

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-43>

УДК 621.391.8

Мороз Сергій Анатолійович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4677-5170>

Якимчук Наталія Миколаївна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-8173-449X>

Селепина Йосип Романович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-2421-1844>

Чалий Василь Дмитрович, к.т.н., асистент

<https://orcid.org/0000-0002-6592-6715>

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗВИТОК NFC ТА RFID: ВИКОРИСТАННЯ ІНДУКТИВНИХ АНТЕН У СУЧАСНИХ ПРИБОРАХ БЛИЖНЬОЇ ДІЇ

Мороз С.А., Якимчук Н.М., Селепина Й.Р., Чалий В.Д. Розвиток NFC та RFID: використання індуктивних антен у сучасних пристроях ближньої дії. В роботі розглянуто сучасні технології ближнього безконтактного зв'язку (NFC) та радіочастотної ідентифікації (RFID), які широко застосовуються у сферах логістики, платіжних систем та управління доступом. Наведено дослідження розвитку стандартів протоколу NFC та ключових параметрів, які критично впливають на ефективність роботи NFC-пристроїв. Основна увага приділена аналізу та вдосконаленню методів розрахунку індуктивності антен, що використовуються в цих технологіях. Описані різні типи антен, включаючи круглі, квадратні, шестикутні та восьмикутні котушки, а також запропоновані формули для розрахунку їх індуктивності. Досліджено можливості адаптивних антен та антен складних конструкцій, що дозволяють підвищити ефективність передачі енергії. Здійснено аналіз впливу геометрії та матеріалів антен на продуктивність NFC та RFID систем. Особлива увага приділяється майбутнім перспективам цих технологій у контексті зростання числа смарт-пристроїв та їх інтеграції в сучасні телекомунікаційні системи. Отримані результати можуть бути використані для розробки більш надійних та ефективних рішень у сфері безконтактних технологій, а також для вдосконалення систем енергозабезпечення і передачі даних.

Ключові слова: NFC, RFID, мережі ближньої дії, антена, індуктивність, адаптивність.

Moroz S., Yakymchuk N., Selepyna Y., Chalyj V. Development of NFC and RFID: Use of Inductive Antennas in Modern Near-Field Devices. The paper discusses modern Near-Field Communication (NFC) and Radio-Frequency Identification (RFID) technologies, which are widely used in logistics, payment systems, and access control. The study presents an analysis of the development of NFC protocol standards and key parameters that critically affect the performance of NFC devices. The main focus is on analyzing and improving methods for calculating the inductance of antennas used in these technologies. Various types of antennas are described, including circular, square, hexagonal, and octagonal coils, along with proposed formulas for calculating their inductance. The potential of adaptive antennas and complex antenna designs to improve energy transmission efficiency is explored. Additionally, the research focuses on the impact of antenna geometry and materials on the performance of NFC and RFID systems. Special attention is paid to the future prospects of these technologies in the context of the growing number of smart devices and their integration into modern telecommunications systems. The results obtained can be used to develop more reliable and efficient solutions in the field of contactless technologies, as well as for improving energy supply and data transmission systems.

Keywords: NFC, RFID, near-field networks, antenna, inductance, adaptability .

Постановка наукової проблеми. В сучасних умовах підвищення потреб користувачів у задоволенні широкого спектру послуг зв'язку та передачі інформації, можливостями значної мініатюризації пристроїв доступу, а також повсюдним переходом до безконтактних способів керування як об'єктами так і інформацією, особам-користувачам необхідно користуватись значною кількістю «електронних ключів». Такий ключ являє собою електронну мітку, що найчастіше виготовляється у вигляді смарт-карти, пристрою на основі пасивних RFID міток [1, 2]. Для уникнення взаємного впливу міток і забезпечення вимоги мінімізації розмірів пристроїв об'єднання таких елементів в одному корпусі не є оптимальним. Тому було розроблено комплекс технологій безконтактного передавання інформації, частиною яких є NFC передача даних. З розвитком інтернету речей (IoT), збільшенням кількості смарт-пристроїв, інтенсифікацією цифрової комунікації та потребою в безпечних і зручних рішеннях, технології на основі NFC знаходять широке застосування. Вони використовуються при платі за товари і послуги, в логістиці, управлінні доступом до приміщень, захисті інформації та ідентифікації особи. Дана технологія дозволяє об'єднати всі необхідні користувачу смарт-карти в одному пристрої, а також забезпечити безпроблемне отримання ідентифікаторів для доступу до різних ресурсів. На даний момент NFC знаходиться на етапі активного розвитку, при цьому для їх широкого впровадження необхідно

знаходити рішення для покращення таких параметрів як ефективність енергопередачі, дальність зчитування, безпека і вартість.

Аналіз досліджень. NFC (Near Field Communication) була розроблена у 2002 році компаніями Sony і NXP Semiconductors для роботи на відстані до 10 сантиметрів. Обладнання працює в частотному діапазоні з центральною частотою 13,56 МГц і дозволяє передавати дані на швидкості до 424 кбіт/с. Дана технологія NFC має багато спільного з радіочастотною ідентифікацією (RFID). Проте NFC підтримує двосторонню передачу даних, що дозволяє одночасно передавати та отримувати інформацію (активно-активний або активно-пасивний зв'язок). У випадку RFID більшість систем забезпечують лише односпрямований зв'язок — зчитувач передає запит, а мітка відповідає.

Крім того, NFC сумісна з поширеною інфраструктурою смарт-карт, побудованою на стандартах ISO/IEC 14443 A (наприклад, з технологією MIFARE компанії NXP) і ISO / IEC 14443 B, так само як і з картами FeliCa компанії Sony (JIS X 6319- 4). Для обміну інформацією між двома NFC-пристроями був розроблений новий протокол, який визначається стандартами ECMA-340 і ISO / IEC 18092. У 2004 році для узгодження NFC-методів і стимуляції їх розвитку компаніями NXP, Sony і Nokia була заснована асоціація NFC Forum. Асоціація розробила технічні вимоги, що забезпечують функціональну сумісність NFC-пристроїв і сервісів. У них включені всі згадані вище стандарти (ISO / IEC 14443 A, B, ISO / IEC 18092 та JIS X 6319-4 / FeliCa). Починаючи з грудня 2010 року, асоціація NFC Forum проводить сертифікацію NFC-пристроїв.

Можна прослідкувати розвиток радіочастотних стандартів і стандартів протоколу NFC зі специфікацією випробувань (рис. 1.) [2,3]. Різними компаніями (NXP, Infineon і Sony) були рекомендовані три стандарти радіочастотної ідентифікації: ISO / IEC 14443 A, ISO / IEC 14443 B і JIS X 6319-4. Першим радіочастотним стандартом NFC був ECMA 340, заснований на радіоінтерфейсі стандартів ISO / IEC 14443A і JIS X6319-4. ECMA 340 був прийнятий як стандарт ISO / IEC 18092. Приблизно в той же час три основні компанії з випуску кредитних карт (Europay, Mastercard, Visa) представили платіжний стандарт EMVCo, заснований на ISO / IEC 14443 A і ISO / IEC 14443 B. Працюючи в асоціації NFC Forum, обидві групи компаній узгодили радіоінтерфейси, які були названі NFC-A (на основі ISO / IEC 14443 A), NFC-B (на основі ISO / IEC 14443 B) і NFC-F (на основі FeliCa).

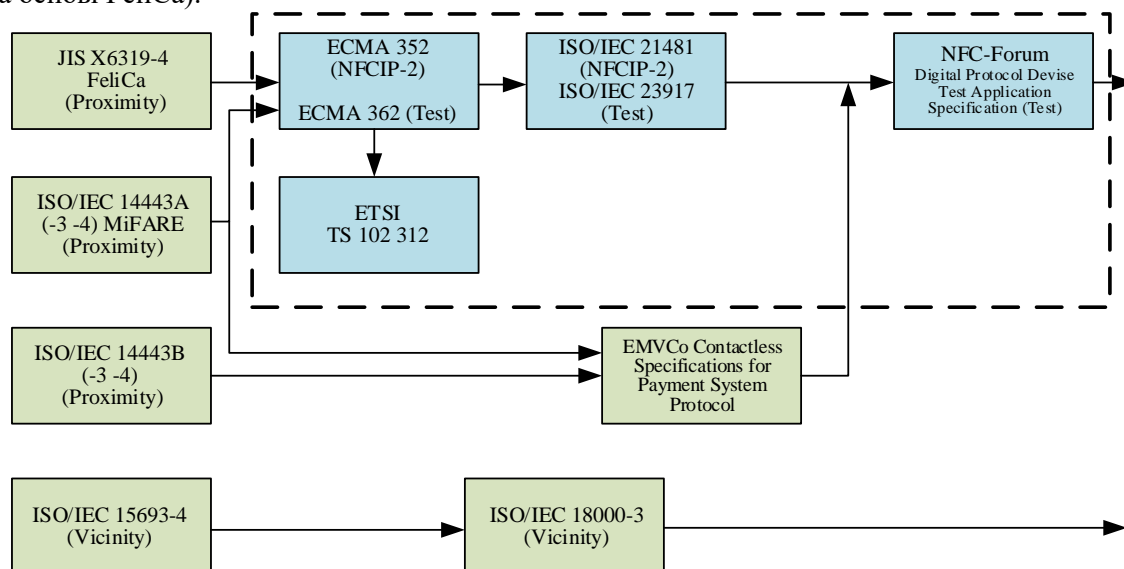


Рис. 1. Розвиток стандартів протоколу NFC

При передачі даних пасивній системі, наприклад, NFC-телефону в режимі емуляції карти, в якості джерела живлення пасивної системи використовується сигнал опитувального пристрою з частотою несучої 13,56 МГц. Як схема модуляції в опитуваних пристроях використовується амплітудна маніпуляція (ASK). Для режиму миттєвої передачі даних обидва напрямки передачі модулюються і кодуються як опитувальний пристрій. Однак в даному режимі потрібно менше потужності, оскільки кожен з NFC-пристроїв використовує своє власне джерело живлення і після закінчення передачі сигнал несучої знімається. Базовим для усіх технологій є використання електромагнітного поля для передачі енергії та інформації.

Ключові параметри, які критично впливають на ефективність роботи NFC-пристроїв впливають з базових принципів їх функціонування, що відповідає принциповій схемі роботи © Мороз С.А., Якимчук Н.М., Селепина Й.Р., Чалий В.Д.

трансформатора. Розглянемо схему, що включає приймально-передавальний модуль, в ролі антени у якого виступає первинна обмотка та мітка (або чіп) у вигляді вторинної обмотки відповідно [4]. При піднесенні зчитувача до мітки, через обмотку мітки протікає струм, від якого живиться чіп, який передає інформацію зчитувачу шляхом зміни опору в навантаженні обмотки (рис. 2).

Як відомо, відношення величини струму і відповідно напруги первинної обмотки трансформатора до вторинної залежить від відношення кількості витків обмоток: $U_1 / U_2 = N_1 / N_2$, проте опір обмоток змінюється в квадратичній залежності: $Z_1 / Z_2 = (N_1 / N_2)^2$. Отже, невелика зміна опору в навантаженні буде явно виражена для опитувального пристрою. Неправильний розрахунок параметрів антени та відхилення при виготовленні від встановлених допусків може призвести до зниження дальності зчитування, перешкод у передачі сигналу або навіть до повної неспроможності мітки функціонувати належним чином. Крім цього слід зазначити, що точний розрахунок параметрів антени (вибір форми, довжина провідника, кількість витків, тощо) забезпечує відповідність потрібній резонансній частоті, що критично для ефективної роботи.

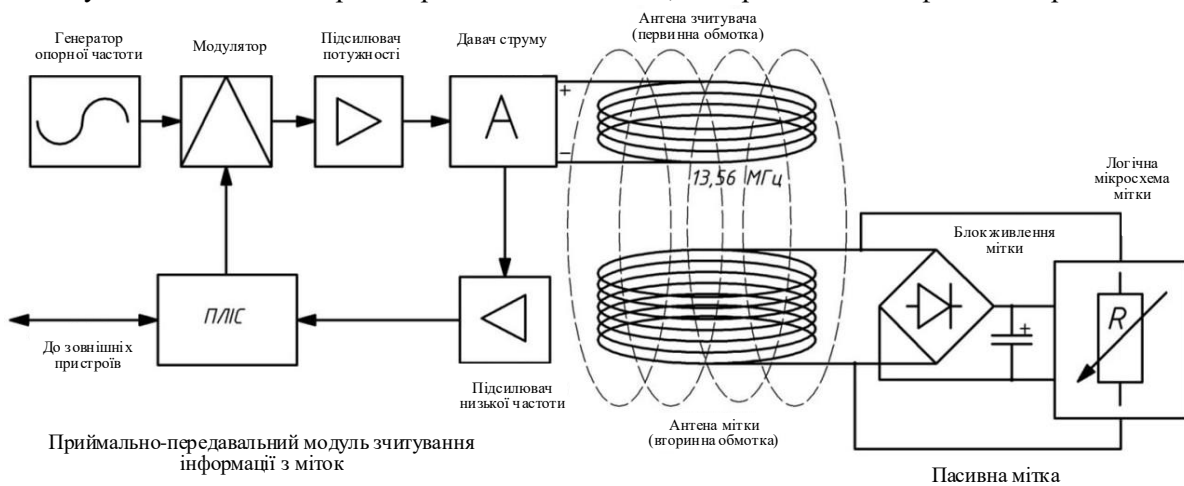


Рис. 2. Схема роботи міток та сканера

Правильний розрахунок таких параметрів, як індуктивність, ємність та геометрія антени, дозволяє оптимізувати відстань, на яку мітка може бути зчитана та мінімізувати вплив зовнішніх факторів. Для пасивних міток це особливо важливо, оскільки вся енергія для їх роботи передається через антену. Антени зі слабкими характеристиками можуть значно обмежити радіус дії системи. Отже, розрахунок параметрів антен для систем RFID та NFC є ключовим аспектом їх проектування та ефективності.

Мета роботи. Метою дослідження є аналіз і удосконалення методів розрахунку індуктивності котушок як провідних елементів антен для забезпечення ефективної роботи NFC та RFID пристроїв.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Електромагнітний зв'язок в системах RFID та NFC базується на застосуванні високочастотних електромагнітних полів і хвиль в НВЧ і мікрохвильовому частотних діапазонах.

Електромагнітне поле являє собою сукупність взаємопов'язаних електричного і магнітного полів. По суті, електричне і магнітне поля є двома характеристиками електромагнітного поля. Електромагнітне поле як форма матерії не може залишатися в спокої, а знаходиться в стані руху. Електромагнітне поле виникає в просторі при наявності мінливих в часі електричних струмів і зарядів. Останні збуджуються в провідних елементах антени. У вільному просторі електромагнітне поле поширюється у вигляді електромагнітної хвилі [2, 3]. Первинне магнітне поле, що генерується випромінюючим контуром, починається на антені. У міру того як поширюється магнітне поле, все більше і більше зростає електричне поле внаслідок індукції. Поле, яке спочатку було чисто магнітним, відповідно, перетворюється в електромагнітне поле.

Правильно спроектована антена повинна ефективно генерувати електромагнітне поле і забезпечувати максимальну передачу енергії до мітки для її живлення (у випадку пасивних міток). Проблеми розвитку NFC та RFID з точки зору використання індуктивних антен у сучасних пристроях можна розглядати через кілька основних аспектів. Головною проблемою можна назвати ефективність передачі енергії, оскільки в системах з пасивними мітками вся енергія для роботи мітки передається через індуктивну антену. Ефективність цього процесу напряму залежить від правильного розрахунку та оптимізації параметрів антени (індуктивність, форма, кількість витків). Невдало сконструйована антена може знижувати ефективність передачі енергії, що призводить до

втрат у продуктивності та зменшення радіусу дії. При цьому слід враховувати сучасні тенденції до зменшення розмірів пристроїв і міток NFC та RFID, що створюють додаткові виклики для проектування індуктивних антен. Чим менша антена, тим складніше забезпечити достатній рівень індуктивності для стабільної роботи пристрою. Це обмежує можливості мініатюризації та підвищує складність розробки.

Крім того, передача енергії між двома лінійно поляризованими антенами буде оптимальною, якщо обидві антени мають однаковий напрямок поляризації. З іншого боку, передача енергії знаходиться на найнижчому рівні, коли напрямки поляризації передавальної і приймальної антен розташовані щодо один одного точно під кутом 90° або 270° (тобто горизонтальна і вертикальна антени). У цій ситуації при розрахунку передачі енергії потрібно враховувати додаткове загасання 20 дБ через втрати поляризації, оскільки приймача антена сприймає лише 1/100 максимально можливої потужності від випромінюваного електромагнітного поля [3, 4].

У системах RFID та NFC з електромагнітним зв'язком, що працюють в НВЧ і мікрохвильовому діапазонах частот, застосовуються такі основні типи антен:

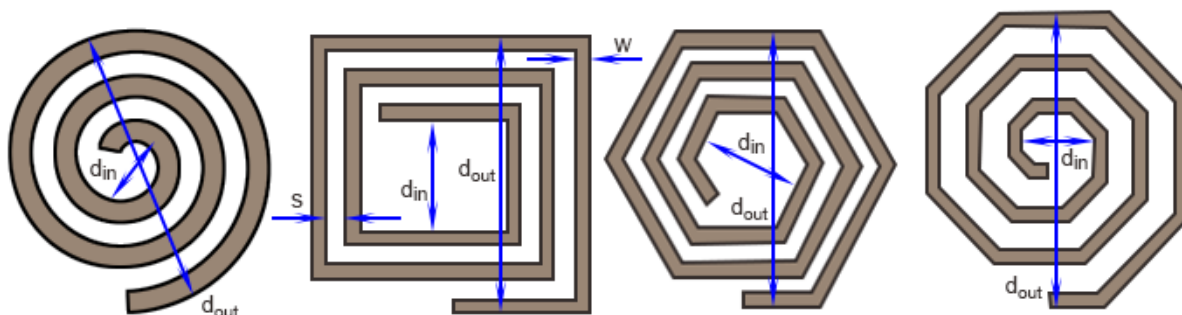
- антена-вібратор;
- антена типу «хвильовий канал»;
- мікросмугова антена;
- щілинна антена.

Параметри антен не залежать від того, чи використовуються антени для передачі або для прийому (принцип взаємності). Якщо відомі властивості антени при використанні її для передачі, то ці властивості дозволяють повністю оцінити її як прийомну і навпаки.

До основних параметрів антен відносяться:

- діаграма спрямованості;
- вхідний опір;
- коефіцієнт спрямованої дії;
- коефіцієнт підсилення;
- дійсна довжина (висота);
- ширина смуги пропускання.

Існують різноманітні методи для розрахунку різних типів антен для RFID та NFC технологій. Оскільки технології RFID та NFC інтенсивно розвиваються, то мітки можуть набувати різних форм, тому є актуальним завдання розрахунку різних форм антен для міток. Розглянемо один із способів розрахунку антен – визначення індуктивностей одношарових круглих, квадратних, шестикутних і восьмикутних планарних (плоских) котушок (рис. 3.).



Кругла Квадратна Шестикутна Восьмикутна
Рис. 3. Види плоских антен – індуктивностей для RFID та NFC технологій

Антени такого типу часто використовуються в мітках пристроїв радіочастотної ідентифікації (RFID) і ближнього безконтактного зв'язку (NFC), які отримують живлення за рахунок енергії електромагнітного поля, що створюється пристроєм зчитування міток. Вхідними параметрами для розрахунку є геометрія котушок, зокрема, їх зовнішній діаметр; ширина провідника або провoda, з якого вони виготовлені; відстань між витками; число витків.

Для розрахунку індуктивності одношарової круглої спіральної котушки рекомендовано використовували формулу Гарольда А. Уїллера [2]:

$$L_{circ} = 31,33 \cdot \mu_0 \cdot n^2 \frac{a^2}{8a+11c} \quad (1)$$

де L - індуктивність, (Гн); μ_0 - магнітна постійна, (Гн/м), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$; n - число витків, a - середній радіус, (м), c - ширина котушки, (м), відповідно:

$$a = \frac{d_{in} + d_{out}}{4} \quad (2)$$

$$c = \frac{d_{out} - d_{in}}{2} \quad (3)$$

Індуктивність одношарової квадратної, шестикутної або восьмикутної спіральної котушки розраховується з використанням модифікованої формули Уїллера [2]:

$$L = K_1 \cdot \mu_0 \frac{n^2 \cdot d_{avg}}{1 + K_2 \cdot \rho} \quad (4)$$

де L — індуктивність, (Гн); μ_0 - магнітна постійна, (Гн/м), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$; K_1 і K_2 - емпіричні безрозмірні коефіцієнти, які залежать від форми катушок (табл. 1); n - число витків; d_{avg} - середній діаметр котушки, (м); ρ - коефіцієнт заповнення котушки:

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (5)$$

Коефіцієнт заповнення ρ показує як заповнений простір спіральної котушки. При малих значеннях ρ котушка виглядає «порожньою» ($d_{out} \approx d_{in}$); при значеннях ρ , що наближаються до одиниці, котушка повністю заповнена витками ($d_{out} \gg d_{in}$). Наприклад, квадратна котушка, показана на рисунку вище, має коефіцієнт заповнення $\rho = 0,42$.

Таблиця 1 – Коефіцієнти K_1 і K_2

Конструкція котушки	K_1	K_2
Квадратна	2.34	2.75
Шестикутна	2.33	3.82
Восьмикутна	2.25	3.55

У наведених вище формулах не враховується вплив явищ, пов'язаних з високими частотами, а також вплив матеріалу на індуктивність, наприклад, поверхневий ефект або властивості матеріалу підкладки, на якій виготовлена котушка [5]. Тому формули підходять тільки для розрахунку на відносно низьких частотах, тобто вони придатні для NFC (діапазон 13,56 МГц) і для низькочастотних діапазонів RFID 120-150 кГц і 13,56 МГц.

Новими рішеннями для виконання ряду спеціалізованих задач є використання нових конструкцій, таких як антени типу фракталів або антен з нестандартною формою, може покращити характеристику випромінювання та сприймання сигналу. Наприклад, у логістиці потрібні антени з великою дальністю зчитування, тоді як у платіжних системах NFC важлива надійність і безпека передачі даних на коротких відстанях. Фрактальні антени зазвичай мають самоподібну геометрію, тобто їх структура повторюється на різних масштабах. Розрахунок індуктивності фрактальної антени може бути досить складним, оскільки фрактальні антени мають складну геометрію, що може ускладнювати точний аналіз. Для деяких простих фрактальних антен можуть бути доступні апроксимації індуктивності через спрощені моделі. Наприклад, для базових фрактальних геометрій можна використовувати формули для індуктивності звичайних антен або лінійних елементів з врахуванням додаткових параметрів, що враховують фрактальну структуру.

Наступним напрямком є використання адаптивних антен, які автоматично налаштовують свій імпеданс, використовуючи різні технології для оптимізації своїх характеристик відповідно до змінних умов сигналу або навколишнього середовища [6]. Для реалізації функціонування адаптивних пристроїв необхідними умовами є забезпечення моніторингу та вимірювання. Адаптивні антени оснащені сенсорами і моніторами, які постійно вимірюють параметри сигналу, такі як рівень потужності, якість сигналу, рівень шуму, а також характеристики навколишнього середовища, такі як відбиття сигналів або зміни в середовищі. Зібрані дані використовуються для аналізу поточних умов і визначення необхідних змін для покращення ефективності антени.

Для автоматичного налаштування імпедансу використовуються змінні компоненти, такі як варикапи, варистори або інші елементи, які можуть автоматично налаштувати імпеданс антени. В загальному для складних застосувань можуть використовуватися цифрові або аналогові контролери, які змінюють параметри антени в реальному часі на основі отриманих даних.

В якості адаптивних алгоритмів традиційно використовуються зворотного зв'язку, проте у зв'язку з широким поширенням і все глибшою розробкою бази когнітивних радіомереж з'являються можливості налаштування оптимізаційних алгоритмів на основі нейромереж та машинного навчання. Ці алгоритми постійно адаптуються до змінюваних умов, щоб підтримувати оптимальну роботу антени.

Для RFID та NFC повинні бути не лише функціональними, але й економічно вигідними у виробництві. Правильний розрахунок параметрів дозволяє створити антени, що задовольняють вимоги до розміру, матеріалів і вартості виробництва, без зниження продуктивності. Це особливо важливо для масового виробництва RFID міток, де будь-яке підвищення вартості може суттєво вплинути на загальну вартість системи.

Отже безконтактні технології в найближчому майбутньому будуть інтенсивно розвиватися. Хоча радіочастотна ідентифікація RFID застаріла технологія відносно технології ближнього поля NFC, однак на нашу думку дані технології ще мають перспективи розвитку в різних сферах людської діяльності. Досить цікавою є технологія NFC, оскільки вона дозволяє накопичити на одній смарт-картці дозволи керування багатьма пристроями та здійснювати різноманітні платіжні операції а можливості динамічної адаптації параметрів антен дають змогу створювати пристрої для широкого кола завдань.

Висновки. В роботі проведено детальний огляд сучасного стану розвитку технологій NFC і RFID, зокрема їхніх стандартів, протоколів і технічних характеристик. Проаналізовано особливості використання технологій у різних сферах та їхню сумісність з іншими стандартами, що дозволило визначити ключові напрямки для вдосконалення. Проведено дослідження параметрів антен для NFC та RFID систем. Здійснено теоретичний розрахунок індуктивностей антен різної геометричної форми (круглі, квадратні, шестикутні та восьмикутні котушки), що дозволяє оптимізувати передачу енергії та забезпечити стабільну роботу пристроїв. Було запропоновано використання нових підходів до підвищення ефективності пристроїв ближньої дії шляхом застосування антен спеціальних конструкцій та адаптивних антен. Досліджено вплив різних факторів на ефективність передачі енергії в змінних умовах. ереж.

Список бібліографічного опису

1. Кошкун В., Ок К., Озденізджи Б. Розробка професійних NFC-додатків для Android. John Wiley & Sons Ltd., 2013. 308 с.
2. Иго Т., Коулмен Д., Джемсон Б. Початок роботи з NFC: Ближній безконтактний зв'язок з Arduino, Android і PhoneGap. O'Reilly Media, 2014. 246 с.
3. Рахул А., Крішнан Г., Рао С. Технологія NFC (Ближній безконтактний зв'язок): Огляд. Міжнародний журнал з кібернетики та інформатики. 4. 2015. С. 133-144. DOI: 10.5121/ijci.2015.4213
4. Сапарходжаєв Н., Дауїтбаєва А., Нуртаєв А., Байменшина Г. Система керування доступом з NFC. Міжнародна конференція з веб-ресурсів і відкритого доступу до навчання, ICWOAL 2014. DOI: 10.1109/ICWOAL.2014.7009188.
5. Паре Д. Проекти антен для NFC-пристроїв. 2016. 344 с. DOI: 10.1002/9781119145301
6. Гебхарт М., Байер Т., Факкіні М. Автоматичне налаштування імпедансу антени для ближнього безконтактного зв'язку (NFC). 2013. С. 235-242.

References

1. Coskun V., Ok K., Ozdenizci B. Professional NFC Application Development for Android. John Wiley & Sons Ltd., 2013. 308p.
2. Igoe T., Coleman D., Jepson B. Beginning NFC: Near Field Communication with Arduino, Android, and PhoneGap. O'Reilly Media, 2014. 246 p.
3. Rahul A., Krishnan G., Rao S. Near Field Communication (NFC) Technology: A Survey. International Journal on Cybernetics & Informatics. 4. 2015. P. 133-144. DOI: 10.5121/ijci.2015.4213
4. Saparkhojayev N., Dauitbayeva A., Nurtayev A., Baimenshina G. NFC-enabled access control and management system. 2014 International Conference on Web and Open Access to Learning, ICWOAL 2014. DOI: 10.1109/ICWOAL.2014.7009188.
5. Paret D. Antenna Designs for NFC Devices. 2016. 344 p. DOI: 10.1002/9781119145301
6. Gebhart M., Baier T., Facchini M. Automated antenna impedance adjustment for Near Field Communication (NFC). 2013. P. 235-242.