

Семенов А.О.

Вінницький національний технічний університет

Семенова О.О.

Вінницький національний технічний університет

Пінаєв Б.О.

Вінницький національний технічний університет

Куляс Р.О.

Вінницький національний технічний університет

Шпильовий О.О.

Вінницький національний технічний університет

ГНУЧКА ДВОХСМУГОВА LTE АНТЕНА ДЛЯ РАДІОЧАСТОТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОСТУПУ НОСИМИХ ПРИСТРОЇВ БЕЗДРОТОВИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ І СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Сучасні інформаційні технології медичної інженерії стрімко розвиваються. Застосування Інтернету речей та медичних сенсорних мереж, зокрема WBAN (Wireless Body Area Networks), потребує створення нових інфокомунікаційних пристроїв для медичних додатків. Сучасні носимі на руці інфокомунікаційні пристрої в основному є фітнес браслетами та розумними годинниками які є додатками до смартфонів і використовують для обміну інформації WiFi або Bluetooth. На сьогоднішній день виникла актуальна науково-практична задача створення нових носимих інфокомунікаційних пристроїв для застосування в телемедицині. Дана задача є міждисциплінарною. Для її вирішення потрібні знання з інфокомунікаційних і радіо-частотних технологій, а також біомедичної інженерії. Антени є надзвичайно важливим компонентом пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних мереж. Від якості узгодження параметрів антени в робочому діапазоні частот залежить рівень інформаційних сигналів і енергоефективність інфокомунікаційних пристроїв. Сучасним напрямком приладобудування є створення гнучких антен. Ринок гнучкої електроніки стрімко розширюється. У роботі запропонована нова конструкція гнучкої двохсмугової антени для використання в носимих на руці інфокомунікаційних пристроях. Запропонована гнучка антена є двосторонньою і має габаритні розміри $39,7 \times 12,0$ мм. Верхня сторона є випромінювальною поверхнею і має геометричні розміри $27,5 \times 11,0$ мм із мікросмужковою лінією живлення довжиною 12,2 мм і шириною 1,9 мм. Нижня сторона є екранувальною поверхнею і має геометричні розміри $12,2 \times 12,0$ мм із вирізаною частиною розмірами $3,5 \times 6,5$ мм для встановлення гнучкої антени на друковану плату. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при носінні на руці діапазон робочих частот гнучкої антени по рівню KCSX не більше 2,1 знаходиться в межах $881,68$ МГц – $975,38$ МГц та $1848,65$ МГц – 2000 МГц. Це дозволяє використати запропоновану гнучку антену в діапазонах частот LTE B2 і B8.

Ключові слова: гнучка антена, бездротових, LTE, носимий пристрій, інфокомунікаційна система, телемедицина.

Постановка проблеми

Розвинення інфокомунікаційних мереж 5G із високою швидкістю обміну даних, великою пропускну здатністю та малою затримкою зумовило стрімкий розвиток Інтернету речей (IoT) і сенсорних мереж для широкого кола медичних і немедичних застосувань [1–2]. Сучасні носимі

інфокомунікаційні пристрої, що серійно виготовляються промисловістю, в переважній більшості не є медичними приладами, а є фітнес-браслетами та розумними годинниками [3–4]. Вони мають бездротове з'єднання за допомогою WiFi або Bluetooth зі смартфоном, за допомогою яких здійснюється обмін інформацією. Це обмежує

область їхнього медичного або лікувального застосування, а також для післяопераційного відновлення [1–2]. Сучасні інформаційні технології медичної інженерії стрімко розвиваються. Застосування Інтернету речей та медичних сенсорних мереж, наприклад WBAN (Wireless Body Area Networks), спонукає створення нових інфокомунікаційних пристроїв для медичних додатків.

Антени є надзвичайно важливим компонентом пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних системах [1–5]. Антени в таких системах можуть використовуватися як компонент зв'язку або отримувач енергії [4]. Складний дизайн конструкцій сучасних інфокомунікаційних пристроїв часто вимагають, щоб антени були встановлені на вигнутих і конформних поверхнях [4–5]. При проектуванні носимих інфокомунікаційних пристроїв для медичних застосувань перед розробниками постає низка радіо-конструкторських задач, головною з яких є забезпечення електромагнітної сумісності блоків всередині малого за розмірами корпусу. Задача електромагнітної сумісності блоків носимих інфокомунікаційних пристроїв ускладнюється тим, що в одному корпусі потрібно розташувати від двох до чотирьох антен: 1) LTE/NB-IoT; 2) WiFi; 3) Bluetooth; 4) антену для дистанційного електроживлення (заряджання акумулятора).

Тому розроблення та дослідження нових типів антен для носимих інфокомунікаційних пристроїв є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останні 3–5 років було опубліковано велику кількість друківаних праць із результатами розроблення та дослідження дизайну антен для радіочастотних технологій доступу носимих пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних мереж. Це зумовлено тим, що ринок носимих медичних інфокомунікаційних пристроїв стрімко розширюється завдяки значному попиту, що зумовлений глобальними карантинними обмеженнями спричиненими поширеннями хвороби COVID-19. Тому більшість світових і європейських фірм-розробників здійснюють інтенсивні розроблення і дослідження в галузі інфокомунікаційної та радіо-частотної медичної інженерії, через колосальний попит на діагностику небезпечних для життя захворювань.

Сучасним напрямом функціональної електроніки є розроблення гнучких антен [1–7]. Гнучкі антени отримали широке застосування для створення носимих медичних інфокомунікаційних пристроїв [1–7].

У роботі [1] наведено детальний огляд останніх досягнень у методах виготовлення гнучких антен. Гнучкі антени, що використовуються для будь-яких застосувань у мережах бездротових датчиків тіла, на відміну від звичайних чіп-антен або РСВ-антен мають такі особливості: гнучкість, пристосованість, надійність та простоту інтеграції. У роботі [1] представлена експлуатаційна перспектива таких передових підходів як вишиті на тканинах гнучкі антени, інкапсульовані в полімерні композити антени, надруковані за допомогою струменевого друку антени на гнучких ламінатах та тривимірному принтері, а також гнучкі антени, що виготовлені шляхом впорскування рідкого металу в мікроканали. Наведено результати аналізу, переваги та недоліки кожного типу гнучких антен у мікрохвильовому та міліметровому діапазонах хвиль. Також наведено порівняння основних механічних і електричних параметрів гнучких антен для їхнього практичного застосування в медичних датчиках.

У роботі [2] описані дослідження технології антен для медичних імплантатів. У статті [2] узагальнено деякі існуючі методи проектування медичних імплантованих антен та висвітлено різновиди гнучких антен відповідно до медичних телеметричних додатків. Детально розглянуто процес виготовлення антен, описані процедури перевірки антен, включаючи випробування в пробірці та в природньому середовищі. Також у роботі [2] коротко описані системи живлення для антен медичних імплантатів.

У роботі [3] проведено повний аналіз впливу вигину та складання гнучких антен на частотні характеристики їхнього випромінювання, такі як S-параметри, відхилення резонансної частоти та неузгодженість імпедансу з лінією живлення мікросмужкових антен і з гнучкою полімерною підкладкою. Акцент досліджень у роботі [3] спрямований на аналіз впливу вигину на характеристики випромінювання гнучких антен, у яких використовуються полімерні підкладки. Крім того, у роботі [3] наведено результати детального порівняльного аналізу фізичних, електричних, термічних і хімічних властивостей гнучких полімерних матеріалів, які використовувалися як підкладки для створення гнучких антен носимих пристроїв IoT.

У роботі [4] розроблена та досліджена гнучка мікросмужкова антена з геометричними розмірами $65,55 \times 55,55 \times 1,2$ мм, що надрукована на 3D-принтері на гнучкій підкладці NinjaFlex. Наведені результати досліджень показують, що

така гнучка антена забезпечує дуже хороше узгодження імпедансу на резонансній частоті 2,4 ГГц і максимальне підсилення антени $-2,78$ дБі, що робить її придатною для таких додатків, як Wi-Fi, WiMAX та мікрохвильовий супутниковий зв'язок.

У роботі [6] представлено три різні конструкції антени для смарт-годинника. Застосовано інтегрування гнучких антен у ремінець годинника. Пропоновані у роботі [6] антени мають діапазон робочих частот від 700 МГц до 2,7 ГГц. У роботі [7] пропонується надширокосмугова гнучка антена-ремінець для пристроїв, які носять на зап'ясті. Гнучка антена побудована на тонкому гнучкому матеріалі з каптону, який легко адаптується до форми зап'ястя. Розроблена в [7] гнучка антена-ремінець працює у всіх європейських та американських діапазонах частот LTE із загальною смугою пропускання від 698 МГц до 2700 МГц при рівні 26 дБ зворотних втрат. Розмір гнучкої антени становить $127 \times 25 \times 0,13$ мм, вона працює в діапазонах LTE 698–960 МГц, 1710–2170 МГц та 2500–2700 МГц, маючи 78% корисної смуги пропускання нижче 26 дБ зворотних втрат при встановленні на руку людини. Така гнучка антена придатна для виготовлення з використанням гібридної технології друкованих плат з електронними схемами, встановленими на верхній жорсткій секції та асиметричної конічної конструкції антени в гнучких секціях.

Основним недоліком розглянутих гнучких антен є їхні значні геометричні розміри внаслідок чого не зручно вирішувати завдання розроблення дизайну та радіо-конструкторського проектування носимих на руці інфокомунікаційних пристроїв.

Постановка завдання

Метою роботи є розроблення та дослідження гнучкої антени LTE зі зменшеними геометричними розмірами для застосування в носимих на руці інфокомунікаційних пристроїв діапазонів частот B2 і B8. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) здійснити розроблення конструкції гнучкої антени LTE; 2) виконати комп'ютерне моделювання спрямованих характеристик гнучкої антени LTE; 3) отримати результати експериментальних досліджень хвильових параметрів гнучкої антени LTE.

Виклад основного матеріалу

На практиці дизайн гнучкої антени та її геометричні підбирають експериментальним шляхом [8] або з використанням сучасних спеціалізованих програм [9–10]. Автори використали пакет програм HFSS ANSYS. За допомогою даного пакету програм можна здійснити синтез гнучкої антени, дослідити її параметри та характеристики, а також досягнути оптимальних параметрів, які б задовольняли поставленим завданням.

На рисунку 1 наведений скріншот робочого вікна програми HFSS ANSYS, що демонструє зовнішній вигляд гнучкої LTE антени та задання параметрів для оптимізації режиму живлення у точці збудження гнучкої антени LTE.

Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) був обраний як основний хвильовий параметр гнучкої антени LTE для оптимізації її геометричних розмірів. Графік частотної залежності КСХ гнучкої антени показаний на рис. 2.

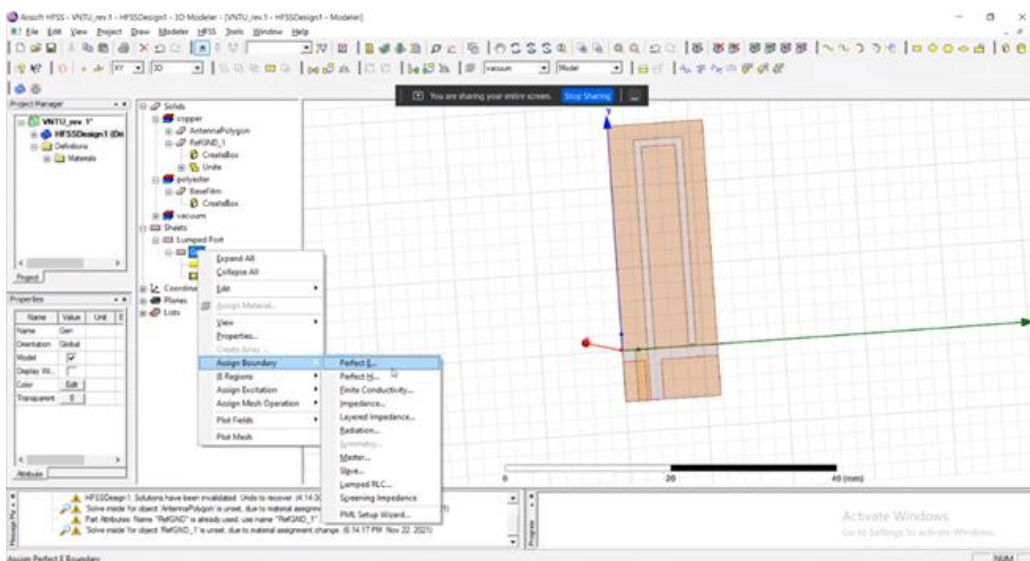


Рис. 1. Зовнішній вигляд гнучкої антени LTE та задання параметрів для оптимізації режиму живлення у точці її збудження

З рисунку 2 випливає, що проєктована гнучка антена є смугова та робоча область її частот зсунута верх по частоті вище ніж В8 верхня частота якого 960 МГц. Також на рисунку 2 спостерігається спадання графіку коефіцієнта стоячої хвилі в області частот вище 1,9 ГГц. У роботі шляхом моделювання було здійснено уточнення геометричних розмірів гнучкої антени для зміщення графіків її частотних характеристик вниз по частоті (рис. 3).

Далі у роботі за допомогою програми HFSS ANSYS було здійснено комп'ютерне моделювання спрямованих властивостей гнучкої антени з уточненими геометричними параметрами. Результати моделювання наведено на рис. 4-5.

По уточнених розмірах гнучкої антени LTE (рис. 6) було створено експериментальний зразок. Як діелектричний матеріал була використана поліетиленова плівка товщиною 30 мкм з відносною діелектричною проникністю 2,03. Формування рисунків металевих поверхонь гнучкої антени було здійснено шляхом використання металеві фольги товщиною 100 мкм. На рис. 7 наведені світлини верхньої (випромінювальної) та нижньої (екранувальної) поверхонь експериментального зразка гнучкої антени LTE.

Дослідження хвильових параметрів гнучкої LTE антени було проведено при її знаходженні у повітрі, а також при розташуванні на бічній поверхні циліндричного тefлонового стакану діаметром основи 60 мм (рис. 8). На рис. 9 наведено результати дослідження гнучкої антени у повітрі в плоскому горизонтальному положенні. Як видно з рис. 9 діапазон робочих частот по рівню КХС не більше 2,1 знаходиться в межах 950,15 МГц – 1000,50 МГц.

Результати експериментальних досліджень гнучкої антени у повітрі (рис. 9) підтверджують спадання графіку КСХ в області високих частот, що було встановлено при

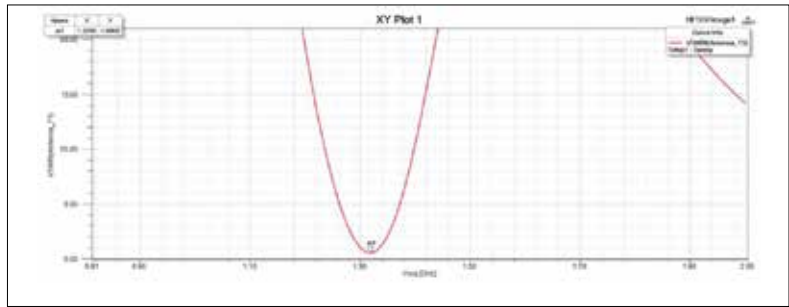


Рис. 2. Графік частотної залежності коефіцієнта стоячої хвилі гнучкої антени LTE

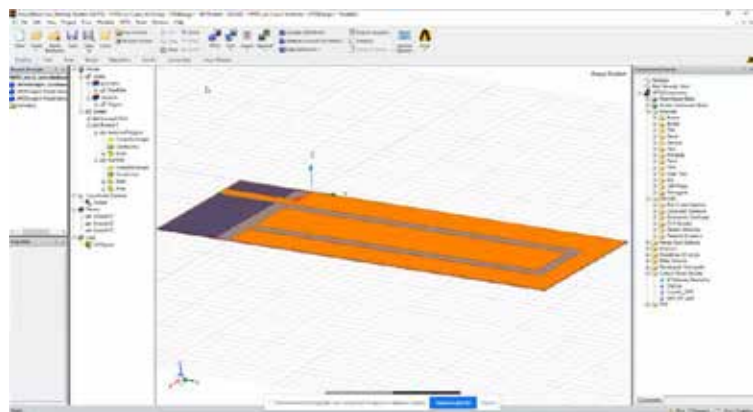
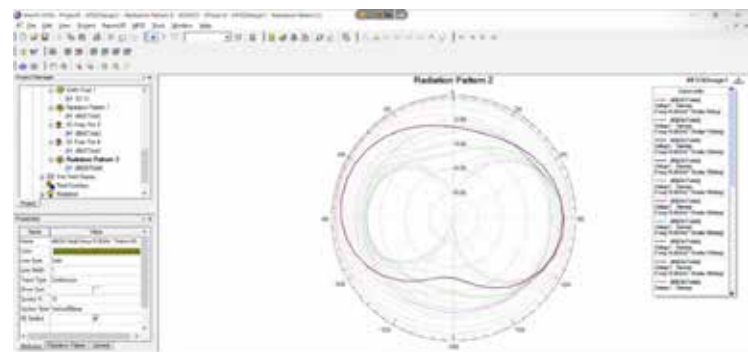
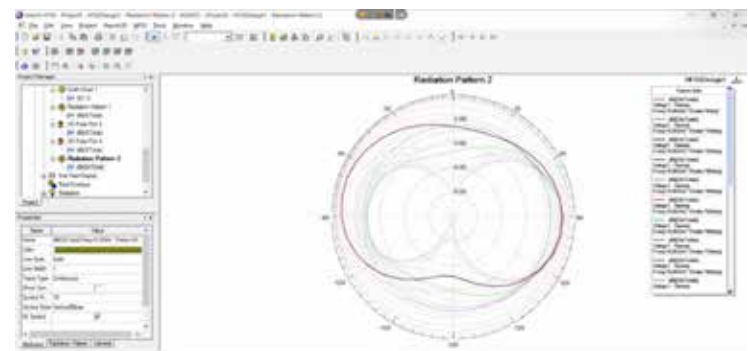


Рис. 3. Уточнення геометричних розмірів гнучкої антени LTE



а



б

Рис. 4. Діаграми спрямованості гнучкої у вертикальній площині (а) та в горизонтальній (б) площині гнучкої антени LTE



Рис. 5. Простора діаграма спрямованості (а) та 3-D зображення просторової діаграми спрямованості (б) гнучкої антени LTE

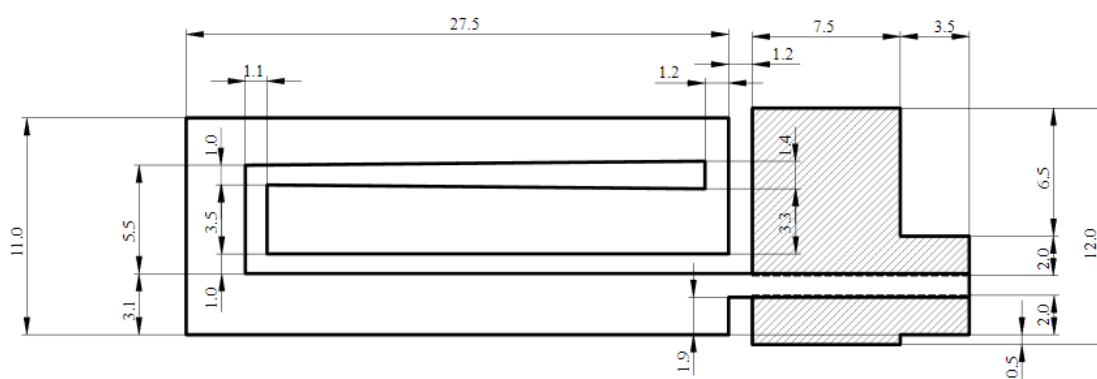


Рис. 6. Креслення гнучкої антени LTE

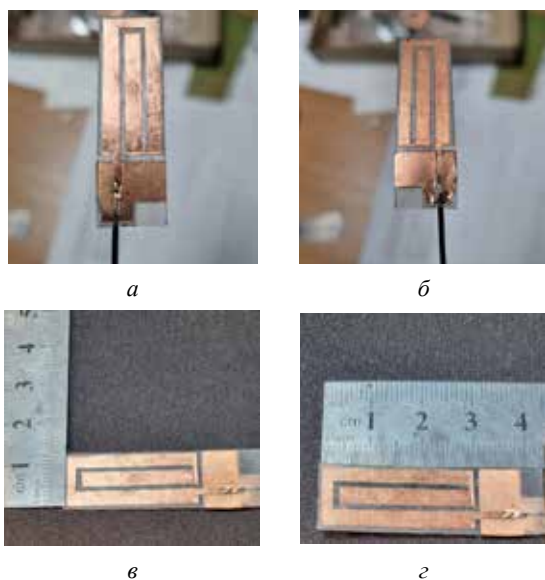


Рис. 7. Фото експериментального зразка гнучкої антени LTE: вигляд зверху (а) і знизу (б), її ширина (в) і довжина (г)



Рис. 8. Фото антени на циліндричному тефлоновому стакані

моделюванні. На рис. 10 наведені суміщені результати експериментального дослідження КСХ гнуч-

кої антени при її розташуванні в повітрі та на бічній стороні тефлонового стакану.

Порівняння результатів експериментального дослідження на рис. 10 показують зсування вниз по частоті графіку КСХ гнучкої антени.

При заповненні тefлонового стакану повітрям і опущеному в стакан по середині вказівного пальця графік КСХ значно зсувається вниз по частоті (рис. 11). Розширюється область робочих частот гнучкої антени LTE і становить 881,68–975,38 МГц. У верхній частині частотного діапазону спостерігається зменшення рівня КСХ до значення 2,9 (рис. 11).

При заповненні тefлонового стакану мінеральною водою графік КСХ ще далі зсувається донизу по частоті (рис. 12). Область робочих частот складає 810,81 МГц – 910,09 МГц. Також у верхній частині частотного діапазону спостерігається значне зменшення рівня КСХ, що дозволяє застосувати цю антену в діапазоні частот 1848,65 МГц – 2000 МГц (рис. 12). Таким чином, в положенні на руці пропонується гнучка антена LTE є дводіапазонною.

Висновки

У роботі запропоновано нову конструкцію двох-смугової гнучкої LTE антени для носимих на руці пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних мереж. Отримано нові результати модельних та експериментальних досліджень гнучкої двох-смугової LTE антени у зігнутому положенні. Оцінений вплив руки людини на хвильові параметри та характеристики гнучкої LTE антени. Області робочих частот гнучкої двох-смугової антени LTE по рівню КСХ не більше 2,1 становлять 881,68–975,38 МГц та 1848,65–2000 МГц. Така антена призначена для застосування в носимих інфокомунікаційних пристроїв діапазонів частот LTE B8 (Uplink 880–915 MHz, Downlink 925–960 MHz) і B2 (Uplink 1850–1910 MHz, Downlink 1930–1990 MHz).

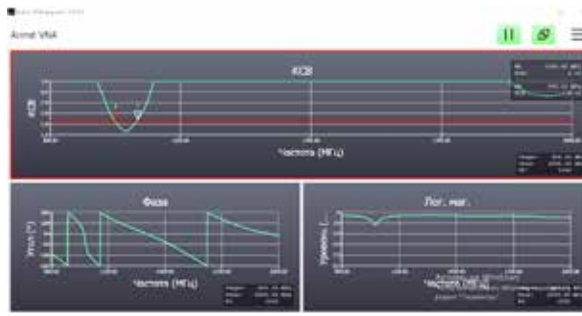


Рис. 9. Результати експериментального дослідження хвильових параметрів гнучкої у повітрі

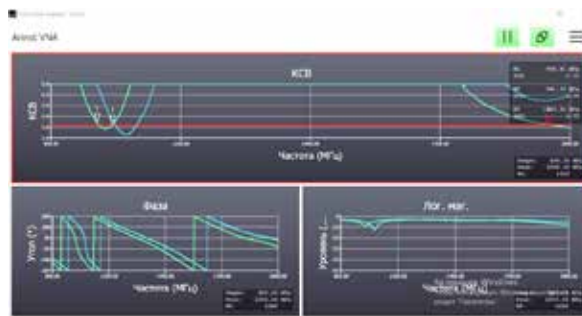


Рис. 10. Суміщені результати експериментального дослідження хвильових параметрів гнучкої антени при її розташуванні у повітрі (синя лінія) та на тefлоновому стакані (зелена лінія)

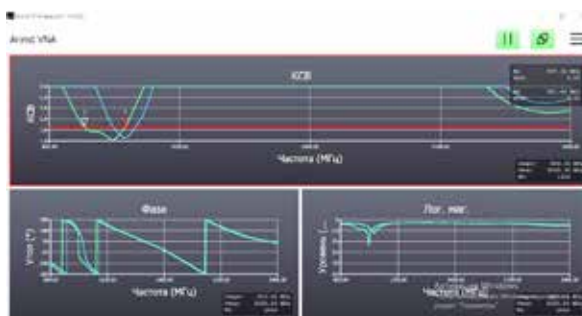


Рис. 11. Суміщені результати експериментального дослідження хвильових параметрів гнучкої антени при опущеному вказівного пальця в тefлоновий стакан по середині (зелена лінія) і гнучкої антени в повітрі (синя лінія)

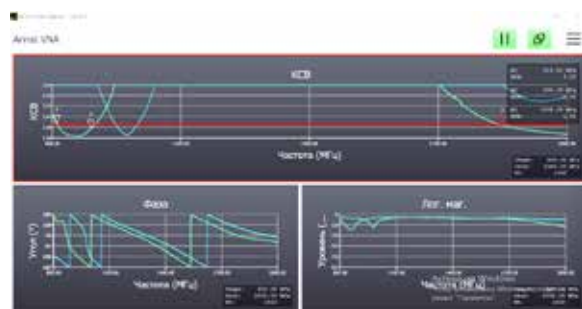


Рис. 12. Суміщені результати експериментального дослідження хвильових параметрів гнучкої антени при заповненні тefлонового стакану мінеральною водою (зелена лінія) і гнучкої антени в повітрі (синя лінія)

Список літератури:

1. Bahare Mohamadzade, Raheel M. Hashmi, Roy B. V. B. Simorangkir, Reza Gharaei, Sabih Ur Rehman, Qammer H. Abbasi. Recent Advances in Fabrication Methods for Flexible Antennas in Wearable Devices: State of the Art. *Sensors*, vol. 19, no. 10. MDPI AG, p. 2312, May 19, 2019. DOI: 10.3390/s19102312.
2. Md Mohiuddin Soliman, Muhammad E. H. Chowdhury, Amith Khandakar, Mohammad Tariqul Islam, Yazan Qiblawey, Farayi Musharavati, Erfan Zal Nezhad. Review on Medical Implantable Antenna Technology and Imminent Research Challenges. *Sensors*, vol. 21, no. 9, MDPI AG, p. 3163, May 02, 2021. DOI: 10.3390/s21093163.
3. M. U. Ali Khan, R. Raad, F. Tubbal, P. I. Theoharis, S. Liu, J. Foroughi. Bending Analysis of Polymer-Based Flexible Antennas for Wearable, General IoT Applications: A Review. *Polymers*, vol. 13, no. 3, MDPI AG, p. 357, Jan. 22, 2021. DOI: 10.3390/polym13030357.
4. Dipankar Mitra, Sayan Roy, Ryan Striker, Ellie Burczek, Ahsan Aqueeb, Henry Wolf, Kazi Sadman Kabir, Shengrong Ye, Benjamin D. Braaten. Conductive Electrified and Nonconductive NinjaFlex Filaments based Flexible Microstrip Antenna for Changing Conformal Surface Applications. *Electronics*, vol. 10, no. 7, MDPI AG, p. 821, Mar. 30, 2021. DOI: 10.3390/electronics10070821.
5. Sharadindu Gopal Kirtania, Alan Wesley Elger, Md. Rabiul Hasan, Anna Wisniewska, Karthik Sekhar, Tutku Karacolak and Praveen Kumar Sekhar. Flexible Antennas: A Review. *Micromachines*, vol. 11, no. 9, MDPI AG, p. 847, Sep. 11, 2020. DOI: 10.3390/mi11090847.
6. Zhao K., Ying Z., He S. Antenna designs of smart watch for cellular communications by using metal belt. *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, Portugal, 13–17 April 2015, pp. 1–5.
7. Flores-Cuadras J. R., Medina-Monroy J. L., Chavez-Perez R. A., Lobato-Morales, H. Novel ultra-wide-band flexible antenna for wearable wrist worn devices with 4G LTE communications. *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 59, Issue 4, 2017, pp. 777–783. DOI: 10.1002/mop.30393.
8. Semenov A., Pastushenko A., Semenova O., Koval K. Flexible antenna for lte-m1 wearables. *Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems: Proceedings of IXth International Scientific-Practical Conference*. Chernivtsi : «Ruta», 2021, pp. 49–50.
9. Семенов А.О., Семенова О.О., Коваль К.О., Пастушенко О.Л. Гнучка LTE антена для носимих інфокомунікаційних пристроїв. *8-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПІРН – 2021)*, 03–05 листопада 2021, Вінниця : ВНТУ. С. 1–3. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/34780>
10. Семенов А.О., Іванов О.С., Шмата В.С. LTE широкопasmовою антена для радіотехнологій доступу інфокомунікаційних пристроїв. *8-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (СПІРН – 2021)*, 0305 листопада 2021, Вінниця : ВНТУ. С. 1–3. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/spirn/spirn2021/paper/view/13911/11780>

Semenov A.O., Semenova O.O., Pinaiev B.O., Kulas R.O., Shpylovyi O.O. FLEXIBLE TWO-BAND LTE ANTENNA FOR RADIO-FREQUENCY ACCESS TECHNOLOGIES FOR WEARABLE DEVICES OF WIRELESS INFO-COMMUNICATION AND SENSOR NETWORKS

Modern information technologies of medical engineering are developing rapidly. The use of the Internet of Things and medical sensor networks, in particular WBAN (Wireless Body Area Networks), requires the creation of new infocommunication devices for medical applications. Modern wearable infocommunication devices are mainly fitness bracelets and smart watches, which are applications for smartphones and use WiFi or Bluetooth to exchange information. To date, an urgent scientific and practical task has arisen to create new wearable infocommunication devices for use in telemedicine. This task is interdisciplinary. Its solution requires knowledge of infocommunication and radio frequency technologies, as well as biomedical engineering. Antennas are an essential component of wireless infocommunication and sensor networks. The level of information signals and the energy efficiency of infocommunication devices depend on the quality of matching the antenna parameters in the operating frequency range. The modern direction of instrumentation is the creation of flexible antennas. The market for flexible electronics is expanding rapidly. The paper proposes a new design of a flexible two-band antenna for use in hand-held infocommunication devices. The proposed flexible antenna is double-sided and has overall dimensions of 39.7×12.0 mm. The upper side is a radiating surface and has geometric dimensions of 27.5×11.0 mm with a microstrip power line 12.2 mm long and 1.9 mm wide. The lower side is a shielding surface and has geometric dimensions of 12.2×12.0 mm with a cut-out part measuring 3.5×6.5 mm for installing a flexible antenna on a printed circuit board. As a result of experimental studies, it was found that when worn on the arm, the operating frequency range of the flexible antenna in terms of SWR is not more than 2.1 is within 810.81 MHz – 975.38 MHz and 1848.65 MHz – 2000 MHz. This allows the proposed flexible antenna to be used in the LTE B2 and B8 frequency bands.

Key words: flexible antenna, wireless, LTE, wearable device, infocommunication system, telemedicine.