modeling of the electrostatic field was performed to identify the primary source of error and justify the need for mod-

ernization. A new sensing element featuring a symmetrical coplanar capacitor was developed. Subsequent electrostatic field modeling and a comparative analysis between the existing and proposed sensing elements were conducted. Mathematical modeling confirmed that the proposed advanced design generates a symmetrical electrostatic field regardless of the medium. This allowed increasing the absolute sensitivity of the sensor by a factor of 1.65 (by 65.3 %) and ensuring a perfectly linear capacitance response. Specifically, the calculated reduced nonlinearity error decreased from 3.2 % (for the existing prototype) to 0.0 % across the entire measurement range (from completely dry soil to 100 % moisture).

The practical significance of this work lies in the potential application of the developed sensing element in advanced soil moisture sensors. These sensors can be integrated into automatic soil moisture control systems, including smart irrigation networks and agricultural complexes. The proposed approach can be utilized in the further development of sensor technologies and the creation of more accurate and reliable measuring devices.

Keywords: coplanar capacitor, Elcut, capacitance, symmetrical configuration, capacitive soil moisture sensor.

Постановка проблеми

Сьогодні для підвищення врожайності в рослинництві потрібне більш точне дотримання певних кліматичних умов. Зокрема, контроль вологості ґрунту зменшує витрати води та запобігає його пересиханню або перенасиченню, тому вимірювання цього показника є необхідним. На ринку представлена велика кількість датчиків вологості ґрунту, які поділяються на резистивні та ємнісні. Недоліком резистивних датчиків є недовговічність вимірювальних електродів, чого позбавлені ємнісні датчики. Однак, останні мають такі недоліки, як нелінійна характеристика вимірювання та слабка чутливість [1; 2].

Існуючі датчики вологості ґрунту реалізуються на основі різноманітних принципів вимірювання, серед яких максимальне поширення отримали резистивні та ємнісні методи вимірювання. Резистивні датчики являють собою примітивні конструкції з двома електродами, зануреними у ґрунт, однак застосування таких датчиків обмежено через схильність електродів датчика до корозії. Внаслідок окислення контактів датчика з'являється додатковий опір, що спотворює показники вимірювань та руйнує електроди [3].

Більш перспективними є датчики, в яких чутливий елемент формує конденсатор, де діелектриком виступає ґрунт. Найбільш розповсюджені конструкції із занурюваними ізольованими електродами та планарні структури, виконані у вигляді друкованих провідників на друкованій платі [4].

Занурені електроди формують об'ємне електричне поле у ґрунті, забезпечуючи високу чутливість, проте вони схильні до впливу неоднорідності середовища та зовнішніх факторів [5]. Планарні структури у вигляді друкованих провідників утворюють крайове електричне поле та відрізняються технологічністю й стабільністю параметрів [4]. Найбільш розповсюджені конструкції планарних структур – це міжпальцеві конфігурації електродів (електроди розташовані по чергово), що підвищують чутливість за рахунок збільшення області взаємодії із ґрунтом [6]. До переваг планарних структур можна додати те, що їх просто інтегрувати у вимірювальні прилади, оскільки вони являють собою доріжки на платі. Недоліком таких структур є діелектрична неоднорідність ґрунту та текстоліту. Вона створює в датчику нелінійну характеристику, що потребує подальшого удосконалення конструкції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика точності датчика була розглянута у статтях [1; 2]. В цих статтях увагу було зосереджено на розробці калібрувальних функцій під конкретні типи ґрунту з метою зменшення похибки вимірювань. Було з'ясовано, що датчик у дрібнозернистому ґрунті схильний завищувати показники вологості, а в крупнозернистому ґрунті – навпаки. У дослідженні було проведено серію вимірювань, після яких з'ясувалося, що заводське калібрування має низьку точність, і для того, щоб її збільшити, необхідно провести додаткове калібрування для конкретного ґрунту.

Також сучасні дослідження датчиків вологості ґрунту спрямовані на підвищення точності та стабільності вимірювань за рахунок оптимізації геометрії чутливих елементів. Особлива

увага приділяється розвитку планарних та міжпальцевих електродів, включаючи спіральні та багатозонні конфігурації, що забезпечують підвищення чутливості та глибини зондування [7]. Також розглядаються методи зниження впливу таких факторів, як температура та солоність ґрунту, включаючи використання височастотних вимірювань та алгоритмів компенсації [5]. В цілому дослідження підтверджують необхідність подальшого вдосконалення конструкції для підвищення стабільності та точності датчиків [7].

Мета дослідження

В роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- дослідити параметри чутливого елемента існуючого ємнісного датчика вологості та визначити недоліки;
- впровадити удосконалену конструкцію чутливого елемента датчика та дослідити її параметри;
- порівняти параметри чутливих елементів існуючого датчика та виділити переваги впровадженної конструкції перед існуючою.

Виклад основного матеріалу дослідження

Під час виконання даної роботи використані такі методи та інструменти: системний аналіз, комп'ютерне моделювання методом кінцевих елементів (далі МКЕ) у програмі Elcut.

Дослідження існуючої конструкції чутливого елемента ємнісного датчика методом кінцевих елементів

Дослідження існуючого датчика здійснено у програмі Elcut, яка виконує розрахунки електромагнітних параметрів методом кінцевих елементів [8].

На рисунку 1 наведено розрахункову модель Elcut [9], параметри якої визначені на основі існуючого чутливого елемента [10] з такими розмірами: довжина по осі Z – 100 мм; пустота – 4 мм; товщина підкладки – 2 мм.

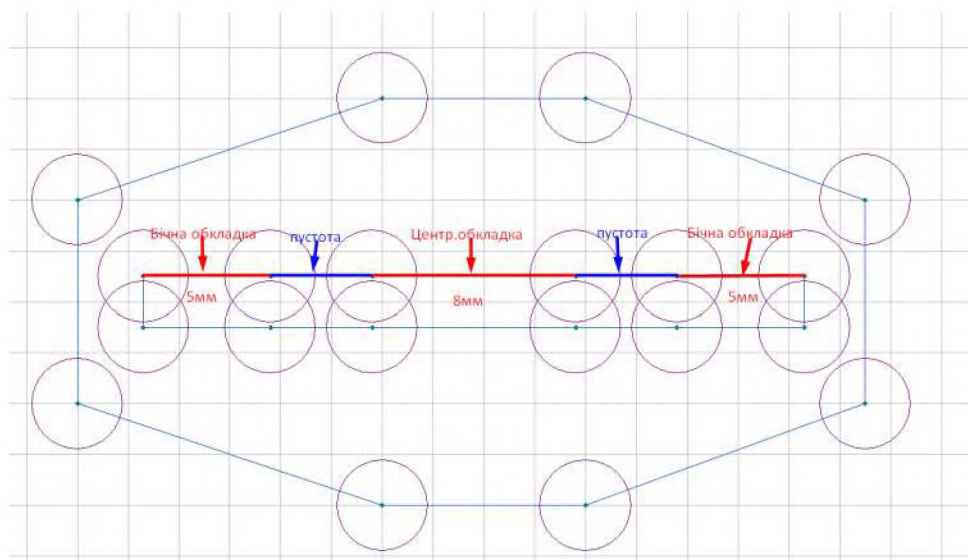


Рис. 1. Elcut-модель існуючого чутливого елемента

Як матеріал плати використано склотекстоліт FR4 з діелектричною проникністю $\epsilon = 4.5$ [4; 6]. Для спрощення моделі та виділення власної нелінійності датчика, прийнято лінійну залежність діелектричної проникності ґрунту (ϵ) від вологості ґрунту (μ). Відповідно до [9] при повністю сухому ґрунті діелектрична проникність $\epsilon = 2$, при вологості 100 % $\epsilon = 30$.

Отримані результати дослідження на основі лінійної залежності виду $y = kx + b$ наведені у таблиці 1. При побудові залежності враховано граничні умови діелектричної проникності ґрунту $\epsilon_{\min} = 2$ та $\epsilon_{\max} = 30$. Точка перетину прямої з віссю Y визначена при $\epsilon_{\min} = 2$, вологості ґрунту $\mu = 0\%$, тоді коефіцієнт $b = 2$. Коефіцієнт k визначається з відношення зміни діелектричної проникності до зміни вологості ґрунту.

Зміна діелектричної проникності розраховується різницею між мінімальним та максимальним значенням

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min} = 30 - 2 = 28.$$

де $\epsilon_{\min}$ – це діелектрична проникність у сухому ґрунті, $\epsilon_{\max}$ – це діелектрична проникність у ґрунті з вологістю 100 %, $\Delta\epsilon$ – це діапазон зміни діелектричної проникності ґрунту.

Зміна вологості $\Delta\mu = 100\%$.

Отже, крутизна зміни діелектричної проникності k дорівнює:

$$k = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta\mu} = \frac{28}{100} = 0.28.$$

На основі цих даних лінійна функція виглядатиме:

$$\epsilon = 0.28\mu + 2.$$

Таблиця 1

Залежність діелектричної проникності від вологості ґрунту

Середовище	Діелектрична проникність ϵ
Сухий ґрунт	2
Вологість ґрунту 1 %	2.28
Вологість ґрунту 2 %	2.56
Вологість ґрунту 3 %	2.84
Вологість ґрунту 4 %	3.12
Вологість ґрунту 5 %	3.4
Вологість ґрунту 10 %	4.8
Вологість ґрунту 25 %	9
Вологість ґрунту 50 %	16
Вологість ґрунту 75 %	23
Вологість ґрунту 100 %	30
FR4(склотекстоліт)	4.5

Встановлюємо потенціал обкладок на рівні +3 В, що відповідає типовій напрузі живлення сучасних малопотужних вимірювальних перетворювачів [10; 2].

Таблиця 2

Значення напруги на обкладках конденсатора

Назва обкладки	Потенціал, В
Центральна обкладка	+3
Бічні обкладки	0

Виконано моделювання з параметрами діелектричної проникності 2 (сухий ґрунт). Картина розподілу електростатичного поля показана на рисунку 2.

Проведений аналіз картини розподілу електростатичного поля при сухому ґрунті показав, що найбільша напруженість спостерігається між обкладками конденсатора, саме ця зона

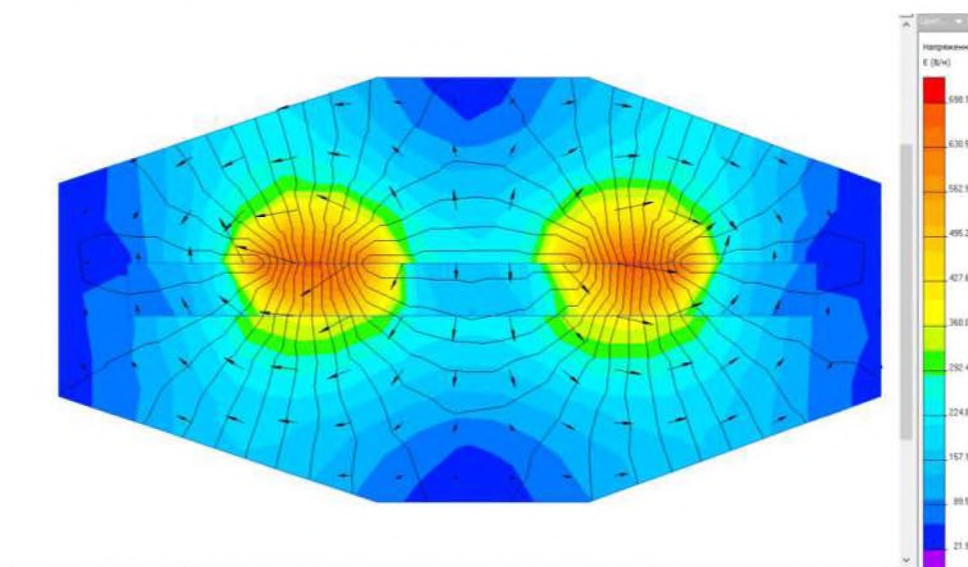


Рис. 2. Картина розподілу електростатичного поля при сухому ґрунті ($\epsilon = 2$)

є чутливою. Тобто при збільшенні діелектричної проникності ґрунту саме ця зона буде змінюватись. Відповідно до цього досліджено розрахункову модель у ґрунті з вологістю 100 %, у якій діелектрична проникність $\epsilon = 30$. Результат математичного моделювання наведено на рис. 3.

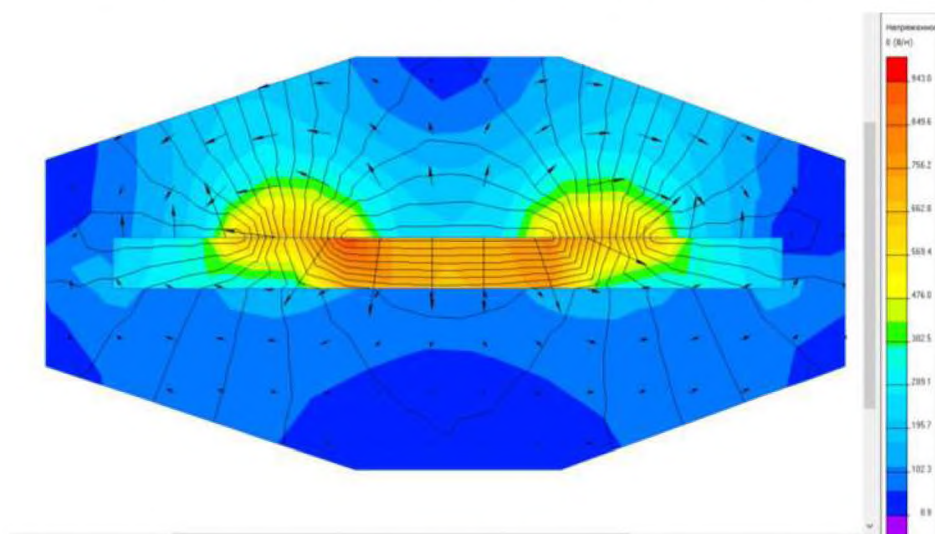


Рис. 3. Картина розподілу електростатичного поля при вологості ґрунту 100 % ($\epsilon = 30$)

Слід зазначити, що форма електростатичного поля стає несиметричною у порівнянні з картиною при сухому ґрунті. Це зумовлено наявністю зазору, який утворено діелектричною пластиною FR4. Виникає нелінійна залежність ємності конденсатора від діелектричної проникності ґрунту.

Дослідження покращеної конструкції чутливого елемента ємнісного датчика методом кінцевих елементів

Вирішенням проблеми нелінійності одностороннього чутливого елемента може стати включення у схему ще одного конденсатора на зворотній стороні текстоліту, схема розрахункової моделі наведена на рисунку 4.

Показана розрахункова модель відрізняється від попередньої тим, що в ній два компланарні конденсатори, з'єднані симетрично. Це забезпечує розширення чутливої області, внаслідок чого ємність і чутливість зростають. Слід також відзначити, що застосування симетричної

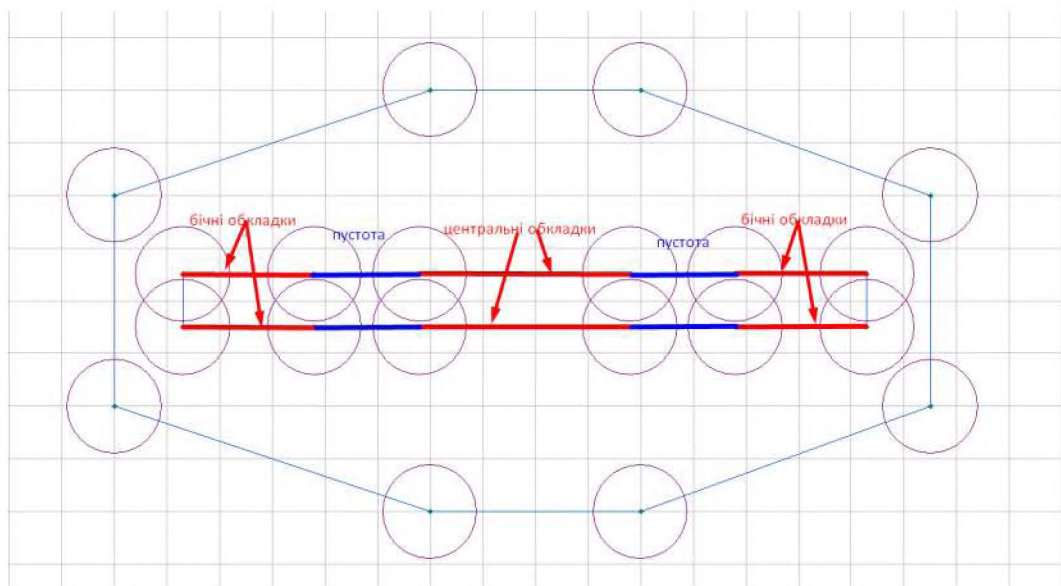
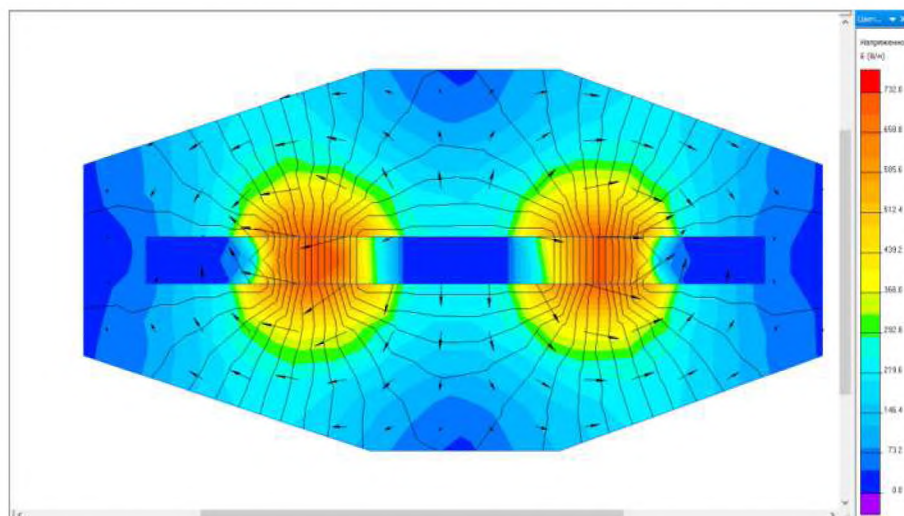


Рис. 4. Розрахункова модель покращеного чутливого елемента

схеми формує симетричну форму електростатичного поля незалежно від середовища. Симетрична форма надає можливість отримати лінійну залежність реакції чутливого елемента від вологості ґрунту.

Також виконано моделювання з параметрами діелектричної проникності $\epsilon_{\min} = 2$ (сухий ґрунт). Картина розподілу електростатичного поля показана на рисунку 5.

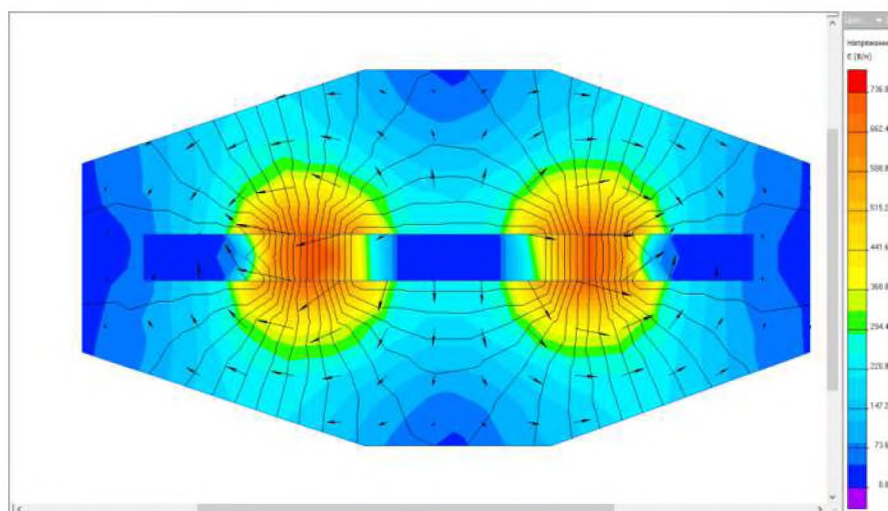
Рис. 5. Картина розподілу електростатичного поля при сухому ґрунті ($\epsilon = 2$)

Результат моделювання показує, що область реєстрації запропонованого варіанту симетрична, на відміну від прототипу, завдяки чому підвищується чутливість датчика.

Для перевірки поведінки поля у граничних умовах виконаємо моделювання також і для ґрунту з максимальною вологістю ($\epsilon = 30$). Результати показані на рисунку 6. Дані про ємність для обох моделей занесемо до таблиці 3.

Порівняльний аналіз результатів моделювання існуючої та вдосконаленої конструкцій

Отримані значення розрахункової ємності існуючої (C) та вдосконаленої (C') моделей зведено до таблиці 3.

Рис. 6. Картина розподілу електростатичного поля при вологості ґрунту 100 % ($\epsilon = 30$)

Таблиця 3

Залежність ємності від діелектричної проникності існуючого чутливого елемента C та покращеного чутливого елемента C'

μ , %	0	1	2	3	4	5	10	25	50	75	100
ϵ	2	2.28	2.56	2.84	3.12	3.4	4.8	9	16	23	30
C , пФ	5.97	6.4	6.83	7.26	7.68	8.1	10.11	15.75	24.38	32.53	40.6
C' , пФ	6.95	7.52	8.1	8.67	9.24	9.81	12.68	21.27	35.58	49.89	64.2
δ_C , %	0.0	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	1.9	3.2	3.2	1.7	0.0
$\delta_{C'}$, %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

З метою аналізу лінійності обох конструкцій було додатково розраховано приведену похибку від нелінійності (δ_C та $\delta_{C'}$). Вона визначалась як максимальне відхилення розрахованої ємності від ідеальної лінійної функції у відсотках від повного діапазону вимірювання. Як видно з таблиці 3, існуюча асиметрична конструкція має похибку нелінійності, яка сягає 3,2 % в середній зоні діапазону. Натомість вдосконалена симетрична конструкція зводить цю похибку до нуля ($\delta_{C'} \approx 0$ %), що математично підтверджує отримання ідеально лінійної характеристики.

Крім того, отримані результати дають змогу визначити зміну абсолютної чутливості датчика. Чутливість визначалась як відношення зміни ємності до зміни вологості ґрунту:

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta \mu}.$$

Для існуючої конструкції цей показник становить у середньому 0.346 пФ/%. Для запропонованої симетричної конструкції чутливість становить 0.573 пФ/%. Таким чином, впровадження додаткового компланарного конденсатора дозволило збільшити абсолютну чутливість чутливого елемента в 1.65 раза (на 65.3 %), що значно розширює динамічний діапазон вимірювального перетворювача.

Відповідно до таблиці 3 побудуємо графіки залежності ємності конденсаторів від вологості ґрунту. Графіки показані на рисунку 7.

Аналіз отриманих графіків (рис. 7) наочно ілюструє суттєве розширення динамічного діапазону вдосконаленого датчика. Значно більший кут нахилу графіка C' (червона лінія) візуально підтверджує розраховане раніше зростання абсолютної чутливості приладу. Крім того, на відміну від графіка існуючого прототипу C , який має приховану нелінійність (прогин) у середній зоні вимірювань, передаточна характеристика запропонованої симетричної конструкції являє собою ідеальну пряму на всьому діапазоні від 0 до 100 % вологості.

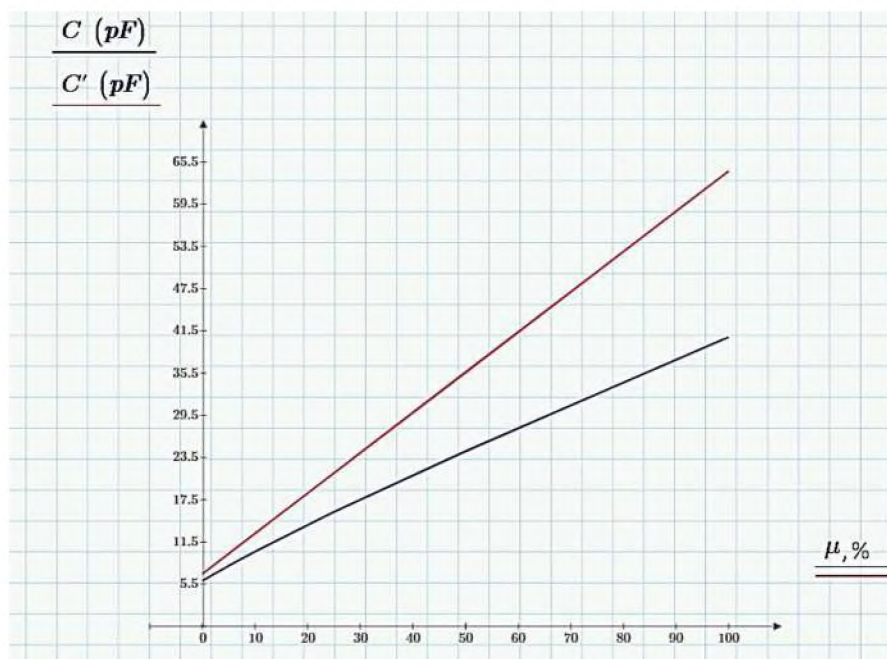


Рис. 7. Графіки залежності ємності конденсаторів від вологості ґрунту

Наукова новизна розробки полягає в удосконаленні конструкції чутливого елемента датчика вологості ґрунту, а також проведенні математичного моделювання його вдосконаленої структури. Завдяки впровадженню симетричної схеми з двох компланарних конденсаторів вдалося досягти підвищення чутливості датчика за рахунок збільшення чутливого об'єму, а також покращення лінійності за рахунок стабільності форми електростатичного поля при мінливій вологості ґрунту.

Висновки

Досліджено існуючу конструкцію чутливого елемента датчика вологості. Моделювання методом МКЕ у програмі Elcut показало, що асиметрія конструкції призводить до несиметричного розподілу електростатичного поля, що є причиною нелінійної вихідної характеристики. Запропоновано удосконалену симетричну конструкцію, що складається з двох компланарних конденсаторів на обох боках діелектричної підкладки. Проведено порівняльне моделювання, яке показало, що запропонована конструкція (C') дозволила збільшити абсолютну чутливість датчика в 1.65 раза (на 65.3 %) та практично повністю усунути нелінійність вихідної характеристики: розрахункова приведена похибка від нелінійності зменшилася з 3.2 % (для існуючої конструкції) до 0.0 % у всьому діапазоні вимірювань (0–100 %).

Список використаної літератури

1. Abdelmoneim A. A., Al Kalaany C. M., Khadra R., Derardja B., Dragonetti G. Calibration of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for Irrigation Management Applications. *Sensors*. 2025. Vol. 25. № 2. P. 343. DOI: 10.3390/s25020343
2. Genovez J. G. F. Enhancing the Accuracy of the Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensor SEN0193 for Internet of Things Applications. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2025. URL: <https://www.scielo.br/j/babt/a/nnMVQvPnkVWGqtwrGbyXRLb/?format=html&lang=en>
3. How Soil Moisture Sensors Work in Home Gardening and Agricultural Irrigation. DFRobot. URL: <https://www.dfrobot.com/blog-17283.html> (дата звернення: 24.03.2026).

4. Ahmad S., Khalid N., Mirzavand R. Detection of Soil Moisture, Humidity, and Liquid Level Using CPW-Based Interdigital Capacitive Sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22. № 11. P. 10338–10345. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3167337
5. Petrashin P., Lancioni W., Castagnola J. A Novel 350 MHz Capacitive Soil Moisture Sensor for Precision Agriculture. *Journal on Advanced Research in Electrical Engineering*. 2025. URL: <https://jaree.its.ac.id/index.php/jaree/article/view/455> (дата звернення: 24.03.2026).
6. Markevicius V., Navikas D., Valinevicius A., Andriukaitis D., Cepenas M. The Soil Moisture Content Determination using Interdigital Sensor. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2012. Vol. 18. № 10. P. 25–28. DOI: 10.5755/j01.eee.18.10.3055
7. Xu Y., He Y., Li X. et al. Novel Spiral and Embracing IDE Capacitive Sensors for In Situ Measurement of Soil Moisture. *Sensors*. 2026. Vol. 26. № 2. P. 541. DOI: 10.3390/s26020541
8. Boriiev V. V., Hodyriev O. P., Donets D. Y. Calculation of the electrostatic field of a capacitive sensor by the combined mesh-free method. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2020. P. 597–600. DOI: 10.1109/ELNANO50318.2020.9259160
9. Komaravolu S., Sastry S.S.R.K.S., Anusha K., Kumari P. P. Measurement of Soil Moisture Content at Microwave Frequencies. 2018 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech). 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/IEMENTech.2018.8703112
10. Capacitive Soil Moisture Sensor V2.0 : Technical Datasheet. Rajguru Electronics. 2021. URL: [https://rajguruelectronics.com/Product/5538/Capacitive%20Soil%20Moisture%20Sensor%20V2\(1\).0.pdf](https://rajguruelectronics.com/Product/5538/Capacitive%20Soil%20Moisture%20Sensor%20V2(1).0.pdf) (дата звернення: 12.11.2025).

References

1. Abdelmoneim, A. A., Al Kalaany, C. M., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). Calibration of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for Irrigation Management Applications. *Sensors*, 25(2), 343. doi: 10.3390/s25020343 [in English].
2. Genovez, J. G. F. (2025). Enhancing the Accuracy of the Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensor SEN0193 for Internet of Things Applications. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. Retrieved from <https://www.scielo.br/j/babt/a/nnMVQvPnkVWGqtwrGbyXRLb/?lang=en> [in English].
3. DFRobot. (n.d.). How Soil Moisture Sensors Work in Home Gardening and Agricultural Irrigation. Retrieved from <https://www.dfrobot.com/blog-17283.html> [in English].
4. Ahmad, S., Khalid, N., & Mirzavand, R. (2022). Detection of Soil Moisture, Humidity, and Liquid Level Using CPW-Based Interdigital Capacitive Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 22(11), 10338–10345. doi: 10.1109/JSEN.2022.3167337 [in English].
5. Petrashin, P., Lancioni, W., & Castagnola, J. (2025). A Novel 350 MHz Capacitive Soil Moisture Sensor for Precision Agriculture. *Journal on Advanced Research in Electrical Engineering*. Retrieved from <https://jaree.its.ac.id/index.php/jaree/article/view/455> [in English].
6. Markevicius, V., Navikas, D., Valinevicius, A., Andriukaitis, D., & Cepenas, M. (2012). The Soil Moisture Content Determination using Interdigital Sensor. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 18(10), 25–28. doi: 10.5755/j01.eee.18.10.3055 [in English].
7. Xu, Y., He, Y., Li, X., Tu, Y., Zhang, K., Liu, Y., & Sun, Y. (2026). Novel Spiral and Embracing IDE Capacitive Sensors for In Situ Measurement of Soil Moisture. *Sensors*, 26(2), 541. doi: 10.3390/s26020541 [in English].
8. Boriiev, V. V., Hodyriev, O. P., & Donets, D. Y. (2020). Calculation of the electrostatic field of a capacitive sensor by the combined mesh-free method. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 597–600. doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9259160 [in English].

9. Komaravolu, S., Sastry, S. S. R. K. S., Anusha, K., & Kumari, P. P. (2018). Measurement of Soil Moisture Content at Microwave Frequencies. 2018 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech), 1–4. doi: 10.1109/IEMENTech.2018.8703112 [in English].
10. Rajguru Electronics. (2021). Capacitive Soil Moisture Sensor V2.0: Technical Datasheet. Retrieved from [https://rajguruelectronics.com/Product/5538/Capacitive%20Soil%20Moisture%20Sensor%20V2\(1\).0.pdf](https://rajguruelectronics.com/Product/5538/Capacitive%20Soil%20Moisture%20Sensor%20V2(1).0.pdf) [in English].

Донченко Євгеній Іванович – к.т.н., старший викладач кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії. E-mail: donchenko.egen@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6941-9019.

Разживін Олексій Валерійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії. E-mail: Oleksii.Razzhyvin@ddma.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1371-2651.

Масик Владислав Володимирович – магістрант кафедри автоматизації виробничих процесів Донбаської державної машинобудівної академії. E-mail: vladmasik37@gmail.com, ORCID: 0009-0004-2444-3014.

Donchenko Yevhenii Ivanovych – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Automation of Production Processes of the Donbas State Engineering Academy. E-mail: donchenko.egen@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6941-9019.

Razzhyvin Oleksii Valeriiovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes of the Donbas State Engineering Academy. E-mail: Oleksii.Razzhyvin@ddma.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1371-2651.

Masyk Vladyslav Volodymyrovych – Master's Student at the Department of Automation of Production Processes of the Donbas State Engineering Academy. E-mail: vladmasik37@gmail.com, ORCID: 0009-0004-2444-3014.



Дата першого надходження статті до видання: 31.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії
відкритого доступу (CC BY 4.0)

ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Технічний редактор

Литвиненко Олена Іванівна
к.т.н., доцент

Верстка

Тетяна Клименко

Дата розміщення онлайн: 01.07.2026. Дата друку: 08.07.2026

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

Друк офсетний. Папір офсетний.

Ум. друк. арк. 53,94. Зам. № 0626/601. Наклад 100 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

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

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК No 7623 від 22.06.2022 р.