

МІШАН ВІКТОР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2771-7285>e-mail: v_mishan@ukr.net

КАРПОВА ЛЕСЯ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5015-2107>e-mail: rtlesya@gmail.com

КРИЖОВИЙ МАКСИМ

Хмельницький національний університет

e-mail: maxim.kryzovyi1288@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ЧЕРЕЗ ТРИФАЗНУ МАГНІТНО-РЕЗОНАНСНУ СИСТЕМУ

В даній роботі запропоновано трифазну бездротову систему передачі енергії, що враховує проблеми низької потужності та ефективності в однофазних системах. Створена багатофізична модель, що детально аналізує топологію трифазної резонансної компенсаційної мережі та оптимізацію конструкції котушки зв'язку. Результати моделювання показують, що запропонована система зменшує втрати магнітного потоку і напругу в контурі, значно підвищуючи ефективність передачі енергії.

Ключові слова: трифазна система, бездротова передача електроенергії, магнітне поле, ефективність передачі, коефіцієнт зв'язку, витік магнітного потоку.

MISHAN VIKTOR, KARPOVA LESYA, KRYZHOVYI MAKSYM

Khmelnitsky National University

OPTIMIZATION OF THE EFFICIENCY OF WIRELESS POWER TRANSMISSION THROUGH A THREE-PHASE MAGNETIC RESONANCE SYSTEM

This work presents a novel three-phase wireless power transfer (WPT) system designed to address the critical challenges of low power output, low energy transmission efficiency, and excessive circuit stress commonly associated with single-phase systems. The proposed system operates with a phase angle difference of 120 degrees, which enhances its performance and overall effectiveness in power transfer applications. To facilitate comprehensive analysis, a multi-physics simulation model using COMSOL software was developed. In this model, the topology of the three-phase resonant compensation network is meticulously analyzed, and the structure of the coupling coil is optimized for improved performance. The simulation results indicate that the three-phase system significantly reduces magnetic flux leakage and minimizes stress within the circuit compared to conventional single-phase systems operating under identical environmental conditions, air gaps, and frequencies. Furthermore, the findings reveal a marked improvement in energy transmission efficiency, demonstrating the advantages of adopting a three-phase configuration in WPT systems. The resonance frequency of 47.5 kHz is highlighted as optimal for achieving superior system performance. The study underscores the importance of the proposed system's design and optimization strategies, which collectively contribute to a more efficient and stable wireless power transfer solution. By advancing the capabilities of WPT technology, this research has the potential to pave the way for practical applications in various domains, including electric vehicle charging and other consumer electronics, thereby enhancing the efficiency and reliability of energy transfer systems. The outcomes emphasize the viability of three-phase systems in overcoming the limitations inherent in traditional single-phase wireless power transfer technologies.

Keywords: three-phase system, wireless power transmission, magnetic field, transmission efficiency, coupling coefficient, magnetic flux leakage.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні системи бездротової передачі енергії стикаються з низькою вихідною потужністю, низькою ефективністю передачі та значним навантаженням на електричні ланцюги, що особливо виражено в традиційних однофазних системах. Це створює труднощі для задоволення зростаючих вимог у сферах електромобільності та бездротової зарядки побутової електроніки. Крім того, зростає використання електронних пристроїв, вимагає ефективних рішень для енергопостачання, які підвищують енергоефективність і зменшують втрати. Пошук нових рішень, що підвищують ефективність систем бездротової передачі енергії, стає важливим науковим і практичним завданням. Запропонована трифазна система з магнітно-резонансним зв'язком є перспективним напрямком, здатним зменшити втрати магнітного потоку та покращити ефективність передачі енергії. Це має важливе значення для розвитку інфраструктури бездротової зарядки та пов'язано з ключовими завданнями, такими як оптимізація енергетичних систем і підвищення стабільності енергетичних мереж. Результати дослідження можуть стати основою для подальших розробок у галузі бездротової передачі енергії, відкриваючи нові можливості для комерційного використання і впровадження нових стандартів.

Аналіз досліджень та публікацій

В контексті даної тематики розглянуто численні дослідження, що стосуються систем бездротової передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком. Одним із основних напрямків наукових робіт є розвиток однофазних і трифазних систем, які вирішують проблеми, пов'язані з низькою потужністю та ефективністю

передачі енергії. Однофазні системи, попри свою простоту, демонструють значні обмеження в контексті потужності та ефективності передачі, що стало спонукальним фактором для вивчення трифазних конфігурацій, які можуть надати кращі результати.

Дослідження, проведені на основі однофазних котушок, показали, що такі конструкції, як котушка типу Тайцзі, здатні забезпечити більш рівномірний розподіл магнітного поля. Однак, як зазначають [1], ці рішення не завжди відповідають вимогам для високих потужностей. Водночас трифазні системи можуть забезпечити підвищену продуктивність завдяки зменшенню фазного струму та кращому розподілу електромагнітного поля, що робить їх більш придатними для потужних застосувань, таких як зарядка електромобілів і бездротове живлення медичних пристроїв [3].

Серед основних досліджень, що висвітлюють переваги трифазних систем, варто зазначити розробки, в яких використовується асиметрична кількість котушок. Наприклад, використання трьох круглих передавальних котушок для підвищення потужності системи [4] та багатофазних приймачів, що вирішують проблеми синусоїдальних коливань напруги [5], демонструє значний прогрес у цій галузі. Ці роботи підкреслюють важливість багатофазних підходів у досягненні більшої ефективності передачі енергії.

Крім того, нові рішення, такі як трифазні котушки з подвійною D-квадратурною структурою, виявилися ефективними в контексті протидії зміщенню [6]. Також, дослідження трифазної індуктивної системи з біполярною фазовою обмоткою підтверджують, що обертове магнітне поле дозволяє досягти більш плавної передачі енергії [7]. Ці інновації вказують на високий потенціал трифазних систем для розширення можливостей систем бездротової передачі енергії.

Дослідження останніх років свідчать про зростаючий інтерес до оптимізації конструкцій котушок та зменшення втрат енергії в бездротових системах. Однак, незважаючи на значний прогрес, все ще існує необхідність у детальному аналізі симетричних трифазних структур для досягнення високої ефективності. Дана стаття, фокусується на оптимізації трифазних систем, є важливим внеском у цю галузь, оскільки надає нові можливості для вдосконалення технології бездротової передачі енергії. Результати дослідження можуть стати основою для подальших розробок у сфері бездротової передачі енергії, забезпечуючи надійність і ефективність в застосуваннях з високою потужністю.

Виклад основного матеріалу

В практичних застосуваннях індуктивність витоку та індуктивність збудження бездротової зарядної котушки є досить високими, що призводить до значної індуктивності самої котушки. Це змушує котушку поглинати велику кількість реактивної потужності перед тим, як активна потужність буде передана на навантаження. Внаслідок цього реактивний струм у ланцюзі стає значним, що, в свою чергу, призводить до збільшення втрат у перетворювачі. Для вирішення цієї проблеми може бути введена модель компенсаційної мережі, яка усуває реактивний опір в ланцюгах передавальної та приймальної сторін, ефективно компенсуючи реактивну потужність, генеровану індуктивною котушкою. Це дозволяє покращити вихідний коефіцієнт потужності системи, підвищити ефективність передачі та оптимізувати потужність навантаження.

Найпоширеніші схеми компенсації для бездротових котушок зазвичай складаються з чотирьох типів структур топологічної компенсації: типу «S-S» (послідовне з'єднання на обох кінцях), типу «S-P» (послідовне з'єднання на передавальному кінці та паралельне на приймальному), типу «P-S» (паралельне з'єднання на передавальному кінці та послідовне на приймальному) і типу «P-P» (паралельне з'єднання на обох кінцях), як показано на рис. 1. Важливо зазначити, що в системах передачі лише топології типу «S-S» і «S-P» не дозволяють значенню C_p впливати на опір R_L , а флуктуації R_L на приймальному кінці не впливають на резонансну частоту передавального кінця. Крім того, топологія типу «S-S» здатна витримувати вищу потужність, а також є простою та зручною у реалізації. Таким чином, у даній статті обрано топологію «S-S». Відповідно до запропонованої трифазної бездротової системи передачі електроенергії, трифазна котушка використовує метод підключення «Y-Y», і топологія, зображена на рис. 2, була реалізована.

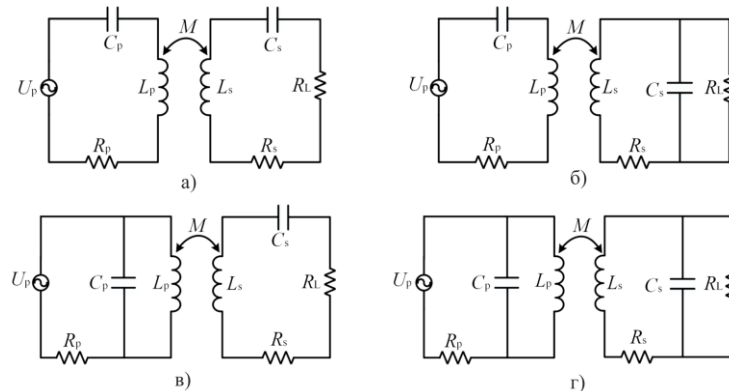


Рис. 1. Чотири топології резонансного контуру компенсації: а) тип S-S; б) тип S-P; в) тип P-S; г) тип P-P

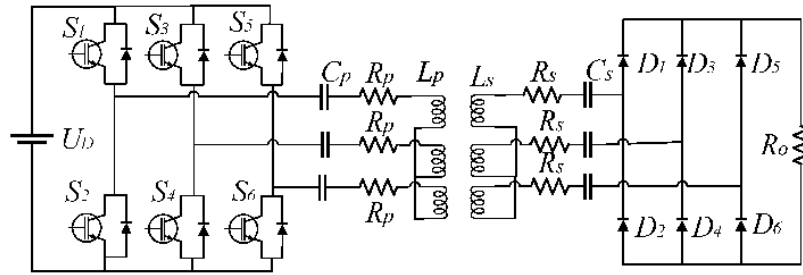


Рис. 2. Топологія трифазної бездротової системи передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком

Топологія трифазної бездротової системи передачі енергії переважно складається з джерела живлення постійного струму, інверторної схеми, механізму трифазного з'єднання та навантаження. Трифазний високочастотний інвертор формується шістьма MOSFET ($S_1 - S_6$), а U_{dc} виступає в ролі джерела вхідної напруги постійного струму. L_p та L_s є власними індуктивностями передавальної та приймальної котушок відповідно, тоді як R_p і R_s – це відповідні опори цих котушок. Компенсаційний конденсатор C_p , який підключається послідовно з L_p на передавальній стороні, а компенсаційний конденсатор C_s підключається послідовно з L_s на приймальній стороні. Повномостовий некерований випрямляч на навантажувальній стороні складається з шести діодів ($D_1 - D_6$). Трифазна котушка реалізує з'єднання Y-Y, а її значення ємності дорівнює

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}, \tag{1}$$

де L – індуктивність котушок, $L = L_s = L_p$

Згідно з законом Кірхгофа для напруг, можна отримати модель взаємної індуктивності трифазної бездротової зарядної системи, як показано у виразі (2), що описує взаємодію електромагнітної індукції між трьома котушками та механізм передачі енергії між ними. Використовуючи цю модель, можна детально дослідити проектування, компонування та керування котушками для досягнення високої ефективності в системі бездротової передачі енергії.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & j\omega M & j\omega M \\ j\omega M & Z_p & j\omega M \\ j\omega M & j\omega M & Z_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -j\omega M_{X1} & -j\omega M_X & -j\omega M_X \\ -j\omega M_X & -j\omega M_{X1} & -j\omega M_X \\ -j\omega M_X & -j\omega M_X & -j\omega M_{X1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}. \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\omega M_{X1} & j\omega M_X & j\omega M_X \\ j\omega M_X & j\omega M_{X1} & j\omega M_X \\ j\omega M_X & j\omega M_X & j\omega M_{X1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Z_S & -j\omega M & -j\omega M \\ -j\omega M & -Z_S & -j\omega M \\ -j\omega M & -j\omega M & -Z_S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}. \tag{3}$$

де $Z_p = R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p}$, $Z_s = (R_s + R_w) + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}$.

Оскільки структура приймальних і передавальних котушок є повністю симетричною, їхня самоіндуктивність також однакова. Для спрощення розрахунків, позначимо L_p і L_s як власні індуктивності передавальної та приймальної котушок відповідно; M_x позначає взаємну індуктивність між котушками приймання або передавання; M_{x1} – взаємну індуктивність між передавальною та приймальною котушками; R_p і R_s відповідають за опір котушок; I_x (де $x = a, b, c, A, B, C$) представляє струми в контурах передавальної та приймальної сторін. Із цієї моделі стає зрозуміло, що конфігурація котушок має значний вплив на рівень взаємної індуктивності та ефективність роботи системи бездротової передачі енергії.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C}{U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c}. \tag{4}$$

Ефективність передачі енергії котушкою, відповідно до виразів (2)-(4), залежить від взаємної індуктивності, яка визначається розмірами та положенням обмоток. Тому в цій статті основна увага приділяється розташуванню та структурним параметрам обмоток для розробки трифазної котушки в бездротовій системі передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком.

Аналізуючи структури котушок в літературі, можна дійти висновку, що трьохкотушкова структура забезпечує кращий коефіцієнт зв'язку та ефективність передачі. Для перевірки доцільності трифазної котушки проведено моделювання, щоб оцінити ефективність передачі для різних конфігурацій.

Створення магнітного поля в котушці можна описати рівняннями Максвелла, що включають закон Ампера і закон Фарадея. Закон Ампера описує формування магнітного поля навколо провідника зі струмом, а закон Фарадея пояснює, що зміна магнітного поля індуктує електричне поле. Ці рівняння є основою для моделювання взаємодії електромагнітних полів, що є критично важливим для аналізу характеристик магнітного поля у бездротових системах передачі енергії.

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = J \\ B = \mu H, J = \sigma E \end{cases}, \tag{5}$$

де B – це напруженість магнітної індукції у будь-якій точці простору; H – напруженість магнітного поля; J – густина струму, яка визначається як $J = 0$ у повітрі і $J = I/A$ в котушці (де I – струм котушки, а A – площа поперечного перерізу провідника); E – електрорушійна сила, що наводиться в системі; μ – проникність матеріалу; σ – електропровідність матеріалу.

Рівняння магнітної дифузії між котушками можна отримати на основі рівнянь Максвелла, що описують

електромагнітні взаємодії в системі бездротової передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком.

$$\frac{\nabla \times \nabla \times B}{\mu\sigma} + \frac{\partial B}{\partial t} = 0. \tag{6}$$

Відповідно до формули $\nabla \times \nabla \times B = \nabla(\nabla \cdot B) = \nabla^2 B$ та враховуючи, що $\nabla \cdot B = 0$ можна вивести рівняння дифузії магнітної індукції B для системи бездротової передачі енергії з магнітно-резонансним зв'язком:

$$-\frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 B + \frac{\partial B}{\partial t} = 0. \tag{7}$$

Модель втрат включається до розрахунку ефективності передачі в системі бездротової передачі енергії. Основні втрати зумовлені опором нагріву котушки. Коли рівняння магнітної дифузії застосовується до котушки зв'язку, виміри в напрямках x , y та z можуть бути обчислені окремо.

$$\begin{cases} \frac{1}{\mu\sigma} \left(\frac{\partial^2 B_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_x}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial B_x}{\partial t} \\ \frac{1}{\mu\sigma} \left(\frac{\partial^2 B_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_y}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial B_y}{\partial t} \\ \frac{1}{\mu\sigma} \left(\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial B_z}{\partial t} \end{cases} \tag{8}$$

де σ – провідність матеріалу, B_x – компонент густини магнітного потоку по осі xxx у просторі котушки, B_y – компонент густини магнітного потоку по осі y , а B_z – компонент густини магнітного потоку по осі z . Густину магнітного потоку в просторі можна розрахувати за наведеними раніше формулами.

$$Q = \frac{1}{T} \int_{T_0-T}^{T_0} J \cdot E dt. \tag{9}$$

Для спрощення аналізу методом кінцевих елементів котушка Літца була представлена у вигляді багатожильної зосередженої котушки, що знижує складність деталей, зберігаючи основні електромагнітні характеристики. Цей підхід є особливо корисним при розробці механізмів з'єднання, оскільки зменшує обчислювальні витрати без втрати точності.

Моделювання показало, що потужність залишається сталою, а втрати в котушках враховуються при розрахунку їх ефективності. Основні втрати виникають через тепловий опір, що відображено у виразі (9). Результати свідчать, що структура з кількома котушками є більш ефективною при передачі однакової потужності, зокрема, ефективність трифазної котушки в кільцевому розміщенні перевищує ефективність котушки подвійної D квадратури (DDQ) і одношарової котушки.

Проведено моделювання горизонтального зсуву для однієї котушки, котушки DDQ та трифазної перекриваючої котушки. Ефективність цих котушок при відстані передачі 100 мм представлена на рис. 3. У разі бічного зсуву ефективність одношарової котушки швидко знижується, тоді як ефективність котушок DDQ та трифазної котушки знижується повільніше. Загальний коефіцієнт корисної дії (ККД) трифазної котушки перевищує ККД котушки DDQ і збільшується при відхиленні від радіуса. Таким чином, запропоновано перекриваючий та симетричний механізм зв'язку для трифазної котушки, проведено його аналіз у стаціонарному режимі.

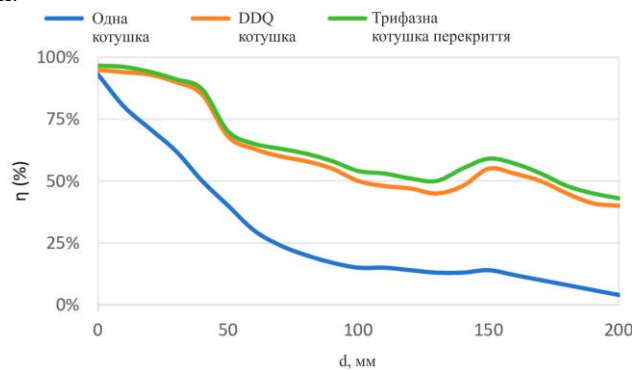


Рис. 3. Моделювання впливу горизонтального зсуву на ефективність котушки в системі бездротової передачі енергії ($D = 100$ мм)

У цьому дослідженні котушки розташовані у формі кола та мають повністю симетричну конструкцію. Порівняно з наявними системами з трьома котушками, структура, представлена в даній статті, є більш оптимізованою. Взаємна індуктивність між котушками також демонструє повну симетрію, що спрощує аналіз і розрахунки моделі взаємної індуктивності. Остаточна оптимальна модель взаємної індуктивності була розроблена шляхом детального вивчення кута перекриття та відстані між котушками в трифазній системі бездротової зарядки з трьома котушками. Розмах кожної фазної котушки в моделі становить 180 градусів, а різниця кутів між трьома фазами дорівнює 120 градусів. Структурну схему наведено на рис. 4.

На рис. 5 представлені результати моделювання магнітного поля та щільності струму в механізмі з'єднання при напрузі 220 В і частоті 47,5 кГц. Конструкція трифазної секторної котушки забезпечує високу щільність намотування в обмеженому просторі. При однаковому відному збудженні трифазна котушка генерує сильніше магнітне поле з меншим витоком магнітного потоку, що оптимізує бездротову передачу енергії. Зсув трифазних струмів на 120 градусів створює обертове магнітне поле, що дозволяє уникнути точного вирівнювання між передавачем і приймачем, підвищуючи ефективність системи. Ефективність передачі трифазної котушки становить 96,49%, порівняно з 93,67% для однієї котушки, що означає приріст

на 2,82%. Це також зменшує обсяг котушки, підвищуючи компактність і ефективність обладнання, без збільшення початкових розмірів.

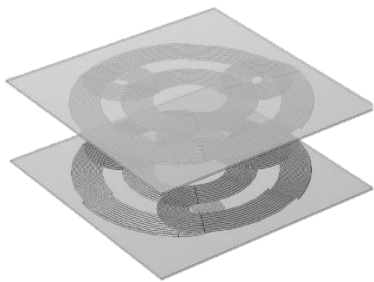


Рис. 4. Модель механізму з'єднання трифазної системи

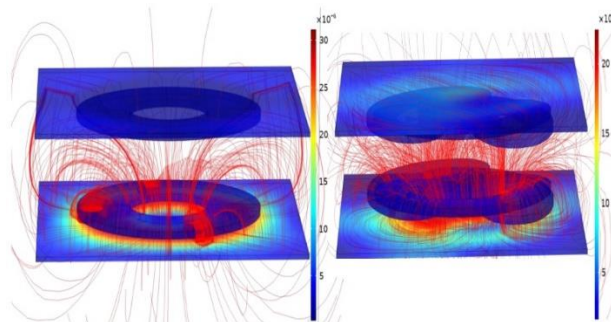


Рис. 5. Порівняння режимів магнітного поля та ліній щільності магнітного потоку

Керуючий імпульс інвертора не враховує сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) з коефіцієнтом заповнення 50% та частотою 47,5 кГц, з фазовим зсувом між трьома фазами модуляції 120 градусів. На рис. 6 показано сигнал ШІМ трифазного інвертора, де імпульсні сигнали верхньої та нижньої гілок кожної фази є взаємодоповнюючими: коли одна гілка ввімкнена, інша вимкнена, щоб запобігти короткому замиканню.

Для забезпечення безпеки вводиться «час затримки між перемиканнями», який становить 600 нс, що дозволяє повністю розрядити комутаційну трубку перед увімкненням іншої гілки. Цей час затримки необхідно мінімізувати для підвищення швидкості відгуку системи, водночас забезпечуючи надійність роботи.

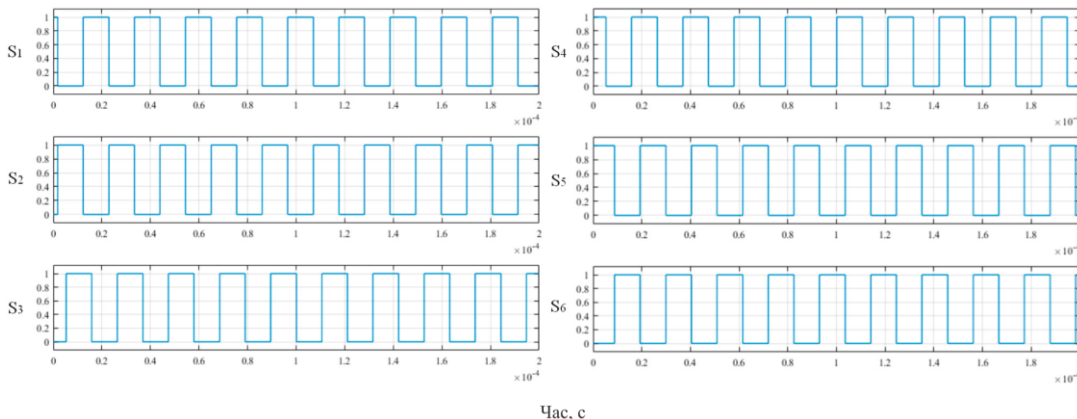


Рис. 6. Форма хвилі широтно-імпульсного сигналу керування інвертором

На рис. 7 показані форма сигналу напруги та струму на виході системи. Напруга має прямокутну форму з коефіцієнтом заповнення позитивних і негативних імпульсів 1/3. Через індуктивний характер котушки між напругою і струмом виникає фазовий зсув, а сигнал струму має стабільну синусоїдальну форму, що свідчить про ефективне перетворення постійної напруги у змінний струм. Трифазна вхідна система працює по черзі, забезпечуючи стабільність і надійність. В реальних умовах така система може ефективно балансувати навантаження, зменшувати коливання напруги та покращувати якість електроенергії.

На рис. 8 представлено симуляцію вихідної напруги та струму приймального вузла з частотою 47,5 кГц. Результати показують, що трифазний міст працює по черзі, а синусоїдальна форма вихідного струму стабільна з періодом 21 мкс. Форма вихідної напруги відповідає ШІМ, а фази вихідного струму та напруги переважно співпадають, що вказує на високий коефіцієнт потужності. Це критично важливо для бездротових систем передачі енергії, оскільки сприяє підвищенню ефективності та зменшенню втрат.

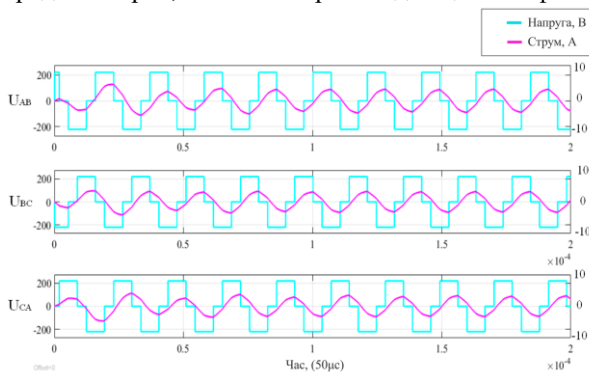


Рис. 7. Форма сигналу напруги та струму на вхідній лінії трифазного передавача

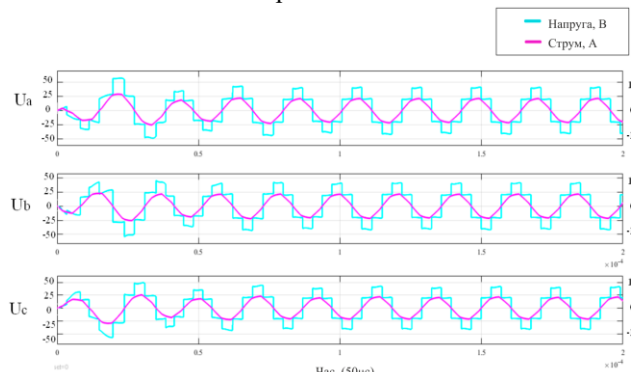


Рис. 8. Форма вихідної фазної напруги та струму на приймальному кінці

Висновки

У даній статті представлена трифазна бездротова система передачі електроенергії з накладеними обмотками, яка підходить для трифазного електропостачання. Магнітне поле запропонованого механізму зв'язку було детально проаналізовано за допомогою програмного забезпечення для аналізу кінцевих елементів. Результати показують, що трифазний механізм зв'язку з перекриттям забезпечує вищу ефективність передачі енергії порівняно з однофазною котушкою. Експериментальні дані підтверджують, що структура трифазного перекриття дозволяє мінімізувати витік магнітного потоку та підвищити коефіцієнт зв'язку, що в свою чергу збільшує верхню межу змінної потужності передачі трифазної котушки. Це сприяє поліпшенню вартості, щільності потужності та стабільності роботи системи.

Література

1. Інтелектуальні системи в електроенергетиці. Теорія та практика: навчальний посібник. / Стаднік М. І., Видмиш А. А., Штуць А. А., Колісник М. А. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 332 с
2. Zhen, Z.; Hong, P.; Apostolos, G.; Carlo, C. Wireless power transfer – An overview. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019, 2, 1044–1058.
3. S. Cheon, Y.-H. Kim, S.-Y. Kang, M. L. Lee, J.-M. Lee, and T. Zyung, "Circuit-model-based analysis of a wireless energy-transfer system via coupled magnetic resonances," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011, vol. 58, no. 7, pp. 2906–2914.
4. A. Q. Cai and L. Siek, "A 2-kW 95% efficiency inductive power transfer system using gallium nitride gate injection transistors", *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 458-468.
5. O. C. Onar, S. Campbell, P. Ning, J. M. Miller and Z. Liang, "Fabrication and evaluation of a high performance SiC inverter for wireless power transfer applications", *Proc. IEEE Workshop Wide Bandgap Power Devices Appl.*, pp. 125-130, 2013.
6. J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho and C. T. Rim, "Narrow-width inductive power transfer system for online electrical vehicles", *IEEE Trans. Power Electron.*, 2011, vol. 26, no. 12, pp. 3666-3679.
7. J. Sallan, J. L. Villa, A. Llombart and J. F. Sanz, "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2140-2149.

References

1. Intelktualni systemy v elektroenerhetytsi. Teoriia ta praktyka: navchalnyi posibnyk. / Stadnik M. I., Vydmysh A. A., Shtuts A. A., Kolisnyk M. A. Vinnytsia: TOV «TVORY», 2020. 332 s.
2. Zhen, Z.; Hong, P.; Apostolos, G.; Carlo, C. Wireless power transfer – An overview. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2019, 2, 1044–1058.
3. S. Cheon, Y.-H. Kim, S.-Y. Kang, M. L. Lee, J.-M. Lee, and T. Zyung, "Circuit-model-based analysis of a wireless energy-transfer system via coupled magnetic resonances," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011, vol. 58, no. 7, pp. 2906–2914.
4. A. Q. Cai and L. Siek, "A 2-kW 95% efficiency inductive power transfer system using gallium nitride gate injection transistors", *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 458-468.
5. O. C. Onar, S. Campbell, P. Ning, J. M. Miller and Z. Liang, "Fabrication and evaluation of a high performance SiC inverter for wireless power transfer applications", *Proc. IEEE Workshop Wide Bandgap Power Devices Appl.*, pp. 125-130, 2013.
6. J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho and C. T. Rim, "Narrow-width inductive power transfer system for online electrical vehicles", *IEEE Trans. Power Electron.*, 2011, vol. 26, no. 12, pp. 3666-3679.
7. J. Sallan, J. L. Villa, A. Llombart and J. F. Sanz, "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2140-2149.