

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-23>

УДК 621.396.67:681.518:004.9

СЕМЕНОВ Андрій

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9580-6602>

e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua

КРИСТОФОРОВ Андрій

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0616-667X>

e-mail: andrew199910kr@gmail.com

НАДШИРОКОСМУГОВА ДИСКО-КОНУСНА АНТЕНА ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ 3-7 ГГц ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (IoT)

У статті представлено результати дослідження надширокосмугової диско-конусної антени, спроектованої для роботи в діапазоні частот 3–7 ГГц, який охоплює ключові стандарти сучасних та перспективних бездротових систем зв'язку, орієнтованих на застосування в Інтернеті речей (IoT). Актуальність дослідження зумовлена зростанням кількості інформаційно-вимірювальних приладів IoT, що потребують універсальних антенних рішень з широкою смугою пропускання, стабільним узгодженням та можливістю підтримки декількох стандартів одночасно. У роботі проведено огляд сучасних підходів до проектування широкосмугових антен, зокрема Vivaldi, логоперіодичних та рупорних конструкцій, і показано переваги диско-конусної антени у завданнях IoT: простота конструкції, механічна надійність, всенаправлена діаграма випромінювання та здатність охоплювати широкий спектр частот без складних узгоджувальних схем. Для досягнення поставленої мети було розроблено геометричну модель диско-конусної антени, виконано електродинамічне моделювання із застосуванням сучасного пакету програм (MMANA-GAL basic) та проведено аналіз основних характеристик: коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі (VSWR), коефіцієнта підсилення та діаграми спрямованості. Результати показали, що розроблена антена забезпечує стабільну роботу в діапазоні 3–7 ГГц із рівнем VSWR ≤ 2 , коефіцієнтом підсилення 0–2,5 дБі та практично рівномірною всенаправленою діаграмою випромінювання. Це підтверджує її придатність для використання у пристроях IoT, що функціонують у мережах 5G NR (n77, n78, n79), Wi-Fi 6E, C-V2X та промислових бездротових системах. Практичне значення дослідження полягає у створенні передумов для розробки універсальних інформаційно-вимірювальних приладів, здатних забезпечити сумісність із різними стандартами бездротового зв'язку. Отримані результати можуть бути використані при конструюванні IoT-сенсорів, промислових контролерів, транспортних систем зв'язку та медичних приладів. У перспективі передбачається дослідження можливостей мініатюризації антени, її інтеграції в багатоканальні системи (MIMO) та адаптації до майбутніх технологій шостого покоління (6G).

Ключові слова: антена, частотний діапазон, надширокосмуговий, Інтернет речей (IoT), інформаційно-вимірювальні прилади, коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі (VSWR), діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення.

SEMENOV Andrii, KRYSTOFOROV Andrii

Vinnitsia National Technical University

ULTRA-WIDEBAND DISCONE ANTENNA FOR THE 3-7 GHZ FREQUENCY RANGE FOR INTERNET OF THINGS (IoT) INFORMATION AND MEASURING DEVICES

This paper presents the results of a study on an ultra-wideband discone antenna designed to operate in the 3–7 GHz frequency range, covering the key standards of modern and emerging wireless communication systems oriented towards the Internet of Things (IoT). The relevance of the research is driven by the rapid growth of IoT measurement and monitoring devices, which require universal antenna solutions with a wide operational bandwidth, stable impedance matching, and the ability to support multiple standards simultaneously. The paper provides an overview of current approaches to broadband antenna design, including Vivaldi, log-periodic, and horn structures, and highlights the advantages of the discone antenna for IoT applications: structural simplicity, mechanical robustness, omnidirectional radiation pattern, and the ability to cover a wide spectrum without the need for complex matching circuits. To achieve the stated goal, a geometric model of the discone antenna was developed, electromagnetic simulations were carried out using modern software (MMANA-GAL basic), and the key characteristics were analyzed: voltage standing wave ratio (VSWR), gain, and radiation pattern. The results demonstrated that the proposed antenna provides stable operation in the 3–7 GHz frequency band with VSWR ≤ 2 , gain in the range of 0–2.5 dBi, and an almost uniform omnidirectional radiation pattern. These properties confirm its suitability for IoT devices operating in 5G NR bands (n77, n78, n79), Wi-Fi 6E, C-V2X systems, and industrial wireless networks. The practical significance of this research lies in the development of a foundation for universal IoT measurement instruments capable of ensuring compatibility with multiple wireless communication standards. The obtained results can be applied in the design of IoT sensors, industrial controllers, vehicular communication systems, and medical devices. Future work is planned to focus on antenna miniaturization, integration into multi-channel MIMO systems, and adaptation for next-generation sixth-generation (6G) technologies.

Keywords: antenna, frequency range, ultra-wideband, Internet of Things (IoT), information and measurement devices, voltage standing wave ratio (VSWR), radiation pattern, gain.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.08.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Сучасні інформаційно-вимірювальні прилади Інтернету речей (IoT) функціонують у різноманітних бездротових мережах, що охоплюють діапазон частот від кількох сотень мегагерц до декількох гігагерц [1]. Особливе значення має піддіапазон 3–7 ГГц, у якому зосереджені ключові стандарти бездротового зв'язку: 5G NR (n77, n78, n79), Wi-Fi 6E, C-V2X, а також промислові бездротові системи управління та моніторингу [2]. Для забезпечення сумісності з цими технологіями IoT-прилади повинні використовувати антени, здатні працювати у широкій смузі частот і гарантувати стабільність основних параметрів [3].

Наявні антени для IoT-пристроїв часто є вузькосмуговими або оптимізованими для конкретного стандарту (наприклад, тільки для Wi-Fi чи 5G) [2]. Це знижує їхню універсальність, ускладнює інтеграцію в багатовимірні системи та обмежує масштабованість приладів. Використання багатьох антен у складі одного пристрою призводить до збільшення габаритів, вартості та споживання енергії [3].

Тому виникла актуальна науково-прикладна задача розроблення надширокосмугової антени для діапазону 3–7 ГГц, яка б забезпечувала:

- стабільне узгодження у широкій смузі частот (по рівню $VSWR \leq 2:1$),
- всенаправлену діаграму випромінювання, придатну для мобільних і стаціонарних IoT-приладів,
- просту і надійну конструкцію, придатну для масового впровадження,
- універсальність застосування в інформаційно-вимірювальних системах різного призначення.

Одним із перспективних рішень цієї науково-прикладної задачі є використання диско-конусної антени, яка природним чином забезпечує надширокосмугову роботу, механічну надійність та можливість масштабування під необхідні частотні діапазони.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Останні п'ять років демонструють стійкий інтерес до надширокосмугових (UWB) та суб-6/7 ГГц антен для 5G/IoT, із фокусом на компактності, всенаправленості, стабільних діаграмах випромінювання та можливості інтеграції у багатовимірні пристрої [4]. Серед конструкцій, що безпосередньо стосуються теми дослідження, виділяються диско-конусні антени (disccone) які є апіорі надширокосмугові рішення. У роботі [4] показано методи стабілізації кутових характеристик (зокрема за рахунок «фукавів»/sleeves) без збільшення габаритів, що важливо для засобів IoT у частотній смузі до 7 ГГц.

На сьогоднішній день паралельно активно розвиваються гнучкі та малогабаритні суб-6 ГГц антени для 5G/IoT і переносних систем. Систематизовано матеріали, топології та обмеження (SAR, ізоляція, узгодження). У роботі [5] продемонстровано практичні багатопортові реалізації гнучких MIMO-антен у діапазоні 3,3 – 6,0 ГГц з експериментальною верифікацією.

Для сценаріїв, де потрібне кероване або підвищене спрямування, активно досліджуються масиви антен і керовані антенні решітки у суб-6 ГГц, включно з двосмуговими рішеннями та інтегрованими модулями «sub-6 + мм-хвилі» [6, 7]. Хоч запропоновані в роботах [6, 7] антени менш всенаправлені, вони задають референтні метрики підсилення/ефективності й сумісності з 5G NR (n77/n78/n79) та Wi-Fi 6E, які корисні для проєктованих антен в IoT-вимірювальних приладах.

З позицій надширокосмугових багатоканальних платформ, останні публікації видавництва PIER (Progress In Electromagnetics Research) за 2025 рік, наприклад [8], описують MIMO-UWB антени, що перекривають n77/n78/n79 та 6-гігагерцовий діапазон, забезпечуючи високу фракційну смугу та узгодження. Результати досліджень роботи [8] підтверджують технічну здійсненність єдиної антенної підсистеми для кількох стандартів у діапазоні 3,0–7,5 ГГц. Також у роботі [8] додатково описані низькопрофільні та всенаправлені UWB-топології, придатні для носимих/компактних пристроїв, що важливо для вимірювальних IoT-модулів інформаційно-вимірювальних приладів.

У роботі [9] наведені результати огляду вибору антени Вівальді для радіолокаційних застосувань. Отримані в роботі [9] результати є також корисними для бенчмаркінгу широкосмугових спрямованих структур. Вони допомагають співставити компроміси «широкосмуговість ↔ підсилення ↔ габарити ↔ ефективність випромінювання» для порівняння різних антенних рішень.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є розроблення нової конструкції надширокосмугової диско-конусної антени, дослідження параметрів та оптимізація геометричних розмірів за критерієм значення коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі (VSWR) не більше 2:1 при узгодженні на фідер з хвильовим опором 50 Ом, здатної ефективно працювати в діапазоні частот 3,0–7,0 ГГц та придатної для інтеграції в інформаційно-вимірювальні прилади Інтернету речей (IoT).

Завдання досліджень:

- Отримати результати порівняльного аналізу сучасних антенних рішень для IoT-пристроїв, що працюють у діапазоні 3,0–7,0 ГГц.
- Розробити геометричну модель диско-конусної антени з урахуванням вимог до надширокосмугового режиму роботи.
- Здійснити комп'ютерне моделювання частотних характеристик (коефіцієнта стоячої хвилі, діаграми спрямованості, підсилення, поляризації) у пакеті програм MMANA-GAL basic.
- Виконати оптимізацію конструкції диско-конусної антени для забезпечення стабільного узгодження по рівню $VSWR \leq 2:1$ у всьому діапазоні робочих частот 3,0–7,0 ГГц.
- Здійснити експериментальну верифікацію моделі (виготовити експериментальний зразок диско-конусної антени та виміряти її параметри в лабораторних умовах).

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У таблиці 1 наведені результати порівняльного аналізу параметрів і характеристик широкосмугових антен діапазону частот 3,0-7,0 ГГц, які отримали автори при опрацюванні робіт [1-11].

Таблиця 1.

Результати порівняльного аналізу широкосмугових антен діапазону частот 3,0-7,0 ГГц

Тип антени Параметр	Диско-конусна	Рупорна	Вівальді	Логоперіодична	Фрактальна
Смуга частот	Дуже широка (до 10:1)	Широка (~3:1)	Дуже широка (~5:1)	Широка (~4:1)	Широка (залежить від фракталу)
Підсилення	Низьке (0–2 дБі)	Високе (10–20 дБі)	Середнє (6–10 дБі)	Середнє (6–10 дБі)	Низьке/Середнє (2–7 дБі)
Спрямованість	Всеспрямована	Вузкоспрямована	Вузкоспрямована	Середня спрямованість	Залежить від конструкції
Розміри (для 3 ГГц)	Великі (~0.35 м)	Великі (~0.2–0.5 м)	Середні	Великі (~0.45 м)	Компактні
Поляризація	Вертикальна	Лінійна	Лінійна	Лінійна	Може бути різною
Тип випромінювання	Передача/прийм	Передача/прийм	Передача/прийм	Передача/прийм	Здебільшого прийм
Застосування	Моніторинг, РЕБ, тестування	Радар, 5G, випробування	РЕБ, 5G, медичні пристрої	Радіозв'язок, РЕБ	Сучасні малогабаритні пристрої
Вартість	Помірна	Висока	Помірна	Помірна	Низька/помірна
Складність реалізації	Низька	Середня	Середня	Середня	Висока (у проектуванні)

Як видно з таблиці 1 диско-конусна антена є однією з найбільш широкосмугових антен - вона може покривати спектр у співвідношенні 10:1 (або навіть більше). Діапазон 3,0–7,0 ГГц може бути лише частиною ширшого спектра, в якому вона здатна функціонувати. У горизонтальній площині диско-конусна антена випромінює рівномірно в усіх напрямках (360°), що робить її корисною для моніторингових та приймальних застосувань. Диско-конусна антена отримала практичне застосування для систем Інтернету речей в діапазоні частот 4G LTE Band 3 [12]. У той же час через всенаправлену характеристику диско-конусна антена має низький коефіцієнт підсилення (~0–2 дБі), що робить її менш ефективною для передачі на великі відстані. Також потрібно зазначити, що для нижніх частот робочого діапазону (3,0 ГГц) антена може мати доволі великі розміри, що може ускладнити її використання в компактних системах [12].

Загальний вигляд конструкції диско-конусної антени поданий на рис. 1 [13, с. 512-513]. На сьогоднішній день відомо достатню кількість онлайн калькуляторів для розрахунку геометричних розмірів диско-конусної антени на задану робочу частоту при її узгодженні на хвильовий опір 50 Ом. Для розрахунку геометричних розмірів диско-конусної антени автори скористалися онлайн-калькулятором [14]. У результаті розрахунку автори отримали такі геометричні розміри конструкції диско-конусної антени: діаметр диску 23,1 мм, зазор між диском і конусом 0,48 мм, діаметр нижньої основи конуса 33,6 мм, діаметр верхнього отвору конуса 1,6 мм, висота від основи конуса до диску 28,2 мм, довжина бічної грані конусу 32,0 мм.

Згідно з методикою [13, с. 512-513] автори здійснили симуляцію дрової моделі диско-конусної антени в пакеті програм MMANA-GAL basic (рис. 2). На рис. 3 показані результати комп'ютерного моделювання діаграми спрямованості дрової моделі диско-конусної антени на крайніх частотах – 3,0 ГГц і 7,0 ГГц. Як видно з рис. 3 коефіцієнт підсилення запропонованої антени не більше 0,54 дБі, що уможливило сформувати її всеспрямовану діаграму випромінювання в горизонтальній площині. Другою перевагою запропонованої авторами конструкції диско-конусної антени є чисельне значення VSWR на рівні 1,26 на крайніх частотах робочого діапазону. Як на характерний недолік форми поверхні просторової діаграми випромінювання диско-конусної антени потрібно вказати на наявний кут підняття вгору напрямку

випромінювання. Цей кут дещо залежить від відношення діаметра диска до висоти конуса та від робочої частоти. Також наявна нерівномірність розподілу випромінювання на різних частотах (зсув максимумів та поява бічних пелюсток).

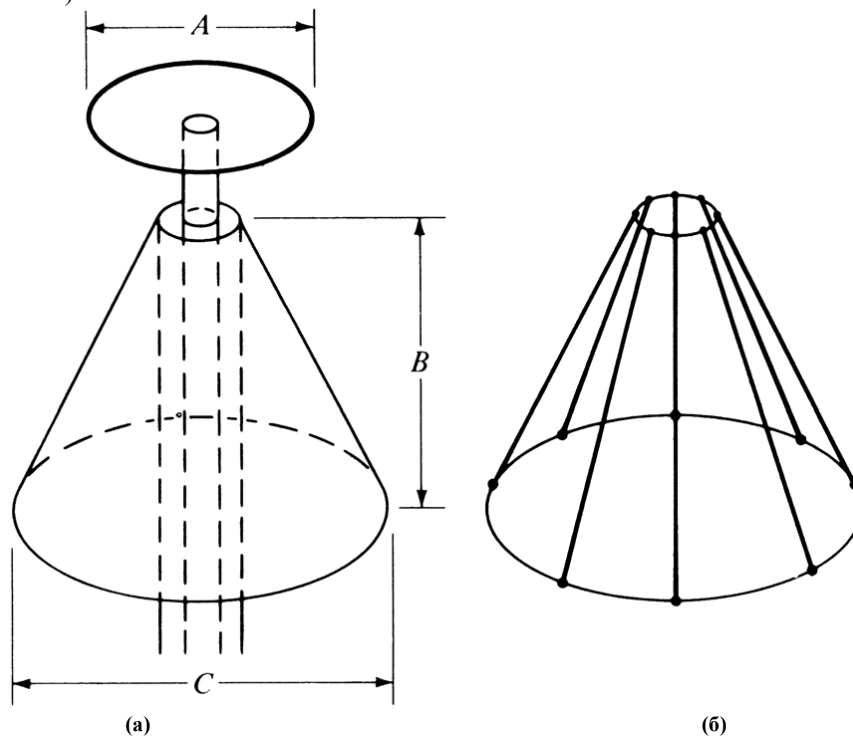


Рис. 1. Конструкція диско-конусної антени та її основні геометричні розміри (а), дротова модель диско-конусної антени для симуляції (б) [13, с. 512-513]

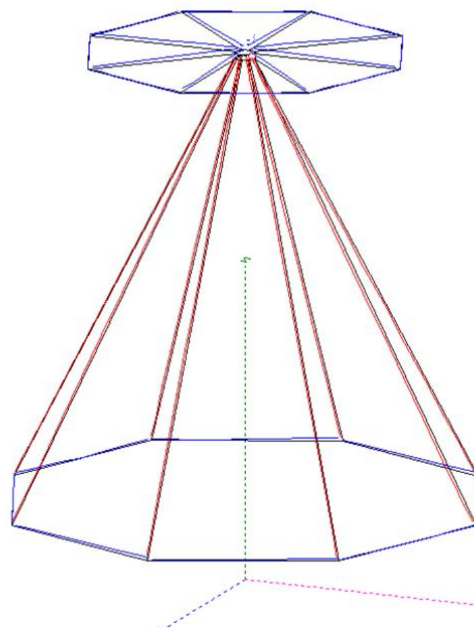


Рис. 2. Дротова модель диско-конусної антени для її симуляції в пакеті програм MMANA-GAL basic

Автори виготовили експериментальний зразок диско-конусної антени з мідного листа (рис. 4,а-б). Матеріал діелектричної вставки між конусом і диском – фторопласт. Як фідер антени автори використали коаксіальний кабель RG405 з радіочастотним конектором стандарту SMA. Коаксіальний кабель RG405 має широке використання в медичних діагностичних приладах і засобах інформаційно-вимірювальних систем у робочій смузі частот 50 МГц – 18 ГГц. Основні електричні параметри коаксіального кабелю RG405 такі: хвильовий опір 50 Ом, погонна ємність не більше 95.1 пФ/м. Його погонне затухання в робочій смузі частот 3,0 – 7,0 ГГц знаходиться в межах 135.0дБ/100м - 200.0дБ/100м.

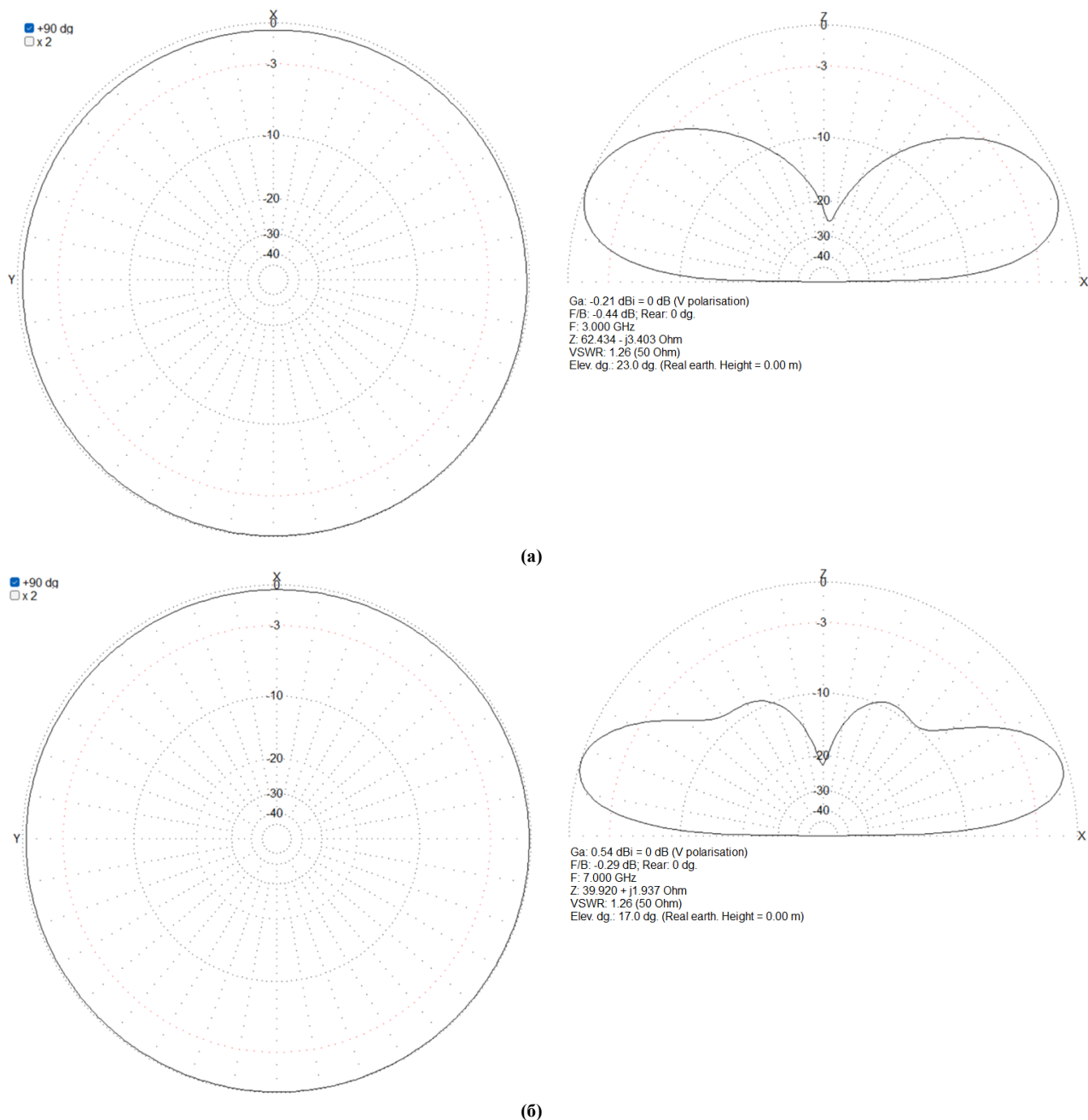
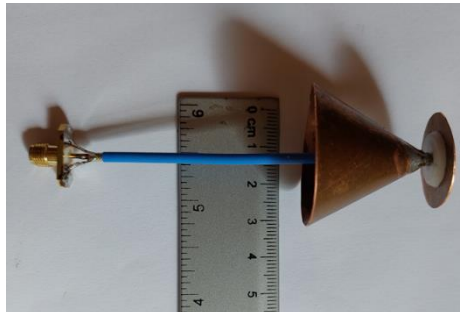


Рис. 3. Результати комп'ютерного моделювання діаграми спрямованості дрової моделі диско-конусної антени в пакеті програм MMANA-GAL basic на частоті 3,0 ГГц (а) і 7,0 ГГц (б)

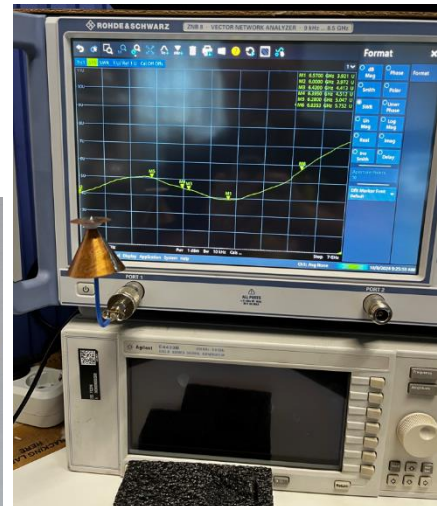
Результати експериментальних досліджень неоптимізованої конструкції диско-конусної антени наведені на рис. 5. З рис. 5 видно, що діаграма Смітта і частотна характеристика VSWR (крива вгорі над діаграмою Смітта) демонструють погане узгодження експериментального зразка диско-конусної антени на хвильовий опір 50 Ом у діапазоні частот вище 5,0 ГГц [15, 16]. На рис. 5 маркерами 2 і 3 позначені характерні точки графіку на частотах 5,26 ГГц ($VSWR = 4,075$) і 6,197 ГГц ($VSWR = 2,709$) відповідно. Автори встановили, що на якість узгодження диско-конусної антени на хвильовий опір коаксіального кабелю 50 Ом значний вплив здійснює величина діаметра верхнього отвору конуса та товщина фторопластової вставки між конусом і диском. Також для зменшення значення VSWR автори використали інший коаксіальний кабель типу RG-142, який має меншу величину погонного затухання в межах 79.3дБ/100м - 119.5дБ/100м в робочій смузі частот 3,0 – 7,0 ГГц. При цьому коаксіальний кабель RG-142 має більший діаметр і меншу гнучкість за рахунок чого не має потреби робити додаткове кріплення для встановлення антени (рис. 4,в).



(а)



(б)



(в)

Рис. 4. Фото експериментального зразка диско-конусної антени (а)-(б) та її підключення до інформаційно-вимірювального приладу (в)

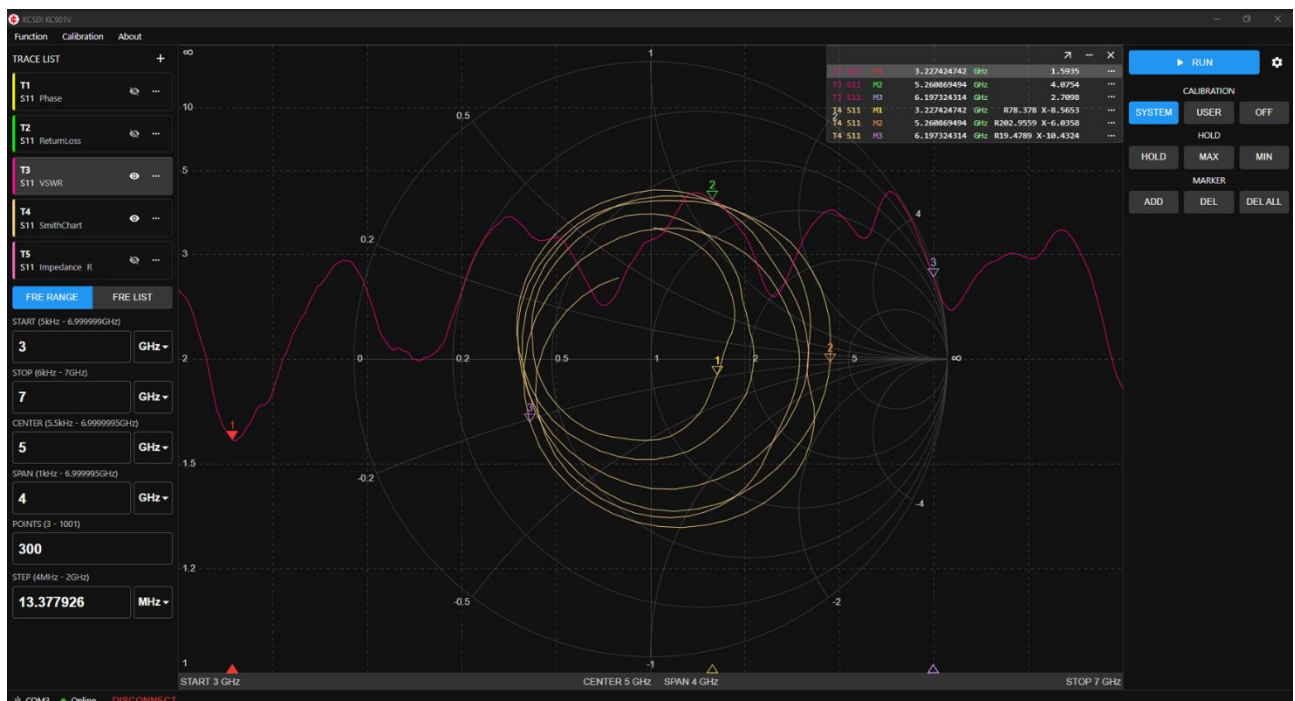


Рис. 5. Графік VSWR і діаграма Смітта неоптимізованої конструкції диско-конусної антени

Результати експериментальних досліджень оптимізованої конструкції диско-конусної антени наведені на рис. 6. У верхній частині графіку рис. 6 показана крива хвильового опору антени, а в нижній частині – крива частотної залежності VSWR. Як видно з рис. 6 діаграма Смітта і частотна характеристика VSWR демонструють якісне узгодження оптимізованої геометрії експериментального зразка диско-конусної антени на хвильовий опір 50 Ом у робочому діапазоні частот [15, 16]. Маркером 2 на рис. 6 позначена максимум на графіку VSWR на частоті 5,555 ГГц, на якій VSWR = 2,1 (точне значення 2,0897). В усіх інших частинах робочого діапазону частот крива графіка VSWR знаходиться набагато нижче рівня маркера 2. Це є відмінним результатом надширокосмугового узгодження хвильового опору антени без застосування додаткових узгоджувальних засобів (електронних схем або мікрохвильових конструкцій) [15, 16].

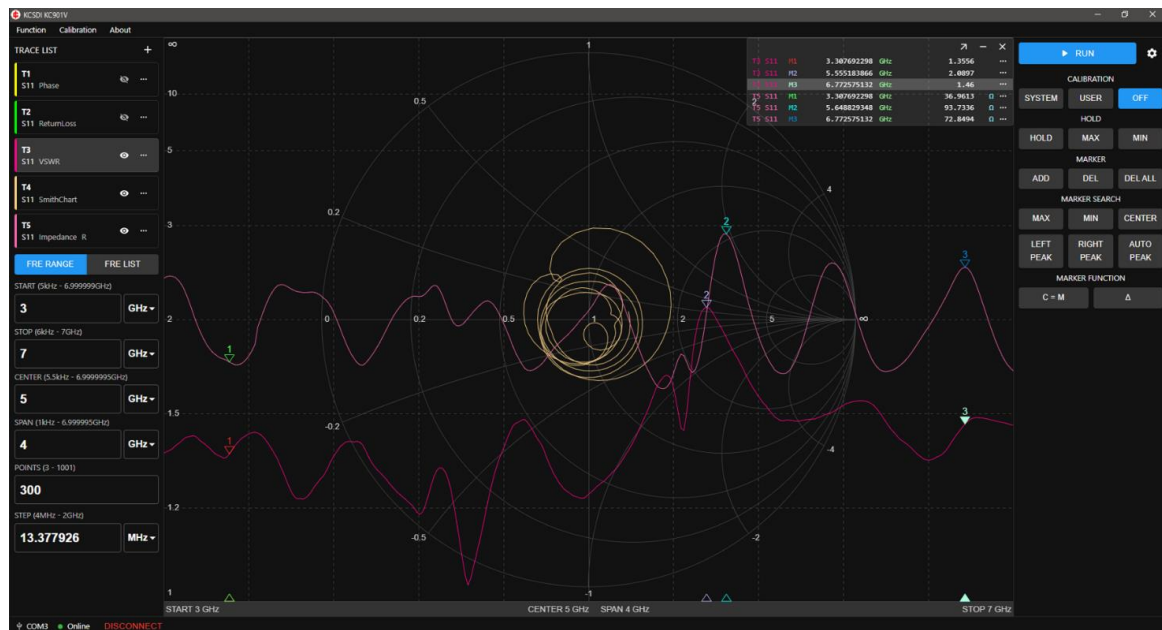


Рис. 6. Графік VSWR і діаграма Смітта оптимізованої конструкції диско-конусної антени по рівню VSWR 2:1

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Для IoT інформаційно-вимірювальних приладів, що працюють у діапазоні 3,0–7,0 ГГц, оптимальним компромісом між всенаправленістю, широкосмуговістю та простотою конструкції є диско-конусна антена. У роботі розглянуто та досліджено надширокосмугову диско-конусну антену, призначену для роботи у діапазоні частот 3,0–7,0 ГГц, що охоплює основні сучасні бездротові технології, орієнтовані на застосування в Інтернеті речей (IoT).

В результаті проведених досліджень авторами отримані такі основні результати:

1) показано актуальність використання широкосмугових антен у сучасних IoT-системах, зокрема для інформаційно-вимірювальних приладів, які потребують стабільного прийому і передавання даних у багатьох частотних діапазонах;

2) обґрунтовано переваги диско-конусної антени порівняно з іншими широкосмуговими рішеннями антен (Vivaldi, логоперіодичними, рупорними) для задач IoT: простота конструкції, механічна надійність, простота узгодження в широкій смузі частот, можливість масштабування та універсальність;

3) розроблено геометричну модель диско-конусної антени, що забезпечує роботу в широкій смузі частот від 3,0 до 7,0 ГГц при коефіцієнті стоячої хвилі (VSWR) не вище 2:1;

4) отримано результати моделювання, які підтверджують стабільність параметрів узгодження, всенаправлену діаграму випромінювання та коефіцієнт підсилення на рівні 0–2,5 дБі у всьому робочому діапазоні частот;

5) здійснено оптимізацію геометричних розмірів диско-конусної антени, виготовлено її експериментальний зразок і отримані результати експериментальних досліджень.

Таким чином, отримані результати дослідження підтверджують, що надширокосмугова диско-конусна антена є ефективним і доцільним рішенням для використання в інформаційно-вимірювальних IoT-приладах, здатним забезпечити їхню сумісність з сучасними та перспективними мережами зв'язку. Тому перспективним напрямом є інтеграція запропонованої антени у багатостандартні IoT-пристрої для промисловості, транспорту, енергетики, медицини та побутових застосувань. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на мініатюризацію конструкції, інтеграцію з багатоканальними системами (MIMO) та адаптацію для 6G-технологій.

Література

1. Abhilash, A. P., Indhu, K. K., Anil Kumar, R., Neema, K., & Aanandan, C. K. (2022). Ultra-wideband Quad Element MIMO Antenna on a Flexible Substrate for 5G and Wearable Applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 126, 143–155. <https://doi.org/10.2528/PIERC2090602>
2. Kumar, S., Dixit, A. S., Malekar, R. R., Raut, H. D., & Shevada, L. K. (2020). Fifth Generation Antennas: A Comprehensive Review of Design and Performance Enhancement Techniques. *IEEE Access*, 8, 163568–163593. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3020952>

3. Semenov, A., Semenova, O., Pinaiev, B., Kulias, R., & Shpylovyi, O. (2022). Development of a flexible antenna-wristband for wearable wrist-worn infocommunication devices of the LTE standard. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(1(65)), 20–26. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.261718>
4. Li, G., Zhang, F., & Wang, B. (2024). Compact VHF/UHF Ultrawideband Discone Antenna with Consistent Pattern. *Sensors*, 24(18), 6147. <https://doi.org/10.3390/s24186147>
5. John, D. M., Vincent, S., Pathan, S., Kumar, P., & Ali, T. (2022). Flexible Antennas for a Sub-6 GHz 5G Band: A Comprehensive Review. *Sensors*, 22(19), 7615. <https://doi.org/10.3390/s22197615>
6. Siddiqui, S. I., Bashir, S., Khan, A., Ghafoor, S., & Aziz, I. (2024). A dual-band high-gain beam steering antenna array for 5G sub-6 GHz base station. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75822-2>
7. Shamoon, S., Zhou, W. Y., Shahzad, F., Ali, W., & Subbyal, H. (2023). Integrated sub-6 GHz and millimeter wave band antenna array modules for 5G smartphone applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 161, 154542. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154542>
8. Yao, S., Qiu, X., & Yang, T. (2025). A Miniaturized UWB MIMO Antenna Design for 5G Multi-band Applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 153, 1–12. <https://doi.org/10.2528/pierc24123001>
9. Amador, M., Rouco, A., Albuquerque, D., & Pinho, P. (2024). Overview of Vivaldi Antenna Selection for Through-Wall Radar Applications. *Sensors*, 24(20), 6536. <https://doi.org/10.3390/s24206536>
10. Semenov, A., Semenova, O., Pinaiev, B., Kozin, D., & Shpylovyi, O. (2022). Study of the radiation pattern of a rectangular horn antenna in the operation of multimode propagation of electromagnetic waves. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2(64)), 50–55. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256560>
11. Semenov, A., Semenova, O., Kryvinska, N., Krystoforov, A., Kurovskiy, P., & Kaplychnyi, O. (2023). Development of a microwave resonant waveguide slot antenna with in-phase slot excitation. *Technology Audit and Production Reserves*, 1(2(69)), 36–43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.274990>
12. Belen, A., Ördek, S., Partal, H.P. Design and development of a high gain discone antenna for 4G LTE applications (2019). *Sigma J Eng & Nat Sci*, 37 (4), 1087-1096.
13. Balanis, C. (2016). Antenna theory. Analysis and design. 4-th edition. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA. 1095 p.
14. Discone antenna online calculator. URL: <https://3g-aerial.biz/en/online-calculations/antenna-calculations/discone-antenna-online-calculator>
15. Semenov, A., Semenova, O., & Meulesteen, S. (2022). Flexible Antenna for Cellular IoT Device. In *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, pp. 293–298. <https://doi.org/10.1109/ukrmw58013.2022.10037036>
16. Semenova, O., Semenov, A., Meulesteen, S., Kryvinska, N., & Pastushenko, H. (2024). Intelligent matching technique for flexible antennas. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 14(4), 16–22. <https://doi.org/10.35784/iapgos.6500>

References

1. Abhilash, A. P., Indhu, K. K., Anil Kumar, R., Neema, K., & Aanandan, C. K. (2022). Ultra-wideband Quad Element MIMO Antenna on a Flexible Substrate for 5G and Wearable Applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 126, 143–155. <https://doi.org/10.2528/pierc22090602>
2. Kumar, S., Dixit, A. S., Malekar, R. R., Raut, H. D., & Shevada, L. K. (2020). Fifth Generation Antennas: A Comprehensive Review of Design and Performance Enhancement Techniques. *IEEE Access*, 8, 163568–163593. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3020952>
3. Semenov, A., Semenova, O., Pinaiev, B., Kulias, R., & Shpylovyi, O. (2022). Development of a flexible antenna-wristband for wearable wrist-worn infocommunication devices of the LTE standard. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(1(65)), 20–26. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.261718>
4. Li, G., Zhang, F., & Wang, B. (2024). Compact VHF/UHF Ultrawideband Discone Antenna with Consistent Pattern. *Sensors*, 24(18), 6147. <https://doi.org/10.3390/s24186147>
5. John, D. M., Vincent, S., Pathan, S., Kumar, P., & Ali, T. (2022). Flexible Antennas for a Sub-6 GHz 5G Band: A Comprehensive Review. *Sensors*, 22(19), 7615. <https://doi.org/10.3390/s22197615>
6. Siddiqui, S. I., Bashir, S., Khan, A., Ghafoor, S., & Aziz, I. (2024). A dual-band high-gain beam steering antenna array for 5G sub-6 GHz base station. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75822-2>
7. Shamoon, S., Zhou, W. Y., Shahzad, F., Ali, W., & Subbyal, H. (2023). Integrated sub-6 GHz and millimeter wave band antenna array modules for 5G smartphone applications. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 161, 154542. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2023.154542>
8. Yao, S., Qiu, X., & Yang, T. (2025). A Miniaturized UWB MIMO Antenna Design for 5G Multi-band Applications. *Progress In Electromagnetics Research C*, 153, 1–12. <https://doi.org/10.2528/pierc24123001>
9. Amador, M., Rouco, A., Albuquerque, D., & Pinho, P. (2024). Overview of Vivaldi Antenna Selection for Through-Wall Radar Applications. *Sensors*, 24(20), 6536. <https://doi.org/10.3390/s24206536>
10. Semenov, A., Semenova, O., Pinaiev, B., Kozin, D., & Shpylovyi, O. (2022). Study of the radiation pattern of a rectangular horn antenna in the operation of multimode propagation of electromagnetic waves. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2(64)), 50–55. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256560>
11. Semenov, A., Semenova, O., Kryvinska, N., Krystoforov, A., Kurovskiy, P., & Kaplychnyi, O. (2023). Development of a microwave resonant waveguide slot antenna with in-phase slot excitation. *Technology Audit and Production Reserves*, 1(2(69)), 36–43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.274990>
12. Belen, A., Ördek, S., Partal, H.P. Design and development of a high gain discone antenna for 4G LTE applications (2019). *Sigma J Eng & Nat Sci*, 37 (4), 1087-1096.
13. Balanis, C. (2016). Antenna theory. Analysis and design. 4-th edition. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA. 1095 p.
14. Discone antenna online calculator. URL: <https://3g-aerial.biz/en/online-calculations/antenna-calculations/discone-antenna-online-calculator>
15. Semenov, A., Semenova, O., & Meulesteen, S. (2022). Flexible Antenna for Cellular IoT Device. In *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, pp. 293–298. <https://doi.org/10.1109/ukrmw58013.2022.10037036>
16. Semenova, O., Semenov, A., Meulesteen, S., Kryvinska, N., & Pastushenko, H. (2024). Intelligent matching technique for flexible antennas. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 14(4), 16–22. <https://doi.org/10.35784/iapgos.6500>