# Układy energoelektroniczne i metody sterowania – nowe rozwiązania dla systemów fotowoltaicznych

Robert Stala, Andrzej Mondzik, Adam Penczek, Stanisław Piróg, Aleksander Skała, Zbigniew Waradzyn

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

**Streszczenie:** Zagadnienia przekształcania energii w systemach fotowoltaicznych są jednym z obszarów badań w Laboratorium Energoelektroniki AGH. W ramach badań zaproponowano nowe koncepcje przekształtników energii, metod sterowania i systemów testowania, a także wykorzystanie elementów półprzewodnikowych mocy z węglika krzemu (SiC) i azotku galu (GaN). Nowe rozwiązania umożliwiają optymalizację wybranych parametrów w systemach przekształtników fotowoltaicznych projektowanych w różnych konfiguracjach zależnych od mocy i koncepcji instalacji fotowoltaicznej.

**Słowa kluczowe:** energoelektronika, odnawialne źródła energii, fotowoltaika, falownik, przekształtnik DC-DC, system fotowoltaiczny

POWER-ELECTRONIC SYSTEMS AND CONTROL METHODS – NOVEL SOLUTIONS FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

**Abstract:** Energy conversion issues in photovoltaic (PV) systems are within the scope of research in the Power Electronics Laboratory. As a result of the investigations, various novel findings have been demonstrated in the field of power converter concept, control, and testing methods, as well as the applications of silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) power semiconductor switches. Novel solutions allow optimising parameters of converters for PV systems, where a wide number of design configurations are used depending on power and the whole system concept.

**Keywords:** power electronics, renewable energy sources, photovoltaic (PV), inverter, DC-DC converter, photovoltaic system

https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9_6

## 1. Wprowadzenie

Energoelektronika w Katedrze Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii AGH była rozwijana od lat 70. XX wieku. Początkowo w technice tyrystorowej badano, opracowano i wdrożono do seryjnej produkcji przekształtniki przeznaczone do napędów prądu stałego górniczych maszyn wyciągowych i walcarek hutniczych o handlowej nazwie Jantar. W kolejnych latach opracowano tyrystorowe falowniki prądowe i falowniki napięciowe (z wymuszoną komutacją za pomocą obwodów LC) oraz przekształtniki impulsowe dla trakcji tramwajowej i przemysłu szklarskiego wymagającego bezprzerwowego zasilania. Opracowano i wdrożono również kaskadowe układy napędowe do pomp elektrociepłowni. Zmiany ustrojowe umożliwiły rozpoczęcie w latach 90. ubiegłego wieku prowadzenie badań nad przekształtnikami realizowanymi w technice tranzystorowej (IGBT), czego rezultatem był impulsowy napęd do tramwaju niskopodłogowego wdrożony do produkcji.

W późniejszym czasie prowadzono badania mające na celu zastosowanie nowoczesnych elementów półprzewodnikowych i opracowanych metod ich sterowania wraz z ich sprzętową implementacją (w układach mikroprocesorowych i FPGA), a także wykorzystanie energoelektroniki w rozwijających się sektorach przemysłowych, takich jak odnawialna energetyka, a w szczególności fotowoltaika. Ten obszar zastosowań energoelektroniki wymaga wysokiej precyzji sterowania i regulacji ze względu na współpracę przekształtników z siecią elektroenergetyczną oraz coraz wnikliwszej analizy zagadnień jakości energii elektrycznej i śledzenia procesów zachodzących w sieci, do której przesyłana jest energia pozyskiwana z odnawialnych źródeł energii (OZE). Ponadto od energoelektroniki obsługującej instalacje PV wymaga się bardzo wysokiej sprawności warunkującej możliwość pozyskiwania energii przy słabym nasłonecznieniu. Straty energii, które są nieuniknione w przypadku układów impulsowych, a takimi są wszelkiego rodzaju przekształtniki DC-DC, DC-AC i AC-DC, można minimalizować przez zastosowanie przekształtników o odpowiedniej topologii z właściwymi elementami półprzewodnikowymi, jak również układów realizujących procesy łączeniowe przy zerowych napięciach lub prądach tranzystorów. Umożliwia to minimalizację strat (zwiększenie sprawności) oraz zwiększenie częstotliwości impulsowania, a tym samym zmniejszenie wartości parametrów elementów pasywnych przekształtnika, co jednocześnie prowadzi do zmniejszenia jego gabarytów, a więc i kosztów materiałowych. W zespole prowadzone są badania układów rezonansowych, układów o komutacji przy zerowym napięciu lub prądzie, implementacji tranzystorów z węglika krzemu (SiC) i azotku galu (GaN) w przekształtnikach energii, a także nowych topologii układów umożliwiających optymalizację wybranych parametrów przekształtnika.

Innym kierunkiem badań były zagadnienia jakości energii elektrycznej. W latach 80. XX wieku opracowano i wdrożono do produkcji nadążne kompensatory mocy biernej o handlowej nazwie SKIF dla przemysłu wydobywczego. Aktualnie, przy szero-

kim wprowadzaniu przekształtników dołączonych do sieci elektroenergetycznej do obsługi fotowoltaiki, pojawiają się nowe wyzwania dotyczące jakości energii. Falowniki obsługujące instalacje PV muszą zapewnić wymaganą symetrię prądów i minimalny poziom ich odkształcenia, a jednocześnie ich algorytmy sterowania mogą umożliwić kompensację negatywnego oddziaływania innych urządzeń (odbiorników energii elektrycznej) zasilanych z tej samej linii na jej prądy.

Wszystkie te zagadnienia są przedmiotem prac zespołu, a ich wyniki są publikowane w uznanych czasopismach, materiałach konferencyjnych, książkach i monografiach oraz w postaci opisów patentowych, z których wybrane są wymienione w artykule.

W ciągu ostatnich lat opublikowane zostały wyniki realizowanych w zespole prac dotyczących implementacji energoelektroniki i sterowania w systemach z odnawialnymi źródłami energii. Badania dotyczyły następujących zagadnień:

- falowniki wielopoziomowe NPC w systemach fotowoltaicznych (Stala 2010b, Szarek i in. 2017);
- poprawa parametrów pracy falowników wielopoziomowych NPC (Stala 2011, 2013, 2018, 2020, Hachlowski i Stala 2019, Mondzik i in. 2021);
- poprawa parametrów przekształtników bazujących na elementach IGBT (Mondzik i in. 2021, 2022);
- przekształtniki DC-DC z obniżonymi stratami wyłączania w układach dużych mocy (Kawa i in. 2016) i problemy optymalizacji przekształtników DC-DC (Barry i in. 2016, 2017, 2018, Mondzik i in. 2022);
- zastosowanie tranzystorów z azotku galu (GaN) i węglika krzemu (SiC) w celu poprawy parametrów przekształtników (Kawa i Stala 2017, 2020, Waradzyn i in. 2020, Folmer i Stala 2021a);
- przekształtniki DC-DC o zwiększonej częstotliwości pracy i zmniejszonych napięciach na tranzystorach (w układzie *flying-capacitor*) (Stala 2010a, 2016a, Kawa i Stala 2016);
- rezonansowe przekształtniki DC-DC o przełączanych kondensatorach (SC) i dużym wzmocnieniu napięcia (Kawa i in. 2016, Mondzik i in. 2016a, Penczek i in. 2017, Stala i in. 2017a, 2018a, 2019a, 2019b, 2020, 2021a, 2021b, 2022, Waradzyn i in. 2017a, 2017b, 2018, Stala i Piróg 2018, Chojowski i in. 2021, Folmer i Stala 2021b);
- systemy fotowoltaiczne i ich sterowanie (Stala i Stawiarski 2010, Penczek i in. 2011, 2012, Stala i in. 2011, Barry i in. 2016, 2017, 2018);
- sterowanie i regulacja z wykorzystaniem układów FPGA (Stala 2010b, Stala i in. 2010, 2011, Stawiarski i in. 2012), oraz koncepcja *hardware-in-the-loop* (Penczek i in. 2011, 2012);
- przekształtniki DC-DC wielokomórkowe (Stala i in. 2009a, 2009b) i falowniki wielopoziomowe *flying-capacitor* (Penczek i in. 2019),
- magazyny energii (Piróg i in. 2012).

Uzyskano także wiele patentów. Ważniejsze z nich to: Mondzik i in. (2016b, 2020a, 2020b), Ryłko i in. (2016), Stala (2016b, 2016c, 2019, 2021), Stala i in. (2016, 2017b, 2018b, 2019c, 2019d).

Zespół Laboratorium Energoelektroniki posiada nowoczesny sprzęt laboratoryjny i pomieszczenia o wysokim standardzie. Rysunek 1 przedstawia fotografię laboratorium, w którym prowadzone są zajęcia dydaktyczne z zakresu układów energoelektronicznych.

**Rys. 1.** Laboratorium energoelektroniki AGH – pomieszczenie dydaktyczne

## 2. Systemy fotowoltaiczne w energetyce odnawialnej

W związku z sukcesywnym wyczerpywaniem się surowców energetycznych, takich jak ropa, gaz i węgiel, na znaczeniu ogromnie zyskały metody wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Jednym z najbardziej rozwijających się sektorów energetyki odnawialnej, zaopatrującym w szczególności odbiorców rozproszonych, jest fotowoltaika. System fotowoltaiczny składa się z paneli fotowoltaicznych (PV), przekształtnika (przekształtników) energoelektronicznych oraz w niektórych instalacjach – zasobnika energii. Obecnie sprawność pozyskiwania energii elektrycznej przez panele PV, w zależności od technologii, w jakiej zostały wykonane, waha się od kilkunastu procent do ok. 20% (sprawność paneli seryjnie produkowanych przez amerykańską firmę SunPower przekracza 22% – https://us.sunpower.com/). Wytworzona w panelach PV energia jest przekazywana do zasobników energii elektrycznej (akumulatory, elektrolizery wytwarzające wodór itd.) bądź bezpośrednio do systemu elektroenergetycznego

(sieci prądu stałego, sieci prądu przemiennego) za pośrednictwem przekształtników energoelektronicznych, których sprawność powinna być jak najwyższa (>95%). O ile w odniesieniu do większości przekształtników energoelektronicznych celem optymalizacyjnym jest uzyskanie jak najwyższego wskaźnika mocy w przeliczeniu na koszt urządzenia, o tyle w przypadku inwerterów solarnych bardzo ważna jest sprawność przekształtnika. Ilość produkowanej przez panele PV energii zależy, przy danej temperaturze, od nasłonecznienia, które jest zależne od wielu czynników meteorologicznych i od pory dnia. Wysoka sprawność przekształtników energoelektronicznych (mała wartość traconej w nich mocy) umożliwia uzyskanie dodatniego bilansu mocy przy słabym nasłonecznieniu (np. godziny poranne i wieczorne), a tym samym produkcję energii elektrycznej. Ma to podstawowe znaczenie dla użyteczności instalacji np. w systemach autonomicznych (*off grid*) i wpływa zasadniczo na opłacalność instalacji prosumenckich (*on grid*). Przekształtniki fotowoltaiczne relatywnie rzadko pracują z obciążeniem nominalnym, co wynika ze zmiennością źródła, jakie stanowi promieniowanie słoneczne. Na ilość energii generowanej przez instalacje fotowoltaiczną ma wpływ pora dnia, pogoda, pora roku, szerokość geograficzna. Stąd dla inwerterów solarnych przyjęto, że sprawność jest wyliczana według specjalnego algorytmu uwzględniającego uzyskane na podstawie badań statystycznych przeprowadzonych w danym regionie współczynniki wagowe dla poszczególnych przedziałów mocy, w których urządzenie pracuje (*European efficiency* – Europa lub *CEC efficiency* – USA). Najwyższą wartość zawsze ma współczynnik wagowy dla obciążenia wynoszącego około 50% mocy nominalnej inwertera. Na sprawność przekształcania energii pozyskiwanej z paneli fotowoltaicznych przez energoelektroniczne inwertery beztransformatorowe wpływają straty rezystancyjne całej instalacji, straty w elementach pasywnych (dławiki, kondensatory), spadki napięcia na elementach półprzewodnikowych oraz pobór energii do obsługi układów sterowania i regulacji.

W ostatnich latach jedną z ważniejszych aktywności Zespołu Energoelektroniki Katedry EiASPE AGH są prace badawcze nad zwiększeniem sprawności przekształtników energoelektronicznych możliwych do stosowania w systemach fotowoltaicznych. Koncentrują się one na poszukiwaniu nowych topologii oraz metod sterowania przekształtników energoelektronicznych przy jednoczesnym wykorzystaniu najnowszych osiągnięć w obszarze technologii elementów półprzewodnikowych mocy oraz elementów pasywnych, tj. elementów magnetycznych i kondensatorów oraz algorytmów sterowania i regulacji implementowanych w sprzęcie o mniejszych wymaganiach energetycznych. Opublikowane wyniki tych badań mają duże znaczenie dla rozwoju fotowoltaiki prosumenckiej wobec oczekiwań szybkiego zwrotu nakładów na inwestycje i ze względu na zwykle dość długi w polskich warunkach klimatycznych czas ograniczonego nasłonecznienia (nieoptymalny azymut i nachylenie dachu, na którym zainstalowano panele, zacienienie itp.).

# 3. Badania naukowe dotyczące optymalizacji parametrów przekształtników energoelektronicznych

## 3.1. Przekształtniki wielopoziomowe NPC i metody kontroli napięć na DC-link

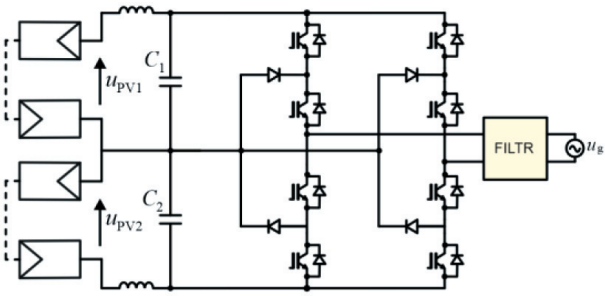
Falowniki napięcia oparte na topologii NPC (*neutral point clamped*) są jednymi z najczęściej stosowanych układów energoelektronicznych. Kontynuowane są jednak badania związane z poprawą działania tych układów w topologiach trójpoziomowych oraz opracowaniem układów NPC o liczbie poziomów większej od trzech. Jednym z najistotniejszych problemów z zakresu sterowania falowników NPC jest konieczność zapewnienia właściwego podziału napięcia stałego na kondensatorach wejściowych układu. Podział napięć stałych można kontrolować przez odpowiednią modulację falownika z wykorzystaniem stanów redundantnych różniących się obciążeniem kondensatorów wejściowych przy tym samym napięciu na wyjściu. Jest to skuteczna metoda wykorzystująca prąd wyjściowy, ale dynamika procesu wyrównywania napięć na kondensatorach zależna jest od obciążenia falownika. Inną metodą jest zastosowanie dodatkowych obwodów dołączonych do kondensatorów wejściowych, co zwiększa koszt układu, ale zapewnia kontrolę podziału napięć stałych również bez obciążenia falownika. Aktywna kontrola podziału napięć wejściowych wymaga prowadzenia pomiaru ich wartości, co także zwiększa koszt falownika.

Poprawna praca falowników wielopoziomowych NPC była przedmiotem następujących badań prowadzonych w AGH:

- falowniki trójpoziomowe NPC z indywidualną kontrolą punktu mocy maksymalnej źródeł fotowoltaicznych (Stala 2010b – rys. 2, Szarek i in. 2017 – rys. 3);
- falownik czteropoziomowy z modulacją zapewniającą obciążenie kondensatorów wejściowych i naturalnym wyrównywaniem napięć (Stala 2020);
- układy aktywnej kontroli napięć dla falowników trój-, cztero- i siedmiopoziomowych NPC (Szarek i in. 2017, Hachlowski i Stala 2019);
- falowniki trójpoziomowe NPC z naturalnym wyrównywaniem napięć wejściowych (Stala 2011, 2013).

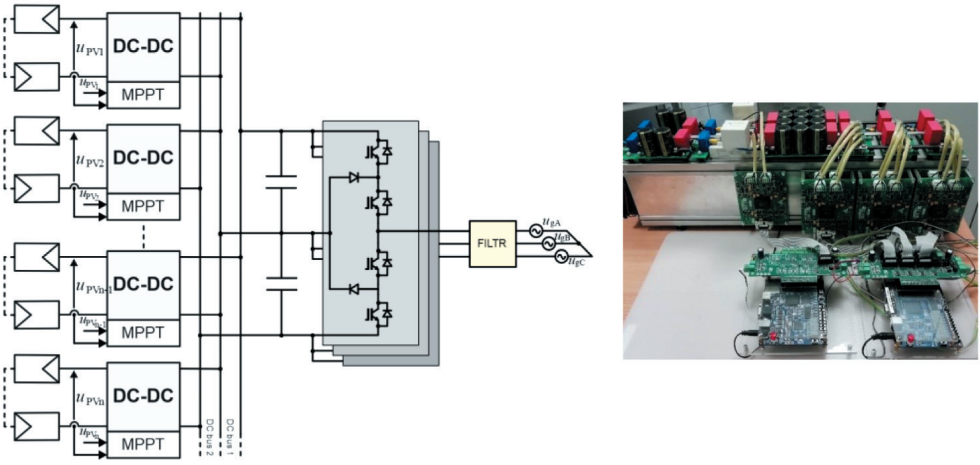
Falownik trójpoziomowy NPC wykorzystuje napięcia stałe z wejściowego dzielnika kondensatorowego. W układzie mostkowym lub trójfazowym można zastosować wektory redundantne do kontroli mocy poszczególnych źródeł wejściowych. Metoda taka służy do wyrównywania podziału napięć wejściowych, ale może również zostać zastosowana do niezależnej kontroli obciążenia dwóch wejściowych źródeł fotowoltaicznych przez falownik. Koncepcję oraz wyniki badań takiego rozwiązania przedstawił Stala (2010b). Wykazał on, że układ mostkowy NPC (rys. 2) może przy odpowied-

nim sterowaniu realizować niezależnie MPPT (*maximum power point tracking*) dwóch wejściowych źródeł PV pracujących w różnych warunkach zewnętrznych wpływających na moc paneli PV.



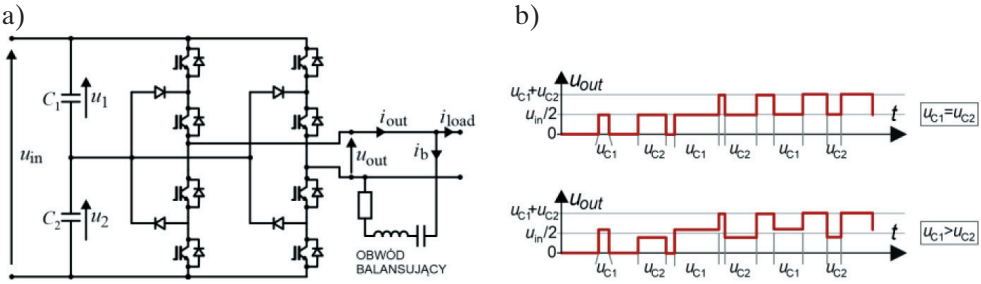

**Rys. 2.** Falownik NPC o trójpoziomowych gałęziach z indywidualnym MPPT dwóch fotowoltaicznych źródeł energii
Źródło: opracowanie własne na podstawie Stala (2010b)

a) b)



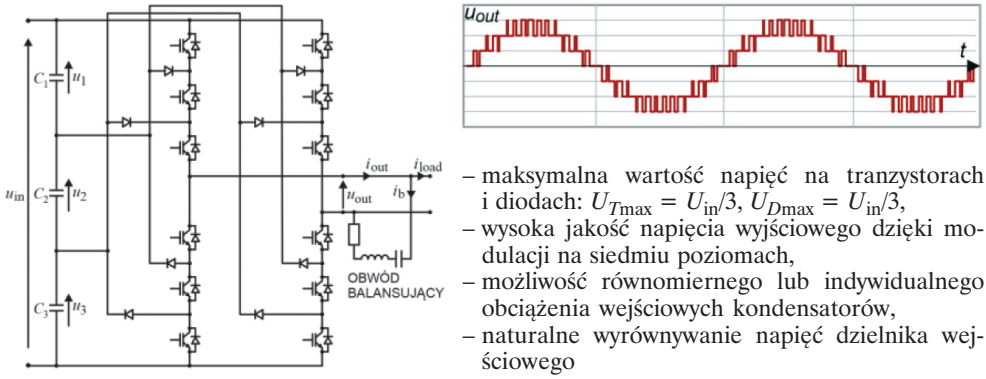

**Rys. 3.** Trójfazowy trójpoziomowy falownik NPC: a) schemat; b) widok
Źródło: opracowanie własne na podstawie Szarek i in. (2017)

Na rysunku 4 przedstawiono układ pięciopoziomowego falownika NPC oraz modelowe przebiegi napięcia wyjściowego uzyskane z wykorzystaniem stanów redundantnych do naturalnego wyrównywania napięć na kondensatorach po stronie napięcia stałego. Zasadę zaprezentowaną przez Stalę i in. (2011) można wykorzystać w układach falowników pracujących równolegle na wspólne wyjście ze wspólnego źródła napięcia wejściowego (Stala 2013), a także w falownikach NPC o liczbie poziomów większej niż trzy (Stala 2020) (rys. 4).




**Rys. 4.** Pięciopoziomowy falownik NPC (a) oraz fragment modulacji napięcia wyjściowego przy sterowaniu z naprzemiennym wykorzystaniem napięcia na kondensatorach wejściowych do uzyskania poziomu napięcia $u_{out} = u_{in}/2$ (b)
Źródło: opracowanie własne na podstawie Stala (2011)

Zastosowanie topologii falownika o większej liczbie poziomów niż trzy umożliwia poprawę jakości modulacji i zmniejszenie gabarytów filtrów pasywnych prądu wyjściowego (rys. 5). Falownik z wejściowym dzielnikiem kondensatorowym zapewnia równomierne lub indywidualne obciążenie wejściowych kondensatorów dzięki zastosowaniu odpowiednich algorytmów sterowania. Nowatorska metoda modulacji dla siedmiopoziomowego falownika NPC (rys. 5) została przedstawiona w publikacji Stali (2020). Proponowane algorytmy modulacji umożliwiają również redukcję stanu niezrównoważenia wartości napięć w sposób naturalny. Układ nie wymaga pomiarów wartości napięć stałych, a ich naturalne wyrównywanie następuje w wyniku przepływu prądu wyjściowego o częstotliwości występującej jedynie w stanie niezbalansowania.

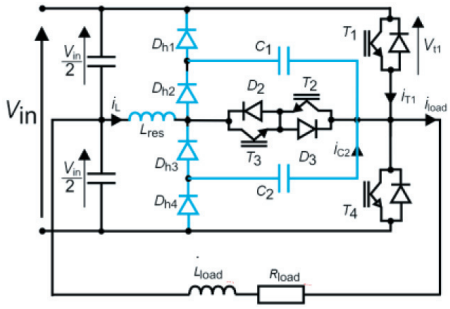



**Rys. 5.** Siedmiopoziomowy falownik NPC
Źródło: opracowanie własne na podstawie Stala (2020)

### 3.2. Przekształtniki wielopoziomowe i DC-DC z miękkim przełączaniem tranzystorów IGBT

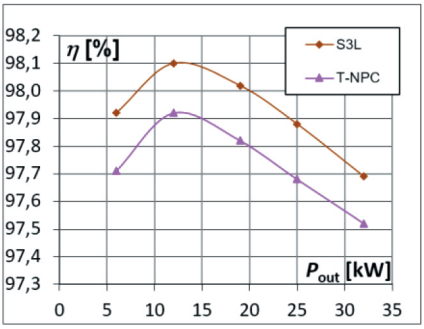
W celu ograniczenia strat w układach energoelektronicznych można stosować dodatkowe układy rezonansowe powodujące wyłączanie elementów półprzewodniko-

wych w warunkach zbliżonych do zerowego napięcia (*zero voltage switching*, ZVS) lub zerowego natężenia prądu (*zero current switching*, ZCS). Przykładem takiego rozwiązania jest trójpoziomowy falownik napięciowy T-NPC z dodatkową celą rezonansową (S3L), przedstawiony na rysunku 6.



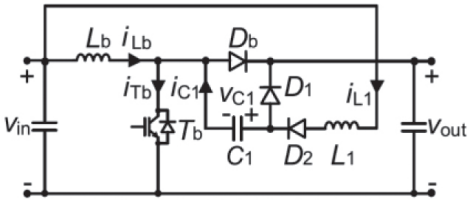

**Rys. 6.** Układ jednej fazy falownika T-NPC z dodatkową celą rezonansową (S3L)
Źródło: Mondzik i in. (2021)

Układ podstawowy z obciążeniem zaznaczono kolorem czarnym, a dodatkowy – kolorem niebieskim. Układ dodatkowy składa się z czterech diod, dwóch kondensatorów i dławika. W czasie załączenia tranzystora $T_1$ następuje oscylacyjne ładowanie kondensatora $C_2$ do napięcia maksymalnego równego $V_{in}$. Przez tranzystor $T_1$ oprócz prądu obciążenia płynie dodatkowo prąd ładowania w obwodzie $V_{in}/2 - T_1 - C_2 - D_{h3} - L_{res}$. W trakcie wyłączania się tranzystora $T_1$ następuje rozładowanie kondensatora $C_2$ w obwodzie $V_{in}/2 - D_{h4} - C_2 - RL_{load}$. Napięcie na zaciskach kolektor-emiter tranzystora $T_1$ jest wtedy równoważone napięciem kondensatora $C_2$. Tranzystor $T_1$ wyłącza się więc w warunkach zbliżonych do ZVS. W czasie impulsowania tranzystorem $T_4$ zachodzi sytuacja analogiczna. Działanie takie ogranicza straty wyłączeniowe tranzystorów $T_1$ i $T_4$. Dodatkowo ze względu na nowe warunki komutacyjne możliwe jest minimalizowanie czasu martwego tranzystorów. Na rysunku 7 przedstawiono porównawcze wyniki sprawności układów falowników T-NPC i S3L.

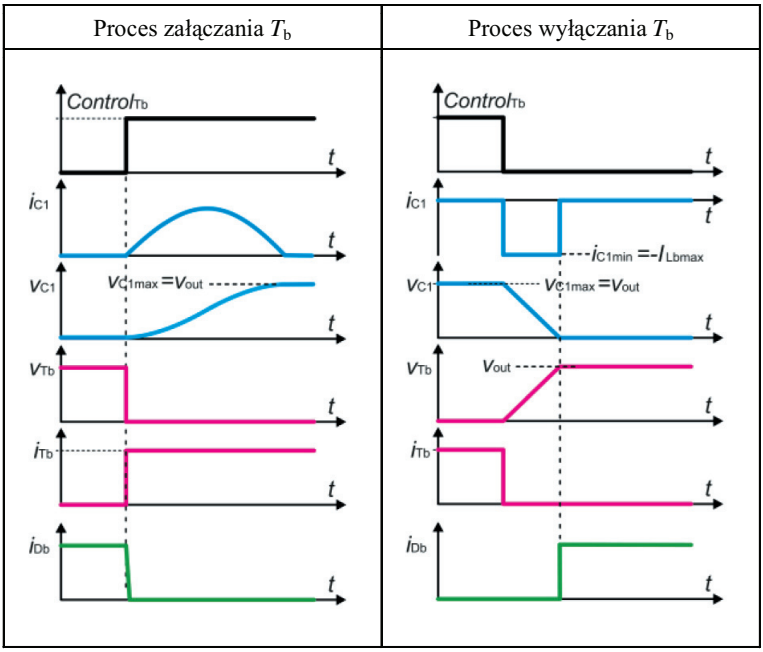



**Rys. 7.** Wyniki pomiarów sprawności falowników T-NPC i S3L
w funkcji mocy obciążenia przy $V_{in}$ = 800 V
Źródło: opracowanie własne na podstawie Mondzik i in. (2021)

Podobne rozwiązanie z dodatkową celą rezonansową mającą na celu ograniczenie strat wyłączeniowych tranzystora mocy zostało wykorzystane w układzie DC-DC podwyższającym napięcie (Mondzik i in. 2022) (rys. 8). Nowymi elementami w stosunku do klasycznego układu *boost* są: $L_1$, $C_1$, $D_1$, $D_2$. W trakcie załączenia tranzystora $T_b$ następuje oscylacyjne ładowanie kondensatora $C_1$ poprzez dławik $L_1$ i diodę $D_2$ do napięcia równego wyjściowemu. W czasie wyłączania tranzystora $T_b$ kondensator $C_1$ rozładowuje się w układzie $V_{in} - L_b - C_1 - D_1 - V_{out}$. Napięcie na tranzystorze $T_b$ jest wtedy równe zeru, a pojemność kondensatora $C_1$ ma wpływ na czas utrzymywania się tego napięcia. Na rysunku 9 przedstawiono teoretyczne przebiegi w prezentowanym układzie.

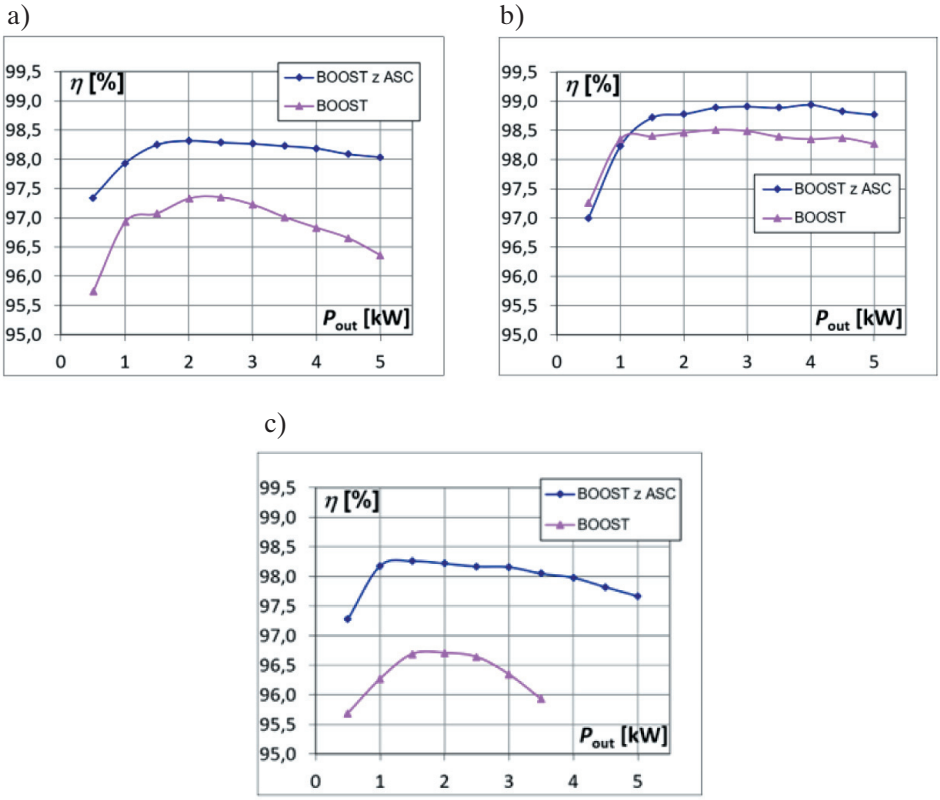



**Rys. 8.** Przekształtnik DC-DC podwyższający napięcie z dodatkową celą rezonansową (ASC)
Źródło: Mondzik i in. (2022)




**Rys. 9.** Teoretyczne przebiegi przekształtnika DC-DC podwyższającego napięcie z dodatkową celą rezonansową
Źródło: opracowanie własne na podstawie Mondzik i in. (2022)

Zastosowanie dodatkowej celi rezonansowej ogranicza straty komutacyjne tranzystora, dzięki czemu zwiększa się sprawność całego układu. Dodatkowo tranzystor, w którym straty są mniejsze, może być impulsowany z większą częstotliwością. Rozwiązanie takie może być więc zastosowane w układach dużej mocy z tranzystorem IGBT. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki pomiarów sprawności modelu rzeczywistego układu o mocy 5 kW dla różnych warunków pracy i wartości pojemności kondensatora $C_1$ równej 44 nF.



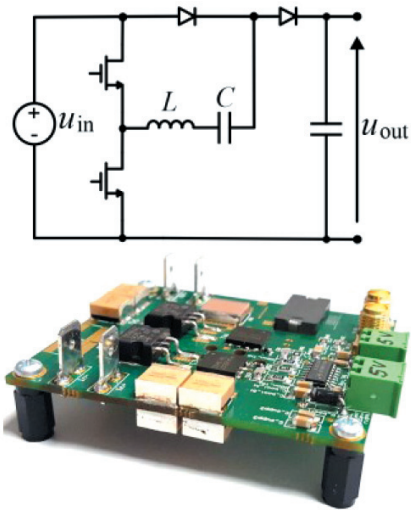

**Rys. 10.** Wyniki sprawności w funkcji mocy wyjściowej przekształtnika *boost* z dodatkową celą rezonansową (ASC) i bez niej w zależności od częstotliwości impulsowania i napięcia na wejściu/wyjściu: a) $f_{sw}$ = 32,2 kHz, $V_{in}/V_{out}$ = 200 V/400 V; b) $f_{sw}$ = 32,2 kHz, $V_{in}/V_{out}$ = 300 V/400 V; c) $f_{sw}$ = 48,7 kHz, $V_{in}/V_{out}$ = 200 V/400 V
Źródło: opracowanie własne na podstawie Mondzik i in. (2022)

## 3.3. Układy z tranzystorami z azotku galu GaN

Tranzystory GaN umożliwiają optymalizację przekształtników w niektórych przypadkach znanych topologii układów energoelektronicznych. Możliwe jest zmniejszenie strat energii i gabarytów elementów pasywnych układu. W badaniach prowadzonych

przez Laboratorium Energoelektroniki AGH tranzystory GaN wykorzystywano w nowych rozwiązaniach układów w celu uzyskania poprawy warunków komutacji i redukcji strat przełączania.

Na rysunku 11 przedstawiono układ DC-DC, w którym uzyskano sprawność 99,27%. Topologię, możliwe tryby pracy, układ laboratoryjny i sprawność przekształtnika zrealizowanego z wykorzystaniem tranzystorów GaN zaprezentowano w publikacji Waradzyna i in. (2020). Dzięki zastosowaniu tranzystorów GaN układ bardziej efektywnie pracuje w trybie komutacji przy zerowym napięciu podczas załączania tranzystorów, co poprawia również jego własności regulacji napięcia wyjściowego.

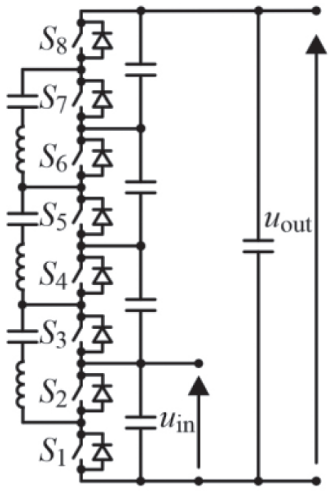
| Przekształtnik rezonansowy z tranzystorami GaN | Parametry i sprawność układu | |
|---|---|---|
|   | Wzmocnienie napięcia | maksymalnie dwukrotne (z możliwością regulacji) |
| | Częstotliwość impulsowania | >100 kHz |
| | Dławik rezonansowy | planarny PCB, $L$ = 10,4 μH |
| | Tranzystory GaN | PGA26E07BA |
| | Maksymalna sprawność | 99,27% |
| | Moc | 400 W |

**Rys. 11.** Przekształtnik DC-DC podwyższający napięcie z przełączanym kondensatorem w obwodzie rezonansowym
Źródło: opracowanie własne na podstawie Waradzyn i in. (2020)

Tranzystory GaN zastosowano również w układach o SC i dużym wzmocnieniu napięciowych (Folmer i Stala 2021a). Niska wartość pojemności wyjściowej $C_{oss}$ pozwoliła na redukcję zakłóceń i strat energii podczas załączania tranzystorów, które w przekształtnikach o przełączanych kondensatorach mogą pracować poza trybem ZVS. Folmer i Stala (2021a) przedstawili wyczerpujące wyniki badania tego problemu, a w kolejnej publikacji zaprezentowali koncepcję układu DC-DC o dużym wzmocnieniu napięcia (Folmer i Stala 2021b).

### 3.4. Układy z tranzystorami z węglika krzemu SiC

Tranzystory z węglika krzemu mogą być efektywnie stosowane w typowych układach energoelektronicznych w celu poprawy parametrów przekształtnika w porównaniu z układami bazującymi na tranzystorach IGBT. Prowadzone badania naukowe obejmują również mniej znane układy przekształtników, w których zastosowanie tranzystorów SiC może być korzystne. Jednym z takich rozwiązań jest dwukierunkowy, wielopoziomowy przekształtnik DC-DC o przełączanych kondensatorach w obwodzie rezonansowym (Kawa i Stala 2020). Podstawową koncepcję układu wraz z wynikami osiągniętymi w projekcie z tranzystorami SiC przedstawiono na rysunku 12. Do korzystnych cech zaprezentowanego projektu z tranzystorami SiC należą: wysoka sprawność (poprawiona w stosunku do układu zrealizowanego z wykorzystaniem tranzystorów krzemowych), równomierne nagrzewanie się układu wynikające z odpowiedniego rozkładu strat energii w jego elementach, a także niewielki spadek napięcia wyjściowego przy wzroście mocy układu.

| Dwukierunkowy, wielopoziomowy przekształtnik z przełączanymi kondensatorami w układzie rezonansowym | Parametry i sprawność układu | |
|---|---|---|
|   | Wzmocnienie napięcia | maksymalnie czterokrotne (0,5/2,0 kV) |
| | Częstotliwość impulsowania | 285 kHz |
| | Dławik rezonansowy | 0,9–3,0 μH |
| | Tranzystory SiC | SCT3030AL i C3M0120090D |
| | Maksymalna sprawność | 98,5% (z układem aktywnej redukcji strat załączania tranzystorów) |
| | Moc | 5 kW |

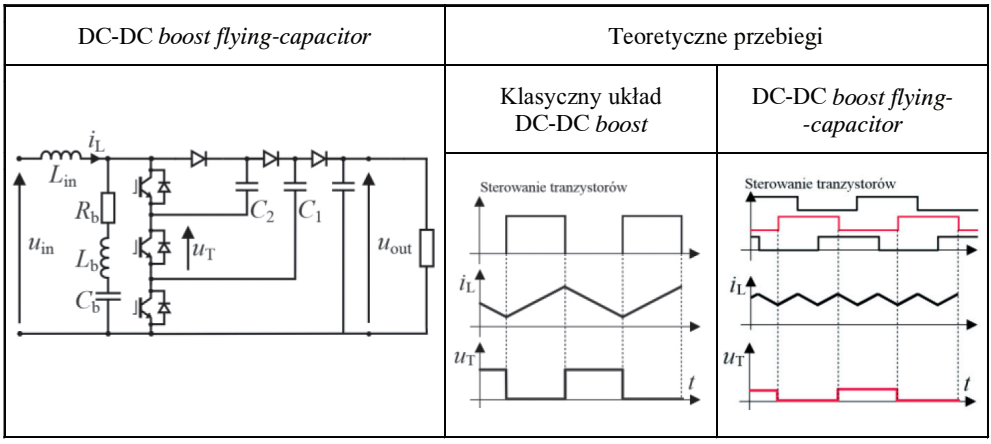
**Rys. 12.** Dwukierunkowy, wielopoziomowy przekształtnik DC-DC podwyższający napięcie o dużym wzmocnieniu oraz wyniki testów z tranzystorami SiC
Źródło: opracowanie własne na podstawie Kawa i Stala (2020)

Ze względu na możliwość pracy dwukierunkowej, redukcję napięć na tranzystorach i możliwość przekształcania napięcia w znacznym zakresie układ może znaleźć zastosowanie przy łączeniu sieci prądu stałego, np. w systemach *smart-grids*.

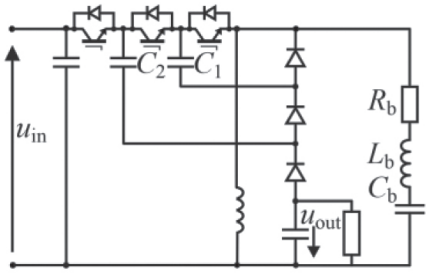
### 3.5. Przekształtniki DC-DC o zwiększonej częstotliwości pracy i zmniejszonych napięciach na tranzystorach w topologiach typu *flying-capacitor*

Na rysunkach 13 i 14 przedstawiono koncepcję układów przekształtników DC-DC rozbudowanych w strukturze wielopoziomowej *flying-capacitors*. Zastosowanie takiego układu jest korzystne ze względu na:

- możliwość zmniejszenia gabarytów dławika w wyniku wzrostu częstotliwości składowej zmiennej prądu dławika,
- możliwość zastosowania tranzystorów i diod o mniejszych napięciach znamionowych.




**Rys. 13.** Wielopoziomowy układ impulsowy DC-DC typu *boost* z naturalną stabilizacją napięć na kondensatorach oraz teoretyczne przebiegi prądu dławika wejściowego i napięcia na jednym z tranzystorów
Źródło: Stala (2010a)




**Rys. 14.** Wielopoziomowy układ impulsowy DC-DC typu *buck-boost* z naturalną stabilizacją napięć na kondensatorach
Źródło: Stala (2010a)

Sterowanie układów DC-DC wielopoziomowych w porównaniu z układami klasycznymi typu *boost* i *buck-boost* nie jest o wiele bardziej skomplikowane. Regulacja napięcia uzyskiwana jest przez zmianę współczynnika wypełnienia sygnałów sterujących, które generowane są dla wszystkich tranzystorów ze stałym przesunięciem fazowym.

W artykule Stali (2010a) przedstawiono wyniki eksperymentów weryfikujących działanie wielopoziomowych układów impulsowych DC-DC typu *boost* i *buck-boost* oraz analizę nowych koncepcji dotyczących naturalnej stabilizacji napięć na kondensatorach układu, zapewniającej bezpieczną pracę przekształtnika.

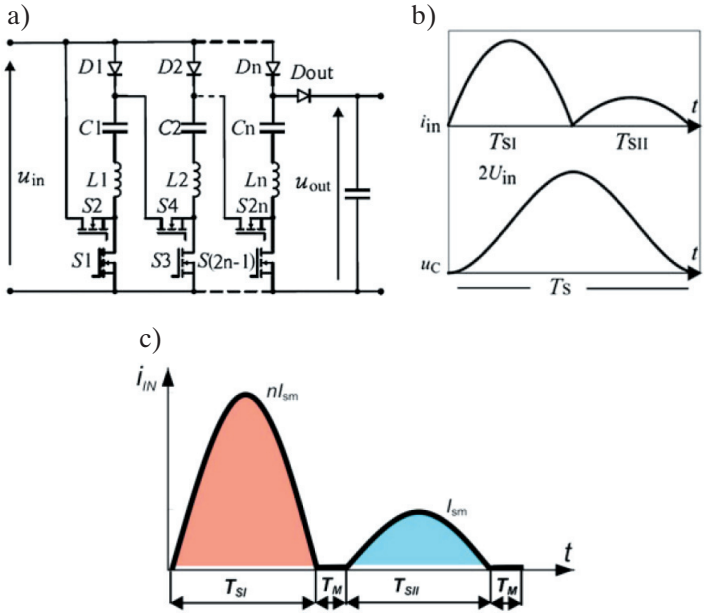
## 3.6. Przekształtniki DC-DC o przełączanych kondensatorach – nowe topologie układów DC-DC

Istotną grupą przekształtników DC-DC, którą badano w ostatnich latach w Laboratorium Energoelektroniki, są rezonansowe układy DC-DC o przełączanych kondensatorach (SCVM). W ramach prowadzonych prac zajmowano się układami z obwodami rezonansowymi. W odróżnieniu od układów niezawierających indukcyjności rezonansowych układy te ograniczają przetężenia prądów przy przełączaniu i zapewniają wyższą sprawność. Przebadano właściwości klasycznych układów oraz przedstawiono i przeanalizowano nowe topologie tego typu przekształtników. Wiele z nich zawiera jedynie cewki powietrzne lub wykorzystuje indukcyjności ścieżek na płytkach PCB, co znacznie zmniejsza gabaryty i ciężar układów oraz umożliwia pracę w wyższych temperaturach.

### 3.6.1. Klasyczne przekształtniki DC-DC o przełączanych kondensatorach

Schemat klasycznego układu o przełączanych kondensatorach przedstawiono na rysunku 15a (Waradzyn i in. 2017a, 2017b). Różne możliwe tryby pracy układu omówiono w pracy Penczka i in. (2017). W publikacji tej wykazano, że najwyższą sprawność otrzymuje się przy równoczesnym ładowaniu (takt 1, przedział $T_{SI}$) wszystkich tranzystorów połączonych równolegle oraz rozładowaniu ich energii (w połączeniu szeregowym) do pojemności wyjściowej (takt 2, przedział $T_{SII}$). W pracy Waradzyna i in. (2017a) przeanalizowano optymalizację parametrów przekształtnika pracującego w tym trybie. Najmniejsza wartość pojemności kondensatorów jest wymagana w przypadku, gdy kondensatory są rozładowywane do wartości bliskiej zero przy minimalnej dopuszczalnej wartości czasu martwego $T_M$. W tym trybie pracy najwyższą sprawność otrzymuje się, gdy czas martwy $T_M$ jest możliwie mały.

Omawiany przekształtnik umożliwia stałe wzmocnienie napięciowe o wartości $n + 1$, gdzie $n$ oznacza liczbę komórek przekształtnika. Ważną cechą układu są stosunkowo niskie napięcia na tranzystorach: napięcie na tranzystorach $S_2$, $S_4$, …, $S_{2n}$ wynosi $U_{in}$, a napięcie na tranzystorach $S_1$, $S_3$, …, $S_{2n-1}$ rośnie kolejno od wartości $U_{in}$ do $nU_{in}$.




**Rys. 15.** Klasyczny przekształtnik DC-DC o przełączanych kondensatorach:
a) schemat układu; b) praca przekształtnika przy przeładowywaniu równoczesnym;
c) prądy przekształtnika przy przeładowywaniu równoczesnym
z uwzględnieniem czasu martwego $T_M$
Źródło: Waradzyn i in. (2017a) – rys. a i b, Penczek i in. (2017) – rys. c

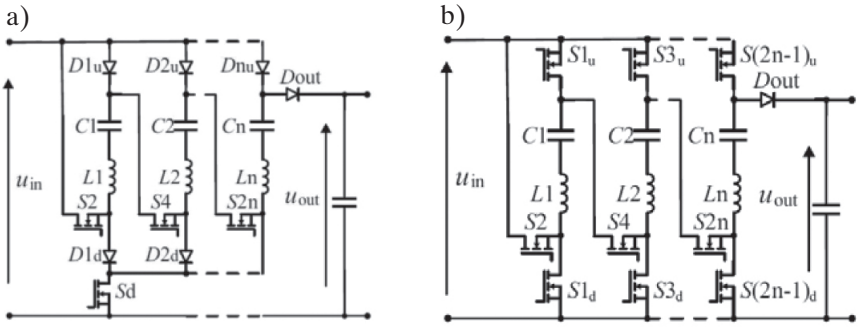
### 3.6.2. Nowe rozwiązania przekształtników DC-DC o przełączanych kondensatorach

W celu optymalizacji parametrów przekształtników DC-DC o przełączanych kondensatorach w Laboratorium Energoelektroniki opracowano i przebadano nowe rozwiązania takich układów. Poniżej przedstawiono wybrane z nich.

Układ zilustrowany rysunku 16a zawiera mniejszą liczbę tranzystorów niż układ klasyczny, co zmniejsza jego koszt i wymiary. W takcie ładowania wykorzystuje się tylko jeden tranzystor i diody. Także jego sterowanie jest prostsze, co zwiększa jego niezawodność. W większości przypadków sprawność tego układu jest niższa niż układu klasycznego. Można ją podnieść głównie przez zastosowanie dolnego tranzystora $S_d$ o możliwie małej wartości rezystancji $R_{DS(on)}$. Zalety tego układu ujawnią się w zastosowaniach, w których straty przełączania stanowią znaczną część strat całkowitych (układy wysokonapięciowe o niskiej mocy i dużej częstotliwości przełączeń).

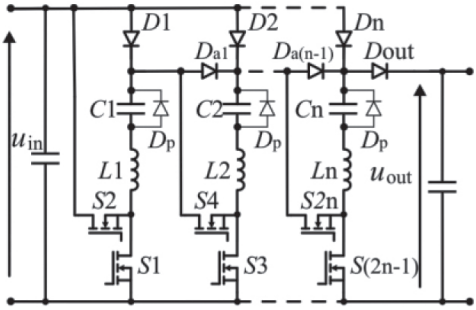
W układzie o topologii synchronicznej (rys. 16b) zamiast górnych diod zastosowano tranzystory, co zmniejsza straty przewodzenia w takcie ładowania przełączanych kondensatorów. W układzie eksperymentalnym osiągnięto większą sprawność niż w układzie klasycznym. Układ ten będzie szczególnie przydatny w przypadkach, gdy

straty przewodzenia diod stanowią znaczną część strat całkowitych (układy niskoczęstotliwościowe) i gdy można zastosować tranzystory o małej wartości rezystancji $R_{DS(on)}$. Układ ten można zmodyfikować przez zastąpienie diody $D_{out}$ tranzystorem i wtedy przekształtnik może pracować jako układ dwukierunkowy.




**Rys. 16.** Zmodyfikowane wersje układu klasycznego przekształtnika DC-DC o przełączanych kondensatorach: a) układ o zmniejszonej liczbie tranzystorów; b) układ o topologii synchronicznej
Źródło: Waradzyn i in. (2017b)

W pracy Stali i in. (2019a) opisano kolejną modyfikację klasycznego przekształtnika DC-DC o przełączanych kondensatorach zawierającą dodatkowe diody (rys. 17). Układ ten może pracować jak klasyczny układ (rys. 15). Jedną z jego zalet jest możliwość pracy z mniejszym wzmocnieniem. Uzyskuje się to dzięki temu, że niektóre komórki pozostają wtedy nieaktywne, co jest możliwe na skutek zastosowania dodatkowych diod $D_{a1}$, …, $D_{a(n-1)}$. Istotną cechą tego przekształtnika jest odporność na stany awaryjne, co także zostało omówione w publikacji Stali i in. (2019a). Przedstawiono w niej m.in. zarejestrowany przykład reakcji układu na nagły zanik prądu w tranzystorze $S_3$. Prąd płynący przez gałąź z indukcyjnością $L_2$ zamyka się wtedy w obwodzie $L_2$ – dioda zwrotna tranzystora $S_4$ – $D_{a1}$ – $C_2$ (rys. 17).

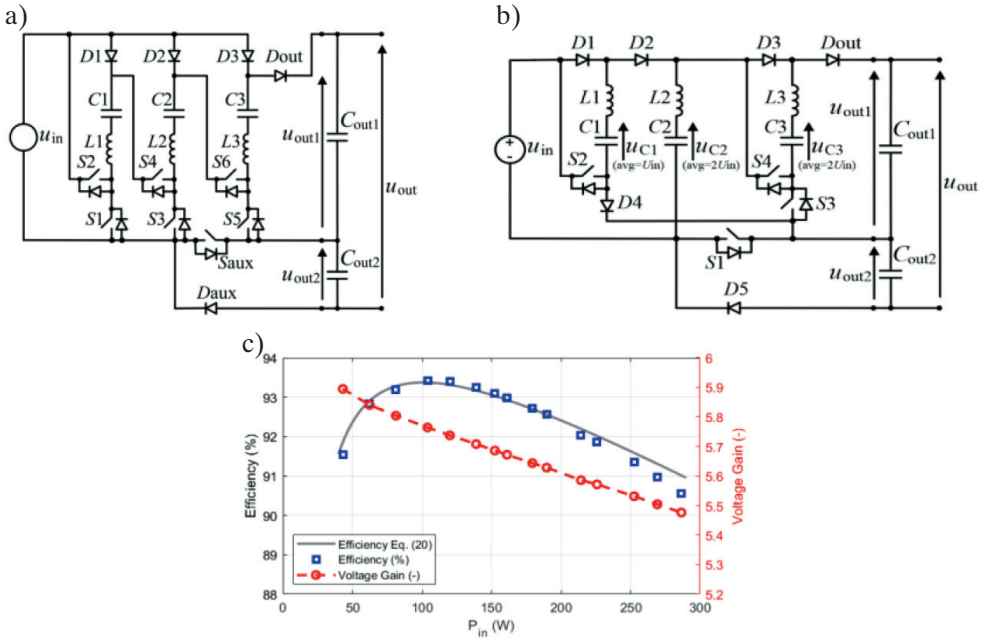



**Rys. 17.** Układ przekształtnika DC-DC o przełączanych kondensatorach umożliwiający regulację mocy w dół oraz odporny na stany awaryjne
Źródło: Stala i in. (2019a)

Na rysunku 18a przedstawiono nowy układ przekształtnika SCVM o wysokim wzmocnieniu, niskiej liczbie łączników oraz niskim napięciu na łącznikach. Napięcie wyjściowe jest blisko dwukrotnie wyższe niż w układzie klasycznym (rys. 15a), gdyż jest sumą napięć na pojemnościach wyjściowych $C_{out1}$ i $C_{out2}$. Topologia umożliwia ładowanie obu pojemności wyjściowych przy dodaniu tylko jednego łącznika i jednej diody do układu klasycznego. Oznacza to znaczną redukcję liczby elementów półprzewodnikowych w odniesieniu do uzyskanego wzmocnienia układu. To rozwiązanie skutkuje także znacznie obniżonym napięciem na łącznikach względem napięcia wyjściowego: napięcie na dwu łącznikach jest bliskie połowie napięcia wyjściowego, zaś na pozostałych jest znacznie niższe. W efekcie uzyskuje się obniżenie zarówno strat przewodzenia, jak i przełączania.

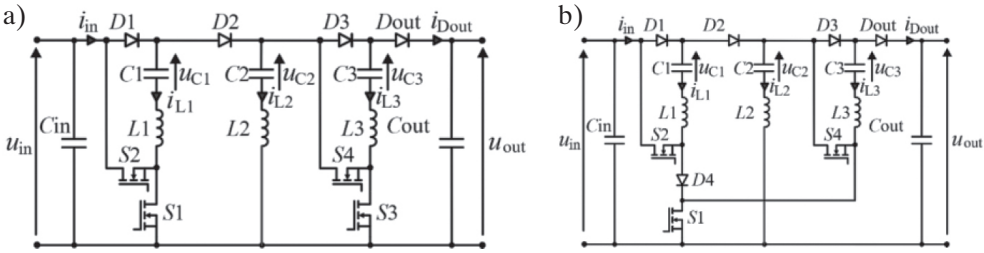
Odmianą omawianego układu jest przekształtnik z rysunku 18b. Zawiera on dodatkową gałąź z elementami biernymi $L_2$, $C_2$ oraz jeszcze mniejszą liczbę łączników. Osiąga się sześciokrotne wzmocnienie napięciowe przy zastosowaniu zaledwie czterech łączników. Także w tym układzie uzyskuje się znaczną redukcję napięć na łącznikach w odniesieniu do układu klasycznego.

Rysunek 18c przedstawia teoretyczną (linia ciągła) i zmierzoną sprawność układu oraz jego wzmocnienie podczas pracy z częstotliwością 35 kHz przy napięciu wejściowym 50 V.




**Rys. 18.** Nowe układy przekształtnika DC-DC o przełączanych kondensatorach o podwójnym wzmocnieniu i zmniejszonej liczbie elementów: a) schemat układu – wersja 1; b) schemat układu o zmniejszonej liczbie elementów – wersja 2; c) teoretyczna (linia ciągła) i zmierzona sprawność oraz wzmocnienie układu z rysunku 18b przy $U_{in}$ = 50 V oraz $f_S$ = 35 kHz
Źródło: Stala i in. (2019b) – rys. a, Stala i in. (2021a) – rys. b i c

Pewną wadą omówionych układów o dzielonej pojemności wyjściowej jest to, że ujemne bieguny napięcia wejściowego i wyjściowego mają różne potencjały. Wady tej nie mają układy przedstawione na rysunku 19 (Stala i in. 2020). Układ LCSCVMb to odmiana układu LCSCVMa zawierająca jeden tranzystor mniej. Podstawową różnicą między tymi układami a układem klasycznym (rys. 15a) jest to, że zawierają gałąź z elementami biernymi $L_2$, $C_2$ zamiast pełnej komórki, jak w klasycznym przekształtniku SCVM, co skutkuje zmniejszoną liczbą łączników. Do kondensatora $C_2$ jest przekazywana energia ze źródła zasilania oraz kondensatora $C_1$, po czym w następnym takcie ta energia zostaje przekazana do kondensatora $C_3$, zaś w kolejnym – na wyjście układu. W ten sposób kondensator $C_2$ także bierze udział w przekazywaniu energii ze źródła do odbiornika. W publikacji Stali i in. (2020) omówiono również możliwe tryby pracy przedstawionych układów.



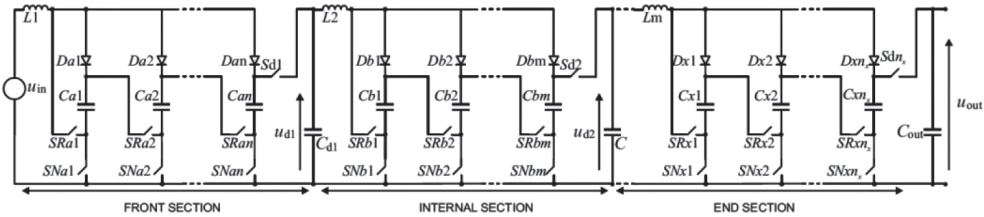

**Rys. 19.** Zmodyfikowane układy przekształtnika SCVM: a) LCSCVMa; b) LCSCVMb
Źródło: Stala i in. (2020)

W publikacji Stali i Piroga (2018) przedstawiono układ wielosekcyjny, którego istotą jest szeregowe połączenie kompletnych układów SCVM (rys. 20). Układ taki umożliwia osiąganie bardzo dużego wzmocnienia napięciowego przy stosunkowo niewielkiej liczbie elementów. Wzmocnienie to jest iloczynem wzmocnień poszczególnych sekcji. Ważną cechą tego układu jest to, że w każdej sekcji występuje inny stosunek wartości napięć do natężeń prądu. W sekcjach najbliższych źródła zasilania są największe natężenia prądu oraz najniższe napięcia. Natomiast w sekcjach bliższych wyjścia układu rosną napięcia przy malejących wartościach natężeń prądu. Układ wymaga więc indywidualnego doboru elementów w każdej sekcji.

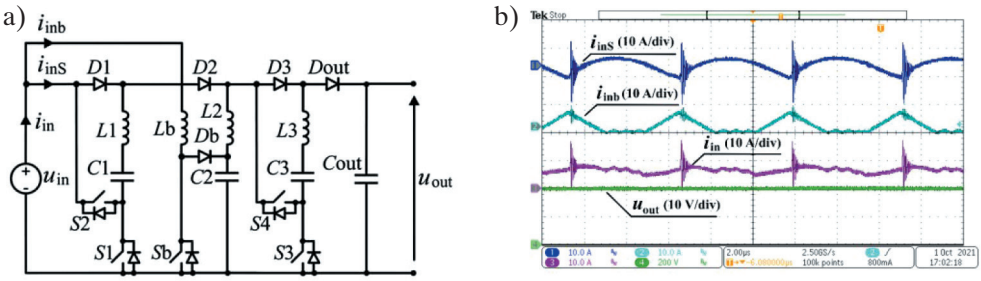
Opracowano także tyrystorowe wysokonapięciowe układy przekształtnika DC-DC dużej mocy o przełączanych kondensatorach – szczegóły można znaleźć w artykule Kawy i in. (2016).

Pewną wadą układów o przełączanych kondensatorach jest duża zawartość tętnień w prądzie wejściowym, który ma zwykle postać pulsów o kształcie zbliżonym do sinusoidalnego. Aby zmniejszyć negatywny wpływ tych tętnień na źródło zasilania, należy zastosować kondensator wejściowy o dużej pojemności. W celu zmniejszenia tętnień prądu wejściowego zbudowano przekształtnik hybrydowy przedstawiony na rysunku 21a,

który jest połączeniem układu o przełączanych kondensatorach SCVM (rys. 19a) oraz układu *boost* (elementy $L_b$, $S_b$ i $D_b$). Układ *boost* pobiera prąd w tych przedziałach czasowych, w których układ SCVM prądu nie pobiera lub pobiera prąd o niewielkiej wartości. Zarejestrowane przebiegi wybranych wielkości przedstawia rysunek 21b.

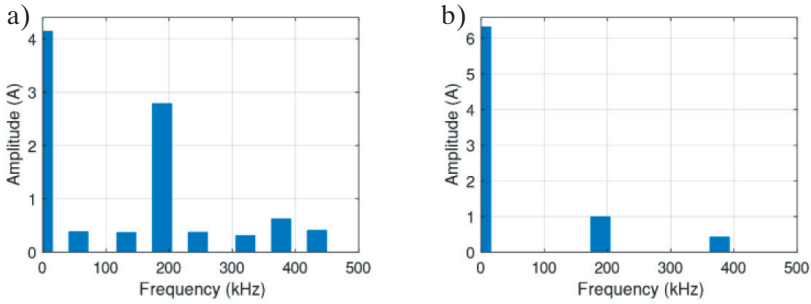



**Rys. 20.** Schemat przykładowego układu wielosekcyjnego złożonego z trzech sekcji
Źródło: Stala i Piróg (2018)




**Rys. 21.** Przekształtnik hybrydowy o zredukowanych tętnieniach prądu wejściowego:
a) schemat; b) zarejestrowane przebiegi prądów
Źródło: Stala i in. (2021b) – rys. a, Stala i in. (2022) – rys. b

Na rysunku 22 przedstawiono zawartość wyższych harmonicznych w prądzie samego przekształtnika SCVM oraz przekształtnika hybrydowego. Zarówno przebieg prądu wejściowego (rys. 21c), jak i analiza FFT (rys. 22) potwierdzają bardzo znaczne zmniejszenie tętnień prądu.

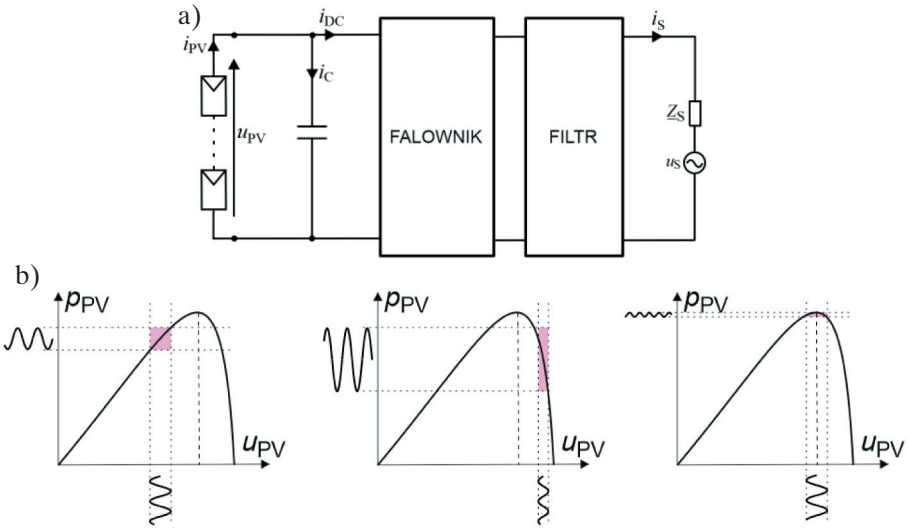



**Rys. 22.** Wyniki analizy FFT prądu wejściowego przekształtników:
a) przekształtnik SCVM; b) przekształtnik hybrydowy
Źródło: Stala i in. (2022)

# 4. Nowe koncepcje i metody sterowania systemów fotowoltaicznych

## 4.1. Algorytm MPPT w systemie z jednofazowym falownikiem napięcia

W jednofazowym systemie fotowoltaicznym, szczególnie w przypadku zastosowania zoptymalizowanej topologii o niewielkich gabarytach elementów po stronie wejściowej, składowa zmienna o częstotliwości mocy jest obecna w napięciu wyjściowym fotowoltaicznego źródła. Zjawisko to można wykorzystać do opracowania algorytmu poszukiwania punktu maksymalnej mocy źródła fotowoltaicznego (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*). W publikacji Stali i in. (2011) zaprezentowano realizację koncepcji MPPT bazującej na analizie częstotliwości składowej zmiennej mocy źródła, która jest dublowana jedynie w otoczeniu MPP (rys. 23). Analiza składowych mocy źródła oraz odpowiednie sterowanie falownikiem umożliwiają doprowadzenie systemu do pracy w punkcie MPP źródła.

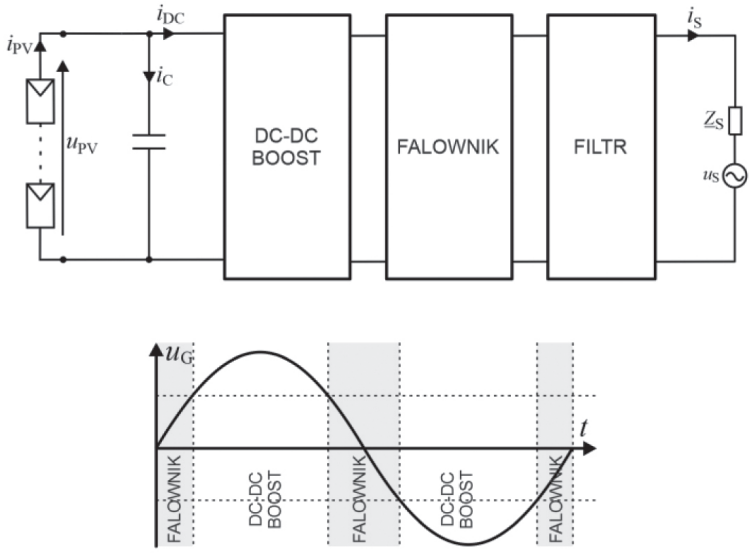


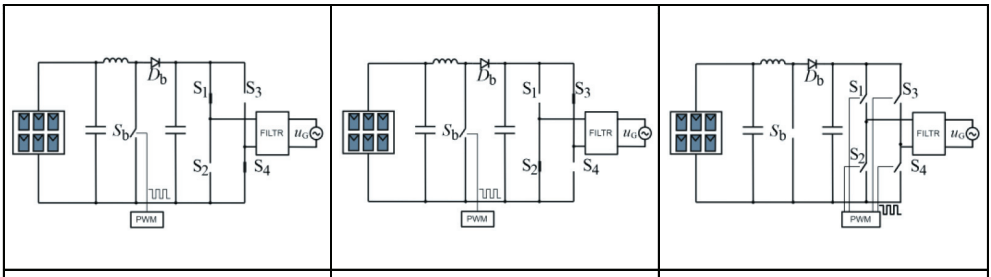

**Rys. 23.** Jednofazowy system fotowoltaiczny dołączony do sieci przez jednostopniowy falownik napięcia (a) oraz podstawy metody MPPT (b)
Źródło: Stala i in. (2011)

## 4.2. Sterowanie jednofazowym systemem fotowoltaicznym dołączonym do sieci elektroenergetycznej z dzielonym czasem impulsowania przekształtników

Sterowanie falownikiem fotowoltaicznym przekazującym energię do sieci elektroenergetycznej jest szeroko analizowanym problemem. Pomimo licznych przemysłowych aplikacji systemów sterowania poszukuje się nowych rozwiązań umożliwiających

poprawę parametrów przekształtnika, takich jak sprawność, poziom zakłóceń czy koszt układu. W publikacji Stali i in. (2010) przedstawiono koncepcję i wyniki testów metody sterowania jednofazowym przekształtnikiem fotowoltaicznym DC-AC złożonym z układu DC-DC *boost* oraz falownika dołączonego do sieci elektroenergetycznej. Optymalizacja strat łączeniowych w systemie zakłada tu aktywne wykorzystanie poszczególnych przekształtników jedynie w części okresu napięcia wyjściowego (rys. 24). Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest redukcja pojemności banku kondensatorów w obwodzie pośredniczącym.




| | | |
|---|---|---|
| aktywna kontrola prądu sieci przez przekształtnik DC-DC *boost* przy dodatniej wartości napięcia sieci | aktywna kontrola prądu sieci przez przekształtnik DC-DC *boost* przy ujemnej wartości napięcia sieci | aktywna kontrola prądu sieci przez falownik przy niskiej bezwzględnej wartości napięcia sieci |

**Rys. 24.** Koncepcja sterowania z czasowo aktywną modulacją zapewniającą kontrolę prądu sieci w systemie fotowoltaicznym złożonym z przekształtnika DC-DC *boost* i falownika
Źródło: Stala i in. (2010)

### 4.3. System szybkiego prototypowania FPGA umożliwiający modelowanie *hardware-in-the-loop*

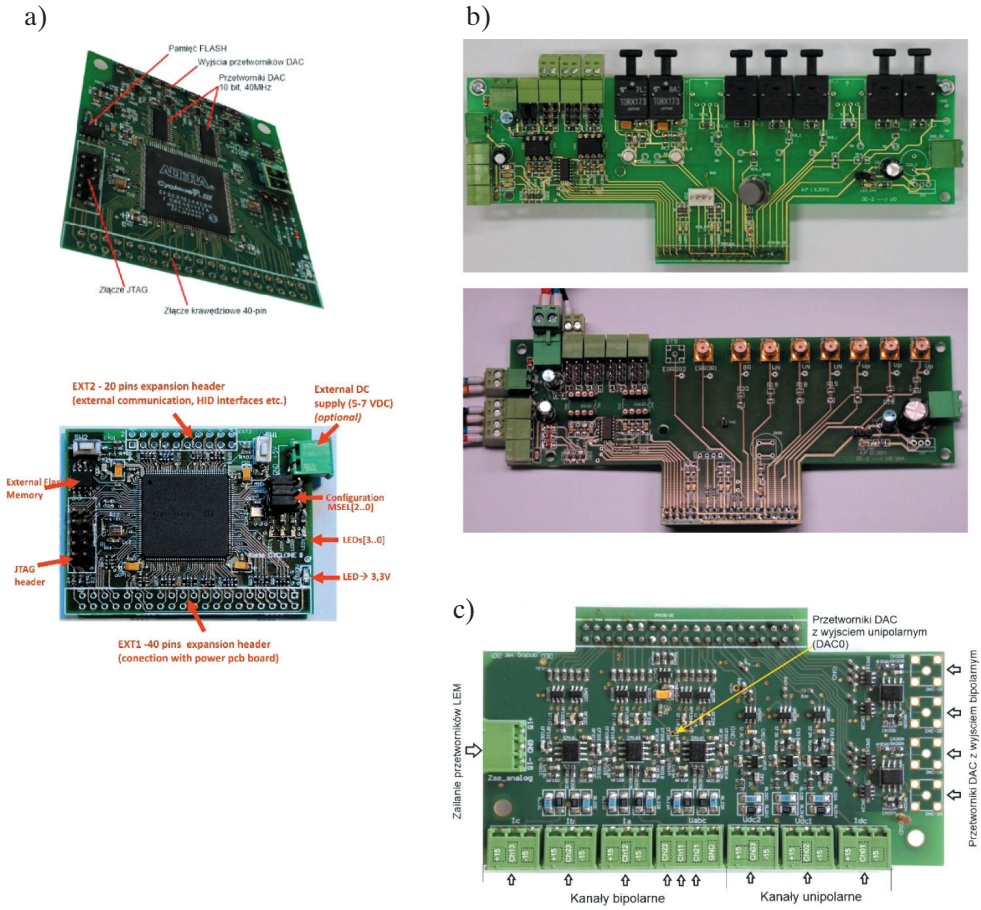
Nowe topologie przekształtników energoelektronicznych bardzo często wymagają stosowania złożonych algorytmów sterowania oraz skomplikowanych metod generowania sygnałów sterujących elementy półprzewodnikowe. W szczególności, na etapie weryfikacji koncepcji oraz testów modeli funkcjonalnych, oczekiwana jest elastyczność systemu sterowania pozwalająca na implementację specjalizowanych modułów peryferyjnych (takich jak np. rozbudowane moduły PWM umożliwiające generowanie nietypowych sekwencji sterujących) oraz zdolność do wykonywania skomplikowanych obliczeń w czasie rzeczywistym z dużą częstotliwością. Pożądaną cechą jest również uniwersalność systemu oraz łatwość jego adaptacji, gdyż na etapie weryfikacji koncepcji często trudno do końca oszacować zasoby sprzętowe i programowe jakie będą wymagane od końcowego sterownika. W ostatnich kilkunastu latach, wykorzystując doświadczenia zdobyte podczas projektowania, uruchamiania i badania różnych przekształtników energoelektronicznych, w Laboratorium Energoelektroniki AGH opracowano system szybkiego prototypowania FPGA. Bazuje on zarówno na rozwiązaniach sprzętowych, jak i algorytmicznych.

W skład części sprzętowej systemu wchodzą:

- **sterownik główny** – z reguły bazujący na karcie sterującej wyposażonej w ustandaryzowane 40-pinowe złącze umożliwiające podłączanie kart rozszerzających o różnych funkcjonalnościach (rys. 25b);
- **karta pomiarowa** – wyposażona w zestaw rekonfigurowanych torów analogowych z 12-bitowymi przetwornikami ADC ($f_{smax}$ = 3 MHz), pięć 12-bitowych przetworników DAC oraz bardzo szybkie komparatory analogowe; na podkreślenie zasługuje to, że każdy z przetworników A/C i C/A jest niezależnie wyzwalany, co pozwala na pełne wykorzystanie możliwości, jakie daje sterownik FPGA (przetwarzanie równoległe, próbkowanie synchroniczne implementowane osobno dla każdego kanału itd.) (rys. 25b);
- **zestaw kart we/wy** – projektowane indywidualnie pod kątem konkretnej aplikacji (wyjścia PWM), zapewniające obsługę sygnałów błędu oraz obsługę automatycznych systemów sterowania pracą i zabezpieczeń (rys. 25c).

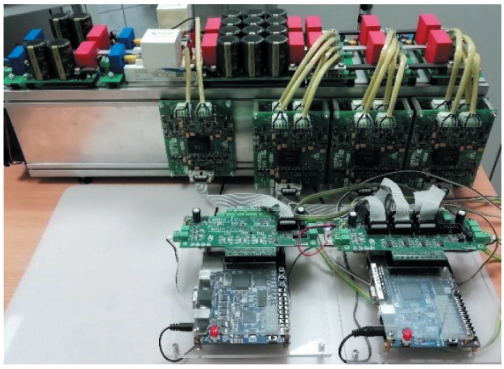
W celu zapewnienia, że system sterowania będzie prawidłowo realizował algorytmy oraz będzie odporny na zakłócenia generowane przez obiekt, jakim jest przekształtnik energoelektroniczny, opracowano koncepcję sterowania „quasi-analogowego" umożliwiającą prowadzenie obliczeń z częstotliwością narzucaną przez przetworniki ADC (do 3 MHz) przy jednoczesnym zapewnieniu prawidłowej sekwencji wykonywania

obliczeń przez kolejne bloki implementowane w kaskadowym układzie zamkniętej regulacji. W efekcie doświadczeń aplikacyjnych opracowano bogatą bibliotekę specjalizowanych funkcji implementowanych w języku VHDL, umożliwiających obsługę przekształtników energoelektronicznych, takich jak moduły PLL, wyrafinowane generatory PWM pozwalające na implementację nietypowych sekwencji sterujących oraz posiadające zaawansowane funkcjonalności sterowania pomiarami analogowymi, adaptacyjne generatory „czasów martwych", rozbudowane moduły generowania sygnałów synchronizujących pomiary oscyloskopowe, maszyny stanu zarządzające automatyką procesu załączania, wyłączania i kontroli pracy przekształtników oraz moduły do wizualizacji pracy przekształtnika w czasie rzeczywistym (wykorzystanie narzędzia *Signal Tap Logic Analyzer*).

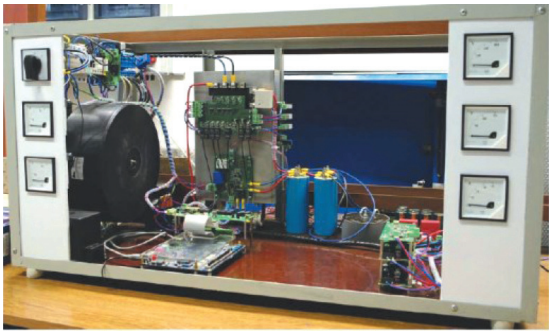



**Rys. 25.** System szybkiego prototypowania FPGA:
a) karty sterujące FPGA (Cyclone III); b) przykładowe karty wejść/wyjść cyfrowych;
c) karta analogowa

Bardzo ważną cechą systemu szybkiego prototypowania FPGA jest możliwość bezpiecznej zmiany newralgicznych parametrów przekształtnika (takich jak np. współczynnik wypełnienia i wzajemne przesunięcie impulsów sterujących elementy półprzewodnikowe, częstotliwość przełączeń, wartość „czasu martwego") bezpośrednio w trakcie pracy urządzenia, za pomocą dedykowanego interfejsu użytkownika. Jest to możliwe, gdyż każda z opracowanych funkcji bibliotecznych została wyposażona w mechanizm bezpiecznej zmiany parametrów w trakcie pracy przekształtnika bez ryzyka uszkodzenia urządzenia. Funkcjonalność ta pozwala na manualne dostrajanie wybranych przez użytkownika parametrów przekształtnika w trakcie jego działania. Usprawnia to proces uruchamiania przekształtników energoelektronicznych oraz znacząco skraca czas poszukiwania i doboru optymalnego punktu pracy urządzenia (zmiana parametrów nie wiąże się koniecznością każdorazowego przerywania pracy przekształtnika, a następnie powtarzania procedury załączenia i wyłączenia).



**Rys. 26.** Zastosowanie systemu szybkiego prototypowania FPGA w trójfazowym falowniku fotowoltaicznym
Źródło: Szarek i in. (2017)



**Rys. 27.** Zastosowanie systemu szybkiego prototypowania FPGA w jednofazowym falowniku fotowoltaicznym
Źródło: Penczek i in. (2012)

Opracowany system szybkiego prototypowania FPGA był z powodzeniem stosowany jako układ sterowania w wielu modelach funkcjonalnych budowanych na potrzeby badań naukowych. Były to m.in.: dwufazowy przekształtnik DC-DC z cewkami sprzężonymi (Barry i in. 2016, 2017, 2018), przekształtniki DC-DC o przełączalnych kondensatorach (Waradzyn i in. 2017b, Stala i in. 2018a, 2019a, 2019b, 2021a) jednofazowy inwerter solarny (Stawiarski i in. 2012) oraz trójfazowy inwerter solarny (Szarek i in. 2017).

System szybkiego prototypowania może być również stosowany do modelowania sprzętowego (*hardware-in-the-loop*, HIL), które pozwala na symulowanie w czasie rzeczywistym przekształtników energoelektronicznych. W latach 2008–2011, w trakcie realizacji projektu badawczego MNiSW o numerze N N510389535 pt. *Modelowanie systemów fotowoltaicznych w układach FPGA*, została opracowana koncepcja realizacji sprzętowej symulatora dla systemów fotowoltaicznych (Stala i Stawiarski 2010, Penczek i in. 2011). Układ umożliwia emulację numeryczną struktur rozbudowanych systemów PV i efektywną weryfikację symulacyjną algorytmów sterowania dla przekształtników energoelektronicznych (równocześnie może pełnić funkcję sterownika dla rzeczywistego przekształtnika). Działanie symulatora sprzętowego zostało zweryfikowane w badaniach laboratoryjnych przekształtnika DC-DC podnoszącego napięcie. Porównanie wyników symulacji sprzętowej i badań układu rzeczywistego wykazało bardzo dużą zbieżność uzyskanych rezultatów. Wyniki zostały zaprezentowane w artykule Penczka i in. (2011).

## 5. Podsumowanie

Poprawa parametrów systemu przekształcania energii ze źródeł fotowoltaicznych obejmuje różne aspekty optymalizacji konfiguracji układów przekształtnikowych, ich sterowania oraz metod projektowania i weryfikacji. Systemy fotowoltaiczne projektowane są w wielu wariantach mocy i napięć źródłowych. W zależności od koncepcji projektowanego systemu kryterium optymalizacji może obejmować sprawność systemu przekształtnikowego, jego funkcjonalność, gabaryty i koszt. W przedstawionym przeglądzie literatury dokumentującym badania w Laboratorium Energoelektroniki AGH zawarte są przykłady nowych koncepcji możliwych do zastosowania w falownikach fotowoltaicznych i przekształtnikach DC-DC. Zademonstrowano również koncepcje i możliwości sterowania opracowane dla układów FPGA, a także system do testowania sterowania z wykorzystaniem symulacji czasu rzeczywistego. Przedstawiono także przykłady implementacji tranzystorów mocy z węglika krzemu (SiC) i azotku galu (GaN) w układach wysokiej częstotliwości pracujących z wysoką sprawnością.

W Laboratorium Energoelektroniki AGH prowadzone są również badania układów energoelektronicznych i metod sterowania o możliwych zastosowaniach w wielu innych współczesnych obszarach techniki.

## Literatura

Barry B.C., Hayes J.G., Ryan R.T., Ryłko M.S., Stala R., Penczek A., Mondzik A., 2016, *Small-signal model and control of the interleaved two-phase coupled-inductor boost converter*, [w:] *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: September 18–22, 2016, Milwaukee: proceedings*, IEEE, Piscataway, s. 1–6. https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855447.

Barry B.C., Hayes J.G., Ryan R.T., Ryłko M.S., Stala R., Penczek A., Mondzik A., 2017, *Digital Type II compensation with forced-output control of an interleaved two-phase coupled-inductor boost converter*, [w:] *ECCE 2017: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: October 1–5, 2017, Cincinnati*, IEEE, Piscataway, s. 4935–4941. https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8096836.

Barry B.C., Hayes J.G., Rylko M.S., Stala R., Penczek A., Mondzik A., Ryan R.T., 2018, *Small-signal model of the two-phase interleaved coupled-inductor boost converter*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33(9), s. 8052–8064. https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2765920.

Chojowski M., Stala R., Piłat A., Skowron M., Folmer S., 2021, *The design concept of low cost and volume switched-capacitor DC-DC resonant converter*, [w:] *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC): Gliwice, Poland, 25–29 April, 2021: proceedings*, IEEE, Piscataway, s. 200–206. https://doi.org/10.1109/PEMC48073.2021.9432547.

Folmer S., Stala R., 2021a, *GaN and superjunction MOSFET transistor switching in a resonant switched-capacitor converter*, [w:] *Ee 2021: 21st international symposium on Power Electronics: Novi Sad, Serbia, October 27th–30th, 2021: proceedings*, IEEE, Piscataway, s. 1–6. https://doi.org/10.1109/Ee53374.2021.9628224.

Folmer S., Stala R., 2021b, *DC-DC high voltage gain switched capacitor converter with multilevel output voltage and zero-voltage switching*, IEEE Access, vol. 9, s. 129692–129705. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3111546.

Hachlowski J., Stala R., 2019, *DC-link voltage balancing converter with resonant switched--capacitor circuit for four-level and six-level NPC inverter*, [w:] *EPE'19 ECCE Europe: European Power Electronics and Drives Association: September 2–6, 2019, Genova, Italy*, IEEE, Piscataway, s. P.1–P.10. https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8914829.

Kawa A., Stala R., 2016, *The flying-capacitor SEPIC converter with the balancing circuit*, Archives of Electrical Engineering, vol. 65(3), s. 411–424. https://doi.org/10.1515/aee-2016-0030.

Kawa A., Stala R., 2017, *Bidirectional multilevel switched-capacitor resonant converter based on SiC MOSFET switches*, [w:] *EPE'17 ECCE Europe: 19th European Conference on Power Electronics and Applications: September 11–14 2017, Warsaw: proceedings*, IEEE, Piscataway, s. P.1–P.10. https://doi.org/10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099148.

Kawa A., Stala R., 2020, *SiC-based bidirectional multilevel high-voltage gain switched-capacitor resonant converter with improved efficiency*, Energies, vol. 13(10), 2445. https://doi.org/10.3390/en13102445.

Kawa A., Stala R., Mondzik A., Piróg S., Penczek A., 2016, *High-power thyristor-based DC–DC switched-capacitor voltage multipliers: Basic concept and novel derived topology with reduced number of switches*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31(10), s. 6797–6813. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2505906.

Mondzik A., Waradzyn Z., Stala R., Penczek A., 2016a, *High efficiency switched capacitor voltage doubler with planar core-based resonant choke*, [w:] *CPE-POWERENG 2016: 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering: Bydgoszcz, Poland, 29 June–01 July, 2016: USB proceedings*, IEEE, Piscataway, s. 402–409. https://doi.org/10.1109/CPE.2016.7544222.

Mondzik A., Penczek A., Ryłko M., Stala R., Szarek M., Szot S., 2016b, *Switching assembly for an NPC multi-point inverter having relief network*, SMA Solar Technology AG, Niestetal (DE), patent nr WO 2016012465 A1, 2016-01-28.

Mondzik A., Penczek A., Ryłko M., Szot S., Szarek M., Stala R., 2020a, *Driver circuit, circuit arrangement comprising a driver circuit, and inverter comprising a circuit arrangement*, SMA Solar Technology AG, Niestetal (DE), patent nr CN 107258047 B, 2020-06-23.

Mondzik A., Penczek A., Ryłko M., Szot S., Szarek M., Stala R., 2020b, *Driver circuit, circuit arrangement comprising a driver circuit, and inverter comprising a circuit arrangement*, SMA Solar Technology AG, Niestetal (DE), patent nr US 10804791 B2, 2020-10-13.

Mondzik A., Stala R., Penczek A., Piróg S., Szot S., Ryłko M., 2021, *Operation improvement of the three-level T-NPC soft switching inverter with passive snubber*, [w:] *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC): Gliwice, Poland, 25–29 April, 2021: proceedings*, IEEE, Piscataway, s. 147–152. https://doi.org/10.1109/PEMC48073.2021.9432505.

Mondzik A., Stala R., Piróg S., Penczek A., Gucwa P., Szarek M., 2022, *High efficiency DC-DC boost converter with passive snubber and reduced switching losses*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69(3), s. 2500–2510. https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3063874.

Penczek A., Stala R., Stawiarski Ł., Szarek M., 2011, *Hardware-in-the-loop FPGA--based simulations of switch-mode converters for research and educational purposes*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 87(11), s. 194–200.

Penczek A., Stala R., Stawiarski Ł., Szarek M., Mondzik A., 2012, *Modelowanie i realizacja praktyczna symulatora sprzętowego systemów fotowoltaicznych z wykorzystaniem układów FPGA*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 88(4b), s. 175–180.

Penczek A., Mondzik A., Waradzyn Z., Stala R., Skała A., Piróg S., 2017, *Switching strategies of a resonant switched-capacitor voltage multiplier*, [w:] *EPE'17 ECCE Europe: 19th European Conference on Power Electronics and Applications: September 11–14 2017, Warsaw: proceedings*, IEEE, Piscataway, s. P.1–P.10. https://doi.org/10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099151.

Penczek A., Mondzik A., Stala R., Ruderman A., 2019, *Simple time-domain analysis of a multilevel DC-DC flying capacitor converter average aperiodic natural balancing dynamics*, IET Power Electronics, vol. 12(5), s. 1179–1186. https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5070.

Piróg S., Baszyński M., Mondzik A., Penczek A., Czekoński J., Gąsiorek S., 2012, *Stanowisko badawcze elektromechanicznego magazynu energii o mocy 100 kW*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 88(4b), s. 181–186.

Ryłko M., Mondzik A., Penczek A., Piróg S., Stala R., Szarek M., Szot S., 2016, *Circuit arrangement for a polyphase NPC multipoint inverter with relief network*, SMA Solar Technology AG, Niestetal (DE), patent nr WO 2016012455 A1, 2016-01-28.

Stala R., 2010a, *The switch-mode flying-capacitor DC-DC converters with improved natural balancing*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57(4), s. 1369–1382. https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030817.

Stala R., 2010b, *Individual MPPT of photovoltaic arrays with use of single-phase three-level diode-clamped inverter*, [w:] *ISIE 2010: International Symposium on Industrial Electronics: Bari, Italy 04–07 July, 2010*, IEEE, Piscataway, s. 3456–3462. https://doi.org/10.1109/ISIE.2010.5637767.

Stala R., 2011, *Application of balancing circuit for DC-link voltages balance in a single-phase diode-clamped inverter with two three-level legs*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58(9), s. 4185–4195. https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2093477.

Stala R., 2013, *A natural DC-link voltage balancing of diode-clamped inverters in parallel systems*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60(11), s. 5008–5018. https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2219839.

Stala R., 2016a, *Natural capacitor voltage balance in multilevel flying capacitor converters: a review of research achievements*, Power Electronics and Drives, vol. 1(36), no. 2, s. 5–33. https://doi.org/10.5277/PED160201.

Stala R., 2016b, *Sposób symulacji i układ do symulacji charakterystyki napięciowo-prądowej ogniwa fotowoltaicznego*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, patent nr PL 222546 B1, 2016-08-31.

Stala R., 2016c, *Sposób redukcji składowej zmiennej mocy fotowoltaicznego źródła energii*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, patent nr PL 223811 B1, 2016-11-30.

Stala R., 2018, *A four-level single-phase diode-clamped inverter with natural DC-link capacitor voltage balance*, [w:] *SPEEDAM 2018: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion: Amalfi, 20–22 June 2018*, IEEE, Piscataway, s. 691–696. https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445346.

Stala R., 2019, *Sposób i układ kontroli napięć na szeregowo połączonych kondensatorach lub akumulatorach*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, patent nr PL 232336 B1, 2019-06-28.

Stala R., 2020, *Natural DC-link voltage balance in a single-phase NPC inverter with four--level legs and novel modulation method*, IET Power Electronics, vol. 13(16), s. 3764–3776. https://doi.org/10.1049/iet-pel.2020.0050.

Stala R., 2021, *Przekształtnik rezonansowy DC-DC o przełączanych kondensatorach i zredukowanej liczbie aktywnych łączników*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, patent nr PL 239302 B1, 2021-11-22.

Stala R., Piróg S., 2018, *DC-DC boost converter with high voltage gain and a low number of switches in multisection switched capacitor topology*, Archives of Electrical Engineering, vol. 67(3), s. 617–627. https://doi.org/10.24425/123667.

Stala R., Stawiarski Ł., 2010, *Real-time models of PV arrays implemented in FPGAs*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 86(2), s. 358–363.

Stala R., Piróg S., Baszyński M., Mondzik A., Penczek A., Czekoński J., Gąsiorek S., 2009a, *Results of investigation of multicell converters with balancing circuit – Part I*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56(7), s. 2610–2619. https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2021681.

Stala R., Piróg S., Baszyński M., Mondzik A., Penczek A., Czekoński J., Gąsiorek S, 2009b, *Results of investigation of multicell converters with balancing circuit – Part II*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56(7), s. 2620–2628. https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2022562.

Stala R., Stawiarski Ł., Szarek M., 2010, *Single phase grid-connected PV system with time-sharing modulation and Pi-type regulators for DC-DC boost converter and full-bridge inverter*, [w:] *EPE-PEMC 2010: 14th International Power Electronics and Motion Control Conference: 6–8 September 2010, Ohrid, Macedonia: final programme*, IEEE, Piscataway, s. T12-68–T12-75. https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2010.5606849.

Stala R., Koska K., Stawiarski L., 2011, *Realization of modified ripple-based MPPT in a single-phase single-stage grid-connected photovoltaic system*, [w:] *ISIE 2011: IEEE International Symposium on Industrial Electronics: Gdańsk, Poland, 27–30 June, 2011*, IEEE, Piscataway, s. 1106–1111. https://doi.org/10.1109/ISIE.2011.5984314.

Stala R., Penczek A., Mondzik A., Szot S., Szarek M., Ryłko M., 2016, *Schaltungsanordnung für einen Mehrpunktwechselrichter mit Entlastungsnetzwerk*, SMA Solar Technology AG, Niestetal (DE), patent nr DE102014110490-A1; DE102014110490-B4.

Stala R., Piróg S., Penczek A., Kawa A., Waradzyn Z., Mondzik A., Skała A., 2017a, *A family of high-power multilevel switched capacitor-based resonant DC-DC converters – operational parameters and novel concepts of topologies*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, vol. 65(5), s. 639–651. https://doi.org/10.1515/bpasts-2017-0069.

Stala R., Penczek A., Mondzik A., Szot S., Szarek M., Ryłko M. S., 2017b, *Przekształtnik podwyższający napięcie, odpowiedni falownik oraz sposób zmniejszania strat wyłączania*, SMA Solar Technology AG, Niestetal (DE), patent nr PL 225731 B1, 2017-05-31.

Stala R., Mondzik A., Penczek A., Waradzyn Z., Kawa A., 2018a, *A synchronous resonant switched-capacitor DC-DC boost converter – experimental results and feasibility model*, Przeglad Elektrotechniczny, r. 94(5), s. 139–142. https://doi.org/10.15199/48.2018.05.24.

Stala R., Piróg S., Kawa A., Waradzyn Z., Mondzik A., Penczek A., 2018b, *Przekształtnik rezonansowy DC-DC o przełączanych kondensatorach o podwyższonej sprawności*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, patent nr PL 228000 B1, 2018-02-28.

Stala R., Waradzyn Z., Penczek A., Mondzik A., Skała A., 2019a, *A switched-capacitor DC-DC converter with variable number of voltage gains and fault-tolerant operation*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66(5), s. 3435–3445. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2851962.

Stala R., Waradzyn Z., Mondzik A., Penczek A., Skała A., 2019b, *DC–DC High Step-up Converter with Low Count of Switches Based on Resonant Switched-Capacitor Topology*, 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), Genova, Italy, 2019, s. P.1–P.10.

Stala R., Mondzik A., Penczek A, Ryłko M., Szarek M., Szot S., 2019c. *Falownik z kondensatorem odciążającym i instalacja fotowoltaiczna zawierająca falownik*, SMA Solar Technology AG, Niestetal (DE), patent nr EP3131194, PL/EP 3131194 T3, 2019-11-29.

Stala R., Mondzik A., Penczek A., Szot S., Szarek M., Ryłko M., Masłoń J., Willenberg M., Knoke R., Falk A., 2019d, *Step-up converter, corresponding inverter and method of operation*, SMA Solar Technology AG, Niestetal (DE), US 10491103 B2, 2019-11-26.

Stala R., Waradzyn Z., Folmer S., 2020, *DC-DC high-voltage-gain converters with low count of switches and common ground*, Energies, vol. 13(21), 2020, 5657. https://doi.org/10.3390/en13215657.

Stala R., Chojowski M., Waradzyn Z., Mondzik A., Folmer S., Penczek A., Skała A., Piróg S., 2021a, *High-gain switched-capacitor DC-DC converter with low count of switches and low voltage stress of switches*, IEEE Access, vol. 9, s. 114267–114281. http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104399.

Stala R., Folmer S., Waradzyn Z., 2021b, *DC-DC Converter with Low Input Current Ripples in Hybrid Switched-Capacitor and Boost Topology*, [w:] *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC): Gliwice, Poland, 25–29 April, 2021: proceedings*, IEEE, Piscataway 2021, s. 83–88. https://doi.org/10.1109/PEMC48073.2021.9432619.

Stala R., Waradzyn Z., Folmer S., 2022, *Input current ripple reduction in a step-up DC-DC switched-capacitor switched-inductor converter*, IEEE Access, vol. 10, s. 19890–19904. http://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3152543.

Stawiarski Ł., Szarek M., Mondzik A., Stala R., Penczek A., 2012, *Jednofazowy system fotowoltaiczny dołączany do linii elektroenergetycznej*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 88(2), s. 218–222.

Szarek M., Penczek A., Stala R., Piróg S., Mondzik A., 2017, *NPC three level inverter with dual DC bus for independent distributed generators: Neutral-point voltage balancing under the input power imbalance*, [w:] *EPE'17 ECCE Europe: 19th European Conference on Power Electronics and Applications: September 11–14 2017, Warsaw: proceedings*, IEEE, Piscataway, s. P.1–P.10. https://doi.org/10.23919/EPE17ECCEEurope.2017.8099240.

Waradzyn Z., Stala R., Mondzik A., Piróg S., 2017a, *Switched capacitor-based power electronic converter – optimization of high frequency resonant circuit components*, [w:] Kabziński J. (ed.), *Advanced Control of Electrical Drives and Power Electronic Converters*, Studies in Systems, Decision and Control, vol. 75. Springer, Cham, s. 361–378. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45735-2_15.

Waradzyn Z., Stala R., Mondzik A., Penczek A., Skała A., Piróg S., 2017b, *Efficiency analysis of MOSFET-based air-choke resonant DC-DC step-up switched-capacitor voltage multipliers*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64(11), s. 8728–8738. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2698368.

Waradzyn Z., Stala R., Skała A., Mondzik A., Penczek A., 2018, *A cost-effective resonant switched-capacitor DC-DC boost converter – experimental results and feasibility model*, Power Electronics and Drives, vol. 3(1), s. 75–83. https://doi.org/10.2478/pead-2018-0004.

Waradzyn Z., Stala R., Mondzik A., Skała A., Penczek A., 2020, *GaN-based DC-DC resonant boost converter with very high efficiency and voltage gain control*, Energies, vol. 13(23), 2020, 6403. https://doi.org/10.3390/en13236403.