



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Izolowana przetwornica do dwukierunkowego przekazu energii o miękkim przełączaniu z wykorzystaniem pojemności pasożytniczych.

Autor: Mgr inż. Maciej Arkadiusz Chojowski

Promotor rozprawy: Dr hab. inż. Marcin Baszyński, prof. AGH

Promotor pomocniczy: Dr inż. Aleksander Dziadecki

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii

STRESZCZENIE

rozprawy doktorskiej pt.

Izolowana przetwornica do dwukierunkowego przekazu energii o miękkim przełączaniu z wykorzystaniem pojemności pasożytniczych.

Rozwój energoelektroniki skupia się obecnie na podwyższaniu sprawności przetwarzania energii, poprzez opracowanie nowych topologii układów przekształtnikowych, wykorzystanie lepszych elementów półprzewodnikowych oraz stosowanie skuteczniejszych algorytmów sterowania. Istotnym aspektem jest też pełne wykorzystanie możliwości aktualnie dostępnych topologii w energoelektronice, aby zapewnić maksymalną sprawność przekształtnika. Ważną metodą zmniejszenia strat w przetwarzaniu energii jest zmiana sposobu komutacji z komutacji twardej na komutację miękką. Do miękkiego przełączania konieczne jest wystąpienie indukcyjności oraz pojemności w obwodzie mocy, czy to w postaci dyskretnej, jako fizyczny element, czy to jako parametry pasożytnicze innych elementów obwodu. Występowanie tych elementów pozwala na dobranie odpowiednich warunków pracy przekształtnika i wymuszenie miękkiego przełączania w układzie.

Rozprawa skupia się na zwiększeniu sprawności przekształtnika DC-DC w układzie Dual Active Bridge (DAB) na drodze modyfikacji topologii, polegającej na zastąpieniu pojedynczych łączników przez dwa, połączone równoległe łączniki. Umożliwia to, dzięki powiększeniu pojemności wyjściowej otrzymanego łącznika, uzyskanie warunków do przełączania tranzystorów w zerze napięcia (ZVS). W pracy zbadano zachodzące zjawiska i opisujące je zależności, mające wpływ na sprawność przetwarzania energii w szerokim zakresie mocy.

Podstawową topologię DAB poddano analizie teoretycznej. Objęła ona sam przekształtnik, metody jego sterowania, parametry elementów składowych. Na jej podstawie zaproponowano modyfikację topologii przekształtnika dla uzyskania miękkiego przełączania w łącznikach. Zmodyfikowana topologia została poddana badaniom na drodze analitycznej i symulacyjnej, co pozwoliło w szczególności na określenie warunków występowania miękkiego przełączania. Wykonano także praktyczny model laboratoryjny układu przekształtnika o zmodyfikowanej topologii. W wyniku badań tego układu potwierdzono zalety wykorzystania równoległego połączenia tranzystorów.

Spis skrótów

Skrót	Pełny opis
DAB	Dual Active Bridge
FET	Tranzystor polowy (Field-Effect Transistor)
JFET	Junction Field-Effect Transistor
SiC	Węglik krzemu Silicon Carbide
SPS	Single Phase Shift
ZVS	Przełączanie w zerze napięcia (Zero Voltage Switching)
ZVS CV	Zero Voltage Switching Clamped Voltage

I Wstęp

Postęp w energoelektronice skupia się obecnie na opracowaniu nowych topologii układów, wykorzystaniu nowych elementów półprzewodnikowych oraz skuteczniejszych algorytmów sterowania. Sprawność i redukcja kosztów jest najważniejszym aspektem nowych urządzeń przekształcających energię elektryczną. Pojawia się pytanie, czy w pełni wykorzystujemy możliwości znanych układów i optymalizujemy je pod kątem sprawności i kosztów. Zwiększenie sprawności układów można w prosty sposób osiągnąć przez zmianę sposobu komutacji z komutacji twardej na komutację miękką. W konsekwencji otrzymuje się obwody quasi rezonansowe lub w pełni rezonansowe, które w oparciu o zjawisko rezonansu (wywołanie drgań w układzie) pozwalają na przełączanie tranzystorów przy mniejszych stratach energii. Do wywołania drgań własnych w układzie niezbędne (nie licząc źródła wymuszającego) są dwa elementy pasywne: element indukcyjny (dławik) i element pojemnościowy (kondensator). Zazwyczaj dławiki lub transformatory jak i kondensatory są elementami wielu topologii przekształtników, co oznacza, że do wytworzenia rezonansu napięć lub prądów mamy wszystkie potrzebne elementy. W każdym układzie energoelektronicznym występują również pojemności i indukcyjności pasożytnicze niezależne od topologii układu, a wynikające z fizycznej konstrukcji obwodu i elementów. Dlatego należy rozważyć, czy tych właśnie elementów nie można wykorzystać do realizacji obwodów rezonansowych dla miękkiego przełączania tranzystorów energoelektronicznych.

Pojemności pasożytnicze występują głównie w trzech elementach układów:

- pojemności transformatora lub dławika. W przypadku tych elementów mamy do czynienia z występowaniem pojemności, występującej między uzwojeniami oraz między uzwojeniem a rdzeniem elementu magnetycznego,
- pojemności między warstwami obwodów drukowanych. Każda z warstw elektrycznych w obwodzie drukowanym jest oddzielona przez warstwę dielektryczną, która wraz z ścieżkami przewodzącymi tworzy pojemność,
- pojemności tranzystorów mocy. Elementy przełączające w energoelektronice to najczęściej elementy sterowane polem elektrycznym FET, które posiadają pojemność, wynikającą z budowy elementu półprzewodnikowego i zachodzących w nim zjawisk.

Sposób produkcji dławika oraz transformatora może umożliwić zaprojektowanie elementu w taki sposób, aby zapewnić dużą pojemność międzyzwojową, która posłuży do uzyskania obwodu rezonansowego. Podobnie

można wykonać płytkę drukowaną, aby maksymalizować pojemność międzywarstwową (która dodatkowo również może posłużyć jako radiator wykonany w PCB). W przypadku tranzystorów producenci starają się minimalizować pojemność wyjściową tranzystorów i nie jest zalecane jej celowe maksymalizowanie do uzyskania rezonansu.

II Teza oraz cel pracy

Tezę rozprawy określono w następującej formie:

Możliwe jest wykorzystanie pojemności pasożytniczych elementów układu i elementów biernych do realizacji miękkiego przełączania tranzystorów w izolowanym przekształtniku do dwukierunkowej wymiany energii elektrycznej (DAB). Wykorzystanie łączenia równoległego tranzystorów pozwoli na zwiększenie sprawności układu dla dużych wartości transferowanej mocy czynnej.

Na podstawie tezy pracy sformułowano cel rozprawy doktorskiej. Celem rozprawy jest zbadanie możliwości zwiększenia sprawności przekształtnika DC-DC w układzie Dual Active Bridge (DAB) na drodze modyfikacji topologii, polegającej na zastąpieniu pojedynczych łączników przez dwa pracujące, równolegle połączone łączniki oraz zbadanie zjawisk i opisujących je zależności, mających wpływ na sprawność przetwarzania energii w szerokim zakresie mocy.

Podstawową topologię DAB poddano analizie teoretycznej. Badania w rozprawie prezentują praktyczną implementację zaproponowanej topologii układu przekształtnika DC-DC do dwukierunkowego przekształtnika energii o miękkim przełączaniu oraz rezultaty wyników badań analitycznych i symulacyjnych. Przeprowadzono analizę i badania symulacyjne z wykorzystaniem modeli LTSPICE. Przeprowadzono również praktyczną weryfikację pracy zmodyfikowanego układu przekształtnika DC-DC.

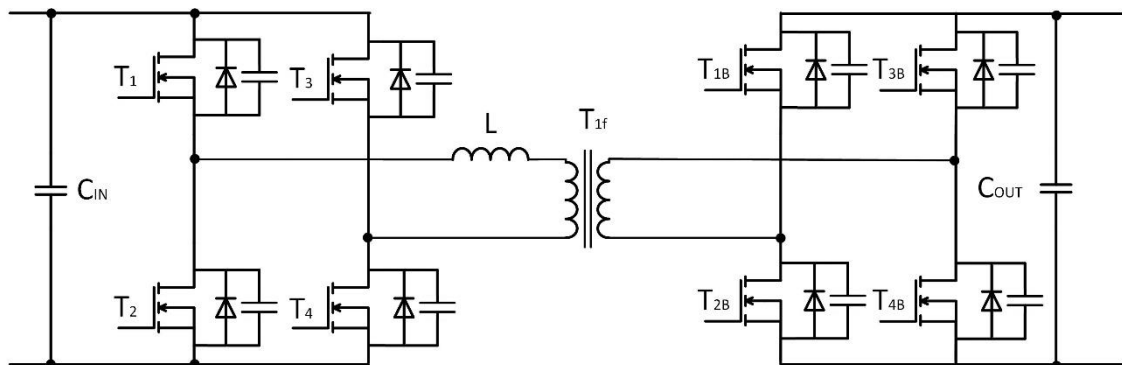
Fizyczny model układu został wykonany na bazie obwodu drukowanego z odpowiednio dobranymi parametrami. Obwód mocy przekształtnika został wyposażony w układ sterowania, którego celem było generowanie impulsów sterujących tranzystorami. Tak wykonany układ został przebadany w laboratorium pod względem poprawności działania, w oparciu o opracowane procedury testowe. Uzyskane wyniki zostały zestawione z dostępnymi rezultatami symulacji komputerowej, a wnioski opisano. W pracy wykorzystano tranzystory z węgla krzemu (SiC), które zostały połączone równolegle, co pozwoliło na zwiększenie

sprawności w wybranym przedziale pracy układu DAB. Rozpatrzono problemy związane z łączeniem równoległym tranzystorów oraz wykonano badania potwierdzające poprawność działania zmodyfikowanej topologii.

Zaprojektowano układ służący do sterowania (generowania impulsów sterujących) oraz wykonywania istotnych pomiarów wielkości elektrycznych w układzie.

III Przekształtnik Dual Active Bridge i realizacja miękkiego przełączania

Jedną z metod uzyskania przełączania w zerze napięcia jest dodanie kondensatora równoległe do łączników energoelektronicznych w przekształtniku DAB (do falowników napięcia). Kondensatory są przeładowywane podczas trwania czasu martwego z energii zgromadzonej w indukcyjności. Do naładowania pojemności konieczne jest zapewnienie odpowiednio dużej energii, która pozwoli na realizację miękkiego przełączania w zerze napięcia - ZVS typu Clamped Voltage.



Rysunek I Schemat przekształtnika DAB z uwzględnieniem pojemności tranzystora – układ do realizacji ZVS Clamped Voltage.

W tego rodzaju układach (Rys. I) stosuje się dodatkowe pojemności równoległe w postaci kondensatora, lecz zwiększa to liczbę elementów w układzie. Powiększają one pojemności do przeładowania i spowalniają szybkość zmian napięcia na tranzystorach. W zależności od sygnałów bramkowych tranzystorów, można dokonać analizy przełączania z uwzględnieniem czasu martwego. Stan przewodzenia danej pary tranzystorów (T_3 i T_2) w mostku został określony jako tryb pracy numer 1. Kolejnym trybem pracy będzie czas martwy, a następnie załączenie kolej pary tranzystorów (T_1 i T_4). Szczegółowy opis jest następujący:

- Tryb pracy 1: Jest to czas w którym Tranzystory T_3 i T_2 są załączone i przewodzą prąd w układzie DAB. W konsekwencji diody (tranzystorów T_{2B} i T_{3B}) przewodzą prąd na

stronie wtórnej w drugim falowniku. Konsekwencją takiego stanu jest to, że pojemność C_{oss} tranzystorów nieprzewodzących zostają naładowane do wartości napięcia zasilania z obwodu napięcia stałego.

- Tryb pracy 2: Przewodzące tranzystory T_3 i T_2 zostają wyłączone, wtedy czas martwy w układzie sterowania nie pozwala na załączenie kolejnych tranzystorów. Energia zgromadzona w pojemności wyjściowej tranzystorów musi zostać rozładowana w obwodzie z indukcyjnością L . Prąd zaczyna płynąć przez wszystkie pojemności wyjściowe tranzystorów (parę T_1 i T_4 oraz parę T_3 i T_2).

- Tryb pracy 3: Charakteryzuje się załączeniem pary T_1 i T_4 . Tranzystory w mostku na stronie pierwotnej transformatora przewodzą prąd i w konsekwencji diody (tranzystorów kolejnej pracy) w mostku na stronie wtórnej również przewodzą prąd. Pojemności tranzystorów nieprzewodzących zostają naładowane do wartości napięcia zasilania z obwodu napięcia stałego.

Analiza pracy jednego mostka podczas trwania czasu martwego pozwala na wyznaczenie równania dla prądu ładującego pojemności wyjściowe tranzystorów nieprzewodzących (para która wcześniej przewodziły prąd) – prądowe prawo Kirchhoffa dla węzła z pojemnościami i indukcyjnością sprzęgającą L :

$$-\frac{i_c(t)}{2} = C \frac{du_c(t)}{dt} \quad (I)$$

Oraz równanie napięciowe:

$$2u_c(t) = L \frac{di_c(t)}{dt} + R_\Sigma i_c(t) + (U_p - nU_w) \quad (II)$$

Podstawiając równanie prądu $i_c(t)$ otrzymuje się równanie opisujące napięcie na pojemności wyjściowej:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + \frac{R_\Sigma}{L} \frac{du_c(t)}{dt} + \frac{u_c(t)}{CL} = \frac{(U_p - nU_w)}{2CL} \\ u_c(0^+) = 0 \wedge \frac{du_c(0^+)}{dt} = -\frac{I_{Lo+}}{2C} \end{cases} \quad (III)$$

W równaniu (II) i (III) występuje wartość rezystancji R_Σ odpowiadającej za sumaryczną rezystancję obwodu, czyli rezystancję dławika ($R_{DC} + R_{AC}$) oraz przewodów. W analizie istotny jest pierwszy półokres przeładowania pojemności, w którym wartość rezystancji nie ma dużego znaczenia, zważywszy na jej małą wartość. Pomijając wartość rezystancji, równanie (IV-9) jest następujące:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + \frac{u_c(t)}{LC_{oss}} = \frac{(U_p - nU_w)}{2LC_{oss}} \\ u_c(0^+) = 0 \wedge \frac{du_c(0^+)}{dt} = -\frac{I_{Lo+}}{2C} \end{cases} \quad (IV)$$

Równanie upraszcza się do opisu obwodu LC z wymuszeniem skokowym Heaviside'a. Odwrotna transformata Laplace'a prowadzi do rozwiązania w postaci czasowej:

$$u_c(t) = \frac{(U_p - nU_w)}{2} (1 - \cos(\omega_o t)) - \frac{I_{Lo+}}{\omega_o 2C} \sin(\omega_o t) \quad (V)$$

Oraz równanie prądu w funkcji czasu:

$$i_L(t) = -I_{Lo+} \cos(\omega_o t) - \frac{(U_p - nU_w)}{2} \sin(\omega_o t) \quad (VI)$$

W przypadku gdy wartość szczytowa napięcia $u_c(t)$ dla czasu t_{peak} wystąpi po czasie martwym t_{dt} to nie ma możliwość zrealizowania miękkiego przełączania:

$$t_{dt} > t_{peak} \quad (VII)$$

Wymagany czas martwy do realizacji ZVS dla mostka wejściowego przy założeniu, że wartość prądu dławika nie zmienia się w czasie martwym i jest równa I_{Lo+} oraz niezmiennie napięcie na tranzystorze nieprzewodzącym U_{DS} może być też wyznaczona z zależności:

$$t_{dt} = C \frac{U_{DS}}{I_{Lo+}} \forall (i_L(t_{dt}) = const \wedge U_{DS} = const) \quad (VIII)$$

Konkluzją z analizy czasu martwego jest stwierdzenie, że do przeładowania pojemności koniczne jest zapewnienie odpowiedniego czasu na wymianę energii i jest to warunek konieczny do wystąpienia ZVS CV.

Kolejnym etapem jest określenie, przy jakich warunkach w układzie Dual Active Bridge wystąpi miękkie przełączanie w przypadku sterowania przesunięciem między mostkami (sterowanie SPS). Do określenia dokładnego przedziału należy wykorzystać bilans mocy w obwodzie podczas przeładowania. Znając wartość pojemności oraz indukcyjności w obwodzie, konieczne jest sformułowanie równania bilansu energii w układzie podczas czasu martwego:

$$E_p + E_d = E_k \quad (IX)$$

Gdzie:

E_p – energia początkowa,

E_d – energia dostarczona,

E_k – energia końcowa.

Energia początkowa jest zgromadzona w indukcyjności oraz pojemnościach wyjściowych pary tranzystorów nieprzewodzących. Energia początkowa jest rozumiana jako energia na początku czasu martwego i jej początkowa wartość może być opisana przez równanie:

$$E_p = \frac{1}{2}LI_L^2 + \frac{1}{2}(2C)U_{DC}^2 \quad (X)$$

Energia końcowa reprezentuje energię po przeładowaniu pojemności w układzie czyli stan, gdy pojemności wszystkich tranzystorów zostały przeładowane.

$$E_k = CU_{DC}^2 \quad (XI)$$

W konsekwencji energia przekazana do pojemności tranzystorów (dwie rozładowane pojemności wyjściowe tranzystorów w mostku) z grupy nieprzewodzącej w poprzednim półokresie opisuje się równaniem:

$$E_D = -\frac{1}{2}LI_L^2 \quad (XII)$$

Konieczny warunek energetyczny do realizacji ZVS typu CV opisuje nierówność:

$$\frac{1}{2}LI_L^2 \geq 2CU_{DC}^2 \quad (XIII)$$

Nierówność (XIII) wraz z równaniami na czas martwy (VII) stanowią warunek do wystąpienia ZVS typu CV w przekształtnikach mostkowych lub półmostkowych. Do celów regulacyjnych konieczne jest określenie przedziału pracy, a zatem granicznej wartości przesunięcia fazowego określającego pracę z miękkim przełączaniem tranzystorów mocy. Równania na prądy obwód DC obu mostkach falowników w przekształtniku DAB, można zapisać:

$$I_{H1} = \frac{U_1}{2\pi L f_S} \cdot \left(2\varphi_{H1} \cdot \left(\frac{nU_2}{U_1} \right) + \pi \cdot \left(1 - \frac{nU_2}{U_1} \right) \right) \wedge I_{H1} \geq 2U_1 \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (XIV)$$

oraz dla mostka na stronie wtórnej:

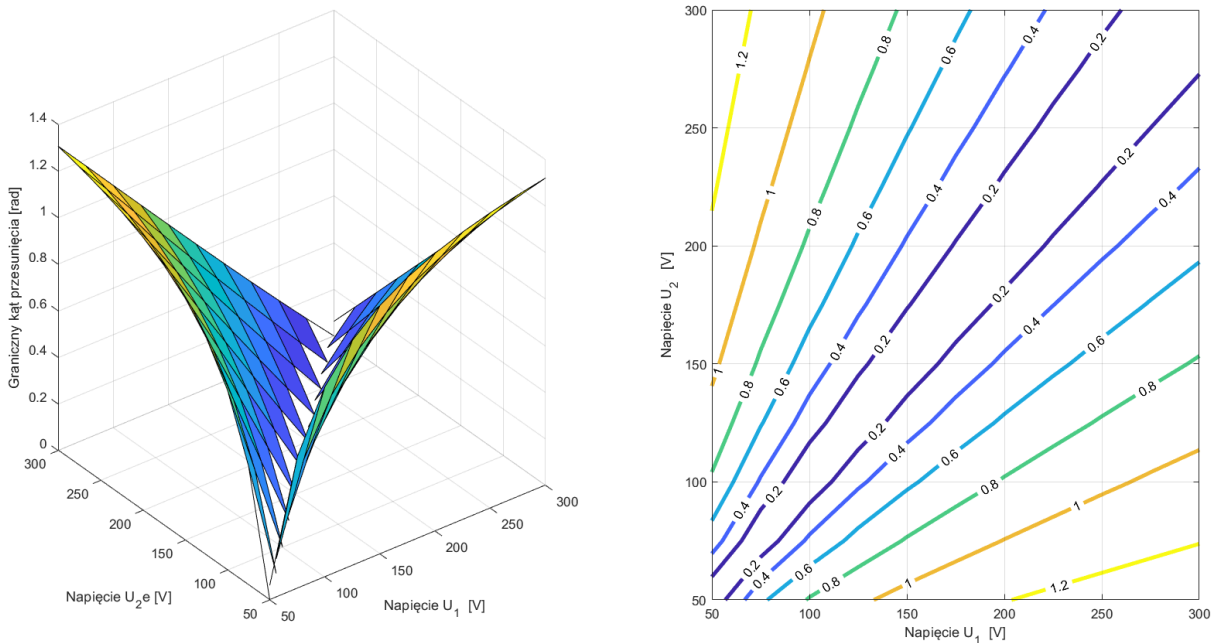
$$I_{H2} = \frac{U_1}{2\pi L f_S} \cdot \left(2\varphi_{H2} + \pi \cdot \left(\frac{nU_2}{U_1} - 1 \right) \right) \wedge I_{H2} \geq 2U_2 \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (\text{XV})$$

Oba równania pozwalają na określenie przedziałów pracy, dla których wystąpi ZVS. Ostatecznie przedziały te wynoszą:

$$\varphi_{H1} \geq \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{nU_2 - U_1}{nU_2} \right) + 2\pi \cdot \left(\frac{U_1 f_S \sqrt{LC}}{nU_2} \right) \quad (\text{XVI})$$

$$\varphi_{H2} \geq \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{U_1 - nU_2}{U_1} \right) + 2\pi \cdot \left(\frac{U_2 f_S \sqrt{LC}}{U_1} \right) \quad (\text{XVII})$$

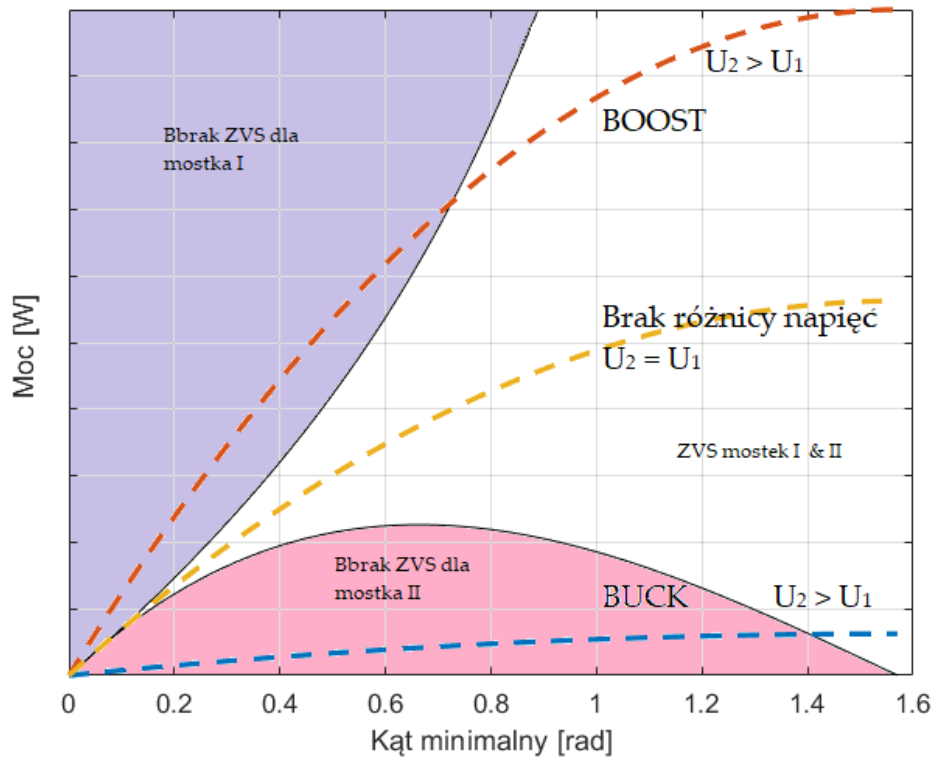
Na podstawie nierówności (XVI) oraz (XVII) można wyznaczyć iteracyjnie charakterystyki dla minimalnego kąta $\varphi_{ZVS} > f(U_1, U_2)$, w funkcji napięć w obwodach DC dla których wystąpi ZVS – CV (rysunek V-6). Charakterystyki (Rys. III) zostały wykreślone w jednym układzie odniesienia oraz ograniczono przedział mocy maksymalnej w dodatnim przedziale, czyli $\varphi > 0$ w celu określenia warunków do realizacji ZVS dla obu mostków, wykreślono przedział w postaci graficznej.



Rysunek III Minimalna wartość mocy transferowanej przez układ DAB dla której wystąpi miękkie przełączania w funkcji napięć na obu stronach DC. Płaszczyznę przedstawiono również jako kontur.

Istotnym problemem jest realizacja ZVS CV w różnych stanach pracy. Z przedstawionych analitycznych wzorów (XVI) oraz (XVII) można wykreślić przedział ZVS w zależności od przesyłanej mocy i stanu pracy układu DAB – obniżającego napięcie, podwyższającego napięcie lub układzie o symetrycznych napięciach (Rys. IV). Zgodnie z nierównościami wartość kąta minimalnego φ_{ZVS} zwiększa się wraz ze

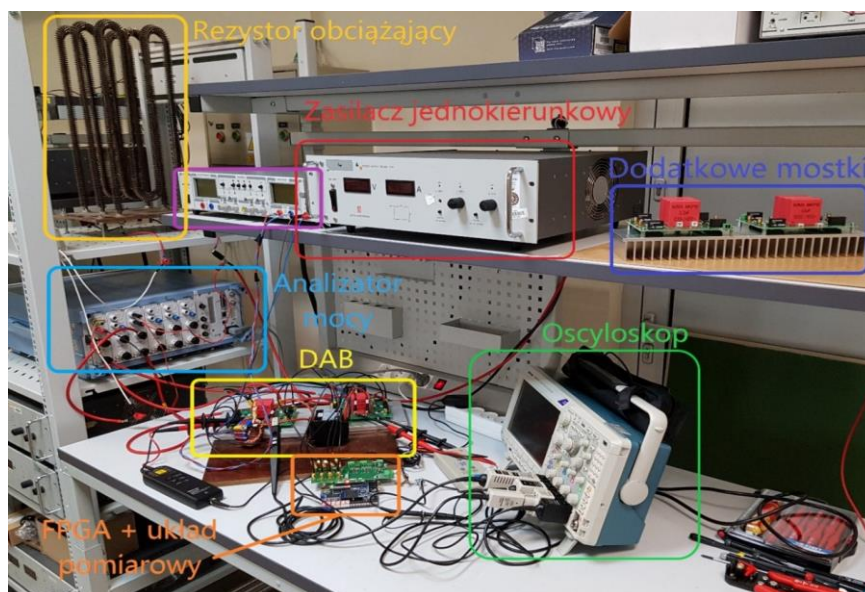
wzrostem pojemności równoległej, można stwierdzić że zwiększanie pojemności zmniejsza przedział pracy w ZVS typu CV.



Rysunek IV Przedziały ZVS oraz krzywe mocy dla różnych przypadków pracy układu DAB.

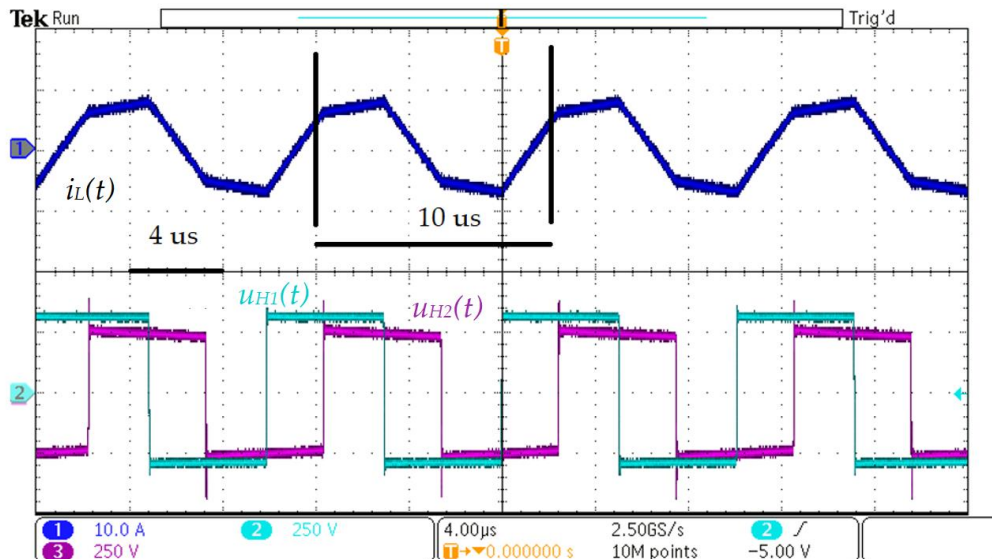
IV Wyniki badań laboratoryjnych

Przedstawione stanowisko laboratoryjne (Rys. V) zostało wykorzystane do badania pracy układu DAB.

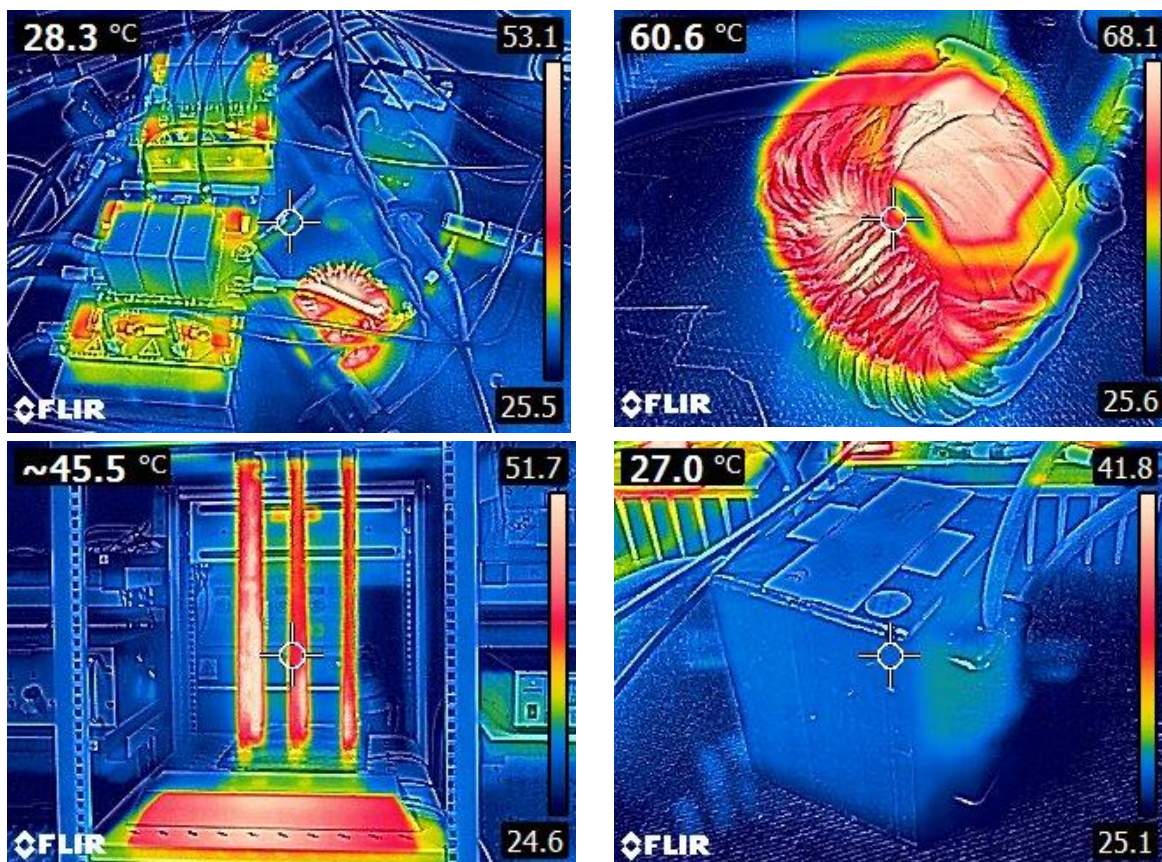


Rysunek V Stanowisko laboratoryjne do testowania układów DAB z rezystorami obciążającymi – test jednokierunkowego transferu mocy.

Zaprezentowany stan pracy został zarejestrowany (Rys. VI) dla maksymalnego kąta przesunięcia (równego $\varphi = \frac{\pi}{2}$) oraz częstotliwości przełączeń o wartości 100 kHz. Dodano również zdjęcia w podczerwieni do poglądowego wskazania strat w układzie (Rys. VII).



Rysunek VI Praca układu DAB dla mocy wyjściowej równej 937 W oraz częstotliwości 100 kHz – CH1: Prąd dławika, CH:2 napięcie na stronie pierwotnej transformatora, CH:3 napięcie na stronie wtórnej.



Rysunek VII Praca układu DAB – zdjęcie w podczerwieni dla pełnego stanowiska, dławika, obciążenia rezystancyjnego oraz transformatora. Najcieplejszym punktem układu mocy jest dławik, który posiada temperaturę w najcieplejszym punkcie o 68,1°C.

Warto również zaobserwować łagodny przebieg napięć podczas przełączania na wyjściu mostka (podobny charakter zmian napięcia będzie miało napięcie dren-źródło – brak oscylacji). Zaobserwowana charakterystyka zmian napięcia jest spowodowana uzyskaniem miękkiego przełączania tranzystorów w zerze napięcia (ZVS – CV).

Wszystkie testy zostały wykonane bez wentylatorów i tylko tranzystory posiadają radiatory. Najcieplejszym elementem jest dławik, który został dobrany do ciągłej pracy układu DAB i w stanie ustalonym (po 15 minutach pracy) osiąga temperaturę 68,1°C w najcieplejszym punkcie. Temperatura pracy dławika nie jest niebezpieczna i dalsze testy są możliwe (zwiększenie mocy czynnej powyżej 1 kW). Testy pokazują że transformator pozostaje zimny, ponieważ został przewymiarowany (zaprojektowany na moc pozorną 2 kVA).

Na rysunku VIII przedstawiono sprawności w funkcji przesyłanej mocy w układzie wraz z przybliżoną charakterystyką dla większej mocy transferu. Sprawność w pierwszym przedziale pracy układu jest mniejsza dla układu z podwójnymi tranzystorami. Dla małego transferu energii i braku miękkiego przełączania tranzystorów, układ z pojedynczymi tranzystorami wypada korzystniej niż układ z podwójnymi tranzystorami. Jest to wynikiem zwiększenia strat energii w pojemności wyjściowej tranzystora E_{oss} , ponieważ pojemność tranzystora zwiększa się dwukrotnie:

$$P_{oss} = \overbrace{\left(\frac{1}{2}C_{oss}U_{DS}^2\right)}^{E_{oss}} f_s \quad (\text{XVIII})$$

W stanie pracy z ZVS, energia E_{on} oraz E_{oss} będzie równa zero. W konsekwencji straty na łącznikach mocy będą zależne tylko od $E_{off} \cdot f_s$ oraz $R_{DS(ON)} \cdot I_{RMS}^2$. Wzór na straty dla jednego łącznika z postaci (twarde przełączanie):

$$P_{S-TP} = (E_{on} + E_{off} + E_{oss}) \cdot f_s + R_{DS(ON)} \cdot I_{RMS}^2 \quad (\text{XIX})$$

zostanie uproszczono w stanie miękkiego przełączania do:

$$P_{S-MP} = E_{off} \cdot f_s + R_{DS(ON)} \cdot I_{RMS}^2 \quad (\text{XX})$$

Na rysunku VIII zaznaczono również punkty i ich aproksymacje dla krzywej określonej jako model sprawności przekształtnika DAB. Zależność określającą sprawność η określono w następujący sposób:

$$\eta \triangleq \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - \Delta P}{P_{in}} \quad (XXI)$$

gdzie ΔP :

$$\Delta P = P_{SW} + R_{DS(ON)} \cdot I_{RMS}^2 + R_{L-ESR} I_L^2 + (R_{T-ESR} I_L^2) + \frac{U^2}{R_{Core}}$$

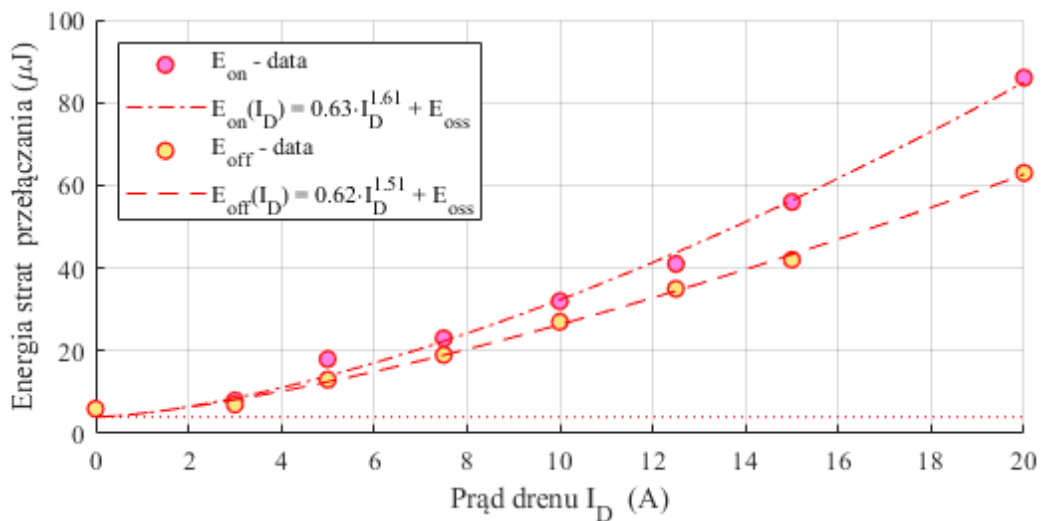
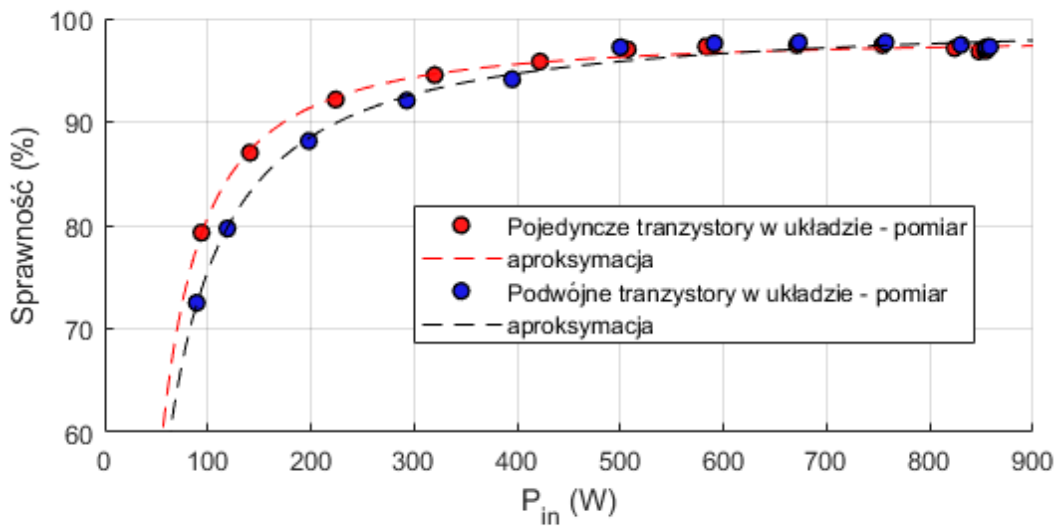
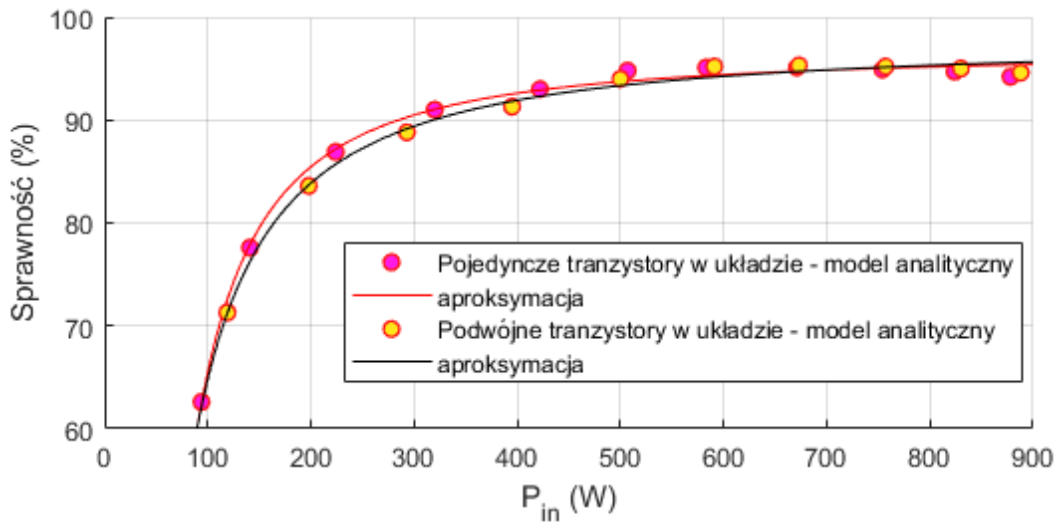
Wartość R_{L-ESR} to ekwiwalent rezystancja, reprezentująca zarówno straty w uzwojeniu jak i rdzeniu dławika. Wartość R_{T-ESR} określają straty w uzwojeniu transformatora. Straty w rdzeniu określono za pomocą rezystancji zastępczej dla rdzenia określonej przez producenta R_{Core} . Straty P_{SW} można określić jako straty z twardym przełączaniem (P_{SW-TP}):

$$P_{SW-TP} = [(E_{on} + E_{off} + E_{oss}) \cdot f_s] \quad (XXII)$$

Ponieważ tranzystory FET włączają się przy zerowym napięciu (dla odpowiedniego kąta i czasu martwego), dlatego do obliczania strat przełączania dla ZVS wykorzystywana jest tylko energia strat podczas wyłączenia E_{off} (P_{SW-MP}):

$$P_{SW-MP} = E_{off} f_s \quad (XXIII)$$

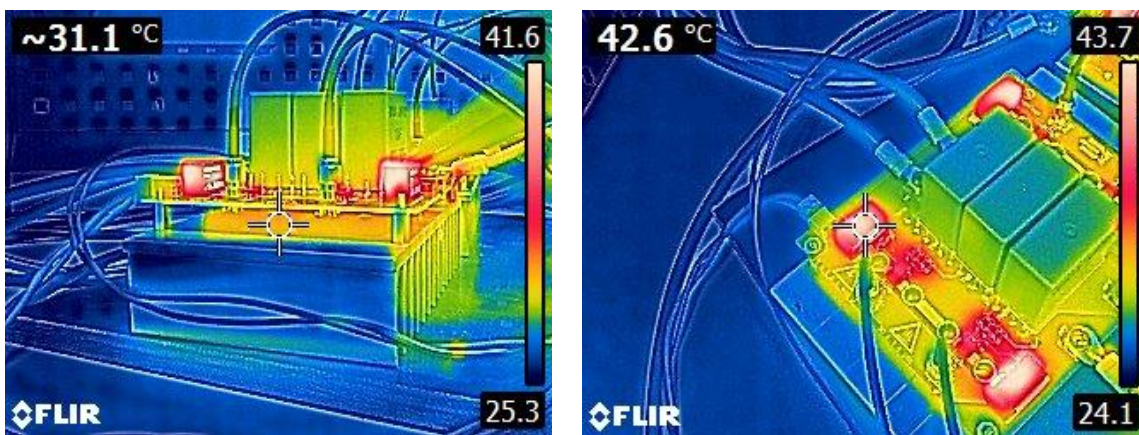
W zależności (XXI) uwzględniono również liczbę tranzystorów dla połączenia klasycznego i równoległego (dwóch tranzystorów). Widoczny przeskok w punktach reprezentujących model sprawności jest wynikiem gwałtownej zmiany strat (spadek ich wartości). Jest to wynik wejścia w pracę ZVS. Należy podkreślić, że ZVS występuje dla obu przekształtników. Na rysunku VIII dla mocy powyżej około 550 W wartość sprawności układu DAB (pomiar mocy dla układu z podwójnymi tranzystorami) wzrasta, ponieważ kąt przesunięcia jest wystarczająco duży do osiągnięcia przełączania miękkiego w zerze napięcia (ZVS) dla obu mostków w przekształtniku DAB. Sprawność w szczycie wzrosła z 95,0% (dla około 600 W) do 95,5% (dla około 650 W), co oznacza wzrost o pół punktu procentowego. Przy maksymalnym, zmierzonym transferze mocy, zmierzona sprawność wynosiła 94,2% dla klasycznego układu. Przy podwójnym łączeniu tranzystorów, zmierzono wartość 94,8%, zatem o 0,6 procenta większa niż w klasycznym układzie. Straty przewodzenia w równoległym łączeniu tranzystorów również zostają zmniejszone przez zmniejszenie rezystancji $R_{DS(ON)}$.



Rysunek VIII Sprawność zaprojektowanych układów DAB dla przedziału mocy od 0 do 900 W (do $\varphi \approx \pi/2$) oraz przyjętą charakterystykę strat w funkcji prądu drenu na podstawie dokumentacji technicznej tranzystorów.

W praktycznym zastosowaniu praca układu z niewielkim transferem energii (mocy) nie ma istotnego znaczenia ponieważ sprawność układu DAB jest bardzo mała, na przykład dla mocy równej 300 W sprawność (dla obu układów) nie przekracza 90%. Dlatego istotnym punktem jest zwiększenie sprawności układu dla bardzo dużych mocy. Łączenie równoległe tranzystorów pozwala na bardziej ekonomiczne użytkowanie układu i szybszy zwrot inwestycji. Poprawa sprawności dla układu z podwójnymi tranzystorami może być istotna dla układów większej mocy oraz dla kąta przesunięcia między mostkami $\varphi \gg 0$.

Zmniejszony przedział pracy z ZVS jest rekompensowane większą sprawnością dla transferu energii przez przekształtnik Dual Active Bridge. Dodatkowe tranzystory pozwalają na podzielenie miejsc występowania strat w łącznikach mocy. Główną zaletą jest możliwość równomiernego rozkładu pola cieplnego na powierzchni radiatora. Rysunek IX przedstawia zdjęcie podczerwone, ilustrujące pracę falownika na stronie pierwotnej transformatora. Tranzystory znajdujące się między płytką drukowaną a radiatorem równomiernie grzeją powierzchnie radiatora. Temperatura tranzystorów nie przekracza 32°C. Najcieplejszym punktem układu są przetwornice zasilające obwody bramkowe (około 43°C). Warto podkreślić to, że temperatura przetwornic (z obwodów bramkowych) nie wzrosła znacząco w porównaniu do pracy z pojedynczymi tranzystorami – przyrost o ok. 4 stopnie Celsjusza.



Rysunek IX Praca układu DAB – zdjęcie w podczerwieni dla jednego mostka układu DAB. Temperatura tranzystorów nie przekracza 32°C. Najcieplejszym punktem układu są przetwornice zasilające obwody bramkowe ($T_{MAX}= 43,7^{\circ}\text{C}$).

W istniejących układach DAB dużej mocy, całe struktury przekształtnika DAB są łączone ze sobą równoległe. Stan pracy z małym kątem przesunięcia jest ograniczany i układy pracują z możliwie jak największym transferem mocy, nawet kosztem wyłączenia pozostałych układów DAB, co potwierdza krzywa sprawności.

V Propozycje dalszych prac

Ciekawym zagadnieniem okazało się łączenie równoległe tranzystorów, co stanowi duże wyzwanie projektowe dla konstruktora układów energoelektronicznych. Propozycją dalszych prac jest sprawdzenie poprawności rozkładu prądu na większej liczby tranzystorów przy dużych prądach (mocach) w układzie. Dodatkowo w układzie zastosowano jeden sterownik oraz przetwornicę do zasilania. Obliczenia wskazują, że można dołączyć kolejne tranzystory i sprawdzić, czy sprawność układu wzrośnie. Kolejnym etapem prac będzie zmniejszenie ceny układu, czyli optymalizacja pod kątem ceny. Zaprojektowanie tańszej wersji układu DAB jest możliwe z wykorzystaniem obwodów bootstrapowych do zapewnienia zasilania dla załączania i wyłączenia tranzystorów. W układzie zastosowano dwukanałowy sterownik z izolacją strony logicznej od obwodu mocy. Nie licząc klasycznego obwodu bootstrapowego w układzie dodano diodę Zenera z równoległe połączonym kondensatorem. Taki układ pozwala na generację ujemnego napięcia w obwodzie podczas wyłączenia tranzystora. Napięcie Zenera określa wartość napięcia ujemnego do wyłączenia tranzystora mocy. Układ działa poprawnie tylko i wyłącznie, gdy współczynnik wypełnienia impulsów wynosi 50%, co jest spełnione w układzie DAB. W przypadku współczynnika wypełnienia bliskiego 0%, kondensator nie naładuje się i nie zapewni napięcia do wyłączenia tranzystora.

VI Wkład własny autora

Za indywidualny wkład własny autora należy uznać:

- Opracowanie falownika w układzie mostka H, w którym zawory zbudowano z łączonych równoległe tranzystorów NJFET. Analityczne zbadanie własności takiego układu.
- Opracowanie układu sterowania dla przekształtnika DC-DC typu DAB wraz z opracowaniem bloku pomiarowego przekształtnika. Opracowanie algorytmów sterowania i ich implementacja w układzie FPGA.
- Dla przekształtnika DC-DC typu DAB zbadano warunki przełączania beznapięciowego (ZVS). Określono analitycznie warunki i obszary takiej pracy. Przeprowadzono weryfikację symulacyjną otrzymanych zależności.

Wykonanie i weryfikacja laboratoryjnego modelu przekształtnika DAB z uwzględnieniem w sterowaniu przedziałów miękkiego przełączania i ich wpływu na wartość strat w modelu.

WYBRANE PUBLIKACJE DOKTORANTA

1. A Method and a Three Source Converter for Medium Frequency Magnetic Elements Losses Measurement/ Marcin BASZYŃSKI, Maciej CHOJOWSKI, Aleksander DZIADECKI, Andrzej STOBIECKI, Roman DUDEK, Józef SKOTNICZNY // IEEE Transactions on Industrial Electronics [Dokument elektroniczny]. — Czasopismo elektroniczne ; 10.1109/TIE.2023.3239874 — Publikacja dostępna online od: 2023-02-01. — tekst: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10035011>
2. Thermal and electric parameter analysis of DC–DC module based on resonant switched capacitor converter / Robert STALA, Adam PIŁAT, Maciej CHOJOWSKI, Mikołaj SKOWRON, Szymon FOLMER // Energies [Dokument elektroniczny]. — Czasopismo elektroniczne ; ISSN 1996-1073. — 2022 vol. 15 iss. 19 art. no. 7040, s. 1–15. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. — Bibliogr. s. 15, Abstr.. — Publikacja dostępna online od: 2022-09-25. — tekst: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/7040/pdf?version=1664347915>
3. High-frequency current transformers cascade for power electronics measurements / Maciej CHOJOWSKI, Marcin BASZYŃSKI, Robert Sosnowski, Aleksander DZIADECKI // Sensors [Dokument elektroniczny]. — Czasopismo elektroniczne ; ISSN 1424-8220. — 2022 vol. 22 iss. 15 art. no. 5846, s. 1–13. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. — Bibliogr. s. 13, Abstr.. — Publikacja dostępna online od: 2022-08-04. — tekst: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/15/5846/pdf?version=1659665865>
4. *Analiza termiczna modelu przetwornika rezonansowego DC-DC* — Thermal analysis of the model DC-DC resonant converter / Adam PIŁAT, Robert STALA, Antoni CIEŚLA, Maciej CHOJOWSKI, Mikołaj SKOWRON, Szymon Formela // *W: Zastosowania elektromagnetyzmu we współczesnej inżynierii i medycynie [Dokument elektroniczny] : XXXI sympozjum środowiskowe PTZE : Kliczków, 4–7 września 2022 r. / Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu, [etc.].* — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — Warszawa : Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu, 2022. — e-ISBN: 978-83-88131-04-2. — S. 208–209. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. — Tryb dostępu: http://sympozjum.ptze.pl/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/Materialy_XXXI-PTZE_2022.pdf [2023-02-08]. — Bibliogr. s. 209. — Afiliacja Autorów: Akademia Górniczo-Hutnicza
5. An analysis of a transformerless dual active half-bridge converter / Robert Sosnowski, Maciej CHOJOWSKI, Marcin BASZYŃSKI // Power Electronics and Drives [Dokument elektroniczny]. - Czasopismo elektroniczne ; ISSN 2543-4292. — 2022 vol. 7 iss. 42, s. 146–158. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. —

Bibliogr. s. 158, Abstr.. — tekst: <http://www.ped.pwr.edu.pl/pdf-152208-77508?filename=An%20Analysis%20of%20a.pdf>

6. Wide bandwidth and inexpensive current sensor for power electronics-an augmented LEM current sensor / Maciej CHOJOWSKI, Aleksander DZIADECKI, Marcin BASZYŃSKI, Roman DUDEK, Andrzej STOBIECKI, Józef SKOTNICZNY // *Energies* [Dokument elektroniczny]. — Czasopismo elektroniczne ; ISSN 1996-1073. — 2021 vol. 14 iss. 14 art. no. 4194, s. 1-14. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. — Bibliogr. s. 12-14, Abstr.. — Publikacja dostępna online od: 2021-07-12. — tekst: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/14/4194/pdf>
7. The design concept of low cost and volume switched-capacitor DC-DC resonant converter / Maciej CHOJOWSKI, Robert STALA, Adam PIŁAT, Mikołaj SKOWRON, Szymon FOLMER // W: 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC) [Dokument elektroniczny] : Gliwice, Poland, 25–29 April, 2021 : proceedings / The Silesian University of Technology. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — Piscataway : IEEE, cop. 2021. — (International Power Electronics and Motion Control Conference ; ISSN 2469-8741). — USB ISBN: 978-1-7281-5659-0, Print on Demand (PoD) ISBN: 978-1-7281-5661-3. — e-ISBN: 978-1-7281-5660-6. — S. 200–206. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. — Bibliogr. s. 206, Abstr.. — Publikacja dostępna online od: 2021-05-21. — tekst: <https://ieeexplore-1ieee-1org-1000047ol01ca.wbg2.bg.agh.edu.pl/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9432547>
8. SiC-based magnetic-less DC-DC converter with wide temperature range operation — Przekształtnik DC-DC bazujący na SiC pracujący w szerokim zakresie temperatur / Maciej CHOJOWSKI, Robert STALA, Andrzej MONDZIK, Adam PENCZEK // *Przegląd Elektrotechniczny / Stowarzyszenie Elektryków Polskich* ; ISSN 0033-2097. — 2021 R. 97 nr 1, s. 56–63. — Bibliogr. s. 62–63, Abstr., Streszcz.. — tekst: <http://pe.org.pl/articles/2021/1/10.pdf>
9. High-gain switched-capacitor DC-DC converter with low count of switches and low voltage stress of switches / Robert STALA, Maciej CHOJOWSKI, Zbigniew WARADZYN, Andrzej MONDZIK, Szymon FOLMER, Adam PENCZEK, Aleksander SKAŁA, Stanisław PIRÓG // *IEEE Access* [Dokument elektroniczny]. — Czasopismo elektroniczne ; ISSN 2169-3536. — 2021 vol. 9, s. 114267-114281. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. — Bibliogr. s. 114280-114281, Abstr.. — Publikacja dostępna online od: 2021-08-12. — tekst: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9512085>
10. Pojemności pasożytnicze w układach energoelektronicznych / Maciej CHOJOWSKI, Stanisław Piróg, Marcin BASZYŃSKI, Aleksander DZIADECKI // *Przegląd Elektrotechniczny / Stowarzyszenie Elektryków Polskich* ; ISSN 0033-

2097. — 2020 R. 96 nr 6, s. 76–80. — Bibliogr. s. 79–80, Streszcz., Abstr.. — tekst: <http://pe.org.pl/articles/2020/6/14.pdf>

11. Sterowanie dla silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi za pomocą zmodyfikowanej modulacji unipolarnej przeznaczonej dla silnika bezszczotkowego — A method for the control of PMSM with classic BLDC commutation approach : the PMSM motor / Maciej CHOJOWSKI, Marcin BASZYŃSKI // Przegląd Elektrotechniczny / Stowarzyszenie Elektryków Polskich ; ISSN 0033-2097. — 2019 R. 95 nr 11, s. 254–258. — Bibliogr. s. 258, Streszcz., Abstr.. — tekst: <http://pe.org.pl/articles/2019/11/58.pdf>
12. Space vector pulse width modulation for high-speed induction motor implemented in Nios II softcore processor / Maciej CHOJOWSKI // Power Electronics and Drives ; ISSN 2451-0262. — Tytuł poprz.: Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały ; ISSN: 1733-0718. — 2018 vol. 3 no. 1, s. 99–107. — Bibliogr. s. 107, Abstr.. — tekst: <http://www.ped.pwr.edu.pl/pdf-91896-31802?filename=Space%20vector%20pulse%20width.pdf>
13. Simulation analysis of extended Kalman filter applied for estimating position and speed of a brushless DC motor / Maciej CHOJOWSKI // Power Electronics and Drives ; ISSN 2451-0262. — Tytuł poprz.: Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały ; ISSN: 1733-0718. — 2018 vol. 3 no. 1, s. 145–155. — Bibliogr. s. 155, Abstr.. — tekst: <http://www.ped.pwr.edu.pl/pdf-91897-31806?filename=SIMULATION%20ANALYSIS%20OF.pdf>