OPEN ACCESS

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

Daniel ZEJLER[1], Marcin KASPRZAK[2]
ORCID: [1]0009-0005-0195-0977; [2]0000-0001-7811-8330
**DOI: 10.15199/48.2025.08.12**

# Przegląd rozwiązań bezprzewodowego, pojemnościowego przesyłu energii elektrycznej

## *An overview of wireless, capacitive power transfer*

[1] mgr inż. Daniel Zejler, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Daniel.Zejler@polsl.pl
[2] dr hab. inż. Marcin Kasprzak Prof. PŚ, Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Marcin.Kasprzak@polsl.pl

**Adres do korespondencji:** Daniel.Zejler@polsl.pl

**Streszczenie:** Publikacja stanowi przegląd aktualnych rozwiązań i prowadzonych badań z zakresu technologii pojemnościowego, bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej CPT. Po wstępie teoretycznym omówiono ogólną budowę układów CPT. W pierwszej kolejności opisano rodzaje sieci dopasowujących sprzęg pojemnościowy do warunków rezonansowych zaczynając od prostych LC do najbardziej złożonych LCLC. Następnie opisano wybrane, rzeczywiste układy CPT ze sprzęgami obrotowymi oraz płaskimi 4-ro i 6-cio elektrodowymi. Podano ich parametry elektryczne pracy i osiągane sprawności. W podsumowaniu wskazano na konieczność zwiększenia częstotliwości pracy CPT do kilkunastu MHz i związanego z tym projektowania elementów biernych sieci dopasowujących i falowników.

**Słowa kluczowe:** bezprzewodowy pojemnościowy przesył energii elektrycznej (CPT), sieci dopasowujące, sprzęg elektryczny, wysokoczęstotliwościowy przesył energii elektrycznej, falownik, rezonans, SiC MOSFET.

**Abstract:** The paper is a review of research in the field of capacitive power transfer technology (CPT) After a theoretical introduction, the general structure of CPT systems is discussed. At first, the types of networks matching the capacitive coupler to resonance conditions are described, starting from simple L to the most complex LCLC type. Then, selected, real CPT systems with rotary couplers and flat 4 and 6 electrodes are described. The publication includes electrical parameters and achieved efficiency of described CPT systems. In addition, the need to increase CPT operating frequency to several MHz and associated design of inverters and matching network's passive elements is indicated in summary section.

**Keywords:** capacitive power transfer (CPT), Matching Networks, electric coupling, high-frequency wireless power transfer, inverter, resonance, SIC MOSFET.

## Wstęp

W ostatniej dekadzie układy bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej na stałe zagościły w życiu codziennym [1–2], rozwiązaniach stosowanych w przemyśle [3,7–8] oraz biomedycynie [9, 19, 35]. Duże zainteresowanie układami bezprzewodowego zasilania urządzeń elektrycznych jest związane z łatwością obsługi, eliminacją konieczności stosowania fizycznego połączenia oraz poszukiwaniem układów pozwalających na bezobsługowe zasilanie i/lub ładowanie mobilnych urządzeń oraz maszyn i pojazdów elektrycznych. Można zaobserwować zwiększone zainteresowanie w tematyce poszukiwania bezpiecznych i tanich w implementacji bezprzewodowych układów zasilania wysokiej mocy dla pojazdów elektrycznych oraz maszyn przemysłowych [10–17], które aktualnie pracują przy wykorzystaniu układów akumulatorowych. Ze względu na konieczność ciągłego zwiększania czasu pracy maszyn oraz zasięgu pojazdów równolegle nadal rozwijane są układy akumulatorowe.

Niestety z powodu gabarytów oraz aspektów środowiskowych budowa akumulatorów o coraz większej pojemności nie jest rozwiązaniem problemu ograniczonego czasu działania urządzeń elektrycznych. Zastosowanie bezprzewodowego zasilania urządzeń elektrycznych wspomagającego układy akumulatorowe pozwoliłoby na zmniejszenie pojemności stosowanych akumulatorów a co za tym idzie ograniczenie kosztów, wagi oraz zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania. Ponadto stosowanie mniejszych akumulatorów lub całkowita ich eliminacja ma pozytywny wpływ na środowisko naturalne pozwalając na zredukowanie zapotrzebowania na metale ciężkie niezbęd-

ne do produkcji ogniw oraz redukcję trudnych w recyklingu odpadów akumulatorowych.

Aktualnie najszerzej rozwiniętą technologią zasilania bezprzewodowego jest indukcyjny przesył energii elektrycznej IPT (ang. Inductive Power transfer) [18–25]. Technologia ta znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach techniki zaczynając od ładowania małej elektroniki, przez stosowane z dużą popularnością urządzenia AGD takie jak płyty indukcyjne aż po rozwiązania przemysłowe jako stacje ładowania czy układy indukcyjnego nagrzewania metali. Pomimo możliwości przesyłu dużych mocy, układy IPT nie znalazły szerokiego zastosowania w obszarze maszyn mobilnych oraz pojazdów elektrycznych. Taki stan rzeczy w głównej mierze spowodowany jest wadami układów IPT takimi jak: konieczność stosowania drogich i ciężkich rdzeni ferrytowych cewek sprzęgających, konieczność budowy cewek z drogich w produkcji drutów licowych, bardzo duża emisja pola elektromagnetycznego wokół urządzenia, silne oddziaływanie elektromagnetyczne z metalowymi obiektami znajdującymi się w pobliżu czy straty mocy związane z indukowaniem prądów wirowych w elementach ferromagnetycznych. Powyższe wady całkowicie eliminują możliwość bezpiecznego i opłacalnego ekonomicznie zastosowania technologii IPT dużej mocy w przemyśle czy pojazdach elektrycznych. Odpowiedzią na powyższe ograniczenia układów IPT mogą być układy bezprzewodowego, pojemnościowego przesyłu energii elektrycznej CPT (ang. Capacitive Power Transfer). W odróżnieniu od IPT układy CPT zbudowane są z dwóch lub więcej okładek wykonanych najczęściej z miedzi lub aluminium tworząc w ten sposób model powietrznego kondensatora. Przesył energii pomiędzy parami oddalonych okładek odbywa się przy pomocy pola elektrycznego generowanego poprzez przyłożenie napięcia (rzędu kilku kV) o wysokiej częstotliwości (MHz) na okładki nadawcze. Takie rozwiązanie eliminuje konieczność stosowania rdzeni ferrytowych, pozwala na pracę przy wysokich częstotliwościach, a ponieważ nie występuje tutaj zjawisko oddziaływania silnego pola elektromagnetycznego układy CPT są prawie niewrażliwe na metalowe obiekty wokół. Ze względu na konstrukcję układów CPT istnieje możliwość implementacji bezprzewodowego przesyłu energii przez powietrze, pod powierzchnią wody [26], przez obiekty wykonane z tworzywa lub szkła [27] oraz metalu [28, 29], a także skórę ludzi [9] i zwierząt [19].

W publikacji przedstawiono przegląd aktualnych rozwiązań i prowadzonych badań z zakresu technologii bezprzewodowego, pojemnościowego przesyłu energii elektrycznej. W rozdziale 2 zamieszczono ogólną budowę układów CPT. Rozdział 3 zawiera informacje na temat sieci dopasowujących sprzęg pojemnościowy do warunków rezonansowych, a w rozdziale 4 przedstawiono wybrane, rzeczywiste układy CPT. Rozdział 5 stanowi podsumowanie najważniejszych informacji na temat układów CPT.

## Budowa układów bezprzewodowego, pojemnościowego przesyłu energii elektrycznej

Bezprzewodowy przesył energii elektrycznej pomiędzy okładkami nadajnika i odbiornika układu CPT jest możliwy dzięki przemiennemu polu elektrycznemu. Fizyczna zasada działania sprzęgu pojemnościowego opiera się na prawie Maxwella:

$$\vec{\nabla}\cdot\left(\vec{\nabla}\cdot\vec{E}\right) = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\nabla\cdot\vec{B}\right) \tag{1}$$

gdzie: $\vec{E}$ – natężenie pola elektrycznego (V/m) oraz $\vec{B}$ – indukcja pola magnetycznego (T). Wyodrębnienie pól magnetycznych i elektrycznych w równaniu (1) daje:

$$\vec{\nabla}\left(\vec{\nabla}\cdot\vec{E}\right) - \nabla^2\vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\mu\sigma\vec{E} + \mu\varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\right) \tag{2}$$

gdzie: $\mu$ – przenikalność magnetyczna (H/m), $\sigma$ – przewodność medium (Ω/m), $\varepsilon$ – przenikalność elektryczna medium ($F$/m).

Prawo Maxwell'a wyrażone zależnością (2) wskazuje na teoretyczną możliwość indukcji przemiennego prądu elektrycznego poprzez przemienne pole elektryczne.Bazując na powyższym, teoretycznie możliwym jest wykonanie układu CPT składającego się jedynie z trzech elementów tj.: źródła zasilania napięcia przemiennego, okładek tworzących kondensator powietrzny oraz odbiornika stanowiącego obciążenie. W praktyce jednak ze względu na niską emisję pola elektrycznego związaną z niskim napięciem pracy sprzęgu, niską częstotliwością oraz brakiem występowania zjawiska rezonansu elektrycznego taki układ cechowałby się bardzo niską sprawnością oraz zdolnością do przesyłania mocy. Dotychczasowe badania układów CPT pozwoliły na wyznaczenie zależności pomiędzy elektrycznymi parametrami pracy sprzęgu pojemnościowego a zdolnością do przesyłania mocy czynnej ($P$) oraz biernej ($Q$). Na przykładzie układu CPT skonstruowanego przy pomocy 2 okładek zależność ta wygląda następująco [34]:

$$\begin{cases} P = 2\pi f\cdot C_M|V_{C1}|\cdot|V_{C2}|\cdot\sin\theta \\ Q = 2\pi f\cdot C_M|V_{C1}|\cdot|V_{C2}|\cdot\cos\theta \end{cases} \tag{3}$$

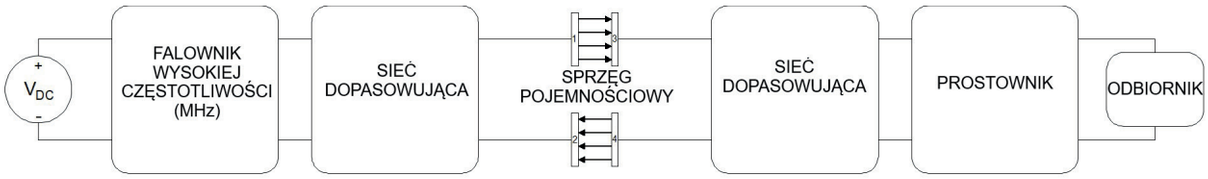
gdzie: $C_M$ – wypadkowa pojemność sprzęgu (F), $V_{C1}$ i $V_{C2}$ – napięcia okładek po stronie nadajnika i odbiornika (V), $\theta$ – kąt przesunięcia fazowego.

Jak widać na podstawie (3) zdolność układu CPT do przesyłania mocy elektrycznej jest wprost proporcjonalna do częstotliwości pracy sprzęgu, wypadkowej pojemności zastępczej oraz napięcia okładek. Poszczególne składniki równania (3) ulegają zmianie w zależności od konstrukcji sprzęgu pojemnościowego (ilość okładek, rodzaje sieci dopasowujących) jednakże korelacja pomiędzy mocą a parametrami elektrycznymi pracy sprzęgu zawsze pozostaje taka sama.

Wobec powyższego do opracowania układu CPT zdolnego do efektywnego przesyłania energii droga bezprzewodową koniecznością staje się zastosowanie: układów pozwalających na zmianę elektrycznych parametrów pracy sprzęgu pojemnościowego, elementów biernych wpływających na wystąpienie warunków pracy rezonansowej oraz układów zapewniających sterowanie i utrzymywanie stabilnej pracy przy zmiennym obciążeniu. Nowoczesne układy CPT składają się zatem z obwodów falownikowych wysokiej częstotliwości (MHz), sieci dopasowujących składających się z biernych elementów indukcyjnych i pojemnościowych, a także układów prostowniczych po stronie odbiornika energii pozwalających na uzyskanie stabilnych warunków napięcia wyjściowego układu CPT (rys.1).

są realizowane przy pomocy różnych topologii (*LC, LCL, LCLC, LCCL, CLLC* itp.) które zostały omówione w rozdziale 3.

Cechą charakterystyczną układów CPT jest sprzęg pojemnościowy, który stanowi separację układu zasilającego od odbiornika. Do wykonania sprzęgu pojemnościowego najczęściej używanymi są okładki wykonane z aluminium lub miedzi. Należy zaznaczyć, że zdolność do przesyłania mocy droga bezprzewodową jest silnie skorelowana z pojemnością elektryczną sprzęgu a nie grubością samych okładek. Dzięki temu okładki układów CPT mogą być wykonane z bardzo cienkich taśm miedzianych oraz o praktycznie dowolnym kształcie. Oczywistym natomiast jest fakt, że im większa powierzchnia okładek tym większa pojemność elektryczna między nimi jednakże wraz ze zwiększaniem gabarytów samych okładek równocześnie zwiększają się pojemności pasożytnicze sprzęgu, które mogą być odpowiedzialne za większość strat energii. Na rysunku 1 pokazano uproszczony układ, w którym występują 2 pojemności elektryczne związane z parami okładek 1–3 oraz 2–4. Dotychczasowe badania układów CPT pokazały jednak, że w tak skonstruowanym sprzęgu pojemnościowym występu-




Rys.1. Podstawowa budowa układów CPT

Powyższa konstrukcja układów CPT jest bardzo ogólna i nie obejmuje wielu szczegółowych elementów rzeczywistych obwodów CPT. Dzięki zastosowaniu nowoczesnego, wysokoczęstotliwościowego falownika możliwe jest uzyskanie napięcia zasilającego o częstotliwości od kilku do kilkunastu MHz. Wysoka częstotliwość napięcia zasilającego pozwala na zwiększenie dystansu pomiędzy okładkami, zmniejszenie impedancji sprzęgu pojemnościowego, zwiększenie mocy i sprawności układu oraz zastosowanie mniejszych elementów biernych sieci dopasowujących. Ze względu na bardzo niską pojemność sprzęgu (rzędu pF) koniecznym jest stosowanie dodatkowych elementów biernych pozwalających na zwiększenie wypadkowej pojemności zastępczej układu oraz zapewnienie warunków wystąpienia rezonansu elektrycznego dzięki któremu osiągane są wysokie napięcia okładek (rzędu kilku kV). W zależności od potrzeb sieci dopasowujące po stronie nadajnika i odbiornika

je szereg innych pojemności pasożytniczych, których udział w wypadkowej pojemności sprzęgu nie może zostać pominięty podczas doboru pozostałych elementów CPT. Przykładowo, na rysunku 2 przedstawiono wszystkie 16 pojemności elektrycznych występujących w układzie CPT skonstruowanym w oparciu o 4 okładki umieszczone pod pojazdem elektrycznym. Poza pojemnościami wzdłużnymi Cs tworzącymi główny sprzęg pojemnościowy między parami okładek można wyróżnić także następujące pojemności pasożytnicze: skrośne Cd, poprzeczne Cppv i Cppr, między okładkami a podłożem Cpr i Cpr', między okładkami a karoserią Cpv i Cpv', miedzy podłożem a karoserią Crv, miedzy podłożem a układem PCB falownika Cr oraz między karoserią a układem prostownika Cv. Jak pokazuje powyższe analiza teoretyczna parametrów sprzęgu pojemnościowego oraz wyznaczenie wypadkowej pojemności między okładkami stanowi skomplikowane i stale rozwijane za-

gadnienie aktualnie badanych układów CPT [31–33]. Część z wyżej wymienionych pojemności jest na tyle mała, że może zostać pominięta w analizie teoretycznej sprzęgu. Niestety niektóre z pojemności pasożytniczych, np.: $C_{pr}$ są często równe lub nawet większe co do wartości od $C_s$ pomiędzy okładkami i nie mogą zostać pominięte.

## Sieci dopasowujące w układach CPT

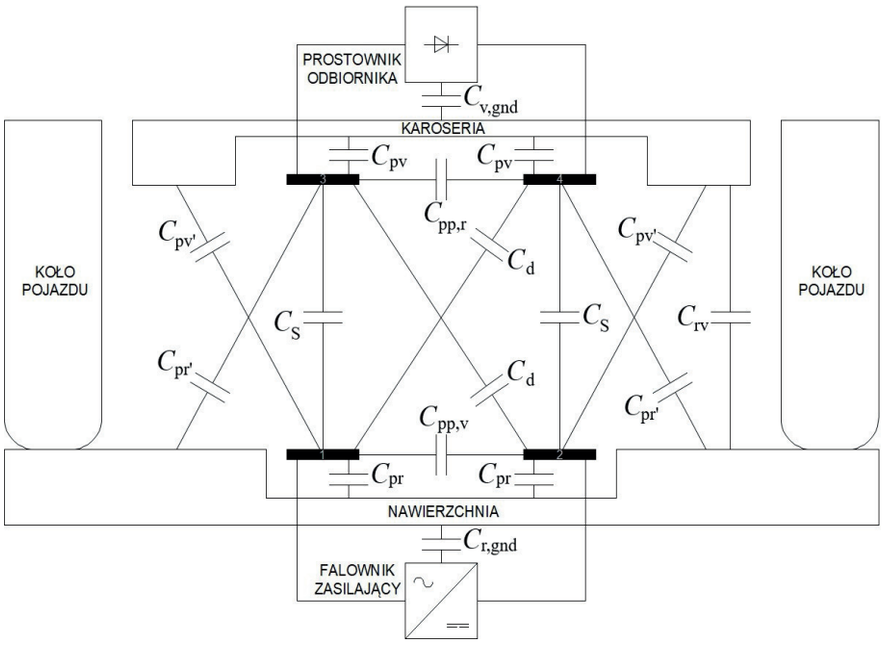
Moc przesyłana przez sprzęg pojemnościowy oraz sprawność układów CPT jest silnie skorelowana z pojemnością zastępczą oraz występowaniem rezonansu elektrycznego. Ze względu na bardzo niską pojemność elektryczną występującą pomiędzy okładkami opracowano szereg sieci dopasowujących (ang. Matching Networks) skonstruowanych z elementów biernych, które pozwalają na zwiększenie pojemności zastępczej, umożliwiają pracę rezonansową układu oraz pełnią rolę obwodów podnoszących oraz obniżających napięcie po stronie nadajnika i odbiornika. Dodatkowo odpowiednia topologia sieci dopasowujących pozwala na pracę całego układu w trybie utrzymywania stałej wartości napięcia wyjściowego *CV* (ang. Constant Voltage) lub w trybie utrzymywania stałej wartości prądu wyjściowego *CC* (ang. Constant Current). Dotychczasowe badania wskazują na występowanie szeregu cech charakterystycznych poszczególnych topologii sieci dopasowujących co skutkuje koniecznością odpowiedniego ich doboru zależnie od spodziewanych warunków pracy układu CPT. Poniżej przedstawiono 5 najczęściej opisywanych w literaturze topologii sieci dopasowujących oraz wskazano ich zalety i wady.

### *Sieć dopasowująca typu „L”*

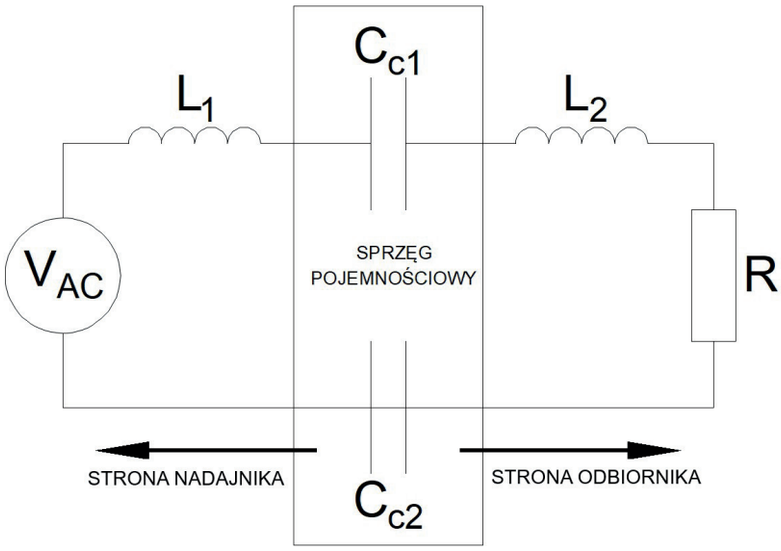
Sieć dopasowująca typu *L* jest najprostsza pod względem topologii spośród wszystkich badanych w literaturze sieci. Jest to podstawowa topologia systemów CPT, która zakłada szeregowe połączenie okładek sprzęgu pojemnościowego z odpowiednio dobranymi cewkami aby umożliwić wystąpienie warunków rezonansu elektrycznego.Do zalet powyższego układu CPT należą: prostota konstrukcji, niewielka ilość elementów oraz niski koszt wykonania. Niestety ze względu na przeważające wady takie jak: duża wrażliwość na niedopasowanie geometryczne okładek, zdolność do efektywnego przesyłu energii na bardzo małych odległościach (mm), niski zakres przesyłanej mocy (W) [36] oraz wysoka impedancja wejściowa [37], sieci typu *L* są sporadycznie stosowane w układach CPT.

### *Sieć dopasowująca typu „LC”*

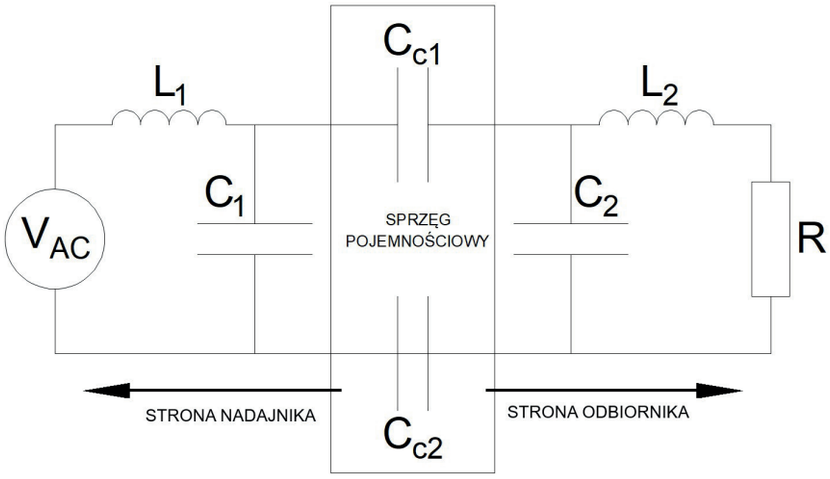
Drugim rodzajem sieci dopasowującej jest sieć typu *LC* (rys.4) w której stosuje się dodatkowe kondensatory po stronie nadajnika i odbiornika połączone równolegle z okładkami sprzęgu pojemnościowego. Taka topologia pozwala na zwiększenie wypadkowej pojemności zastępczej sprzęgu oraz obniżenie impedancji wejściowej.




Rys.2. Pojemności pasożytnicze układu CPT zabudowanego pod pojazdem elektrycznym [10]




Rys.3. Schemat układu CPT z siecią dopasowującą typu *L* po stronie nadajnika i odbiornika




Rys.4. Schemat układu CPT z siecią dopasowującą typu *LC* po stronie nadajnika i odbiornika

Największą zaletą sieci typu *LC* jest niska wrażliwość na niedopasowanie geometryczne okładek sprzęgu pojemnościowego co pozwala na utrzymanie wyższej mocy nawet w przypadku kilkunastocentymetrowego przesunięcia między okładkami nadajnika i odbiornika [37]. Ponadto sieć typu *LC* charakteryzuje się zdolnością do przesyłania wyższych mocy na większe odległości niż pozostałe rodzaje sieci [41]. Do wad należy zaliczyć: większą liczbę elementów, zwiększony koszt wykonania oraz bardziej skomplikowaną budowę. Ponadto sieć typu *LC* charakteryzuje się odwrotnie proporcjonalną zależnością pomiędzy mocą wejściową a współczynnikiem sprzężenia okładek [38, 42]. Oznacza to, że koniecznym jest stosowanie zabezpieczeń układu CPT przed przeciążeniem, ponieważ wraz z obniżeniem współczynnika sprzężenia wzrasta pobór mocy wejściowej.

***Sieć dopasowująca typu „LCL"***

Kolejnym rodzajem sieci dopasowującej jest sieć typu LCL (rys.5). W miarę rozwoju badań nad układami CPT zwiększano częstotliwość Dpracy falowników zasilających w celu poprawy parametrów pracy sprzęgu pojemnościowego. Przy wysokich częstotliwościach zasilania okazało się że, problemem jest wykonanie cewek sieci dopasowujących typu LC aby utrzymać wymaganą częstotliwość rezonansową. Przy wysokich częstotliwościach cewki te wykonywane są jako powietrzne (bezrdzeniowe) co było źródłem problemów. Rozwiązaniem okazały się sieci typu LCL, w których pojedynczą cewkę układu LC rozdzielono na dwie osobne, upraszczając ich wykonanie. Ponadto stosując dwie cewki o mniejszej indukcyjności w miejscu pojedynczej zredukowano straty przewodzenia w drutach nawojowych typu Lica z którego

zwykle wykonane są uzwojenia cewek [12, 13, 44]. Z racji bardzo dużego podobieństwa, sieci te cechują się tymi samymi wadami oraz zaletami co sieci *LC*.

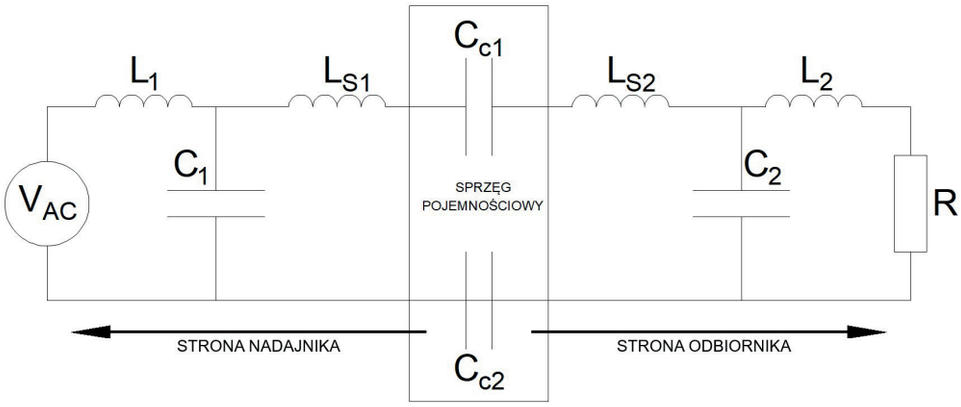
### *Sieć dopasowująca typu „LCLC"*

Trzecią przedstawianą siecią dopasowującą jest sieć typu *LCLC* (rys.6). Ten układ sieci niweluje największe wady sieci typu *LC* oraz *LCL* przy zachowaniu tej samej zdolności do przesyłania mocy. Zastosowanie kolejnych dwóch kondensatorów ($C_{F1}$ i $C_{F2}$) pozwoliło na zmianę charakterystyki pracy sieci którą charakteryzuje wprost proporcjonalna zależność pomiędzy mocą wejściową a współczynnikiem sprzężenia okładek [14]. Dzięki temu sieć ta nazywana jest również siecią „samoregulującą" ponieważ przy pogorszeniu się geometrii pracy sprzęgu lub całkowitego odłączenia obciążenia, następuje samoczynne ograniczenie mocy wejściowej, co jest zdecydowaną korzyścią. Ponadto sieć *LCLC* charakteryzuje się szerszym zakresem tolerancji częstotliwości [39] przez co niewielkie zmiany parametrów pracy sprzęgu nie wpływają na pracę układu i możliwe jest utrzymanie stanu rezonansu elektrycznego. Dzięki zastosowaniu kondensatorów $C_1$ i $C_2$ równolegle połączonych z okładkami sprzęgu pojemnościowego możliwe jest wyeliminowanie mocy biernej zarówno po stronie nadajnika jak i odbiornika [14].

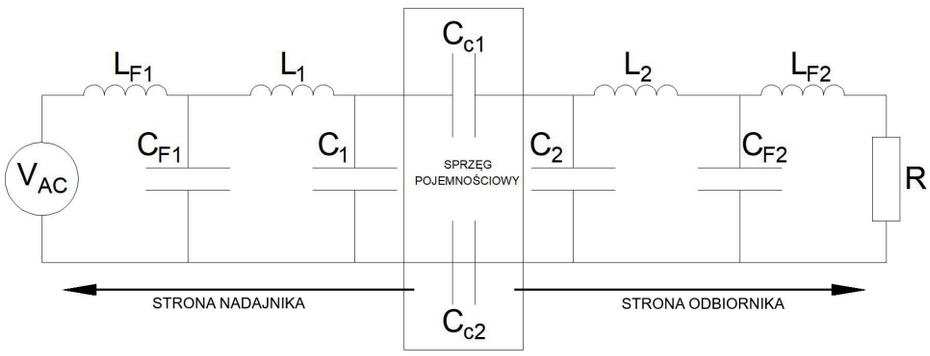
Oprócz bardziej skomplikowanej konstrukcji sieci, wadą *LCLC* jest nieliniowa charakterystyka sprawności w funkcji obciążenia [40] co prowadzi do obniżenia sprawności w przypadku pracy z obciążeniem niższym niż znamionowe. Ponadto układy pracujące z sieciami *LCLC* wykazują dużą wrażliwość na niedopasowanie geometryczne okładek [37].

### *Sieć dopasowująca typu „CLLC"*

Ostatnią z omawianych sieci dopasowujących jest sieć typu *CLLC* (rys.7). Badania układów z siecią *LCLC* potwierdziły niską sprawność układów CPT podczas pracy z dużą rezystancją odbiornika (niskie obciążenie) oraz trudności w utrzymywaniu stabilnej pracy przy nagłych i skokowych zmianach obciążenia *R* [43]. Ponieważ układy CPT są narażone na pracę w nieoptymalnych warunkach wynikających ze sposobu ich użytkowania koniecznym okazało się opracowanie układów o zwiększonej elastyczności, zachowujących wysoką sprawność w jak najszerszym

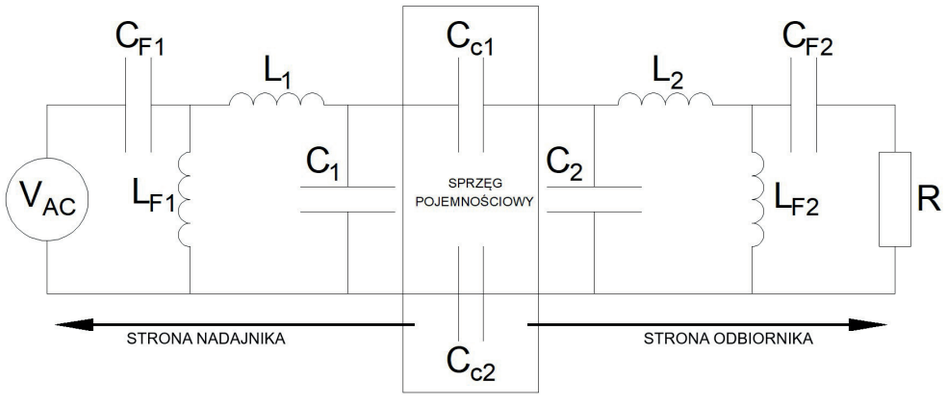



Rys.5. Schemat układu CPT z siecią dopasowującą typu LCL po stronie nadajnika i odbiornika




Rys.6. Schemat układu CPT z siecią dopasowującą typu *LCLC* po stronie nadajnika i odbiornika

zakresie obciążeń. Propozycją rozwiązania problemów są sieci dopasowujące *CLLC*, których cechą charakterystyczną jest liniowa charakterystyka sprawności w funkcji obciążenia [40]. Dzięki temu zachowano wysoką sprawność CPT przy pracy w szerokim zakresie zmian obciążenia. Ponadto indukcyjność cewek sieci *CLLC* jest mniejsza w porównaniu z *LCLC*.




Rys.7. Schemat układu CPT z siecią dopasowującą typu CLLC po stronie nadajnika i odbiornika stronie nadajnika i odbiornika

Ze wszystkich wyżej wymienionych rodzajów sieci dopasowujących, najczęściej stosowane są sieci typu *LCLC* oraz *CLLC* [41] ze względu na zdolność do przesyłania względnie dużych mocy (rzędu kilku kW), co jest aktualnie koniecznością w układach bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej. Powyższe zestawienie przedstawia jedynie podstawowe rodzaje sieci dopasowujących zakładając ich symetryczne zastosowanie po stronie nadajnika oraz odbiornika. W rzeczywistości często spotyka się układy pracujące przy wykorzystaniu innych topologii lub sieci mieszanych np.: *LCL-L* [44], *CLCL* [45], *LC-CLC* [46], *CLC* [47]. Jak wspomniano na początku rozdziału, każda z topologii sieci dopasowującej wykazuje inną charakterystykę pracy dzięki czemu możliwe jest dopasowanie parametrów układu CPT do warunków pracy. Niemożliwym jest określenie jednego typu sieci mianem najlepszego ponieważ zastosowanie danego rodzaju sieci dopasowującej w układzie CPT podyktowane jest założeniami projektowymi układu i powinno maksymalizować sprawność przesyłu energii droga bezprzewodową w danych warunkach pracy.

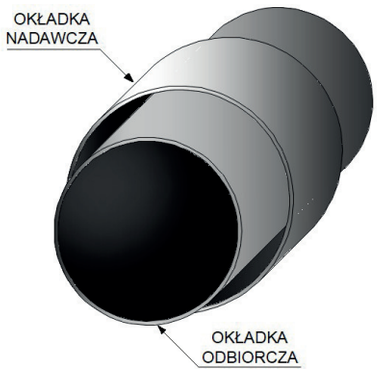
## Przegląd realizacji praktycznych układów CPT

W rozdziale zamieszczono opisy kilku rzeczywistych układów CPT, które zostały skonstruowane w warunkach laboratoryjnych. Wybór układów podyktowany był nieoczywistym sposobem wykorzystania, zdolnością do przesyłu wysokich mocy lub wysoką sprawnością.

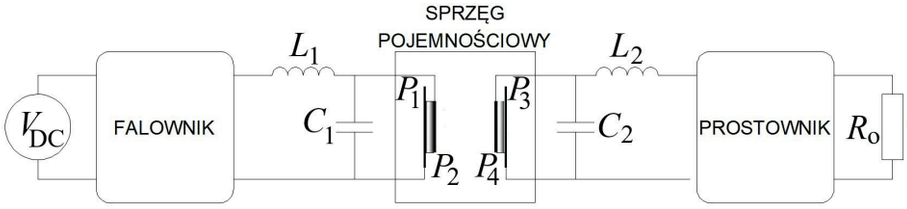
### *Pojemnościowy przesył energii w układach obrotowych*

Jednym z ciekawszych zastosowań jest implementacja CPT w układach charakteryzujących się ruchem obrotowym podczas pracy. Najczęściej układy obrotowe są projektowane z myślą o wykorzystaniu w autonomicznych łodziach, a zatem są przystosowane do pracy pod powierzchnią wody. Przykładowymi aplikacjami tego typu mogą być układy zaproponowane w [48, 49]:

Omawiany układ zbudowano z 4 walcowych okładek (2 pary) tworzących sprzęg pojemnościowy. Okładki odbiornika cechowały się mniejszą średnica i były umieszczone wewnątrz okładek nadawczych. Pomiędzy okładkami umieszczono 5 milimetrową warstwę Polimetakrylanu Metylu zapewniając wymagana wytrzymałość dielektryczną. Zaletą powyższego układu jest zdolność do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej zarówno przy ruchu obrotowym jak i wzdłużnym. Układ elektryczny (rys.9) został skonstruowany w oparciu o falownik półmostkowy




Rys.8. Rysunek geometrii pary okładek układu obrotowego [48]




Rys.9. Schemat elektryczny obwodu głównego układu CPT [48]

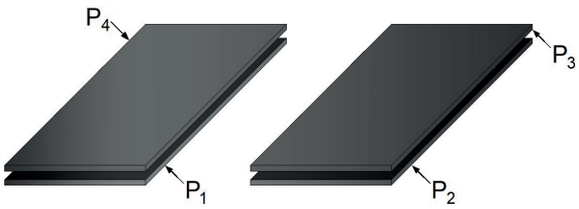
zbudowany z tranzystorów SiC MOSFET pracujący z częstotliwością około 700 kHz. W takiej konfiguracji układ był zdolny do przesyłania 100,8 W ze sprawnością 85,3%.

Rozwinięciem powyższego jest układ zaproponowany w [49]. Za sprawą m.in. podniesienia częstotliwości pracy do 2,5 MHz oraz napięcia okładek do 3.32 kV układ o bliźniaczej konstrukcji cechował się zdolnością do przesyłania 3,55 kW ze sprawnością 94,2%.

### *Pojemnościowy przesył energii w układach płaskich*

Obecnie w literaturze najczęściej spotykanymi obwodami CPT są układy wyposażone w 4 lub 6 płaskich okładek ułożonych w sposób wertykalny lub horyzontalny. W większości przypadków badania dotyczą rozwoju CPT pod kątem ładowania samochodów elektrycznych.

Pierwszym przykładem płaskiego układu CPT może być system zaproponowany w [13]. Przedstawiony układ zbudowano w oparciu o 4 kwadratowe okładki o długości boków 610 mm. Para okładek $P_1$ i $P_2$ znajduje się w gruncie podczas gdy para okładek $P_3$ i $P_4$ jest umieszczona pod karoserią pojazdu. Separacja powietrzna między okładkami nadawczymi a odbiorczymi wynosiła 150 mm.

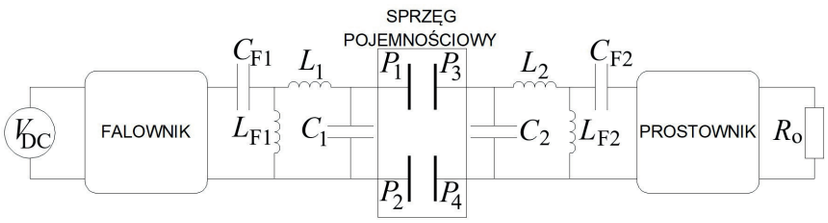



Rys.10. Rysunek geometrii 4 okładek płaskiego układu CPT [13]

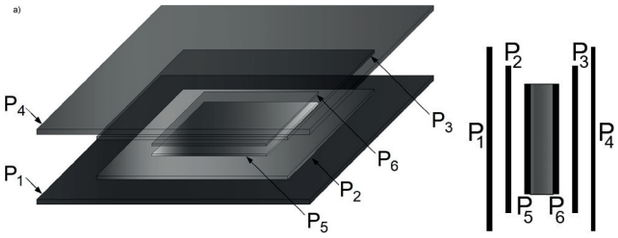
Część elektryczna powyższego układu składała się z falownika wykonanego z tranzystorów SiC MOSFET w układzie pełnego mostka, sieci dopasowującej typu *CLLC* oraz prostownika i obciążenia w postaci rezystora. Układ CPT pracował z częstotliwością 1 MHz przy napięciu zasilającym $V_{DC}$ równym 400 V. Układ był zdolny do przesłania 2,57 kW ze sprawnością 89,3%. Warto zaznaczyć, że zastosowanie sieci dopasowującej typu *CLLC* pozwoliło na zachowanie wysokiej sprawności pomimo przesunięcia osiowego pary okładek odbiorczych względem nadawczych. Badania sprawności przeprowadzono przy niedopasowaniu osiowym okładek odbiornika o 15 oraz 30 cm dla obciążenia od 0 do 2 kW. Układ był zdolny do przesłania 1,5 kW ze sprawnością 86% przy przesunięciu 30 cm oraz 2 kW ze sprawnością 88% przy przesunięciu 15 cm.

Kolejnym przykładem płaskiego systemu CPT może być układ skonstruowany w oparciu o 6 kwadratowych okładek ustawionych w sposób wertykalny symulując w ten sposób model bezprzewodowego złącza zamontowanego w gruncie do którego przyłączony jest pojazd na zasadzie zazębiania się okładek [11].

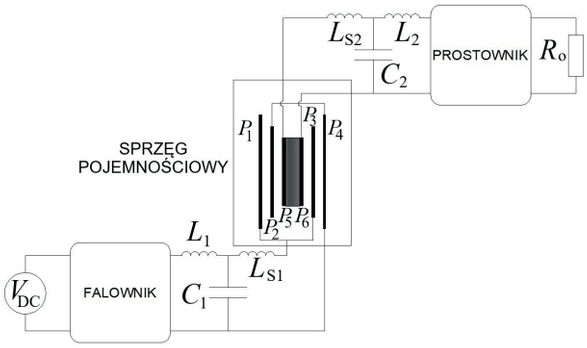
Wielkość okładek została dobrana na podstawie opracowanej w [11] zależności mającej na celu maksymalizację sprawności, zdolności do przesyłania mocy oraz zapobieganiu nadmiernej emisji pola elektrycznego wokół układu. Wielkość okładek była uzależniona od rozmiaru okładek nadawczych $P_1$ oraz $P_4$, których długość boku wynosiła 500 mm. Następnie wyznaczono długości boków okładek pomocniczych $P_2$ i $P_3$ – 400 mm oraz okładek po stronie odbiornika $P_5$ i $P_6$ – 320 mm. Okładki sprzęgu pojemnościowego zostały wykonane z aluminiowych płyt o grubości 2 mm.




Rys.11. Schemat elektryczny obwodu głównego układu CPT [13]




Rys.12. Rysunek ideowy geometrii 6 okładek płaskiego układu CPT; a) rzut izometryczny, b) przekrój poprzeczny [14]




Rys.13. Schemat elektryczny obwodu głównego układu CPT [14]

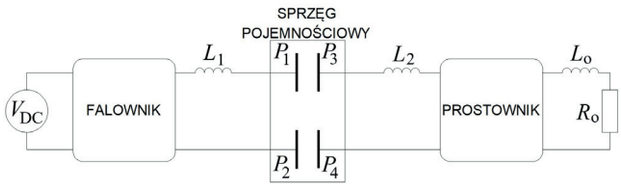
Strona nadawcza zasilana była z falownika w układzie pełnego mostka z tranzystorami GaN. Układ pracował przy użyciu sieci typu LCL z częstotliwością 1 MHz oraz napięciem zasilającym VDC równym 310 V. W takich warunkach pracy układ cechował się zdolnością do przesyłu 6,06 kW ze sprawnością 92,3%. Pomimo wysokiej sprawności i dużej przesyłanej mocy (jak na układy CPT) wadą tego rozwiązania jest konieczność precyzyjnego umieszczenia pojazdu nad okładkami nadawczymi aby zapewnić poprawną pracę sprzęgu pojemnościowego. Ponadto układ zapewnia ładowanie pojazdu jedynie podczas postoju.

Zastosowanie układu zbudowanego z 6 okładek pozwoliło na wykonanie ekranowania pola elektrycznego. Dozwolona emisja pola elektrycznego na podstawie standardu IEEE [30] dla częstotliwości 1 MHz nie może przekroczyć 614 V/m. Opublikowane w [11] wyniki symulacji ANSYS wskazują na znaczne zredukowanie emisji pola elektrycznego wokół sprzęgu pojemnościowego, a bezpieczne dla człowieka wartości uzyskiwane są w odległości 0,5 m od okładek. Zważywszy na fakt, że pole elektryczne między okładkami sprzęgu osiąga szczytowa wartość 2,4 kV/m jest to bardzo dobry rezultat.

### *Układy CPT w innych zastosowaniach*

Ze względu na cechy charakterystyczne CPT w literaturze spotyka się wiele odmian podstawowych układów. Niektóre z prowadzonych badań dotyczą dostosowania układów CPT do specyficznych wymagań projektowych [52], [53]. W tym podrozdziale przedstawiono przykłady nietypowych zastosowań układów CPT w celu zobrazowania drzemiącego potencjału do dalszego rozwoju.

Pierwszym omawianym systemem CPT jest układ zaimplementowany wewnątrz silnika synchronicznego [50], który nie jest odpowiedzialny bezpośrednio za przesyłanie mocy a pełni rolę obwodu wzbudzenia uzwojeń wirnika.

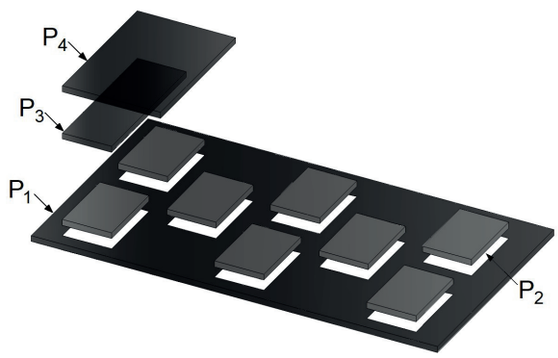



Rys.14. Schemat elektryczny obwodu głównego CPT [50]

Zaletą takiego zastosowania jest możliwość eliminacji mechanicznych połączeń ślizgowych tradycyjnego silnika synchronicznego. Układ CPT zrealizowano przy pomocy 4 cylindrycznych okładek wewnątrz stojana silnika oraz na zewnętrznej powierzchni wirnika.

Za zasilanie układu odpowiedzialny był falownik w układzie pełnego mostka pracujący z częstotliwością 2 MHz przy napięciu zasilania $V_{DC}$ około 33 V. Ze względu na niewielkie obciążenie układu zastosowano prostą sieć dopasowującą typu *L*. W takich warunkach pracy układ cechował się zdolnością do przesłania 64 W przy sprawności 81,3% oraz pozwalał na prawidłową pracę silnika synchronicznego. Szczytowe napięcie między okładkami wynosiło 480 *V*.

Kolejnym nietypowym zastosowaniem układu CPT jest system przeznaczony do ładowania małych urządzeń mobilnych. Zaproponowany w [51] układ cechował się dużą swobodą w umieszczeniu ładowanego urządzenia na przygotowanym polu strony nadawczej o wymiarach 480 mm na 290 mm składającym się z sieci wielu okładek. Taka konstrukcja niweluje ograniczenie zachowania wzajemnej symetrii strony nadawczej i odbiorczej oraz zapewnia bezprzewodowy przesył energii niezależnie od położenia odbiornika.




Rys.15. Rysunek geometrii wielookładkowego układu CPT [51]

Za zasilanie układu, w zależności od częstotliwości pracy, był odpowiedzialny falownik w układzie pełnego mostka skonstruowanego przy użyciu tranzystorów SiC MOSFET (dla częstotliwości 1 MHz), oraz zasilacz laboratoryjny AG1016 (dla częstotliwości 2,17 MHz i 3,45 MHz). Podobnie jak w poprzednim przypadku układ pracował przy użyciu sieci dopasowującej typu *L*. Ze względu na taką samą liczbę okładek oraz ten sam typ sieci dopasowującej schemat elektryczny omawianego układu jest taki sam jak w poprzednim przypadku (rys.14).

W trakcie badań napięcie zasilające układ ulegało zmianom w taki sposób aby zachować bezprzewodowy przesył mocy na poziomie 5 W dla częstotliwości 1 MHz oraz 15 W dla częstotliwości 2,17 MHz i 3,45 MHz. Pomiary przesyłanej mocy były wykonywane dla różnych położeń okładek odbiornika nad polem nadawczym. W takich warunkach pracy układ utrzymywał zadane moce bezprzewodowego przesyłu energii ze sprawnością w zakresie 52–56% dla częstotliwości 1 MHz, 60–66% dla częstotliwości 2,17 MHz oraz 52–58% dla częstotliwości 3,45 MHz.

## Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule układy wskazują na rosnące zainteresowanie technologią CPT. Głównymi zaletami układów CPT są: niewielka wrażliwość na obiekty metalowe oraz znacznie zredukowany koszt wykonania sprzęgu pojemnościowego w porównaniu do układów IPT. Dzięki temu technologia CPT jest chętnie rozwijana pod kątem szerszych zastosowań w przemyśle i motoryzacji. W ciągu ostatnich lat badań można zaobserwować przyrost przesyłanej mocy w układach CPT z rzędu setek watów do kilku kilowatów przy jednoczesnym zwiększeniu sprawności. Dzięki możliwości wykonania sprzęgu pojemnościowego z bardzo cienkich okładek możliwa jest implementacja tej technologii w niewielkich przestrzeniach, które są niewystarczające dla układów przesyłu indukcyjnego IPT.

Wadą CPT jest ograniczona moc przesyłanej energii w porównaniu do układów IPT oraz silna emisja pola elektrycznego, która w wielu przypadkach znacząco przekracza normy bezpieczeństwa określone dla ludzi i zwierząt [30]. Można jednak zaobserwować, że aktualnie prowadzone badania emisji pola elektrycznego w układach CPT [11] wskazują na bardzo dobre wyniki w zakresie ekranowania układów CPT co pozwala na ograniczenie emisji pola występującego wokół sprzęgu do wartości bezpiecznych. Podobnie jak w układach IPT technologia CPT boryka się z problematyką geometrycznego dopasowania strony nadawczej i odbiorczej układu jednak badania prowadzone w kierunku opracowania układów adaptacyjnych do ułożenia okładek [51] wskazują na potencjał do opracowania systemów pracujących przy zmiennej geometrii. Ponadto ze względu na silną korelację pojemności wypadkowej sprzęgu z geometrią układu konieczne jest wykonywanie elementów sieci dopasowujących skorelowanych z precyzyjnymi założeniami projektowymi. Na podstawie aktualnych badań można zauważyć, że elementy bierne sieci dopasowujących odpowiadają za niemal 50% strat energii w układach CPT [11, 44, 49]. Ponadto nadal wymaganym jest rozwinięcie teoretycznej analizy wyznaczania pojemności zastępczej sprzęgu, która stanowi trudne zagadnienie ze względu na mnogość pojemności pasożytniczych.

Dalsze badania układów CPT będą prowadzić do przeprowadzenia symulacji ANSYS układu CPT oraz zbudowania rzeczywistego modelu laboratoryjnego. Badania pozwolą na oszacowanie pojemności sprzęgających i pasożytniczych oraz przeprowadzenie optymalizacji geometrii okładek pod kątem optymalnej pracy układu.

**Przyjęto**: 03.06.2025, **zaakceptowano**: 13.08.2025, **opublikowano**: 29.08.2025

## LITERATURA

[1] Kim C., Seo D., You J., Park J., Cho B. H., Design of a contactless battery charger for cellular phone, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, No. 6, 2001), 1238–1247

[2] Raabe S., Covic G. A., Practical Design Considerations for Contactless Power Transfer Quadrature Pick-Ups, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, No. 1, 2013), 400–409

[3] Deja P., Hylla P., Polnik B., Skóra M., Niedworok A., Nowe rozwiązanie akumulatorowego układu zasilającego dla samojezdnych wozów strzelniczych, *KOMTECH – Innowacyjne Techniki i Technologie w Dobie Zielonej Transformacji, Instytut Techniki Górniczej KOMAG*, 2021, 82–88

[4] Kaczmarczyk K., Suffner H., Dobrzaniecki P., Polnik B., Budzyński Z., Heliński M., Podwieszony ciągnik akumulatorowy PCA-1 kierunkiem rozwoju nowoczesnych urządzeń transportowych, *KOMTECH – Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa, Instytut Techniki Górniczej KOMAG,* 2011, 253–260

[5] Mróz J., Skupień K., Drwięga A., Budzyński Z., Polnik B., et al., „Gentle accumulator drive (GAD) – new directions of development for the mining industry", *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 6, 2013, 205–209

[6] Moore P., eDumper battery electric haul truck developer eMining acquired by Lithium System AG from partner Kuhn Schweiz

[7] "Battery-Electric Zero Emission 10-tonne LHD", Available online: https://artisanvehicles.com/a10
[8] Skóra M., Hylla P., Kaczmarczyk Z., Kasprzak M., Kierepka K., Przybyła K., Wireless capacitive energy transfer system – preliminary results, *IEEE Trans. on Power Electronics and Motion Control Conference*, 2022
[9] Jegadeesan R., Guo Y. X., Je M., Electric near-field coupling for wireless power transfer in biomedical applications, *Proc. IEEE Int. Microw. Workshop Ser. Biomed. Healthcare Appl.,* 2013
[10] Sinha S., Kumar A., Regensburger B., Afridi K. K., A New Design Approach to Mitigating the Effect of Parasitics in Capacitive Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle Charging, *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, No. 4, 2019, 1040–1059
[11] Kodeeswaran S., Gayathri M. N., Kannabhiran A., Williamson S. S., Design of a Static Capacitive Power Transfer System With Six-Plate Coupler for Electric Vehicle Wireless Charging, *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, No. 2, 2024, 3927–3939
[12] Maji S., Sinha S., Regensburger B., Monticone F., Afridi K. K., Reduced-Fringing-Field Multi-MHz Capacitive Wireless Power Transfer System Utilizing a Metasurface-based Coupler, *Department of Electrical and Computer Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, USA*
[13] Lu F., Zhang H., Hofmann H., Mi C., A CLLC-compensated high power and large air-gap capacitive power transfer system for electric vehicle charging applications, *IEEE Trans. on Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2016, 1721–1725
[14] Lu F., Zhang H., Hofmann H., Mi C., A Double-Sided LCLC--Compensated Capacitive Power Transfer System for Electric Vehicle Charging, *IEEE Trans. on Power Electronics*, No. 11, 2015), 6011–6014
[15] Zhang H., Lu F., Hofmann H., Liu W., Mi C. C., A Four-Plate Compact Capacitive Coupler Design and LCL-Compensated Topology for Capacitive Power Transfer in Electric Vehicle Charging Application, *IEEE Trans. on Power Electronics*, No. 12, 2016, 8541–8551
[16] Maji S., Sinha S., Afridi K. K., Roadway Embeddable Multi-MHz Capacitive Wireless Charging System with Matching Network Realized using Wiring Parasitics, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2021
[17] Etta D., Maji S., Hou Y., Afridi K. K., Stacked Inverter Architecture for High-Frequency Capacitive Wireless Power Transfer Systems, *IEEE 24th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2023
[18] Nikiforidis I., et al., A 3 kW 3.39 MHz DC/DC Inductive Power Transfer System with Power Combining Converters, *IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE)*, 2023, 1–6
[19] Chang Y., et al., Seamless Capacitive Body Channel Wireless Power Transmission Toward Freely Moving Multiple Animals in an Animal Cage, *IEEE Trans. on Biomedical Circuits and Systems*, No. 4, 2022, 714–725
[20] Obayashi S., Kanekiyo Y., Shijo T., UAV/Drone Fast Wireless Charging FRP Frustum Port for 85-kHz 50-V 10-A Inductive Power Transfer, *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, 2020, 219–222
[21] Park J., Choi H.-G., Sung M., Ha J.-I., Design and Implementation of Bi-directional Inductive Wireless Power Transfer for Elevator System, *10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 – ECCE Asia)*, 2019, 2246–2251
[22] Liu C., Liu X., Inductive Power Transfer System with Automatic Control, *2019 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, 2019, 383–386
[23] Budak A., Durna E., Performance Evaluation of Inductive Wireless Power Transfer for High-Speed Non-Contact Slip Ring Applications, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2022, 500–504
[24] Kim J. H., et al., Development of 1-MW Inductive Power Transfer System for a High-Speed Train, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, No. 10, 2015, 6242–6250
[25] Nikiforidis I., et al., A 3 kW 3.39 MHz DC/DC Inductive Power Transfer System with Power Combining Converters, *IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE)*, 2023, 1–6
[26] Hasaba R., et al., A Highly Efficient and High Degree of Freedom of Position kW-class Wireless Power Transfer System in Seawater for Small AUVs, *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, 2021, 1–4
[27] Yi K. H., High frequency capacitive coupling wireless power transfer using glass dielectric layers, *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, 2016, 1–3
[28] Zhou W., Su Y.-G., Huang L., Qing X.-D., Hu A. P., Wireless Power Transfer Across a Metal Barrier by Combined Capacitive and Inductive Coupling, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, No.14, (2019), 4031–4041
[29] Mu X., Li J., Sheng Q., Capacitive wireless power transfer isolated by metal mesh barriers, *IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, 2022, 385–390
[30] Bailey W. H., et al., Synopsis of IEEE Std C95.1TM-2019 'IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz, ' *IEEE Access*, No. 7, 2019, 171346–171356
[31] Xin D., Min S., Generalized Hamiltonian Energy Modeling Method for Wireless Power Transfer System, *8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 2020, 1–5
[32] Wu Y., Chen Q., Yin J., Ren X., Zhang Z., High power density capacitive coupler for the capacitive power transfer system in the miniaturized rotary application, *CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021*
[33] Rong E., Sun P., Qiao K., Zhang X., Yang G., Wu X., Six-Plate and Hybrid-Dielectric Capacitive Coupler for Underwater Wireless Power Transfer, *IEEE Trans. on Power Electronics*, No. 2, 2024), 2867–2881
[34] Lu F., Zhang H., Mi C., A Two-Plate Capacitive Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Charging Applications, *IEEE Trans. on Power Electronics*, No. 2, 2018), 964–969
[35] Barbruni G. L., Ros P. M., Demarchi D., Carrara S., Ghezzi D., Miniaturised Wireless Power Transfer Systems for Neurostimulation: A Review, *IEEE Trans. on Biomedical Circuits and Systems*, No.6, 2020), 1160–1178
[36] Dai J., Hagen S., Ludois D. C., Brown I. P., Synchronous Generator Brushless Field Excitation and Voltage Regulation via Capacitive Coupling Through Journal Bearings, *IEEE Trans. on Industry Applications*, No. 4, 2017), 3317–3326
[37] AL-SAADI M., Hussien E. A., AHMED S., CRACIUNESCU A., Comparative Study of Compensation Circuit Topologies in 6.6kW Capacitive Power Transfer System, *11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2019, 1–6
[38] Lu F., Zhang H., Hofmann H., Mi C. C., A Double-Sided LC--Compensation Circuit for Loosely Coupled Capacitive Power Transfer, *IEEE Trans. on Power Electronics*, No. 2, 2018, 1633–1643
[39] Gao F., Wang Z., Deng J., Wang S., Wang Y., A Comparison Study of Compensation Topologies for Capacitive Power Transfer, *IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2019, 691–696
[40] Wang Y., Yang Y., A Comparative Review on the Development of High-Frequency and High-Power Capacitive Power Transfer

Technology, *10th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 2024, 1–9
[41] Erel M. Z., Bayindir K. C., Aydemir M. T., Chaudhary S. K., Guerrero J. M., A Comprehensive Review on Wireless Capacitive Power Transfer Technology: Fundamentals and Applications, *IEEE Access*, No. 10, 2022, 3116–3143
[42] Zhang H., Zhu C., Zheng S., Mei Y., Lu F., High Power Capacitive Power Transfer for Electric Aircraft Charging Application, *IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, 2019, 36–40
[43] Reatti A., Musumeci S., Corti F., Frequency Analysis and Comparison of LCCL and CLLC Compensations for Capacitive Wireless Power Transfer, *AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*, 2020, 1–6
[44] Vu V.-B., Dahidah M., Pickert V., Phan V.-T., An Improved LCL-L Compensation Topology for Capacitive Power Transfer in Electric Vehicle Charging, *IEEE Access*, No. 8, 2020, 27757–27768
[45] Zou L. J., Hu A. P., Su Y.-G., A single-wire capacitive power transfer system with large coupling alignment tolerance, *IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, 2017, 93–98
[46] Luo B., Mai R., Guo L., Wu D., He Z., LC-CLC compensation topology for capacitive power transfer system to improve misalignment performance, *IET Power Electronics*, No. 12, 2019), 2626–2633
[47] Wang Y., Zhang H., Cao Y., Lu F., Remaining Opportunities in Capacitive Power Transfer Based on Duality With Inductive Power Transfer, *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, No. 9, 2023, 2902–2915
[48] Wu X.-Y., Su Y.-G., Hu A. P., Zou L. J., Liu Z., A Sleeve-Type Capacitive Power Transfer System With Different Coupling Arrangements for Rotary Application, *IEEE Access*, No. 8, 2020, 69148–69159
[49] Wang Y., Zhang H., Lu F., 3.5-kW 94.2% DC–DC Efficiency Capacitive Power Transfer With Zero Reactive Power Circulating, *IEEE Trans. on Power Electronics*, No. 38, 2023), 1479–1484
[50] Savio S., Hassan Gillani S. M., Pratik U., Chattopadhyay R., Husain I., Pantic Z., An Integrated Capacitive Power Transfer System for Field Excitation of Wound Field Synchronous Machine, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2023, 829–835
[51] Zhu J.-Q., et al., A Novel Capacitive Coupler Array With Free--Positioning Feature for Mobile Tablet Applications, *IEEE Trans. on Power Electronics*, No. 7, 2019, 6014–6019
[52] Hou Y., Afridi K., Design of A 27.12MHz Ultra-Compact High--Performance Capacitive Wireless Power Transfer System Using Stacked Inverter Architecture, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2024, 2864–2869
[53] Etta D., Maji S., Hou Y., Afridi K. K., Stacked Inverter Architecture for High-Frequency Capacitive Wireless Power Transfer Systems, *IEEE 24th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2023, 1–6