

Realizacja systemu bezprzewodowego przesyła energii na zasadzie sprzężenia pojemnościowego

Streszczenie. Artykuł dotyczy projektu, opracowania i analizy właściwości prototypu systemu bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej na zasadzie sprzężenia pojemnościowego. System przeznaczony jest do ciągłego doładowywania podwieszanej kolejki górniczej. W jego skład wchodzi: falownik rezonansowy, obwody dopasowujące strony pierwotnej i wtórnej, odpowiedni sprzęg pojemnościowy oraz prostownik z obciążeniem – docelowo ładowarka baterii mobilnego zasobnika energii. Zapewniono pożądane napięcie wyjściowe (330 V) i moc wyjściową (2 kW) przy częstości pracy 300 kHz, uzyskując sprawność całkowitą 88% oraz nie przekraczając poziomu 3 kV przez napięcia skuteczne na elementach biernych.

Abstract. The article deals with the design, development and analysis of the properties of a prototype of a wireless power transfer system based on capacitive coupling. The system is designed for continuous charging of the suspended mining railway. It consists of: a resonant inverter, primary and secondary matching circuits, a suitable capacitive coupler and a rectifier with a load – ultimately a battery charger for a mobile energy storage device. The desired output voltage of 330 V and the output power of 2 kW at the operating frequency of 300 kHz were obtained, achieving a total efficiency of 88% and not exceeding the level of 3 kV by RMS voltages on passive components. (**Implementation of a wireless energy transfer system based on capacitive coupling.**)

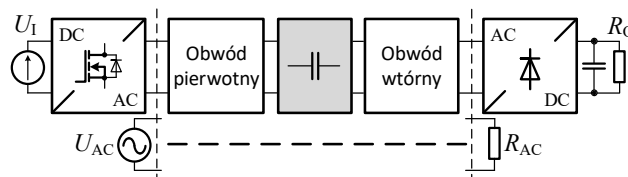
Słowa kluczowe: obwody rezonansowe, bezprzewodowy przesył energii, sprzężenie pojemnościowe, projektowanie i pomiary.
Keywords: resonant circuits, wireless energy transfer, capacitive coupling, design and measurements.

Wstęp

Współcześnie rozwiązania wykorzystujące bezprzewodowy przesył energii elektrycznej (z ang. WET – wireless energy transfer) stosowane są coraz powszechniej ze względu na swe liczne zalety. Równolegle prowadzone są badania nad ich ulepszeniem i poszerzeniem zakresu zastosowań. Najbardziej rozpowszechnione i efektywne systemy tego typu bazują na sprzężeniu za pośrednictwem pola magnetycznego lub elektrycznego, realizując odpowiednio bezprzewodowy przesył indukcyjny lub pojemnościowy [1]. Do zalet tego ostatniego należą m.in.: eliminacja prądów wirowych i możliwość pracy w sąsiedztwie obiektów metalowych, wykorzystanie tanich i nieskomplikowanych elektrod metalowych, ograniczenie poziomu EMI w przypadku przesyłu na krótkich dystansach oraz możliwość prostego zasilania wielu odbiorników. Z kolei po stronie wad zwykle występuje mała pojemność sprzęgająca – duża impedancja. Dlatego koniecznym jest podwyższenie częstości pracy w celu ograniczenia poziomów występujących napięć. Przykładami zastosowań bezprzewodowego zasilania pojemnościowego są urządzenia biomedyczne [2], elektronika użytkowa [3], roboty mobilne [4] oraz statyczne i dynamiczne ładowanie pojazdów elektrycznych [5]-[10].

Tematyka niniejszego artykułu dotyczy systemu bezprzewodowego przesyłu energii działającego na zasadzie sprzężenia pojemnościowego (z ang. C-WET – capacitive wireless energy transfer). Schemat takiego typowego systemu przedstawiono na rysunku 1, zaznaczając jednocześnie powszechnie stosowane uproszczenie toru przesyłu energii za pomocą metody pierwszej harmonicznej (z ang. FHA – first harmonic approximation). System tworzą: falownik rezonansowy, dopasowujące obwody pierwotny i wtórny, pomiędzy którymi znajduje się obwód zapewniający niezbędne sprzężenie pojemnościowe – sprzęg pojemnościowy. Ostatnim stopniem jest prostownik z filtrem pojemnościowym oraz obciążeniem. Przedstawiany system przeznaczony jest do statycznego i dynamicznego doładowania podwieszanej kolejki górniczej, zwiększając jej

czas pracy i efektywność. Może on zostać także wykorzystany do ciągłego zasilania innych odbiorników małej mocy związanych z komunikacją i pomiarami.



Rys. 1. Ogólny schemat systemu C-WET

W literaturze proponowanych jest wiele rozwiązań obwodów dopasowujących oraz różne struktury sprzęgu pojemnościowego. Obwody dopasowujące o charakterze rezonansowym filtrują i dostosowują poziom napięć i prądów. Stosowane są topologie o różnym kaskadowym połączeniu elementów biernych [5, 6, 9, 11, 12], przykładowo oznaczane jako LC, LCL, LCLC, CLLC. Obwody pierwotne i wtórne mogą być jednakowe lub tworzone są ich odpowiednie kombinacje. W rezultacie kształtowane mogą być właściwości całego systemu, takie jak poziom napięć i prądów, wzmacnienie, wyjściowy charakter jako źródła napięcia lub prądu oraz wpływ zmian sprzężenia pojemnościowego. Struktury sprzęgu pojemnościowego różnią się liczbą oraz wzajemnym, poziomym lub pionowym, usytuowaniem jego elektrod [5, 6, 7, 12]. Spotykane są rozwiązania z dwoma (użycie uziemienia jako połączenia), czterema (typowe dwa kondensatory) oraz sześcioma (dodatkowe ekranowanie lub powielanie) elektrodami.

Koncepcja zrealizowanego systemu C-WET bazuje na rozwiązaniu zaproponowanym w [9] oraz jest rozwinięciem systemu opracowanego w [13]. Nowum polega na końcowej korekcie parametrów obwodów dopasowujących typu LCL-L względem metody opisanej w [9] – wymagane warunki pracy prototypu systemu uzyskano poprzez zmianę pojemności dodatkowych kondensatorów regulowanych dołączonych na wejściu i wyjściu sprzęgu

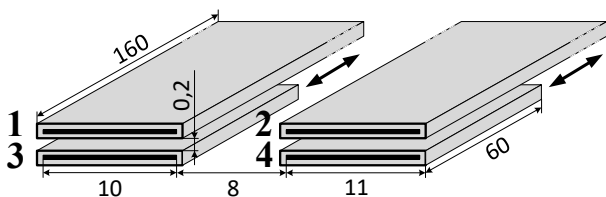
pojemnościowego. Elektrody pierwotne zostały odpowiednio zintegrowane z szyną nośną podwieszanej kolejki górniczej, natomiast elektrody wtórne dostosowano do poruszania się wraz z zasobnikiem energii. Zamieszczono wstępny etap testów laboratoryjnych prototypu systemu C-WET, dotyczący jedynie badań statycznych.

Sprzęg pojemnościowy

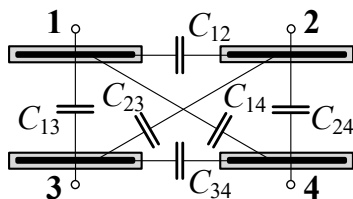
Opis systemu C-WET rozpoczęto od wyjaśnienia struktury i metody identyfikacji parametrów elektrycznych sprzęgu pojemnościowego, który w uproszczeniu zilustrowano na rysunku 2 – szczegóły uzupełniono w części laboratoryjnej. Składa się on z dwóch długich, nieruchomych, zasilanych elektrod pierwotnych 1 i 2 oraz dwóch krótkich, ruchomych, odbiorczych elektrod wtórnych 3 i 4. Elektrody wykonane są z taśmy miedzianej, otoczone nośną izolacją epoksydową oraz dodatkowo występuje szczelina powietrzna o wartości 2 mm. Elektrody pierwotne mogą być wydłużane poprzez dołączanie kolejnych, identycznych stopni.

Ważne dla zaprojektowania systemu jest wyznaczenie parametrów sprzęgu pojemnościowego. W tym celu zastosowano metodę eksperymentalną zaproponowaną w pracy [8]. Na rysunku 3 zaznaczono wszystkie pojemności międzyelektrodowe. Pojemności C_{12} , C_{34} , C_{14} , C_{23} można określić jako pasożytnicze, utrudniające realizację przesyłu energii. Z kolei pojemności C_{13} i C_{24} są głównymi pojemnościami między elektrodami pierwotnymi i wtórnymi. Należy wyjaśnić, że oprócz zaznaczonych pojemności występują również dodatkowe pojemności doziemne elektrod i innych podzespołów systemu, w tym falownika i prostownika. Ich występowanie może zmienić istotnie właściwości systemu, szczególnie w przypadku względnie długich elektrod. Zgodnie z analizą w [8] mogą one zostać całkowicie pominięte ze względu na przyjęcie symetrycznej konfiguracji poszczególnych obwodów dopasowujących i sprzęgu pojemnościowego (czyli: $C_{13} = C_{24}$, $C_{14} = C_{23}$). Pojemności międzyelektrodowe (rys. 3) mogą zostać wyrażone schematami równoważnymi (rys. 4), zgodnie z (1) [6] i [8]. Pierwszy schemat (rys. 4a) wykorzystywany jest w metodzie identyfikacji parametrów, natomiast drugi schemat (rys. 4b) stosowany jest w uproszczonej metodzie FHA.

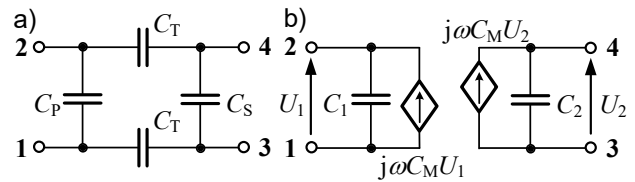
Metoda identyfikacji parametrów sprzęgu pojemnościowego ma kilka wariantów [8]. Niezbędne jest wykonanie przynajmniej trzech niezależnych pomiarów pojemności. Wybrane trzy układy pomiarowe zilustrowano na rysunku 5.



Rys. 2. Widok poglądowy zestawu elektrod tworzących sprzęg pojemnościowy (wymiarzy w centymetrach; brak skali)

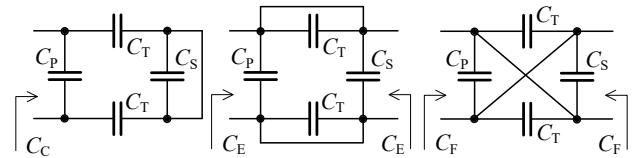


Rys. 3. Pojemności międzyelektrodowe



Rys. 4. Schematy sprzęgu pojemnościowego: a) uproszczony, b) uproszczony w metodzie FHA ($C_M = C_T/2$, $C_1 = C_P + C_T/2$, $C_2 = C_S + C_T/2$)

$$(1) \quad C_T = C_{13} - C_{14}, C_P = C_{12} + C_{14}, C_S = C_{34} + C_{14}$$



Rys. 5. Schematy stosowane w pomiarowej metodzie identyfikacji parametrów sprzęgu pojemnościowego

Tabela 1. Pojemności zmierzone zgodnie z rysunkiem 5

Pojemność	Wartość	Jednostka
C_C	367,0	pF
C_E	193,7	pF
C_F	942,2	pF

$$(2) \quad C_P = \frac{4 \cdot C_C + C_E - C_F}{4} \approx 180 \text{ pF}$$

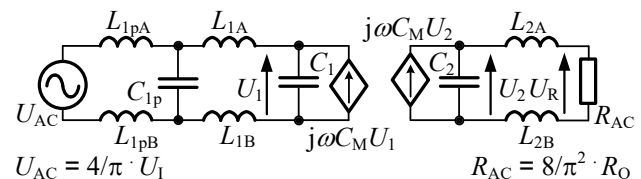
$$(3) \quad C_S = \frac{-4 \cdot C_C + 3 \cdot C_E + C_F}{4} \approx 14 \text{ pF}$$

$$(4) \quad C_T = \frac{-C_E + C_F}{2} \approx 374 \text{ pF}$$

Znając C_C , C_E , C_F , na podstawie (2)-(4), obliczane są parametry danego sprzęgu pojemnościowego. Zwiększając długość elektrod pierwotnych, rośnie pojemność C_P , a pozostałe pojemności C_T i C_S nie ulegają zmianie.

Metoda doboru parametrów obwodów dopasowujących

Jako obwody dopasowujące systemu C-WET wybrano konfigurację LCL-L (rys. 6), zaproponowaną w opracowaniu [9], przyjmując jednocześnie konfigurację symetryczną ($L_{1pA} = L_{1pB} = L_{1p}/2$, $L_{1A} = L_{1B} = L_1/2$, $L_{2A} = L_{2B} = L_2/2$). Cechuje się ona względną prostotą oraz w przybliżeniu stałym wzmocnieniem napięciowym – z punktu widzenia zmiennego obciążenia stanowi ona źródło napięcia. Dodatkowo, pogorszenie sprzężenia pojemnościowego (zmniejszenie C_M) powoduje proporcjonalne zmniejszenie napięcia wyjściowego. Metoda doboru parametrów obwodów LCL-L prowadzona jest metodą FHA i bazuje na adaptowanych zależnościach (5)-(9) z pracy [9]. Zależność (8) wynika z warunku zerowej fazy impedancji wejściowej, natomiast (9) wyraża wzmocnienie napięciowe. Upraszczając, przyjęto użycie jednakowych cewek L_1 i L_2 ($X_{L1} = X_{L2}$). Korzystając dodatkowo z zależności (6)-(8), uzyskano wyrażenie (10).



Rys. 6. Wykorzystany schemat o konfiguracji LCL-L [9]

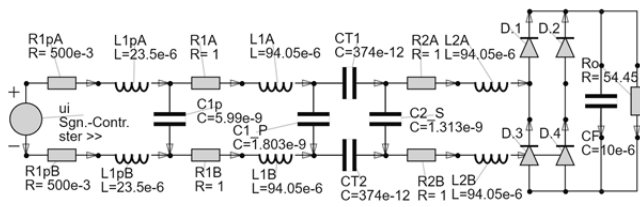
- (5) $X_{L1p} = X_{C1p}$
- (6) $X_{L1} / X_{C1p} = k \gg 1$
- (7) $X_{L2} = X_{C2}$
- (8) $X_{L1} = X_{C1} + X_{C1p}$
- (9) $\frac{U_R}{U_{AC}} \approx \frac{X_{L1} \cdot X_{L2}}{X_{CM} \cdot X_{L1p}} = \frac{X_{C2}}{X_M} \cdot k$
- (10) $X_{C1} = \frac{k-1}{k} \cdot X_{C2}$

Projekt obwodów LCL-L:

Założono: $f = 300 \text{ kHz}$ ($\omega = 2\pi f$); $X_{CM} = 2837 \ \Omega$ ($C_M = 187 \text{ pF}$); $U_{ON}/U_{IN} = U_R/U_{AC} = 330/770 = 0,43$ (przyjęto 0,5); $k = 4$.

Obliczono: $X_{C2} = 354,6 \ \Omega$ ($C_2 = 1,5 \text{ nF}$) – (9); $X_{C1} = 266 \ \Omega$ ($C_1 = 1,99 \text{ nF}$) – (10); $X_{L1} = X_{L2} = 354,6 \ \Omega$ ($L_1 = L_2 = 188,1 \ \mu\text{H}$) – (7); $X_{C1p} = 88,6 \ \Omega$ ($C_{1p} = 5,99 \text{ nF}$) – (6); $X_{L1p} = 88,6 \ \Omega$ ($L_{1p} = 47 \ \mu\text{H}$) – (5).

Częstotliwość pracy f została założona odgórnie. Jej zwiększenie zmniejszyłoby wymagane podzespoły oraz obniżyłoby występujące napięcia. Pojemność C_M ($C_M = C_T/2$) została wyznaczona na podstawie (4). Napięcie zasilania $U_{IN} = 770 \text{ V}$ i wyjściowe $U_{ON} = 330 \text{ V}$ określają przyjęte warunki znamionowe. Wzmocnienie napięciowe zostało wstępnie zawyżone ze względu na przyjęte uproszczenia. Wartość współczynnika k (6) została celowo zaniżona, aby zgodnie z (9) ograniczyć wymaganą pojemność C_2 . Zatem warunek (6) nie jest w pełni spełniony. Jednak jak wykazano dalej nie prowadzi to do zniszczenia przedstawianej koncepcji systemu C-WET. Należy wyjaśnić, że docelowy prototyp systemu opisany w części laboratoryjnej zawiera dodatkowe kondensatory dołączone równolegle do strony pierwotnej i wtórnej sprzęgu pojemnościowego. W szczególności kondensator C_{1-} (rys. 13) umożliwia właściwą kompensację zmian długości elektrod pierwotnych przy ich wydłużaniu lub skracaniu – towarzyszą temu zmiany pojemności C_p (rys. 4).

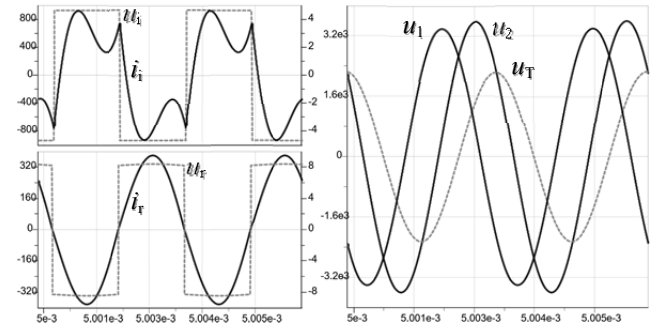


Rys. 7. Model symulacyjny systemu – GeckoCIRCUITS

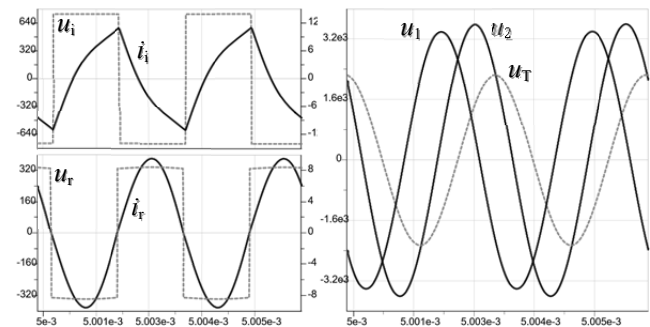
Symulacje systemu

Na podstawie opisanego wcześniej projektu obwodów LCL-L opracowano model symulacyjny (rys. 7). Ma on konfigurację symetryczną – odpowiednie pary podzespołów oznaczono indeksami A i B. Dodatkowo wprowadzono rezystory odzwierciedlające straty mocy w cewkach L_{1pA} , L_{1pB} , L_{1A} , L_{1B} , L_{2A} , L_{2B} . Rezystory R_{1pA} i R_{1pB} uwzględniają częściowo straty mocy falownika. Diody D_1 , D_2 , D_3 , D_4 mają rezystancję przewodzenia równą $400 \text{ m}\Omega$. Wszystkie pozostałe rezystancje dobrano w sposób przybliżony, aby uzyskać całkowitą sprawność energetyczna η na poziomie 86%. Zasilanie odbywa się ze źródła napięcia prostokątnego u_i o częstotliwości 300 kHz oraz amplitudzie równej napięciu zasilania U_i . Napięcie to odpowiednio korygowano w celu uzyskania znamionowego napięcia wyjściowego $U_{ON} = 330 \text{ V}$ – napięcie pracy docelowej ładowarki, doładowującej baterię mobilnego zasobnika energii. Założona znamionowa moc wyjściowa systemu P_{ON}

wynosi 2 kW , a stąd przyjęta znamionowa rezystancja obciążenia $R_{ON} = 54,45 \ \Omega$.



Rys. 8. Wyniki symulacji (u_i , i_i , u_r , i_r , u_1 , u_2 , u_T) dla parametrów projektowych (400V/div; 2A/div; 160V/div; 4A/div; 1,6kV/div)

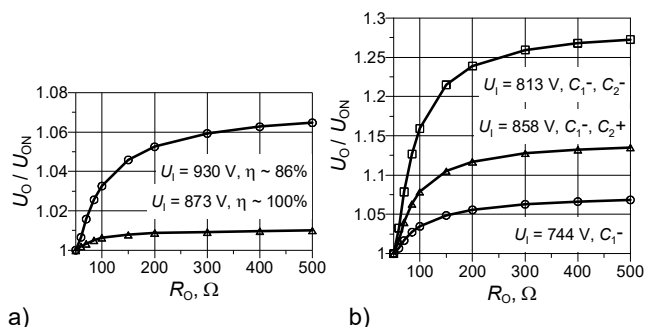


Rys. 9. Wyniki symulacji (u_i , i_i , u_r , i_r , u_1 , u_2 , u_T) dla $C_1 = 400 \text{ pF}$ (320V/div; 6A/div; 160V/div; 4A/div; 1,6kV/div)

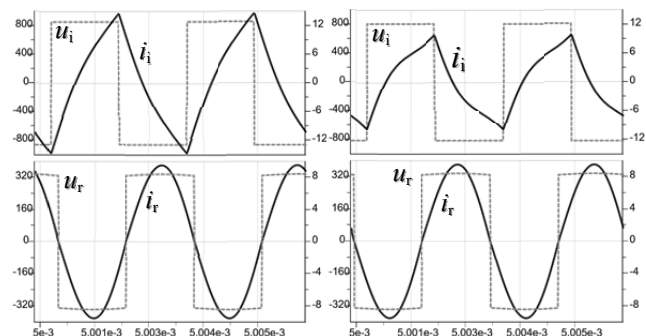
Pierwsze wyniki symulacji (rys. 8) ilustrują przypadek obliczonych parametrów projektowych obwodów LCL-L (rys. 7). Strzałkowanie napięć i prądów oznaczono na rysunku 13. Prąd falownika jest zauważalnie odkształcony. Amplitudy sinusoidalnych napięć sprzęgu pojemnościowego u_1 i u_2 przekraczają wartość $3,2 \text{ kV}$. Przypadkowi temu odpowiada obliczona charakterystyka sztywności napięcia wyjściowego (rys. 10a, $\eta \approx 86\%$). Dołączono do niej charakterystykę dla w przybliżeniu bezstratnego systemu ($\eta \approx 100\%$). Stanowią one wyjaśnienie głównej przyczyny podatności napięcia wyjściowego na zmiany rezystancji obciążenia. Uzyskana sztywność napięcia na poziomie 7% jest akceptowalna, przy czym napięcie zasilania (rys. 10a) przekracza wartość znamionową 770 V . Rozbieżność ta jest spowodowana uproszczonym projektowaniem metodą FHA oraz niezadawalającym spełnieniem warunku (6) – $k = 4$. Dlatego poniżej wyjaśniono propozycję korekty parametrów.

Okazuje się, że dla uzyskania pożądanego wzrostu wzmocnienia napięciowego, bez szkodliwego wpływu na sztywność napięcia, wystarczające jest jedynie zmniejszenie pojemności C_1 . Przypadek zmniejszenia pojemności C_1 o 400 pF ilustruje rysunek 9. Widoczny jest wzrost prądu falownika bez istotnego pogorszenia sprawności systemu – źródłem dominujących strat mocy są cewki L_1 i L_2 . Sztywność napięcia wyjściowego (rys. 10b, C_1 -) została zachowana na takim samym poziomie, natomiast w rezultacie wzrostu wzmocnienia obniżyło się wymagane napięcie zasilania $U_1 = 744 \text{ V}$. Oznacza to, że napięcie wyjściowe może być prosto dostosowane przez korektę pojemności C_1 i możliwe jest skonstruowanie systemu o pożądanym parametrach. Ostatnie dwa przypadki służą potwierdzeniu, że wystarczającym warunkiem dla zapewnienia wymaganej sztywności napięcia wyjściowego systemu jest zachowanie przeciwfazy napięć prostokątnych falownika i prostownika.

Warunek ten był dotychczas spełniony (rys. 8 i 9). Dokonano zwiększenia i następnie zmniejszenia o 100 pF pojemności C_2 (rys. 11), zachowując wcześniej zmniejszoną o 400 pF pojemność C_1 . Widoczna jest zmiana przesunięcia pomiędzy napięciami falownika i prostownika (rys. 11). Towarzyszy temu pogorszenie się sztywności napięcia wyjściowego (rys. 10b, C_{1-} , C_{2+} oraz C_{1-} , C_{2-}). Występuje również spadek wzmocnienia napięciowego – wzrost napięcia zasilania $U_1 = 858$ i 818 V. Kontrola fazy pomiędzy napięciami falownika i prostownika możliwa jest poprzez korektę pojemności C_2 , zapewniając pożądaną sztywność napięcia wyjściowego.



Rys. 10. Charakterystyki względnego napięcia wyjściowego dla parametrów projektowych (a), po zmianach C_1 i C_2 (b)



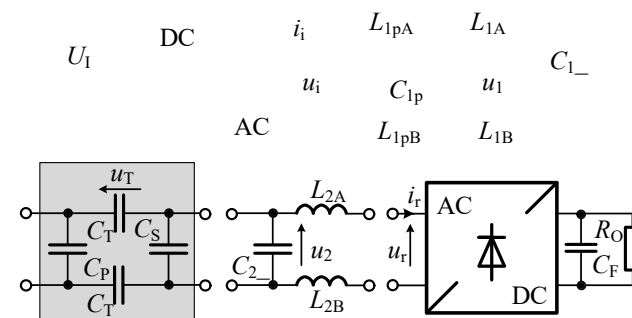
Rys. 11. Wyniki symulacji (u_i, i_i, u_r, i_r) odpowiednio dla $C_1 - 400$ pF i $C_2 + 100$ pF oraz $C_1 - 400$ pF i $C_2 - 100$ pF (400V/div; 6A/div; 160V/div; 4 A/div; 1,6kV/div)

Prototyp systemu

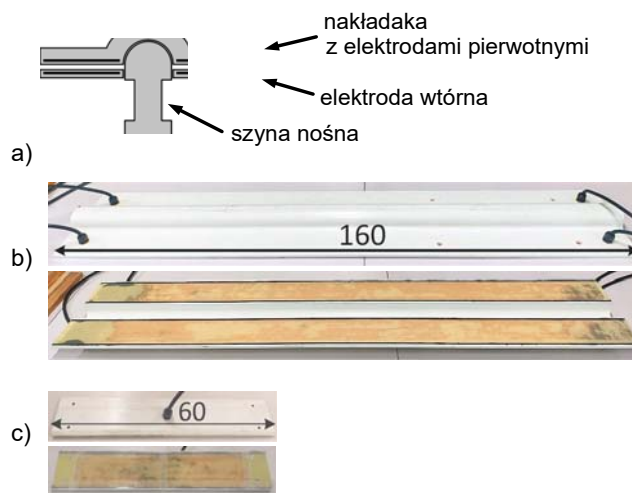
Zdjęcie prototypu systemu C-WET z zaznaczeniem podstawowych podzespołów zamieszczono na rysunku 12, a odpowiadający mu schemat z podziałem na podobwoły na rysunku 13. Dołączając zewnętrzne kondensatory C_{1-} i C_{2-} , uzyskano ostatecznie konfigurację LCLC-CL obwodów dopasowujących. Zestaw elektrod pierwotnych składa się z trzech stopni / trzech nakładek z elektrodami (rys. 14b), które na etapie testów laboratoryjnych umieszczone zostały do góry nogami (rys. 12). Ich prawidłowa pozycja została zilustrowana na rysunku 14a. Docelowo nakładki epoksydowe mocowane są na epoksydowej szynie nośnej, która utrzymuje podwieszoną od dołu kolejkę. Zestaw elektrod wtórnych złożony jest z czterech elektrod (rys. 14c), które połączone są w dwie pary i docelowo zintegrowane z poruszającym się zasobnikiem energii kolejki. Dla takiej struktury sprzęgu pojemnościowego (usytuowanie elektrod pierwotnych i wtórnych widoczne na rysunku 12) zidentyfikowano pomiarowo poszczególne pojemności C_p, C_s, C_T (2)-(4). Wykorzystując wyniki wcześniejszych obliczeń projektowych, dobrano pozostałe podzespoły prototypu systemu. Zmierzone za pomocą mostka LCR Sanwa LCR700 parametry zestawiono w tabeli 2.

Falownik mostkowy zawiera dwa półmostkowe moduły tranzystorowe CoolSiC MOSFET FF23MR12W1M1P_B11

(1200 V, 50 A). Cewki skonstruowano wykorzystując rdzenie ferrytowe typu E65/32/27 z materiału 3C95, wprowadzając szczelinę powietrzną około 1 mm. Ich uzwojenia wykonano podwójną licą typu 650 x 0,1 mm. Pojemność C_{1p} tworzą połączone szeregowo-równoległe kondensatory foliowe serii PHE448 2000 VDC. Z kolei pojemności C_{1-} i C_{2-} utworzono łącząc równoległe wysokonapięciowe kondensatory ceramiczne, dyskowe o napięciach dopuszczalnych 7,5 kV. Dodatkowo w każdym zestawie kondensatorów umieszczono regulowany kondensator próżniowy o pojemności 250 pF serii CVUN-250AC 9 kV. W rezultacie podczas badań laboratoryjnych możliwa jest prosta i płynna korekta pojemności C_{1-} i C_{2-} . Obciążenie diodowego prostownika mostkowego stanowią dwa połączone szeregowo rezystory grzałkowe z wymuszonym chłodzeniem, o rezystancji około 54 Ω i mocy dopuszczalnej 3 kW.



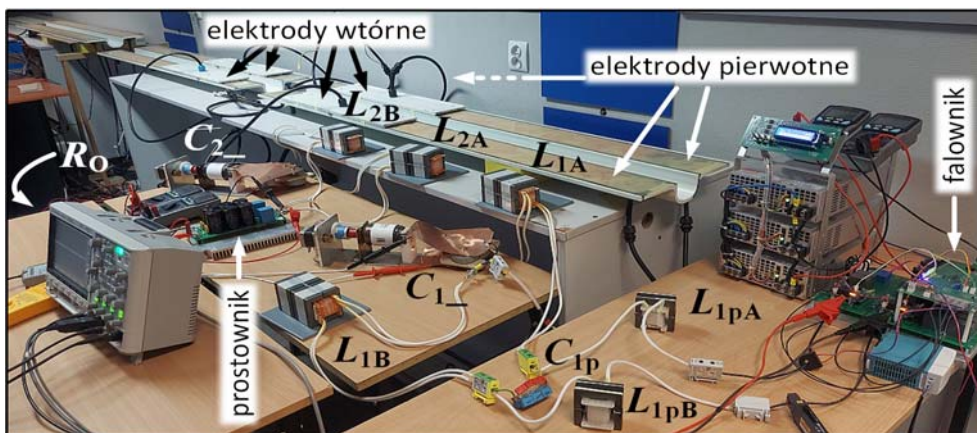
Rys. 13. Schemat prototypu systemu



Rys. 14. Ilustracja konstrukcji szyny nośnej, nakładki z elektrodami pierwotnymi, (b) widok z góry i z dołu nakładki z elektrodami pierwotnymi, (c) widok z góry i z dołu jednej elektrody wtórnej (c)

Tabela 2. Parametry prototypu systemu

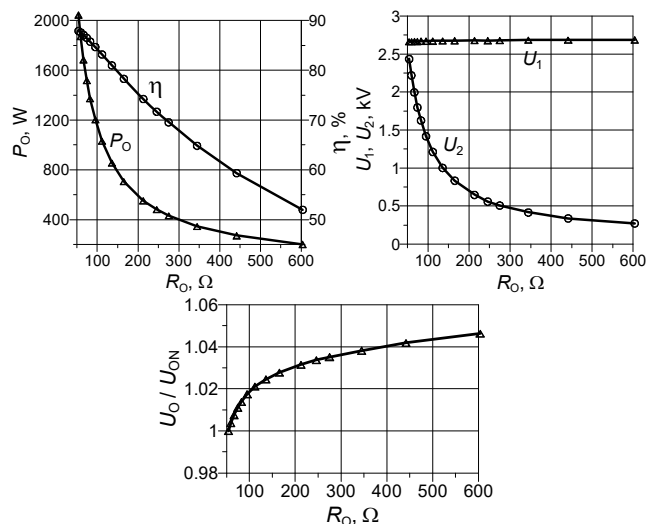
Parametr	Wartość	Jednostka
C_p	374	pF
C_T	180	pF
C_s	14	pF
L_{1pA}	22,57	μ H
L_{1pB}	23,26	μ H
C_{1p}	6,11	nF
L_{1A}	92,95	μ H
L_{1B}	93,61	μ H
C_{1-}	1,2	nF
C_{2-}	1,3	nF
L_{2A}	93,49	μ H
L_{2B}	93,04	μ H



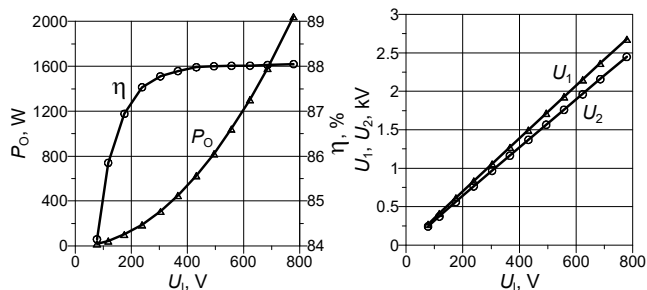
Rys. 12. Widok ogólny prototypu systemu C-WET

Wynik badań laboratoryjnych

Dla opracowanego prototypu systemu C-WET przeprowadzono cykl badań laboratoryjnych. Polegał on na wyznaczeniu wybranych charakterystyk oraz rejestracji oscylogramów. Do pomiarów wykorzystano oscyloskopy cyfrowe wyposażone w różnicowe sondy wysokonapięciowe oraz sondy prądowe. Do pomiarów napięć i prądów stałych użyto multimetrów cyfrowych.



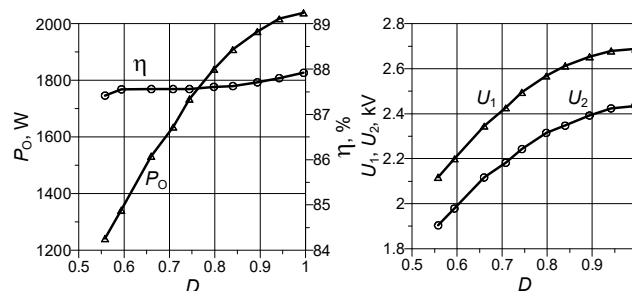
Rys. 15. Charakterystyki prototypu – moc wyjściowa, sprawność, napięcia sprężu U_1 i U_2 oraz względne napięcie wyjściowe w funkcji rezystancji obciążenia



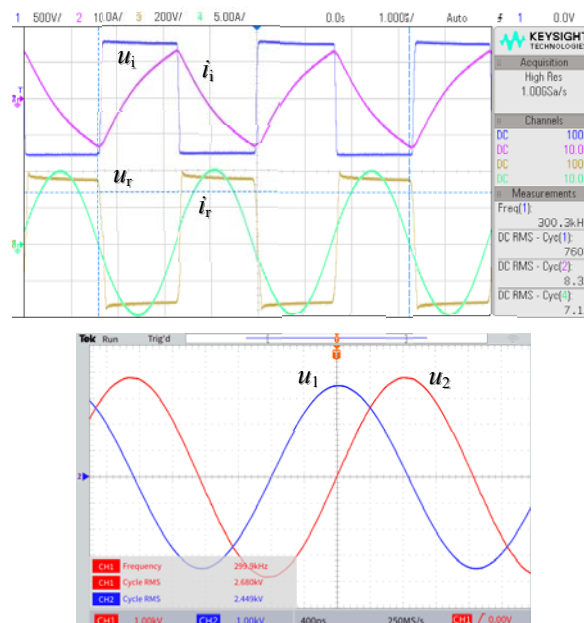
Rys. 16. Charakterystyki prototypu – moc wyjściowa, sprawność, napięcia sprężu U_1 i U_2 w funkcji napięcia zasilania

Przedstawione charakterystyki (rys. 15-17) ilustrują właściwości opracowanego prototypu systemu. Wszystkie pomiary rozpoczynały się od pracy w warunkach znamionowych, dla których dane ilościowe zestawiono w tabeli 3 oraz którym odpowiadają oscylogramy załączone

na rysunku 18. Warunki znamionowe uzyskano po dostrojeniu do wymaganej wartości napięcie wyjściowe (korekta C_{1-}) oraz po doprowadzeniu do usytuowania w przeciwfazie napięcie falownika i prostownika (korekta C_{2-}), zapewniając w ten sposób wymaganą sztywność napięcia wyjściowego. Zamieszczone oscylogramy (rys. 18 i 19) są zgodne z wynikami przeprowadzonych wcześniej symulacji (rys. 9).



Rys. 17. Charakterystyki prototypu – moc wyjściowa, sprawność, napięcia sprężu U_1 i U_2 w funkcji współczynnika D

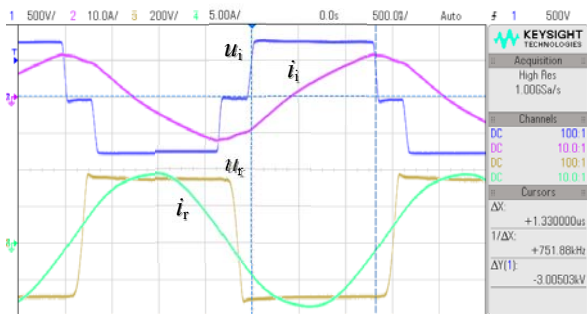


Rys. 18. Oscylogramy (u_1 , i_1 , u_r , i_r , u_2) – praca znamionowa

Pierwszy zestaw charakterystyk (rys. 15) ilustruje wpływ zmian rezystancji obciążenia. Jej wzrost prowadzi do zmniejszenia mocy wyjściowej i sprawności oraz analo-

gicznego do zmian mocy obniżenia napięcia sprzęgu U_2 przy zachowaniu napięcia sprzęgu U_1 . Szywność napięcia wyjściowego jest wystarczająco wysoka i zbliżona do wyników symulacji (rys. 10). Zmiany napięcia zasilania (rys. 16) powodują odpowiednie zmiany mocy wyjściowej i prowadzą do proporcjonalnego skalowania napięć U_1 i U_2 .

Możliwa jest również zmiana napięcia i mocy wyjściowej przy niezmiennym napięciu zasilania poprzez modyfikację współczynnika wypełnienia D przewodzenia tranzystorów falownika. Zilustrowano to za pomocą charakterystyk z rysunku 17.



Rys. 19. Oscylogramy (u_i , i_i , u_r , i_r) – $D = 0,8$

Tabela 3. Parametry dla pracy znamionowej ($P_o \approx 2$ kW)

Parametr	Opis	Wartość	Jednostka
U_1	napięcie zasilania	778,6	V
I_1	prąd zasilania	2,99	A
U_o	napięcie wyjściowe	332,2	V
I_o	prąd wyjściowy	6,16	A
R_o	rezystancja obciążenia	54,0	Ω
P_o	moc wyjściowa	2045,4	pF
η	sprawność całkowita	87,9	%
U_1	wartość RMS napięcia na wejściu sprzęgu poj.	2,66	kV
U_2	wartość RMS napięcia na wyjściu sprzęgu poj.	2,44	kV

Dla pracy w warunkach znamionowych (tab. 3, rys. 18) dokonano bardziej szczegółowej analizy rozkładu strat mocy. Całkowite straty mocy wyniosły około 280 W. Na podstawie oscylogramów napięć i prądów falownika i prostownika dokonano obliczeń szacunkowej mocy wyjściowej falownika oraz mocy wejściowej prostownika. Ostatecznie uzyskano udział strat mocy falownika i prostownika względem strat mocy całkowitych wynoszący odpowiednio około 20 i 30%. Pozostałe 50% (140 W) to przede wszystkim straty mocy cewek L_{1A} , L_{1B} , L_{2A} , L_{2B} obwodów dopasowujących, z mniejszym udziałem strat mocy cewek L_{1pA} , L_{1pB} .

Dokonano również weryfikacji prototypu systemu przy zwiększonej mocy do około 3 kW poprzez zmniejszenie rezystancji obciążenia. Dane ilościowe dla tego przypadku zestawiono w tabeli 4. Uzyskano prawidłową pracę systemu, zachowując sprawność całkowitą na poziomie 88%.

Tabela 4. Parametry po zwiększeniu mocy ($P_o \approx 3$ kW)

Parametr	Wartość	Jednostka
U_1	777,8	V
I_1	4,25	A
U_o	324,0	V
I_o	8,98	A
R_o	36,1	Ω
P_o	2909,1	W
η	88,0	%
U_1	2,70	kV
U_2	3,55	kV

Wnioski

Przedstawiono koncepcję, zaprojektowano i zrealizowano prototyp systemu bezprzewodowego przesyłu energii na zasadzie sprzężenia pojemnościowego, przeznaczony do ciągłego zasilania podwieszanej kolejki górniczej. Przeprowadzona w warunkach statycznych weryfikacja laboratoryjna z wykorzystaniem (nieruchomego) prototypu potwierdziła uzyskanie jego pożądanymi właściwościami. Dla częstotliwości pracy 300 kHz moc wyjściowa wyniosła 2045 W, sprawność 88%, a szywność napięcia pomimo dziesięciokrotnego zwiększenia rezystancji obciążenia była lepsza od 5%.

Odpowiednio zaadaptowano zastosowane metody projektowania obwodów dopasowania LCLC-CL oraz identyfikowania parametrów sprzęgu pojemnościowego. Wykazano, że do dostrojenia wartości napięcia wyjściowego wystarczająca jest zmiana pojemności wejściowej sprzęgu pojemnościowego, a do uzyskania wymaganej szywności tego napięcia konieczne jest zachowanie przeciwfazy napięć falownika i prostownika – warunek doboru pojemności wyjściowej sprzęgu pojemnościowego. Alternatywnie do warunku przeciwfazy może zostać zastosowany warunek maksymalnego wzmocnienia napięciowego.

Dalsze badania będą obejmowały testy dynamiczne systemu z ruchomymi elektrodami wtórnymi oraz ładowarką baterii zasobnika energii jako obciążeniem.

Funding: Scientific paper published as part of an international project co-financed by the European Commission Research Fund for Coal and Steel (RFCS) in the years 2020-2023; grant agreement no: 899469.



Scientific paper published as part of an international project co-financed by the Ministry of Science and Higher Education's program "PMW" in the years 2020-2023; contract no. 5117/FBWiS/2020/2.

Scientific paper published as part of an international project co-financed by the Ministry of Science and Higher Education's program "PMW" in the years 2020-2023; contract no. 5122/FBWiS/2020/2.

Autorzy: dr hab. inż. Zbigniew Kaczmarczyk, prof. PŚ, dr hab. inż. Marcin Kasprzak, prof. PŚ, dr inż. Paweł Lasek, dr inż. Krzysztof Przybyła, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: zbigniew.kaczmarczyk@polsl.pl, marcin.kasprzak@polsl.pl, pawel.lasek@polsl.pl, krzysztof.przybyla@polsl.pl; dr inż. Marcin Skóra, dr inż. Krzysztof Stankiewicz, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice, e-mail: mskora@komag.eu, kstankiewicz@komag.eu.

LITERATURA

- [1] Dai J., Ludois D., A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11 (2015), 6017-6029
- [2] Karagozler M. E., Goldstein S. C., Ricketts D. S., Analysis and modeling of capacitive power transfer in microsystems, *IEEE Trans. Circuit Syst. I*, vol.59, no.7 (2012) 1557-1566
- [3] Hui S. Y. R., Ho W. W. C., A new generation of universal contactless battery charging platform for portable consumer electronic equipment, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 3 (2005), 620-627
- [4] Hu A. P., Liu C., Li H. L., A novel contactless battery charging system for soccer playing robot, in *Proc. Int. Conf.*

- Mechatronics Mach. Vis. Pract.*, Auckland, New Zealand (2008), 646-650
- [5] Lu F., Zhang H., Hofmann H., Mi C., A double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11 (2015), 6011-6014
- [6] Zhang H., Lu F., Hofmann H., Liu W., Mi C., A four-plate compact capacitive coupler design and LCL-compensated topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging application, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 12 (2016), 8541-8551
- [7] Lu F., Zhang H., Mi C., A two-plate capacitive wireless power transfer system for electric vehicle charging applications, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2 (2018), 964-969
- [8] 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. Transp. Electrific.*, vol. 5, no. 4 (2019), 1040-1059
- [9] Vu V. -B., Dahidah M., Pickert V., Phan V. -T., An Improved LCL-L Compensation Topology for Capacitive Power Transfer in Electric Vehicle Charging, in *IEEE Access*, vol. 8 (2020), 27757-27768
- [10] Panchal C., Stegen S., Lu J., Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system, *Eng. Sci. Technol., Int. J.*, vol. 21, no. 5 (2018), 922-937
- [11] Lu F., Zhang H., Hofmann H., Mi C., A double-sided LC-compensation circuit for loosely coupled capacitive power transfer, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 2 (2018), 1633-1643
- [12] 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, in *IEEE Access*, vol. 10 (2022), 3116-3143
- [13] Deja P., Skóra M., Stankiewicz K., Tokarczyk J., Kasprzak M., Kaczmarczyk Z., Hildebrandt R., Wireless energy transfer system for use in underground mining, *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 27 (1) (2022), 267-280