

Janusz Biliński, Marta Malczewska, Artur Rojek, Włodzimierz Kruczek

# Falowniki trakcyjne kolejowych pojazdów szynowych - rozwiązania techniczne i kierunki rozwoju konstrukcji

Nowoczesna technologia i ciągły rozwój na rynku komponentów elektronicznych pozwala na tworzenie bardziej energooszczędnych, lżejszych, cichszych i mniejszych systemów trakcyjnych [1]. W artykule przedstawione zostały różne systemy trakcyjne wraz z ich parametrami zależnymi od architektury pojazdu. Architektura pojazdu ściśle wiąże się z napięciem sieci trakcyjnej oraz typem przejazdów realizowanych przez te pojazdy (miejskie, regionalne, szybkie, towarowe) [2].

**Słowa kluczowe:** pojazdy kolejowe, falowniki trakcyjne.

Artykuł powstał na podstawie prac prowadzonych w ramach projektu „Innowacyjny i zestandaryzowany model rozwoju zakupu kolejowego taboru pasażerskiego” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Społeczny i gospodarczy rozwój Polski w warunkach globalizujących się rynków” GOSPOSTRATEG (nr umowy o dofinansowanie: GOSPOSTRATEG1/388876/30/NCBR/2019). Przedstawia on najnowsze rozwiązania techniczne i kierunki rozwoju konstrukcji falowników trakcyjnych pojazdów szynowych.

## Topologie/architektury napędów trakcyjnych

W zależności od napięcia sieci trakcyjnej dla elektrycznych pojazdów szynowych definiujemy trzy topologie/architektury na-

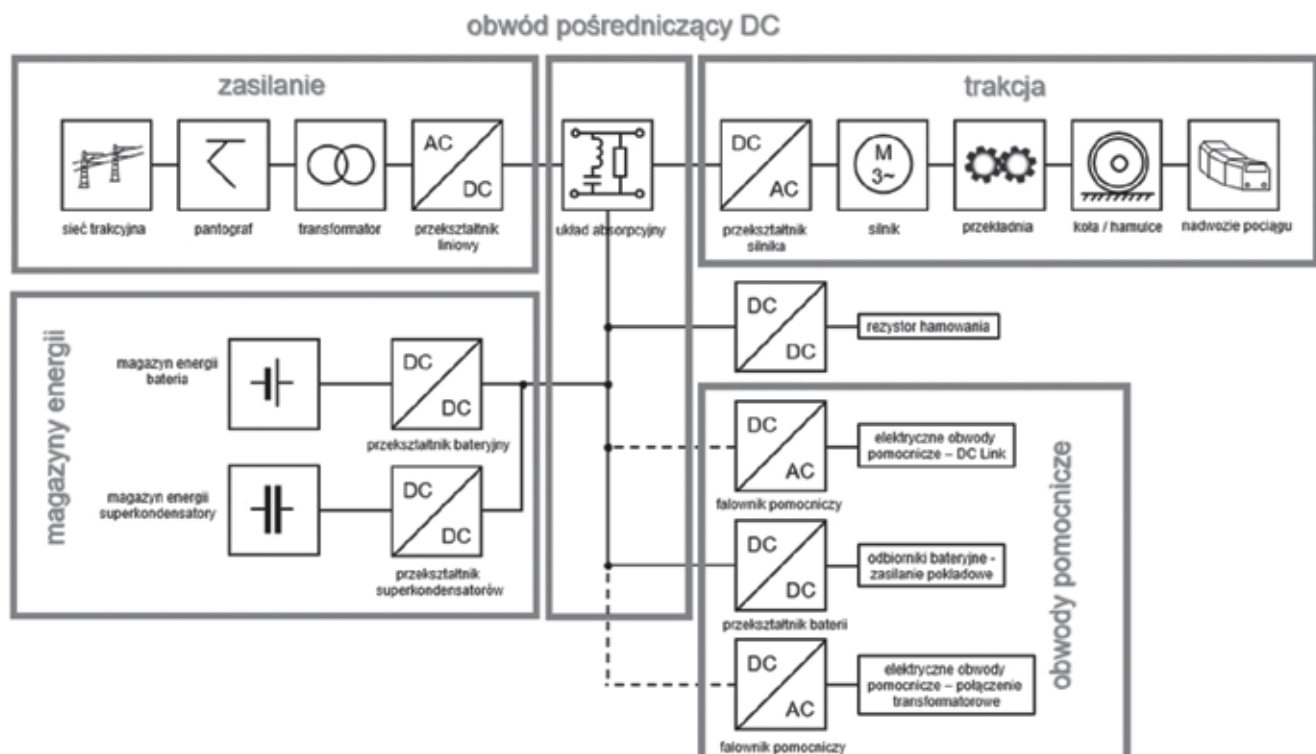
pędów trakcyjnych, które zostaną przedstawione w kolejnych rozdziałach. Każda z topologii została przedstawiona w sposób ogólny tzn. omawiana topologia napędu trakcyjnego może być rozważana zarówno dla kolei dużych prędkości, kolei regionalnych czy towarowych. W zależności od rozważanego przypadku należy wziąć pod uwagę konieczność dostosowania charakterystyk trakcyjnych czy liczby elementów systemu. W przedstawionych topologiach linią przerywaną zostały oznaczone komponenty i/lub interfejsy, które są wykorzystywane alternatywnie.

## Topologia dla pociągów zasilanych prądem przemiennym z transformatorem konwencjonalnym (T01)

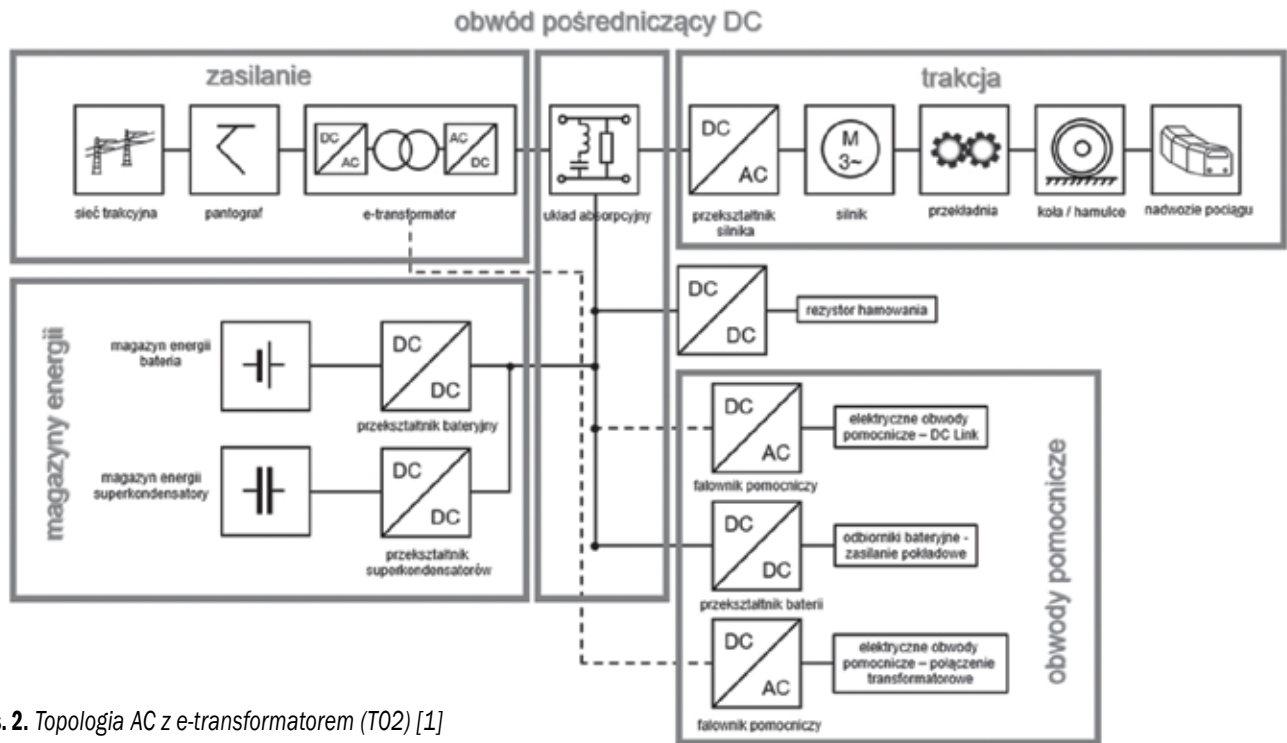
Na rysunku 1 przedstawiono topologię T01. Topologia ta wykorzystuje konwencjonalny transformator z rdzeniem wykonanym z żelaza. Jest ona przeznaczona dla pociągów zasilanych napięciem przemiennym o wartości 15 kV lub 25 kV przez napowietrzną sieć trakcyjną.

## Topologia dla pociągów zasilanych prądem przemiennym z transformatorem elektronicznym (e-transformatorem) (T02)

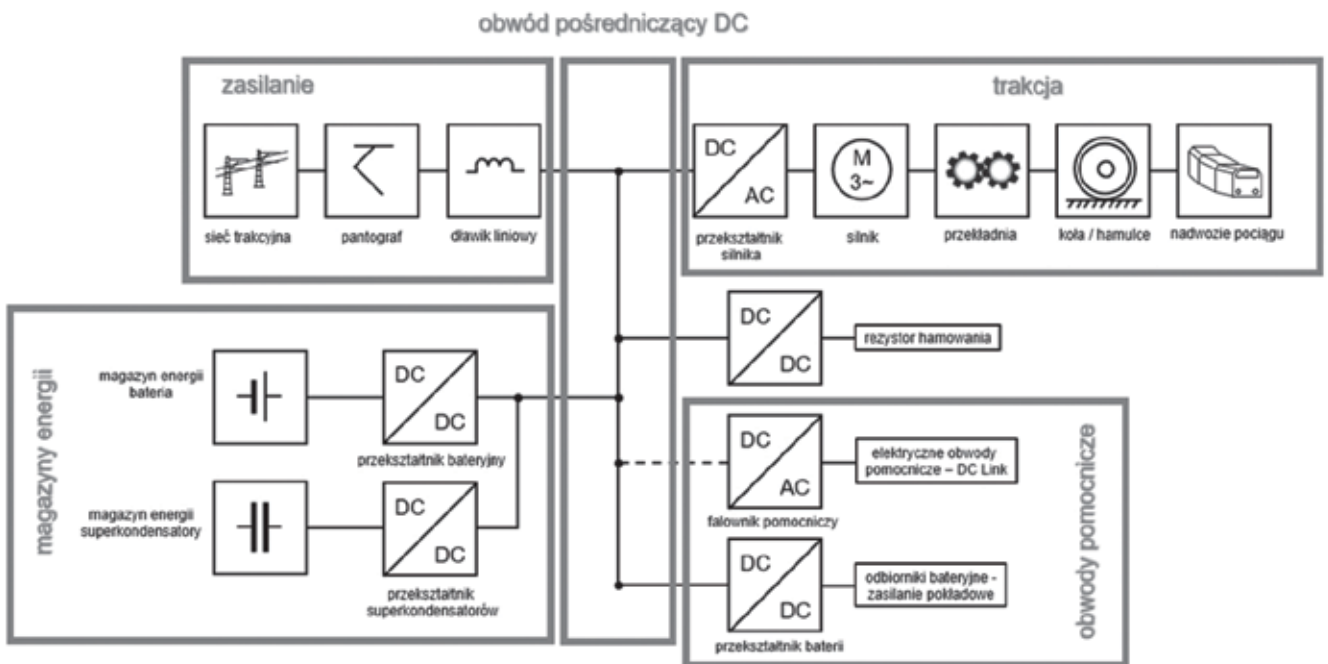
Topologia T02 z transformatorem elektronicznym przedstawiona została na rysunku 2. Przeznaczona jest dla pociągów zasilanych napięciem 15 kV AC lub 25 kV AC.



Rys. 1. Topologia AC z transformatorem konwencjonalnym (T01) [1]



Rys. 2. Topologia AC z e-transformatorem (T02) [1]



Rys. 3. Topologia dla pociągów zasilanych prądem stałym (T03) [1]

### Topologia dla pociągów zasilanych prądem stałym (T03)

Topologia przedstawiona na rysunku 3 jest wykorzystywana dla pociągów zasilanych napięciem stałym o wartości: 750 V, 1500 V lub 3000 V.

### Komponenty stosowane dla różnych topologii pociągów

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie komponentów składowych dla poszczególnych topologii pociągów: T01, T02 i T03.

Wymienione w tabeli komponenty nie muszą być częścią każdego systemu trakcyjnego. W zależności od zasilającego napięcia trakcyjnego niektóre elementy są pomijane. Na przykład dla systemu zasilanego prądem stałym nie są stosowane np.: przekształtniki AC/DC (C12) czy transformatory (C13).

Niektóre z wymienionych komponentów są w fazie testów i badań pod kątem zastosowań trakcyjnych np. silnik synchroniczny oraz silnik z magnesami trwałymi (C06), falownik trakcyjny z elementami półprzewodnikowymi wykonanymi z węgla krzemu (C08) czy e-transformator (C14).

Tab. 1. Komponenty używane dla różnych topologii pociągów [1]

ID	Nazwa	Opis
C00	Pojazd	Nadwozie pociągu /reprezentuje opór toczenia
C04	Przekładnia osiowa	Przekładnia pomiędzy piastą koła a wałem silnika / stałe przełożenie
C05	Silnik indukcyjny	Przetwornik między mocą elektryczną a mechaniczną/ praca asynchroniczna
C06	Silnik synchroniczny	Przetwornik między mocą elektryczną a mechaniczną/ praca synchroniczna
C07	Przekształtnik trakcyjny	Przekształca napięcie stałe (DC) na napięcie przemienne trójfazowe (3AC) / standardowe elementy półprzewodnikowe mocy (np. SiO <sub>2</sub> -IGBT)
C08	Przekształtnik trakcyjny SiC	Przekształca napięcie stałe (DC) na napięcie przemienne trójfazowe (3AC) / elementy półprzewodnikowe mocy wykonane z węgla krzemu (SiC)
C09	Przekształtnik rezystora hamowania	Przekształtnik DC/DC / przekształcanie napięcia DC do poziomu napięcia rezystora hamowania
C10	Rezystor hamowania	Rezystancja rezystora hamowania
C11	Obwód pośredniczący prądu stałego DC	Filtr drugiej harmonicznej / obwód tłumiący: do filtrowania tętnień resztkowych / tylko dla sieci zasilającej AC
C12	Przekształtnik liniowy	Przekształcanie jednofazowego napięcia przemiennego na napięcie stałe (DC) / tylko dla sieci zasilającej AC
C13	Transformator	Transformacja między dwoma poziomami napięć przemiennych / tylko dla sieci zasilającej AC
C14	E- Transformator	Przekształcanie napięcia zmiennego AC na napięcie stałe DC / połączenie klasycznego transformatora z elementami półprzewodnikowymi mocy / tylko dla sieci zasilającej AC
C15	Dławik liniowy (wejściowy)	Dławik liniowy używany do optymalizacji przesyłu prądu / tylko dla sieci zasilającej DC
C16	Przekształtnik zasobnika energii ESS (ang. Energy Storage System)	Przekształtnik DC/DC / przekształcanie napięcia stałego DC do poziomu napięcia stałego zasobnika energii (ESS)
C17	Litowo jonowa bateria zasobnika energii ESS (Li-Ion)	System magazynowania energii odzyskanej podczas hamowania / Bateria jako magazyn dużej ilości energii
C19	Przekształtnik ultrakondensatorów (DLC)	Przekształtnik DC/DC / przekształcanie napięcia stałego DC do poziomu napięcia stałego ultrakondensatorów
C20	Ultrakondensatory (DLC)	System magazynowania energii odzyskanej podczas hamowania / Ultrakondensatory jako magazyn dużej ilości energii
C22	Przetwornica pomocnicza w obwodzie pośredniczącym prądu stałego (DC-link)	Przekształcanie napięcia stałego DC na napięcie przemienne trójfazowe (3AC) do zasilania obciążen trójfazowych/ 400 Vrms@50 Hz
C23	Pomocnicze zasilanie elektryczne w obwodzie pośredniczącym prądu stałego (DC-link)	Zużycie elektrycznych urządzeń pomocniczych podłączonych do obwodu pośredniczącego (DC-link) / może się różnić w zależności od pory roku
C24	Pomocnicze zasilanie elektryczne zasilane z transformatora	Przekształcanie jednofazowego napięcia przemiennego (1AC) na napięcie przemienne trójfazowe (3AC) do zasilania obciążen trójfazowych/ 400 Vrms@50 Hz
C25	Pomocnicze zasilanie elektryczne z transformatora	Zużycie elektrycznych urządzeń pomocniczych podłączonych do specjalnego uzwojenia transformatora / może się różnić w zależności od pory roku.
C26	Przekształtnik baterii	Przekształtnik DC/DC / przekształcanie napięcia stałego DC do poziomu napięcia stałego baterii pokładowej
C27	Zużycie baterii	Bateria do zasilania pokładowego / 24 Vdc
C30	Infrastruktura kolejowa	Informacje o torze, ograniczeniu prędkości, rozkładzie jazdy

### Struktury obwodów falowników trakcyjnych

W zależności od struktury, budowy i składu pojazdu szynowego istnieje wiele typów rozwiązań technicznych dla poszczególnych elementów systemu napędowego tj. sterowania elektronicznego i rozwiązań sprzętowych dla falownika trakcyjnego. Na rysunku 4 w sposób schematyczny przedstawione zostały różne rozwiązania dla poszczególnych podsystemów napędu pojazdu szynowego [3].

Zadaniem falownika trakcyjnego jest zasilanie silników trakcyjnych w taki sposób, aby mogły one zapewnić odpowiedni moment oraz prędkość obrotową na wale. Falownik trakcyjny połączony jest ze źródłem zasilania. Poprzez odpowiednie przekształcanie napięcia wejściowego zasilają on silniki trakcyjne wymagane, regulowanym napięciem. Falowniki trakcyjne mogą występować w różnych topologiach, w zależności od zastosowanej topologii wybierany jest odpowiedni algorytm sterowania pozwalający na kontrolowanie zmiennych parametrów napędu elektrycznego takich jak prędkość, moment obrotowy czy wartości prądów silnika.

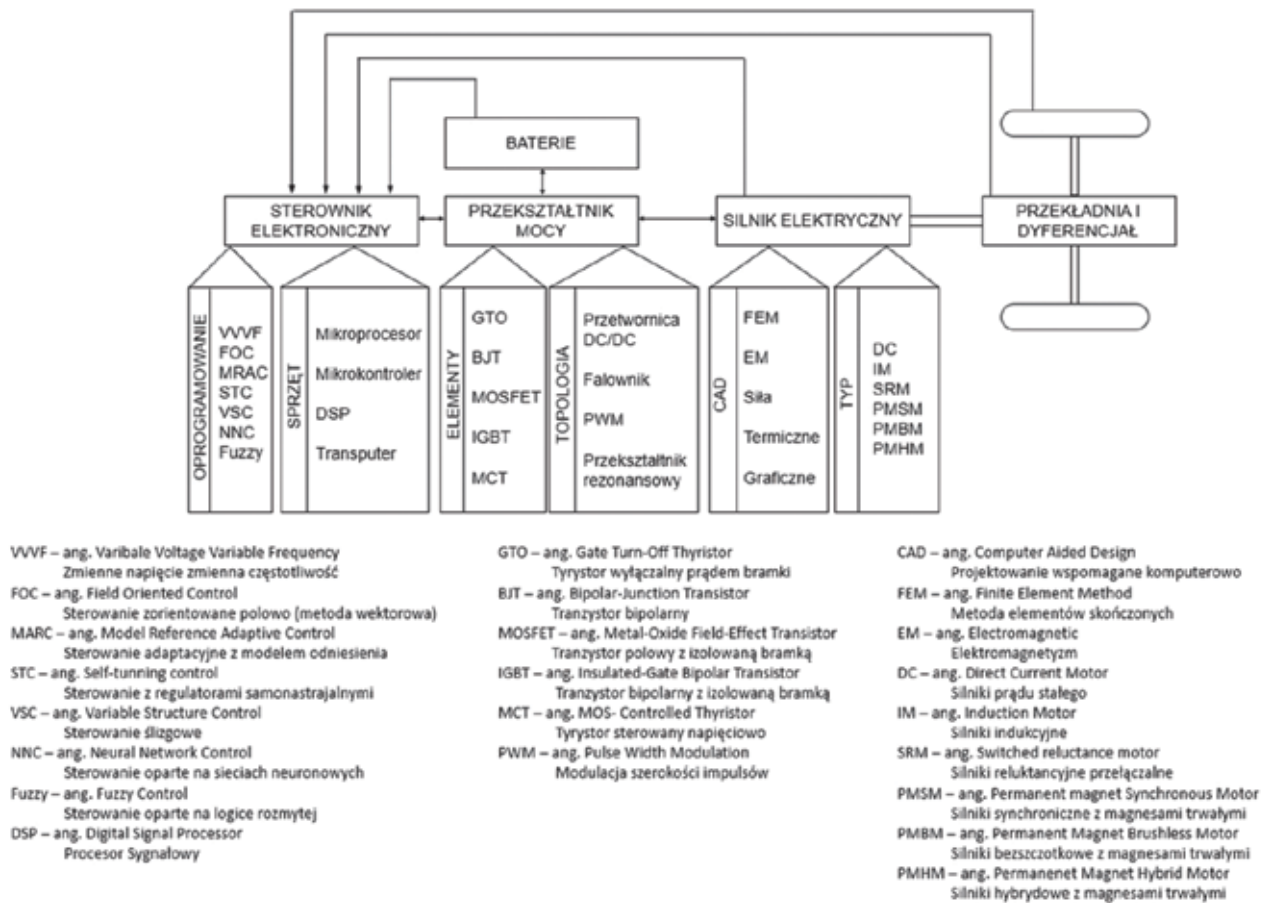
W chwili obecnej, najbardziej wydajnymi, niezawodnymi i ekonomicznymi maszynami elektrycznymi są maszyny prądu przemiennego, dlatego też wymagane jest zasilanie ich regulowanym napięciem zmiennym. Oznacza to, że napięcie zasilające silnik

może mieć różną amplitudę i częstotliwość. Należy pamiętać, że maszyna elektryczna może być postrzegana jako elektromechaniczny przekształtnik energii, który po jednej stronie pracuje ze zmiennymi elektrycznymi, takimi jak napięcia i prądy, natomiast po drugiej działa ze zmiennymi mechanicznymi, takimi jak moment i prędkość obrotowa.

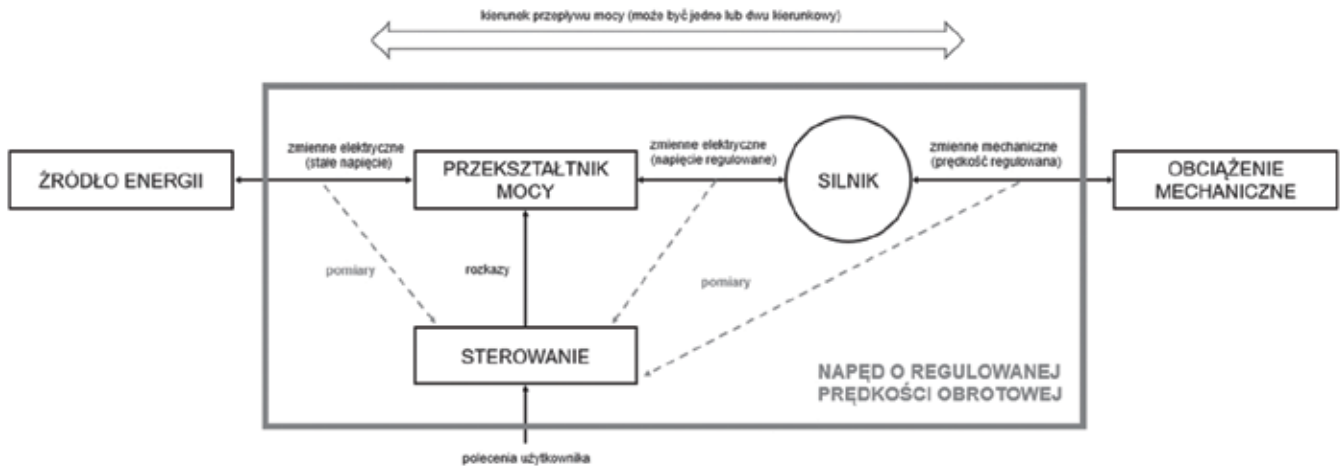
Poprzez sterowanie elementami przełączającymi falownika trakcyjnego kształtowana jest fala napięcia wyjściowego. W falownikach stosowane mogą być: tranzystory bipolarne z izolowaną bramką (IGBT), tranzystory polowe (MOSFET), tyrystory sterowane za pomocą izolowanej bramki (IGCT), tranzystory z węgla krzemu (SiC) oraz inne elementy półprzewodnikowe.

Poniżej przedstawiono typowe struktury falowników trakcyjnych [4].

W sytuacji idealnej, dla zapewnienia poprawności działania maszyna prądu przemiennego powinna być zasilana napięciem sinusoidalnym o zmiennej amplitudzie i częstotliwości. Jednakże, nawet najbardziej wydajne i ekonomiczne przekształtniki energoelektroniczne nie są w stanie wytworzyć idealnego napięcia sinusoidalnego. Na rysunku 8 w sposób uproszczony przedstawione zostały napięcia wyjściowe AC falownika trakcyjnego w zależności od mocy i wybranej topologii.



Rys. 4. Schemat blokowy podsystemów napędu pojazdu szynowego z możliwymi rozwiązaniami technicznymi [3]



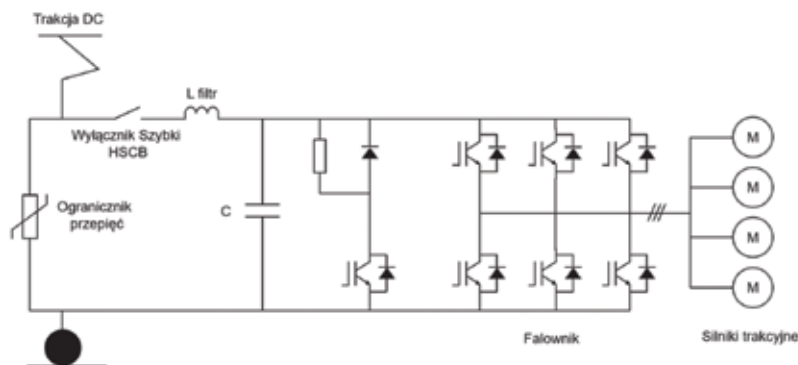
Rys. 5. Schemat blokowy napędu pojazdu szynowego z falownikiem trakcyjnym. [4]

Dla maszyny prądu przemiennego otrzymane kształty fal napięciowych są właściwe, zapewniające akceptowany poziom bezpieczeństwa, wydajność oraz zachowanie odpowiedniego momentu i prędkości obrotowej dla zastosowań trakcyjnych.

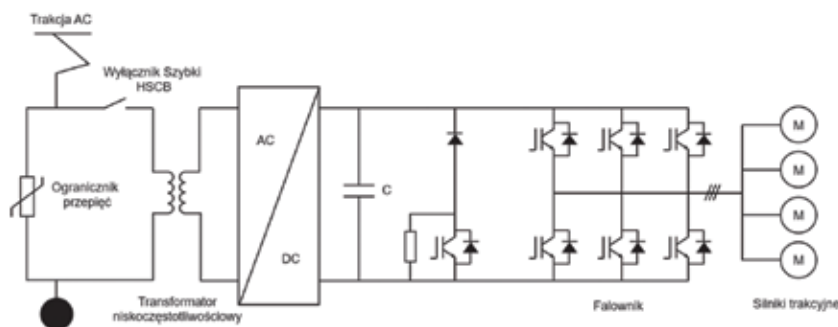
**Konfiguracja falownika trakcyjnego przy zasilaniu z sieci prądu stałego**  
Najbardziej rozpowszechnioną konfiguracją dla falowników zasilanych z sieci trakcyjnej prądu stałego jest klasyczny falownik

dwupoziomowy. Dla sieci trakcyjnej 3kV stosowane są zazwyczaj elementy IGBT o napięciu blokowania 6,5 kV, umożliwiające bezpośrednią pracę na napięciu trakcyjnym 3 kV z wartościami skokowymi do 5 kV. Dla sieci trakcyjnych 1,5 kV stosowane są zazwyczaj elementy IGBT o napięciu blokującym 3,3 kV lub 4,5 kV. Rysunek 9 przedstawia typową konfigurację falownika dla tych sieci trakcyjnych zasilanych prądem stałym.

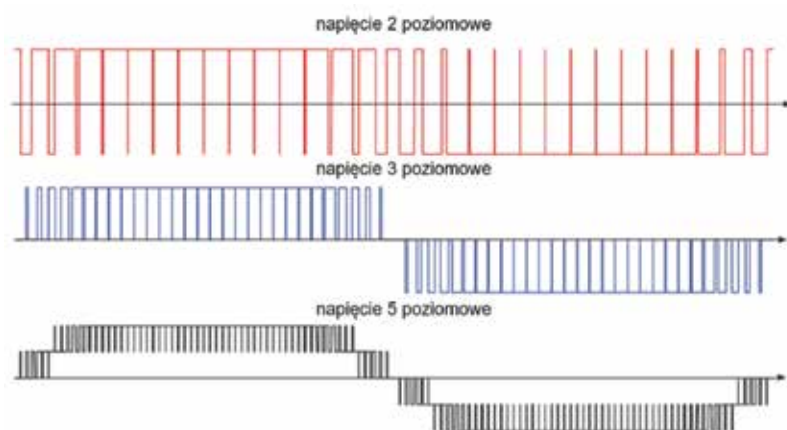
Elementem obwodu wejściowego jest dławik filtra wejściowego.



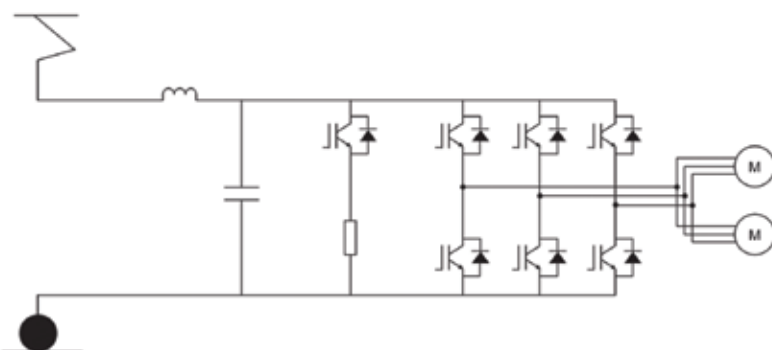
Rys. 6. Typowa struktura falownika zasilanego z sieci DC [4]



Rys. 7. Typowa struktura falownika zasilanego z sieci AC [4]



Rys. 8. Napięcia wyjściowe AC uzyskiwane dla różnych topologii falowników [4]



Rys. 9. Konfiguracja napędu elektrycznego zasilanego z sieci trakcyjnej prądu stałego i falownikiem dwupoziomowym [4]

Głównym celem filtra wejściowego LC jest odfiltrowanie harmonicznych o wysokiej częstotliwości, generowanych przez przełączanie tranzystorów falownika oraz zachowanie indukcyjnego charakteru obciążenia, widzianego od strony sieci trakcyjnej. W zastosowaniach kolejowych dopuszczalne poziomy harmonicznych prądu zasilającego generowane do sieci trakcyjnej w wyniku przełączenia tranzystorów mocy muszą być ograniczone, aby uniknąć zakłóceń sygnałów urządzeń infrastruktury, pracujących w sieci kolejowej (np. urządzeń sterowania ruchem kolejowym). Kondensator filtra LC filtruje harmoniczne prądu o wysokiej częstotliwości dzięki czemu tylko składowe niskoczęstotliwościowe prądu popłyną do sieci trakcyjnej.

Podczas doboru filtrów wejściowych LC należy uwzględnić następujące parametry:

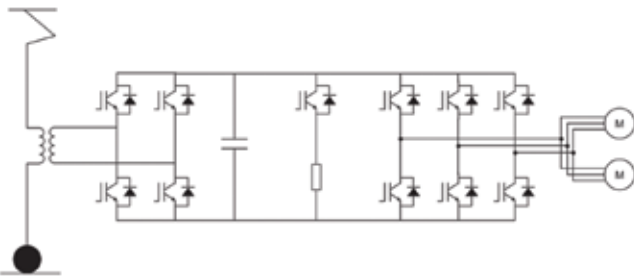
- ❖ wybór częstotliwości granicznej filtru w celu zapewnienia zgodności z wymogami dotyczącymi zawartości harmonicznych prądu generowanego do sieci trakcyjnej;
- ❖ ograniczenie tętnień napięcia na kondensatorze filtra/obwodu pośredniczącego DC-link;
- ❖ ograniczenie tętnień prądu dławika filtru.

Dławiki filtrujące do kolejowych przekształtników mocy są zwykle dławikami powietrznymi, ich uzwojenia mogą być wykonane z miedzi lub aluminium. Dławiki powietrzne bez rdzenia są elementami „liniowymi” (tzn. posiadają liniową charakterystykę strumienia magnetycznego w funkcji prądu) i nie wykazują nasycenia magnetycznego charakterystycznego dla dławików z rdzeniem żelaznym. Ponieważ dławiki z rdzeniem wykonanym z żelaza są z reguły mniejsze niż dławiki powietrzne, w zależności od wymaganych parametrów elektrycznych projektant może zdecydować się na zastosowanie jednego z tych rozwiązań.

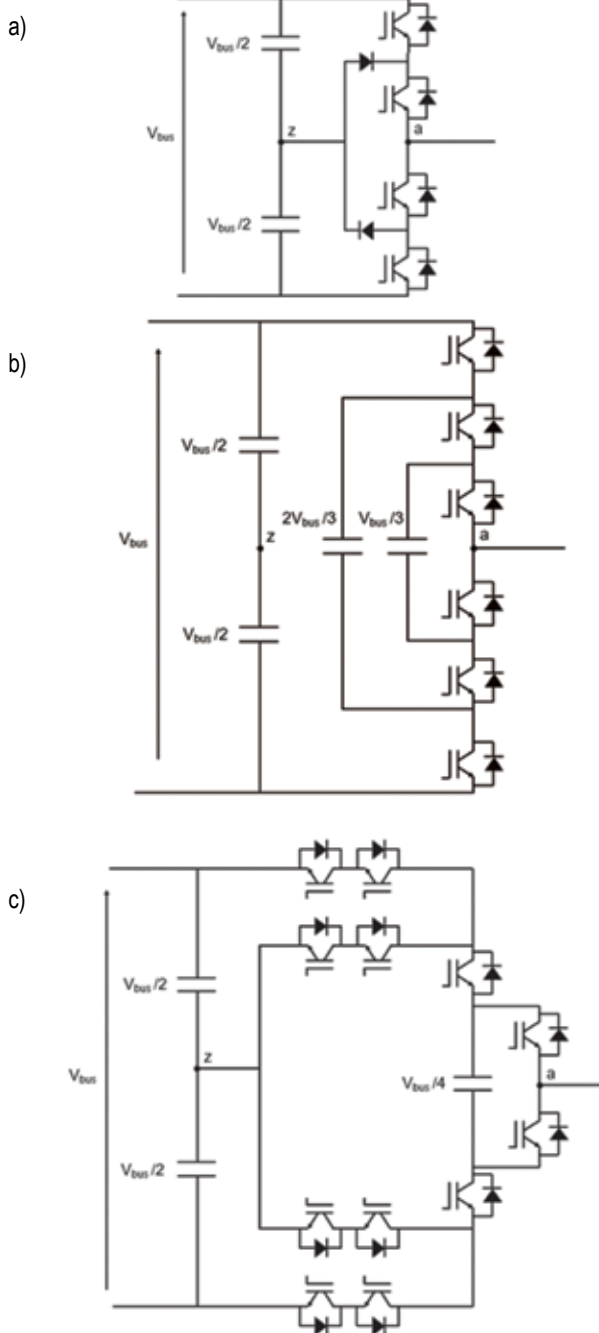
Inną możliwą topologią, która była szerzej stosowana w przeszłości, to trójpoziomowy falownik z punktem neutralnym NPC. Falownik jest wyposażony także w układ łącznika czoperowego, który jest konieczny dla procesu hamowania elektrodynamicznego, ponieważ nie zawsze jest możliwe zapewnienie zwrotu energii hamowania do sieci trakcyjnej.

### Konfiguracja falownika trakcyjnego przy zasilaniu z sieci prądu przemiennego

W przypadku sieci trakcyjnych prądu przemiennego wymagany jest transformator jednofazowy 16,7 Hz (lub 50 Hz lub 60 Hz) służący do obniżenia napięcia sieci trakcyjnej (15 kV lub 25 kV) do napięcia roboczego napędu. Napęd, jak pokazano na rysunku 10, składa się z czterokwadrantowego, jednofazowego przekształtnika, który przetwarza napięcie wejściowe AC na DC, zaś trójfazowy falownik trakcyjny zasilają silniki trakcyjne. Przekształtnik jednofazowy po stronie prądu przemiennego jest przystosowany do pracy ze współczynnikiem mocy równym jedności. Typową topologią dla obu omawianych przekształtników jest klasyczna dwupoziomowa topologia falownika, jak pokazano na rysunku 10.



**Rys. 10.** Konfiguracja napędu elektrycznego zasilanego z sieci trakcyjnej prądu przemiennego z transformatorem o częstotliwości sieciowej. W niektórych przypadkach może być konieczny filtr dolnoprzepustowy w obwodzie pośredniczącym DC-link, aby zredukować oscylacje napięcia na szynach DC, które w sposób naturalny pojawiają się w czasie przepływu mocy [4]



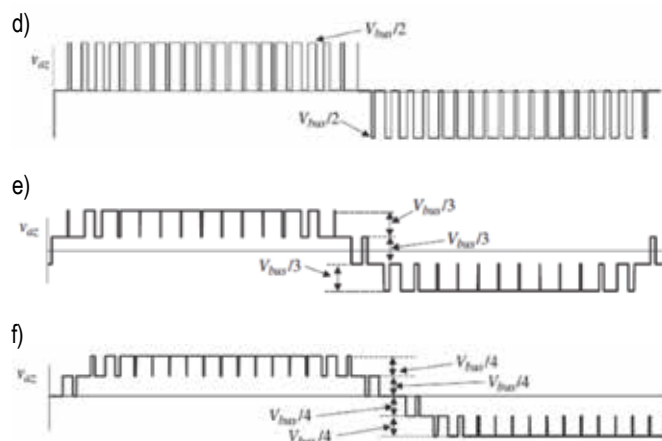
W odniesieniu do topologii konwertera, możliwe jest również zastosowanie bardziej zaawansowanych topologii falownika trakcyjnego takich jak: trójpoziomowego falownika typu „neutral point clamped” (3L-NPC), czteropoziomowego falownika typu „flying capacitor” (4L-FC) lub pięciopoziomowego falownika w topologii „active neutral point clamped” (5L-ANPC). Pojedyncze gałęzie tych wielopoziomowych falowników przedstawiono na rysunku 11. Należy wspomnieć, że jest to jedynie przykład nowoczesnych, wielopoziomowych topologii konwerterów, które mogą okazać się odpowiednie dla danego napędu elektrycznego i wykorzystywane w niektórych zastosowaniach trakcyjnych. Wykorzystanie wielopoziomowych topologii falowników niesie za sobą wiele zalet, które rekompensują większą złożoność układu oraz jego systemu sterowania. Falowniki te umożliwiają pracę układu przy wyższym napięciu, co pozwala na ograniczenie wartości pobieranego prądu oraz poprawę jakości napięcia wyjściowego (fala napięciowa w większym stopniu zbliżona do sinusoidy). Rysunki 11 i 12 ilustrują kształt napięcia wyjściowego AC uzyskanego z omawianych struktur przekształtników wielopoziomowych.

W przypadku, w którym w układzie napędowym wykorzystywany jest transformator może być konieczne zastosowanie filtra (zazwyczaj filtra L) po stronie prądu przemiennego pomiędzy transformatorem a przekształtnikiem wejściowym AC/DC.

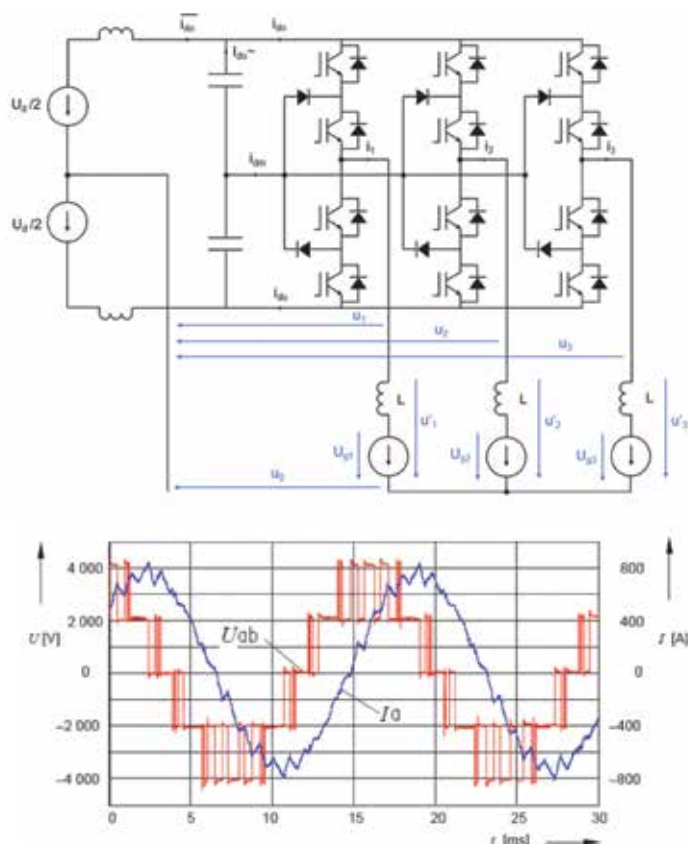
Jeśli transformator wykazuje wystarczająco wysoką indukcyjność rozproszenia, może zmniejszyć pulsacje prądu pobieranego z sieci trakcyjnej, co pozwala na spełnienie wymagań normatywnych dotyczących wartości zakłócających prądów harmonicznnych. W przeciwnym razie należy umieścić dodatkowy filtr w celu zmniejszenia poziomu harmonicznnych prądu.

Należy zauważyć, że często jednofazowy przekształtnik wejściowy składa się z dwóch równoległych przekształtników, zasilanych przez dwa wtórne uzwojenia transformatora, jak pokazano na rysunku 13.

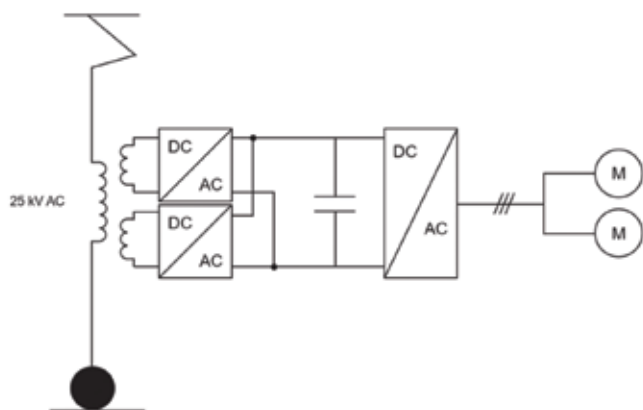
Pozwala to na zbilansowanie mocy znamionowej wejścia dwóch przekształtników wejściowych z trójfazowym falownikiem, zasilającym silniki trakcyjne. Liczba przekształtników czterokwadrantowych zależy również od pożądanego zniekształceń harmonicznnych w prądzie liniowym oraz od poziomu redundancji, który ma zostać osiągnięty.



**Rys. 11.** Schematy pojedynczych gałęzi topologii przekształtników wielopoziomowych: (a) topologia 3 L-NPC, (b) topologia 4 L-FC, (c) topologia 5 L-ANPC i napięcia wyjściowe dla poszczególnych topologii: (c) 3L-NPC, (d) 4L-FC, (e) 5L-ANPC [4]



Rys. 12. Trójfazowy przekształtnik trójpoziomowy w topologii NPC oraz przebiegi prądów i napięć [8]



Rys. 13. Konfiguracja napędu elektrycznego zasilanego z sieci trakcyjnej prądu przemiennego z transformatorem o częstotliwości sieciowej z równoległym połączeniem jednofazowych przekształtników AC/DC. [4]

Należy zauważyć, że układ zabezpieczający typu „crowbar” jest w dalszym ciągu konieczny, chociaż nie jest on przedstawiony na rysunku 13. Podobnie jak w poprzednim przypadku, typową konfiguracją falownika jest klasyczny falownik dwupoziomowy. Przekładnia transformatora jest zwykle wybierana pod kątem uzyskania pożądanego napięcia w obwodzie pośredniczącym DC-link przekształtnika. Powszechnie stosowanym napięciem w obwodzie DC-link jest 1800 V, co pozwala na wykorzystanie tranzystorów IGBT 3,3kV, oferowanych przez wielu producentów elementów półprzewodnikowych. W niektórych przypadkach niższe napięcie obwodu pośredniczącego prądu stałego rzędu 700 V pozwala na

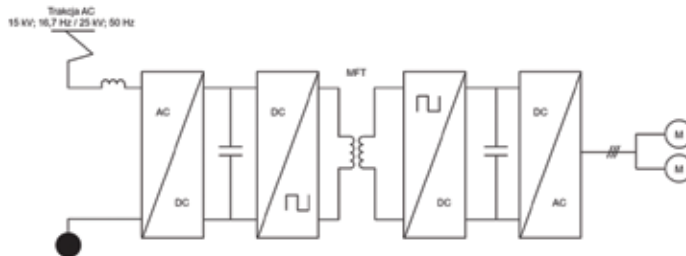
zastosowanie tranzystorów IGBT o napięciu blokującym o wartości 1,2 kV, umożliwiającym uzyskanie mniejszych strat mocy przełączania oraz obniżenie wymagań izolacyjnych na zaciskach silnika. Jednakże w przypadku mocy wyjściowej większej niż 1 MW, prowadzioby to do przepływu zbyt dużych prądów. Można powiedzieć, że w tego typu konfiguracjach najczęściej wybierane jest zasilanie falownika prądem stałym. Na przykład, jeśli wybrano, że wartość napięcia w obwodzie DC wynosi około 3 kV, napięcie znamionowe silnika wybiera się o wartości około 2,2 kV, z elementami IGBT o wartości napięcia blokującego 4,5 kV. Jednym z typowych napięć w obwodzie pośredniczącym DC jest 3, 6kV, w tym przypadku napięcie znamionowe silnika to 2,6 kV, a wartość napięcia blokującego elementów IGBT to 6,5 kV. Ponadto często konieczny jest filtr o niskiej częstotliwości (poniżej 50 Hz) na szynie DC w celu złagodzenia skutków naturalnych oscylacji napięcia, spowodowanych przez przełączenia przekształtnika wejściowego i falownika trakcyjnego. Ogólnie rzecz biorąc filtr powinien być zaprojektowany w taki sposób, aby w najgorszym przypadku oscylacje napięcia szyny DC były mniejsze niż 1%. Należy zauważyć, że zostały opracowane specjalne strategie sterowania, które są w stanie złagodzić to zjawisko oscylacji.

### Napęd trakcyjny prądu przemiennego z transformatorem średniej częstotliwości (e-transformator, mft)

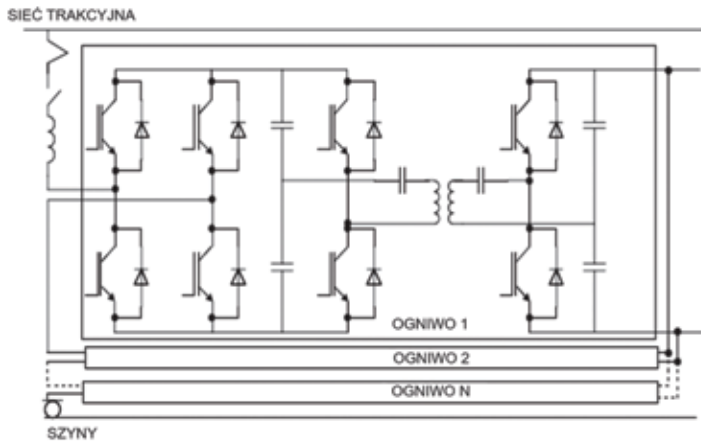
Aby zredukować masę transformatora niskoczęstotliwościowego w systemach zasilanych z sieci prądu przemiennego stosowane są e-transformatory o zmniejszonej objętości i masie (rys. 14)

W tej konfiguracji przekształtnik wejściowy jest umieszczony przed transformatorem. Po stronie wtórnej transformatora napięcie przemiennego z transformatora jest prostowane i zasila obwód pośredniczący DC-link falownika trakcyjnego (LV DC link). Ta topologia niesie ze sobą duże wyzwanie konstrukcyjne z uwagi na zlokalizowanie przekształtnika wejściowego od strony sieci trakcyjnej wysokiego napięcia. Obecnie elementy półprzewodnikowe nie są w stanie pracować bezpośrednio z takimi średnimi wartościami napięć w sieci trakcyjnej prądu przemiennego. W związku z tym stosuje się określone szeregowo połączenie modułów, czego wynikiem jest rodzaj wielopoziomowej struktury przekształtnika. Przekształtnik wejściowy z rysunku 14 nie jest typową konstrukcją pojedynczego przekształtnika, w rzeczywistości składa się z kilku przekształtników, pracujących z częstotliwością przełączania rzędu kilku kHz. Jedną z możliwych konfiguracji opiera się na zastosowaniu kaskadowych konwerterów szeregowych po stronie wysokiego napięcia, o wyjściach połączonych równolegle po stronie prądu stałego, jak pokazano na rysunku 15.

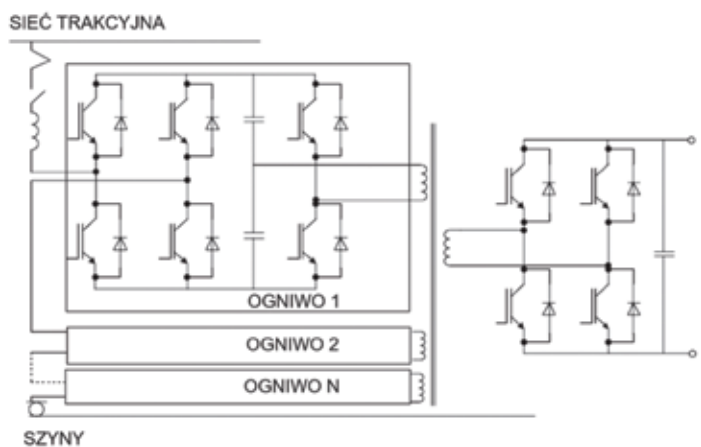
Takie rozwiązanie pozwala na skalowalność systemu oraz redundancję w przypadku wystąpienia uszkodzenia. Zastosowana w tym układzie topologia składa się z kilku kaskadowych most-



Rys. 14. Konfiguracja napędu elektrycznego zasilanego z sieci trakcyjnej prądu przemiennego z e-transformatorem (MFT) [4]



**Rys. 15.** Konfiguracja napędu elektrycznego zasilanego z sieci trakcyjnej prądu przemiennego z modułami kaskadowymi po stronie pierwotnej i e-transformatorem (MFT) [4]

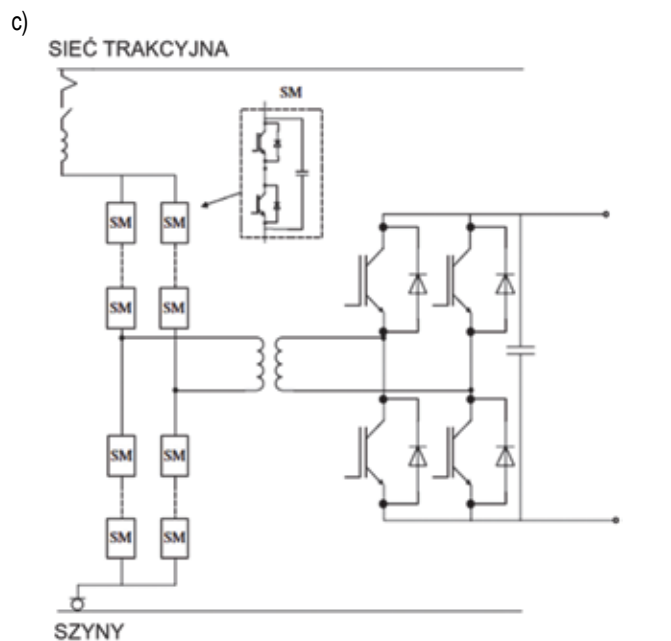
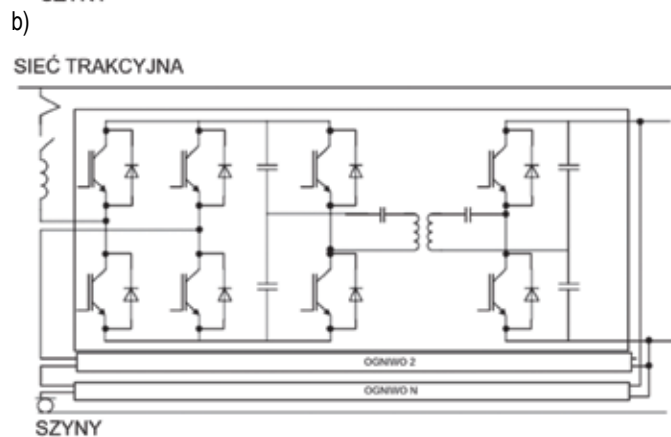
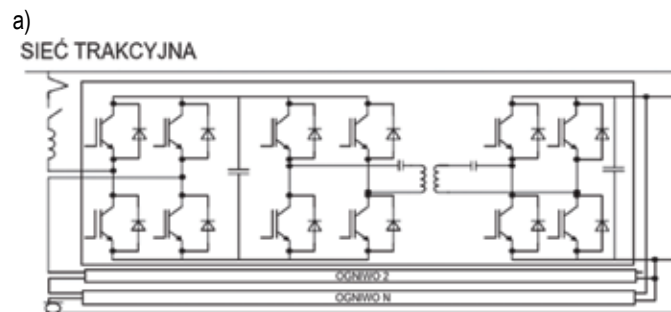


**Rys. 16.** Prototypowy falownik z e-transformatorem Alstom oparty na kaskadowo połączonych gałęziach półmostkowych i rezonansowych przetwornicach DC/DC firmy Alstom [4]

ków H na wejściu przekształtników rezonansowych DC/DC. Kaskadowe mostki H mogą być przełączane niezależnie od siebie za pomocą strategii „interleaved”, co pozwala na uzyskanie lepszych jakościowo przebiegów prądu linii wejściowej, a tym samym na zmniejszenie rozmiarów filtrów wejściowych lub ich eliminację. Przekształtnik DC/DC jest realizowany przy użyciu konfiguracji półmostkowej z obwodem rezonansowym LLC, gdzie zarówno indukcyjność rozproszenia jak i indukcyjność magnesowania transformatora są wykorzystane w obwodzie rezonansowym. W ten sposób uzyskuje się załączanie tranzystorów IGBT przy zerowym napięciu (ZVS), podczas gdy wyłączenie tranzystora IGBT odbywa się przy prądzie bliskim zeru (ZCS). Konfiguracja ta została zastosowana w prototypowym rozwiązaniu firmy ABB pod nazwą transformatora elektronicznego (PET). Ten prototypowy układ jest zaprojektowany dla sieci trakcyjnej o napięciu 15 kV, 16,7 Hz. Jego znamionowe napięcie wyjściowe wynosi 1,5 kV, a moc znamionowa 1,2 MVA. Konfiguracja układu składa się z ośmiu komórek (+1 komórka dodana dla zapewnienia redundancji), a częstotliwość przełączania transformatora wynosi 1,8 kHz. Prototyp został opracowany na potrzeby próby terenowej Szwajcarskich Kolei Federalnych. E-transformator spełnia trzy podstawowe funkcje: zapewnia izolację galwaniczną, skaluje poziomy napięcia pomiędzy

wejściem i wyjściem, oraz zapewnia „miękką” komutację dzięki wykorzystaniu rezonansu LLC. Kilka innych alternatywnych rozwiązań konfiguracyjnych przedstawiono w dalszej części artykułu.

Firma Alstom opracowała prototyp falownika, przedstawiony na rysunku 16. Topologia bazuje na kaskadowo połączonych gałęziach półmostkowych i rezonansowych przetwornicach DC/DC. Wykorzystano pojedynczo nawinięty rdzeń ferrytowy o częstotliwości komutacji 5 kHz. Inne rozwiązania przedstawiono na rysunku 17.



**Rys. 17.** Przykładowe realizacje prototypowe falowników z e-transformatorami [4]



Konfiguracje (a) i (b) to kaskadowe przekształtniki półmostkowe, z przekształtnikami rezonansowymi DC/DC (LC lub LLC) z kilkoma e-transformatorami. Zakres częstotliwości pracy tych urządzeń wynosi od 4 do 10 kHz. Topologia (c) przedstawia inną konfigurację opartą na modułowym, wielopoziomowym przekształtniku zaproponowanym przez firmę Siemens, wykorzystującą tylko jeden e-transformator. Jeśli chodzi o e-transformatory (MF), wyzwania związane z ich budową dotyczą wymagań elektroizolacyjnych, wyboru odpowiedniego chłodzenia (powietrze, olej, woda), uwzględnienia zjawisk naskórkowości prądu, ograniczeń wagowych i objętościowych, doboru rdzeni ferrytowych itp.), uzwojeń (miedź, aluminium) czy izolacji (powietrze, ciało stałe, olej).

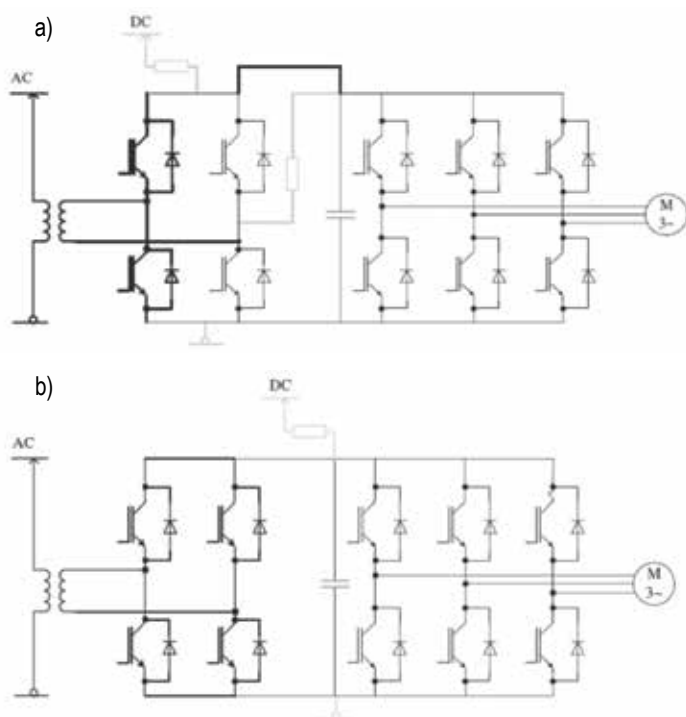
## Falowniki trakcyjne wielosystemowych pojazdów trakcyjnych

Na rysunku 18 przedstawiono topologię wielosystemową z chopperem wejściowym.

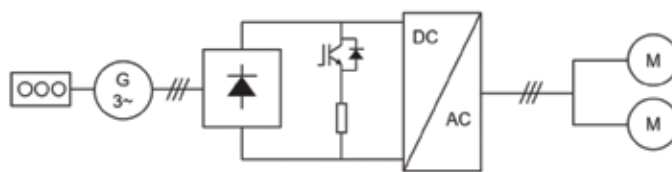
Kiedy system pracuje w trybie AC, czterokwadrantowy przekształtnik wejściowy i falownik trakcyjny silnika są bezpośrednio połączone obwodem DC-link, tworząc układ napędu trakcyjnego. W trybie DC, sieć trakcyjna prądu stałego jest bezpośrednio podłączona do obwodu pośredniczącego (DC link). Przy zastosowaniu tranzystorów IGBT o napięciu blokującym 6,5 kV, konfiguracja ta jest możliwa również dla sieci trakcyjnych prądu stałego o napięciu 3 kV.

## Pojazdy trakcyjne z silnikiem wysokoprężnym z przekładnią elektryczną

Inną powszechnie stosowaną konfiguracją jest system spalinowy z przekładnią elektryczną. W tym przypadku, jak pokazano na rysunku 19 obwód DC-link jest zasilany przez trójfazowy generator synchroniczny poprzez prostownik diodowy mostkowy.



Rys. 18. Wielosystemowy przekształtnik trakcyjny, zasilany z sieci trakcyjnej a) AC lub b) DC [4]



Rys. 19. Obwód trakcyjny z silnikami wysokoprężnymi i przekładnią elektryczną [4]

## Rezystor hamowania

Rezystory hamowania są stosowane w obwodzie prądu stałego (DC link) falownika trakcyjnego. Rezystor jest załączany przez klucz tranzystorowy (półprzewodnikowy element mocy). Jeżeli w trybie hamowania elektrodynamicznego, kiedy silnik pracuje w trybie generatorowym, napięcie w obwodzie DC link przekroczy maksymalną, ustaloną wartość dla danego urządzenia, klucz półprzewodnikowy załącza rezystor hamowania. W trakcie tego procesu rezystor hamujący pobiera energię i zamienia ją w ciepło. Jeśli napięcie spadnie poniżej ustalonej wartości maksymalnej, klucz półprzewodnikowy odłącza rezystor od obwodu falownika.

### Tryby pracy rezystora hamującego

Rezystory hamujące są zazwyczaj aktywowane tylko na krótki czas, rozpraszają energię hamowania i oddają zgromadzone ciepło do otoczenia. Rezystor pracuje cyklicznie, ze współczynnikiem wypełnienia (cyclic duration factor - c.d.f.), określonym jako % czasu pracy w czasie trwania cyklu.

Czas cyklu pracy  $t_{sp}$  oblicza się na podstawie sumy całkowitego czasu hamowania  $t_a$  oraz czasu spoczynku  $t_r$ . Zdolność przeciążeniowa rezystorów hamowania jest zależna od stałej czasowej temperatury, a tym samym m.in. od ich konstrukcji.

### Wartość rezystancji rezystorów hamujących

Ogólnie rzecz biorąc, wartość rezystancji rezystora hamującego nie jest krytyczna. Może ona zawierać się w zakresie między najniższą wartością dopuszczalną dla czopera hamującego, a wartością maksymalną dla przypadku, gdy wymagana skuteczność hamowania jest nadal możliwa do osiągnięcia.

Przy projektowaniu rezystorów przyjmuje się najczęściej standardowy zapas 25 %, uwzględniający tolerancje produkcyjne oraz zmianę rezystancji spowodowaną nagrzewaniem.

Przyjmując zapas 25 %, oraz najniższą średnią wartość napięcia obwodu prądu stałego w porównaniu do napięcia załączenia czopera, maksymalna wartość rezystora hamującego jest obliczana za pomocą zależności:

$$R_{br} = \frac{U_z^2}{P_{br}} \quad (1)$$

gdzie:

$R_{br}$  – wartość rezystancji rezystora hamowania

$U_z$  – najniższa wartość napięcia DC link

$P_{br}$  – moc rezystora hamowania.

Ze względu na powstawanie ciepła rezystory o większych mocach znamionowych często mają własną obudowę i są instalowane oddzielnie. Możliwe stopnie ochrony wynoszą od IP00 - IP23.

Przykładowy widok rezystora hamowania przedstawiono na rysunku 20.



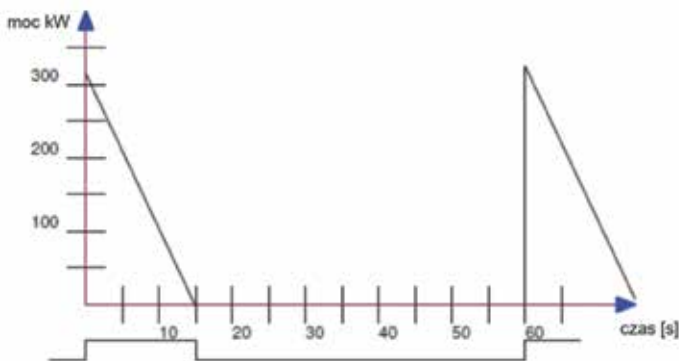
Rys. 20. Przykładowy widok rezystora hamowania (wg GINO) [www.gino.de]

Typowy rezystor hamowania znajduje się na dachu pojazdu i jest chłodzony naturalnie (bez użycia chłodzenia wymuszonego). Konstrukcja mechaniczna musi gwarantować wysoki stopień izolacji napięciowej nawet w najgorszych warunkach klimatycznych (deszcz, śnieg). Stopy Ni-Cr i Ni-Cu są preferowanymi materiałami dla rezystora hamowania, ponieważ są w stanie wytrzymać temperaturę do 600 °C.

Przy projektowaniu rezystora należy określić parametry jego pracy:

- ❖ Minimalną rezystancję z uwzględnieniem tolerancji,
- ❖ Maksymalną rezystancję po nagraniu z uwzględnieniem tolerancji,
- ❖ Rezystancję znamionową
- ❖ Moc maksymalną
- ❖ Moc średnią
- ❖ Współczynnik wypełnienia (czas załączenia - czas wyłączenia),
- ❖ Napięcie znamionowe pracy
- ❖ Kategorię nadnapięciową
- ❖ Przestrzeń dostępną do zabudowy
- ❖ Maksymalną dopuszczalną masę urządzenia
- ❖ System chłodzenia.

Na rysunku 21 przedstawiono przykład cyklu pracy rezystora hamowania.



Rys. 21. Przykładowy cykl pracy rezystora hamowania [opracowanie własne]

## Elektryczny silnik trakcyjny

Silniki trakcyjne umożliwiają mechaniczny napęd pociągu. W dzisiejszych czasach najpowszechniej stosowanym silnikiem jest indukcyjny silnik klatkowy, chociaż spotykane są także rozwiązania z silnikami synchronicznymi lub z magnesami trwałymi.

Silniki z magnesami trwałymi charakteryzują się wysoką sprawnością w całym zakresie prędkości obrotowej, dużą przeciążalnością momentu, szerokim zakresem prędkości obrotowej, mniejszymi wymiarami (w porównaniu do silników indukcyjnych lub silników prądu stałego), efektywną regulacją prędkości obrotowej, dużą niezawodnością ruchową w porównaniu do silników prądu stałego (brak węzła szczotkowego).

Spośród silników z magnesami trwałymi można wyróżnić dwie podstawowe grupy: bezszczotkowe silniki prądu stałego (BLDC) i silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM). Silniki z magnesami trwałymi są w chwili obecnej znacznie droższe od silników asynchronicznych klatkowych, nie oferują także tak dużych mocy, jakie są wymagane dla napędzania pociągów czy lokomotyw. Można jednak spotkać zastosowania w mniejszych pojazdach kolejowych, np. lokomotywach manewrowych oraz w zespołach trakcyjnych.

Silniki trakcyjne klatkowe uważane są przez niektórych producentów za silniki modułowe z uwagi na elastyczność zastosowań. Mogą to być maszyny z przewietrzaniem własnym, z chłodzeniem wymuszonym powietrzem lub chłodzeniem cieczowym.

Silniki indukcyjne trakcyjne stosowane w elektrycznych i spalinowych zespołach trakcyjnych, lokomotywach oraz pociągach dużych prędkości/mocy są silnikami o mocy znamionowej do 1,5 MW. W zastosowaniu trakcyjnym, silnik indukcyjny musi spełniać kilka kryteriów:

- ❖ silnik musi wytwarzać wysoki moment obrotowy także przy niskich prędkościach obrotowych (z uwzględnieniem rozruchu),
- ❖ silnik musi pracować w szerokim zakresie napięć i częstotliwości zasilania (od około 0,4-1 Hz do 140-180 Hz),
- ❖ silnik musi pracować zarówno w trybie silnikowym podczas napędzania pojazdu, jak również w trybie generatorowym podczas hamowania silnik musi charakteryzować się wysoką przeciążalnością,
- ❖ konstrukcja mechaniczna silnika musi zapewniać odporność na drgania i udary mechaniczne.

Tabela 2 przedstawia głównych producentów silników trakcyjnych dla przemysłu kolejowego.

Klasyczny układ napędowy – asynchroniczny silnik trakcyjny prądu przemiennego, przekładnia i falownik trakcyjny – jest z reguły projektowany dla konkretnego typu pojazdu z uwzględnieniem jego specyfiki eksploatacji, ilości rozruchów, warunków otoczenia. W każdym przypadku wymagane jest, by układ napędowy miał jak największą sprawność przy minimalnych wymiarach i jak

Tab. 2. Producenci silników trakcyjnych [4], [opracowanie własne]

Producent silnika	Strona internetowa
Traktionssysteme Austria	<a href="http://www.traktionssysteme.at">www.traktionssysteme.at</a>
ABB	<a href="http://www.abb.com/motors&amp;generators">www.abb.com/motors&amp;generators</a>
EMIT Cantoni Group	<a href="https://www.cantongroup.com/emit">https://www.cantongroup.com/emit</a>
Mitsubishi	<a href="http://www.mitsubishielectric.com">www.mitsubishielectric.com</a>
Sherwood Electromotion Inc.	<a href="http://www.sherwoodelectromotion.com/traction-motors">www.sherwoodelectromotion.com/traction-motors</a>
Siemens	<a href="http://www.mobility.siemens.com">www.mobility.siemens.com</a>
Skoda	<a href="http://www.skoda.cz/en/products/traction-motors/">http://www.skoda.cz/en/products/traction-motors/</a>
VEM Group	<a href="https://www.vem-group.com/en.html">https://www.vem-group.com/en.html</a>

najmniejszej masie. Z tego względu, przy projektowaniu silników i falowników dąży się do zminimalizowania strat, występujących w tych urządzeniach.

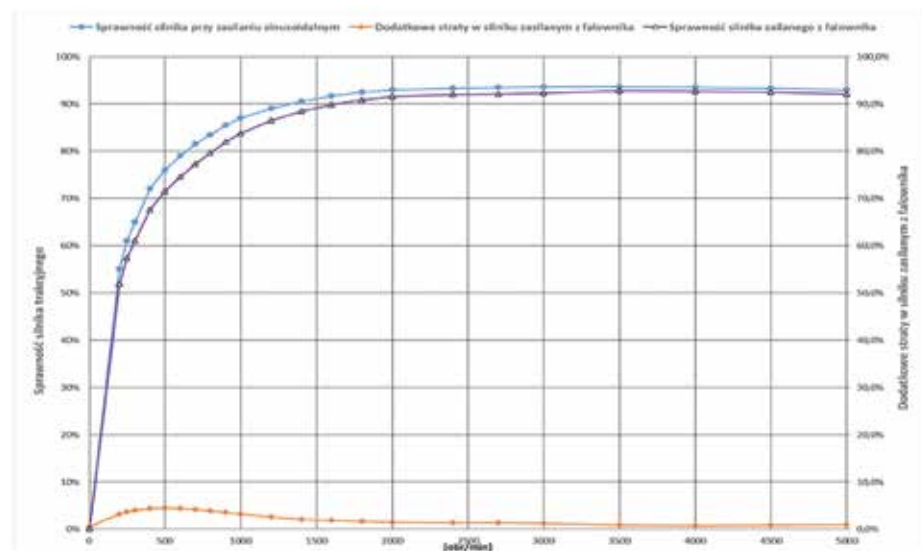
Wyznaczenie wartości strat w falowniku wymaga kompleksowej analizy jego punktów pracy. Falownik trakcyjny zasila silnik lub silniki trakcyjne napięciem przemiennym o zmiennej częstotliwości tak, by umożliwić płynne przyspieszanie pojazdu bez szarpnięć. W czasie rozruchu silniki pobierają prąd w zakresie od zera do wartości maksymalnej, również obciążenie silnika jest zmienne w czasie. W czasie jazdy z prędkością ustaloną silniki trakcyjne pracują ze stałą prędkością obrotową i momentem, w czasie hamowania silniki pracują w trybie pracy prądnicowej, oddając energię do falownika i dalej do sieci zasilającej (rekuperacja energii). Ponadto silnik, jako odbiornik lub generator energii elektrycznej charakteryzuje się zmiennym współczynnikiem mocy ( $\cos \phi$ ), co także ma wpływ na obciążenie falownika.

W celu zapewnienia prawidłowej pracy, zwłaszcza do zapewnienia szybkiego przejścia z trybu pracy silnikowej do pracy prądnicowej, silnik pobiera z falownika prąd magnesujący, znacznie mniejszy od prądu znamionowego.

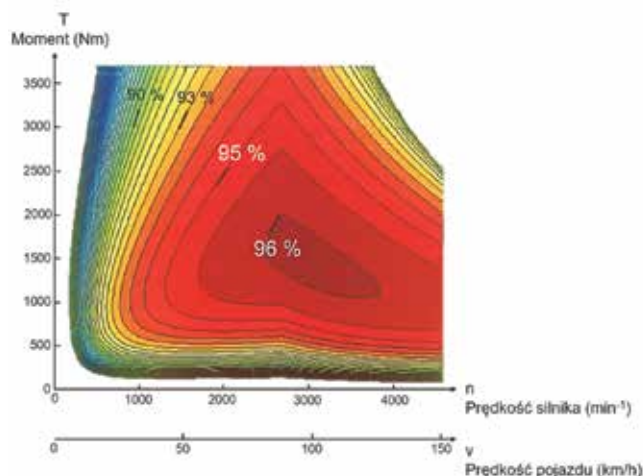
Zmienność wartości obciążenia, częstotliwości i współczynnika mocy silnika w czasie powoduje, że nie jest możliwe wyznaczenie stałej wartości strat w układzie falownika. Ponadto stosowana zmienna częstotliwość przełączania elementów półprzewodnikowych, która pozwala na optymalne kształtowanie fali sinusoidalnej prądu, także ma wpływ na straty przełączania w półprzewodnikowych elementach mocy.

Na rysunku 22 przedstawiono przykładowe wykresy sprawności silnika trakcyjnego zasilanego z falownika.

W celu dokładniejszego określenia wartości strat w silniku trakcyjnym należy wyznaczyć straty w falowniku dla poszczególnych punktów pracy silnika. Należy podkreślić, że do wyznaczenia wartości strat w punkcie pracy konieczne jest określenie przez producenta silnika wartości prądu silnika, częstotliwości i współczynnika mocy w danym punkcie pracy. Najczęściej obliczenia wykonuje się dla prędkości jazdy od zera do prędkości maksymalnej z krokiem co 10 km/h i dla poszczególnych wartości obciążeń: 0%, 15%, 25%, 50%, 75% i 100% obciążenia, przy czym obciążenie jest przyjmowane dla wymaganej siły pociągo-



Rys. 22. Przykładowe wykresy sprawności silnika trakcyjnego zasilanego z falownika [opracowanie własne]



Rys. 23. Sprawność silnika trakcyjnego TMFI 59-33-4A prod. TSA (400kW, maks. 5050 obr/min, maks. 3500 Nm; GTW2 2/8) (na podstawie TSA). [www.tsa.at]

wej i może przewyższać wartości znamionowe silnika. W wyniku obliczeń uzyskuje się macierz z wartościami strat do poszczególnych punktów pracy falownika. Przykładowy wykres sprawności silnika trakcyjnego dla różnych obciążeń i prędkości obrotowych przedstawiono na rysunku 23.

W celu doboru silnika trakcyjnego należy określić szereg parametrów technicznych pojazdu, które są także wymagane do wyboru konfiguracji falownika zasilającego silnik trakcyjny:

- ❖ Rodzaj pojazdu (tramwaj, elektryczny zespół trakcyjny, lokomotywa, ...)
- ❖ Masa pojazdu pustego / z masami wirującymi / z pełnym obciążeniem (kg)
- ❖ Wartość sił oporów ruchu w funkcji prędkości (N/km/h)
- ❖ Rozstaw szyn (mm)
- ❖ Koncepcja napędu mechanicznego (napęd poprzeczny lub napęd wzdłużny)
- ❖ Zawieszenie silnika: całkowicie czy częściowo odsprężynowane
- ❖ Liczba silników
- ❖ Maksymalna prędkość pojazdu (km/h)
  - ❖ Średnica koła nowego/zużytego (mm)
  - ❖ Minimalny prześwit podłogi przy kole zużytych (mm)
  - ❖ Przyspieszenie pojazdu ( $m/s^2$ )
  - ❖ Napięcie sieci trakcyjnej prądu stałego/przemiennego (V) i zakres tolerancji napięcia
  - ❖ Poziom napięcia obwodu pośredniczącego (V) dla trybu rozruchu i hamowania
  - ❖ System zasilania elektrycznego, gradient napięcia  $dU/dt$  [ $\mu s$ ], częstotliwość impulsów falownika silnika
  - ❖ Siła pociągowa (kN) / maksymalna ciągła siła pociągowa w funkcji prędkości obrotowej lub prędkości.
  - ❖ Wykres siły pociągowej w funkcji prędkości jazdy i hamowania
  - ❖ Przełożenie przekładni
  - ❖ Zapotrzebowanie na miejsce dla silnika/przekładni wewnątrz wózka (mm x mm x mm)

- ❖ Warunki pracy/otoczenia (temperatura otoczenia, wilgotność)
- ❖ Średnia odległość między przystankami (km)
- ❖ Maksymalny gradient linii (% lub ‰)
- ❖ Dostawca przekładni, przełożenie przekładni, sprawność przekładni
- ❖ Rysunek wózka
- ❖ Dane silnika trakcyjnego
- ❖ Rodzaj chłodzenia silnika (chłodzenie własne, wymuszone, chłodzenie cieczą)
- ❖ Wymagany stopień ochrony IP
- ❖ Wymagane dane silnika: S1 P (kW); U (V); I (A); f (Hz); n (rpm); n max (rpm); Mn (Nm), cos φ, η (%)
- ❖ Schemat obwodu głównego, charakterystyka przy braku obciążenia
- ❖ Wartości maksymalne prądu (A) podczas pracy z pełnym obciążeniem, podczas rozruchu, hamowania i hamowania awaryjnego ED

Parametry wybranego silnika (napięcia, prądu, częstotliwość napięcia zasilającego, sprawność, współczynnik mocy) są podstawą do zaprojektowania falownika trakcyjnego. Należy podkreślić, że silnik trakcyjny musi zostać specjalnie zaprojektowany do pracy z falownikiem trakcyjnym, by zminimalizować straty dodatkowe, wynikające z kształtu prądu uzyskiwanego z falownika i zapewnić odporność na stromość fali napięciowej zasilającej silnik. Przykładowe typ silnika przedstawiono na rysunku 24 (dane katalogowe silnika produkcji TSA).

## Kierunki rozwoju urządzeń energoelektronicznych w taborze kolejowym

Rozwój technologiczny wpływa także na wymagania dla falowników trakcyjnych. W tabeli 3 przedstawiono korelację pomiędzy wymaganiami dotyczącymi pojazdów szynowych a wymaganiami dla urządzeń wchodzących w skład systemu napędowego [5].

W ostatnich latach można zaobserwować intensywny rozwój konstrukcji pojazdów z napędem autonomicznym – wykorzystującym energię zgromadzoną w zasobniku energii. W szczególności dotyczy to pojazdów komunikacji miejskiej – autobusów elektrycznych, trolejbusów i tramwajów, trwają również prace rozwojowe nad



Silnik: Typ: TMF 50-29-4					
P	250	kW	$n_{max}$	4025	min <sup>-1</sup>
N	1482	min <sup>-1</sup>	m	690	kg
U	230	V	Mstart	2967	Nm
I	76	A	Projekt modernizacji dla elektrycznych zespołów trakcyjnych EN57		
f	50	Hz			
Q	0,6	l/min			

Rys. 24. Przykładowy widok i parametry silnika trakcyjnego, wykorzystywanego przy modernizacji ezt EN57 (wg TSA Austria) [ www.tsa.at ]

Tab. 3. Korelacja pomiędzy wymaganiami dotyczącymi pojazdów szynowych a wymaganiami dla urządzeń napędowych [5]

Kryterialne wymaganie techniczne	Wpływ na system trakcyjny
Obniżenie strat	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zmniejszenie rozmiarów/wagi urządzeń chłodzących</li> <li>- zmniejszenie zużycia energii przez pomocnicze urządzenia chłodzące</li> <li>- zmniejszenie objętości/wagi przekształtników</li> <li>- zmniejszenie poziomu hałasu generowanego przez urządzenia chłodzące</li> <li>- zmniejszenie zużycia energii</li> <li>- zmniejszenie pracochłonności czynności konserwacyjnych urządzeń chłodzących</li> <li>- zwiększenie niezawodności dla niższych temperatur</li> </ul>
Duża moc wyjściowa przekształtnika	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zmniejszenie objętości/wagi silnika</li> <li>- zmniejszenie objętości/wagi transformatora</li> <li>- zwiększenie mocy trakcyjnej</li> <li>- zwiększenie niezawodności</li> </ul>
Wysoka częstotliwość przełączania	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zmniejszenie strat w silniku/transfornatorze</li> <li>- zmniejszenie wielkości/wagi silnika/transfornatora</li> <li>- zmniejszenie hałasu w silniku/transfornatorze</li> <li>- zmniejszenie wielkości/wagi elementów filtrujących</li> </ul>
Podniesienie niezawodności zespołów	<ul style="list-style-type: none"> <li>- podniesienie niezawodności systemu trakcyjnego</li> </ul>

ich zastosowaniem w kolejnictwie. Zasobnikami wykorzystywanymi w takich rozwiązaniach są najczęściej baterie akumulatorów i/lub baterie superkondensatorów.

System pokładowego zasobnika energii w pojeździe może być zdefiniowany jako system hybrydowy. System hybrydowy posiada dwa (lub więcej) źródła energii, w tym system magazynowania energii (ang. *Energy Storage System* - ESS), wraz z przekształtnikami, falownikami trakcyjnymi, silnikami oraz sterowaniem zarządzającym zużyciem energii. Dzięki takiemu rozwiązaniu można:

- ❖ poprawić efektywność energetyczną i paliwową pojazdu,
- ❖ poprawić charakterystykę przyspieszenia,
- ❖ zwiększyć zasięg i zapewnić nieprzerwane funkcjonowanie w przypadku utraty zasilania ze źródła podstawowego (ang. *Primary Power Source* - PPS),
- ❖ wyeliminować lub złagodzić ograniczenia podstawowego źródła zasilania, zmniejszając szczytowy pobór mocy,
- ❖ zmniejszyć zużycie paliwa i emisję (np. CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM, etc.),
- ❖ zredukować negatywny wpływ na środowisko (np. eliminacja sieci trakcyjnej, redukcja hałasu, itp.)

System hybrydowy może występować jako system równoległy lub szeregowy. System równoległy to system, w którym siła pociągowa jest wytwarzana przez kilka silników i przekazywana do zestawów kołowych przez system transmisyjny. System szeregowy to system, w którym falownik trakcyjny, zasilany z kilku źródeł, zasila silnik trakcyjny. Szeregowy układ hybrydowy jest zasilany z co najmniej dwóch źródeł energii, w tym z zasobnika energii. Odbiornikiem jest układ napędowy lub rezystor hamowania, w sytuacji, gdy układ zasobnikowy nie jest w stanie odebrać nadmiaru energii - na przykład w czasie hamowania odzyskowego. Analiza topologii i właściwości tych układów były przedmiotem wcześniejszej publikacji [6, 10].

## Kierunki rozwojowe konstrukcji falowników trakcyjnych [11-32]

Rozwój technologiczny falowników trakcyjnych i przetwornic statycznych jest ściśle związany z postępem technologii półprzewodników. Producenci półprzewodników dążą do zwiększenia

stopnia integracji elementów półprzewodnikowych. Jednoczesne dążenie do zmniejszenia objętości elementów półprzewodnikowych (zwiększenie gęstości mocy) wymaga zastosowania zaawansowanych technologii upakowania elementów, przy zachowaniu wysokich parametrów izolacji elektrycznej oraz przewodności cieplnej. Dodatkowo od nowych modułów półprzewodnikowych wymagane są znacznie wyższe częstotliwości przełączeń. Te ściśle zintegrowane podzespoły będą wymagały zaawansowanych systemów zarządzania termicznego i doboru materiałów. Trendy rozwojowe obejmują także prace badawczo rozwojowe w zakresie upakowania komponentów, projektowania sterowników bramkowych, integracji systemów i technik wytwarzania. Zastąpienie krzemowych (Si) półprzewodników mocy elementami o szerokim paśmie zabronionym (ang. WBG - *Wide Band Gap*) daje również duże możliwości projektowania nowej generacji falowników trakcyjnych.

#### ❖ Topologie

Tendencja zwiększania wartości napięcia sieci prądu stałego, powoduje zwiększenie zainteresowania falownikami wielopoziomowymi. Rozwiązanie to jednak wymaga zastosowania dodatkowych elementów półprzewodnikowych, a co za tym idzie zwiększenie kosztów. Finalnie wysokie koszty mogą uczynić to rozwiązanie niepraktycznym dla zastosowań trakcyjnych.

Na tej podstawie przewiduje się, że większość falowników trakcyjnych, będzie realizowana w topologii falownika dwupoziomowego.

#### ❖ Elementy półprzewodnikowe o szerokim paśmie zabronionym „wide band gap” (WBG)

Zastosowanie półprzewodników o szerokim paśmie zabronionym WBG w energoelektronice, w tym w falownikach trakcyjnych, było przedmiotem wielu badań. Wiele firm jako cel do roku 2025 przyjęło znaczne zwiększanie gęstości mocy urządzeń energoelektronicznych. Uzyskanie tych celów jest możliwe poprzez zastąpienie tradycyjnych tranzystorów krzemowych (Si) mocy, elementami wykonanymi z nowych materiałów półprzewodnikowych, charakteryzujących się szerokim pasmem zabronionym (WBG).

Elementy półprzewodnikowe wykonane z materiałów WBG posiadają liczne zalety w porównaniu do tranzystorów krzemowych: wyższa temperatura pracy, wyższe napięcia pracy, wyższa częstotliwość przełączeń, zmniejszenie strat mocy, zmniejszenie wielkości chipów.

Obecnie najbardziej obiecującymi materiałami WBG ze względu na swoje właściwości i postęp w komercjalizacji są węgiel krzemu (SiC) i azotek galu (GaN). Zwłaszcza SiC okazał się atrakcyjnym materiałem do zastosowania w falownikach trakcyjnych i przetwornicach statycznych ze względu na jego wysoką, dopuszczalną temperaturę pracy, która może umożliwić redukcję kosztów systemowych poprzez unifikację przekształtnika i jego układu chłodzenia. Elementy WBG oferują wiele korzyści w porównaniu z istniejącymi urządzeniami Si, jednak podstawową barierą dla producentów trakcyjnych układów napędowych jest wysoki koszt elementów wysokonapięciowych wykonanych z nowych materiałów półprzewodnikowych. Zauważalna i oczekiwana jest tendencja spadku kosztów nowych elementów przełączających, wraz z poprawą i rozwojem tej technologii na rynku półprzewodników. Jako pośredni krok w kierunku produkcji elementów półprzewodnikowych wykonanych w pełni z materiałów WBG, producenci niektórych półprzewodników wprowadzili elementy hybrydowe, które

składają się z tranzystora krzemowego IGBT i diody SiC w jednej obudowie. Wykorzystanie diody SiC w porównaniu do typowej diody Si pozwala na zmniejszenie strat całkowitych o 30-40%.

#### ❖ Nowe rozwiązania obudów i upakowania chipów

Mitsubishi Electric wprowadził na rynek nowy moduł IGBT z jednolitą, jednowarstwową, izolowaną metalową płytą podstawową (IMB), zapewniającą zarówno wysokie napięcie izolacji, jak i przewodność cieplną. Konwencjonalne podłoże ceramiczne zapewnia niską rezystancję cieplną, która w połączeniu z substratami azotków aluminium zapewnia izolację elektryczną. Dzięki zastosowaniu techniki IMB, pojedyncza warstwa IMB pozwala na wyeliminowanie połączeń wewnętrznych struktury, a efektywna powierzchnia mocowania chipa może być zwiększona o ok. 23%. Odprowadzanie ciepła jest również zwiększone dzięki obniżeniu rezystancji termicznej o ok. 65%. Poprawa niezawodności może być również osiągnięta dzięki sprawdzonej obudowie i zaawansowanej konstrukcji termicznej. Udaje się to osiągnąć dzięki innowacyjnym rozwiązaniom w procesie mocowania matryc, ulepszonym połączeniom wewnętrznym oraz metodom chłodzenia, takim jak chłodzenie dwustronne (*Double Sided Cooling* - DSC). Producenci zaczęli odchodzić od łączenia przewodów i połączeń lutowanych, ponieważ wykazują one ograniczenia w pracy w warunkach dużego natężenia prądu i wysokiej temperatury. Firma Semikron rozwinęła swoją linię modułów SKiM, które wykorzystują połączenia dyfuzyjne w celu zastąpienia materiału interfejsu termicznego, warstw lutowanych i przewodów połączeniowych. Dzięki temu osiągnięta jest wysoka niezawodność i wydłużona zostaje żywotność w warunkach cyklicznych naprężeń termicznych. Zarządzanie termiczne jest również ulepszone w zakresie gęstości mocy poprzez rozszerzenie obszaru rozpraszania ciepła modułu. Osiąga się to dzięki metodzie DSC, która usuwa ciepło zarówno z górnej jak i dolnej strony modułu, co pozwala na zmniejszenie powierzchni zajmowanej przez niego nawet o ok. 45% w porównaniu z konwencjonalną technologią chłodzenia bocznego. W połączeniu z DSC, przewody łączące górną stronę chipa mogą być zastąpione połączeniami planarnymi. Dzięki temu rezystancja cieplna oraz indukcyjność pasożytnicza zmniejszają się znacząco. Pozwala to na uzyskanie większej niezawodności i wydajności cieplnej systemu oraz gęstości mocy.

#### ❖ Nowe technologie pasywnych komponentów elektronicznych

Dla potrzeb wysokoczęstotliwościowych przekształtników mocy została opracowana nowa folia dielektryczna do kondensatorów z polieterymidu (PEI), która może pracować w wyższych temperaturach. Oprócz udoskonalenia samej technologii kondensatorów, poprawiana jest technologia integracji kondensatora z szyną prądu stałego, co także umożliwiła pewną poprawę gęstości mocy i wydajności, bowiem poprzez minimalizację indukcyjności szeregową po stronie DC, można zmniejszyć wartość przepięć w obwodzie. Ograniczenie przepięć w obwodzie pozwala na zastosowanie modułów IGBT o mniejszym zapasie napięciowym, zapewniającym wymagany margines bezpieczeństwa. Prowadzi to do zwiększenia gęstości mocy falownika i ograniczenia kosztów elementów półprzewodnikowych.

#### ❖ Zarządzanie energią cieplną

Oprócz ulepszeń w elementach elektronicznych, przeprowadzono istotne badania nad metodami usuwania ciepła z urządzeń. W miarę wzrostu gęstości mocy urządzeń, odprowadzanie cie-

pla przy zastosowaniu konwencjonalnego radiatora czy płyty z przepływającym wewnątrz czynnikiem chłodniczym jest coraz trudniejsze. Jako dalsza modernizacja konstrukcji falowników i przetwornic istnieje propozycja chłodzenia bezpośredniego, w którym pakiet modułowy jest w pełni zanurzony w płynie chłodzącym, a nie przykręcony do zimnej płyty radiatora. Pasywne dwufazowe chłodzenie zanurzeniowe zostało z powodzeniem zastosowane w prototypowych falownikach trakcyjnych do lokomotyw. Znaczną uwagę poświęca się również chłodzeniu z radiatorami mikrokanalowymi i rurkami cieplnymi.

## ❖ Konstrukcja sterownika bramki

Układy sterujące przełączającymi elementami mocy muszą być zaprojektowane bardzo starannie. W praktyce, sterowniki bramkowe są zazwyczaj projektowane z uwzględnieniem najgorszego scenariusza, który zakłada konieczność ograniczenia stromości przełączanego prądu  $di/dt$ , w celu zapobiegnięcia nadmiernego wzrostu napięcia, co powoduje zwiększenie strat mocy przy przełączaniu. Istnieje tendencja do wykorzystywania coraz bardziej inteligentnych sterowników bramkowych, które dostosowują nachylenie włączania i wyłączania IGBT w zależności od warunków pracy. Aktywne techniki sterowników bramkowych umożliwiają większą kontrolę nad charakterystyką przełączania, co pozwala na zminimalizowanie strat przy przełączaniu, zmniejszenie napięcia operacyjnego i emisji zakłóceń elektromagnetycznych. Spotykane są również rozwiązania dynamicznego układu sterownika bramki, który redukuje straty przy wyłączaniu nawet o 30%, zapewniając jednocześnie niskie koszty i napięcie przepięciowe podobne do konwencjonalnego sterownika bramki oraz sterowniki bramkowe łączące dwustopniową kontrolę napięcia bramki z dodatkowym układem sprzężenia zwrotnego. Metoda ta pozwala na osiągnięcie dobrego kompromisu pomiędzy napięciem przepięciowym a stratami przy przełączaniu. Inteligentne sterowniki bramek mają również na celu integrację większej ilości opcji ochrony i monitorowania, takich jak techniki wykrywania prądu i temperatury, które mogą poprawić niezawodność elementów mocy jak i urządzeń takich jak: falowniki czy przetwornice. Poza potrzebą udoskonalenia sterownika bramki IGBT, elementy WBG stawiają nowe wyzwania ze względu na ich wysokie wartości prądu, szybkie przełączanie i pracę w wysokiej temperaturze. Ma to wpływ na układy scalone sterowników, ponieważ muszą one również pracować w wyższych temperaturach i zapewniać wyższe bariery izolacyjne napięcia. Ponadto, wysoka częstotliwość przełączeń zwiększa wpływ pojemności i indukcyjności pasożytniczych, odpowiedzialnych za przepięcia czy oscylacje (dzwonienie) w układzie. Integracja specjalizowanych układów scalonych z modułem zasilającym jest odpowiednim rozwiązaniem ograniczającym indukcyjność w miarę zmniejszania się odległości pomiędzy bramką a chipsetem.

## Integracja systemowa

Ścisła integracja falownika trakcyjnego i przetwornicy statycznej jest wyraźnym trendem w produkcji pojazdów elektrycznych. Integracja falownika i przetwornicy umożliwia zminimalizowanie okablowania zewnętrznego. Zmniejsza to zarówno koszty montażu, jak i koszty materiałów przy jednoczesnym zwiększeniu niezawodności. Wielu producentów oferuje zintegrowane falowniki i przetwornice z innymi modułami energoelektroniki w pojeździe. Zmniejsza to wagę i objętość wspólnej obudowy, nakłada jednak wysokie wymagania, co do niezawodności i podatności obsługowo-naprawczej.

Oprócz prostej fizycznej integracji modułów energoelektronicznych w jednej obudowie, istnieje zainteresowanie zintegrowanymi topologiami, które mają na celu obniżenie kosztów poprzez ponowne wykorzystanie istniejących komponentów i urządzeń w celu osiągnięcia nowego trybu działania. W szczególności są proponowane zintegrowane topologie ładowania akumulatorów, które wykorzystują istniejące układy przetwornicy statycznej, eliminując potrzebę stosowania dedykowanej ładowarki pokładowej.

## Techniki produkcji

Masowa produkcja złożonych zespołów falownika jest trudnym zadaniem ze względu na dużą liczbę różnych części i restrykcyjne wymagania dotyczące niezawodności i kosztów. W szczególności układ chłodzenia cieczą często ma unikalną geometrię i ścisłe tolerancje, pozwalającą zoptymalizować przepływ cieczy chłodzącej, utrzymać stały opór cieplny i zapewnić brak wycieków cieczy chłodzącej, które mogłyby spowodować rozległą awarię przetwornicy czy falownika. Ze względu na najnowsze osiągnięcia w dziedzinie technik produkcji, materiały kompozytowe ponownie zyskały na zainteresowaniu w zastosowaniach trakcyjnych, które mają na celu poprawę wydajności i bezpieczeństwa pojazdów dzięki niskiej wadze. Kompozyty mogą być nawet o 35% lżejsze od aluminium i 60% lżejsze od stali, zmniejszając znacząco masę urządzeń energoelektronicznych. Tendencja ta może prowadzić do poszerzenia zakresu oprav i obudów elementów pojazdu, w tym falowników trakcyjnych i przetwornic statycznych. Kompozytowe obudowy wzmocnione włóknem węglowym zostały już wprowadzone na rynek do zastosowań w przemyśle lotniczym i kosmicznym, a dalsza redukcja kosztów będzie coraz bardziej opłacalna dla zastosowań kolejowych. Uważa się, że oprócz zmniejszenia masy obudów metalowych, materiały kompozytowe charakteryzują się również doskonałymi parametrami w zakresie zakłóceń elektromagnetycznych, ponieważ materiał kompozytowy może pochłaniać promieniowanie elektromagnetyczne, a nie odbijać je z powrotem do źródła.

## Podsumowanie

Falowniki trakcyjne oraz przetwornice statyczne są urządzeniami krytycznymi dla pojazdu z punktu widzenia dążenia do zwiększenia wydajności i powstawania pojazdów przyjaznych dla środowiska.

Wymaganiem, które nieodłącznie towarzyszy rozwojowi konstrukcji urządzeń półprzewodnikowych jest zapewnienie odporności na wibracje oraz wysoką temperaturę pracy.

Projekt, jego optymalizacja oraz konstrukcja urządzeń takich jak: falowniki trakcyjne czy przetwornice statyczne jest złożonym, interdyscyplinarnym zadaniem, w trakcie którego rozwiązywane są skomplikowane problemy konstrukcyjne zarówno w dziedzinie rozwiązań elektrycznych, jak i mechanicznych. Dodatkowo należy zwrócić uwagę na fakt rozbieżności celów i wymagań stawianym urządzeniom.

Przykłady z branży urządzeń energoelektronicznych pokazują, że istnieje wiele koncepcji, metod w odniesieniu do jednego, standardowego rozwiązania, realizującego te same cele.

Nowe koncepcje pojazdów o szerokim zastosowaniu, są przyczyną i motorem napędowym dla poszukiwania innowacyjnych rozwiązań w dziedzinie układów napędowych i zasilania pomocniczego, które mają spełnić wysokie wymagania producentów pojazdów.

**Literatura:**

- Goikoetxea J., Peris E.: Roll2Rail. Developing the rolling stock of the future. European Railway Review, Vol. 21, Issue 5, p. 56-58, 2015.
- OPEUS D5.1 Modelling and strategies for the assessment and Optimisation of Energy Usage aspects of rail innovation. D05.1 Traction chain architecture characterization. Deliverable report. OPEUS. [http://opeus-project.eu/IMG/pdf/opeus\\_d51\\_traction\\_chain\\_architecture\\_characterisation.pdf](http://opeus-project.eu/IMG/pdf/opeus_d51_traction_chain_architecture_characterisation.pdf)
- Tiago Oliveira Bastos Pinto de Sá. Traction Control in Electric Vehicles. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- Abad G.: Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications. Wiley, 2017.
- Roll2Rail. NEW DEPENDABLE ROLLING STOCK FOR A MORE SUSTAINABLE, INTELLIGENT AND COMFORTABLE RAIL TRANSPORT IN EUROPE D1.1 - Top level specification from Operators & Technology Search results systems. <http://www.roll2rail.eu/download.aspx?id=7b6ca0ae-9af1-40a6-ac4c-be9e72a3f18b>
- Biliński J. Napędy trakcyjne z zasobnikami energii (typy, konfiguracje, ograniczenia). XVII Ogólnopolska Konferencja Naukowa z zakresu Trakcji Elektrycznej SEMTRAK, Zakopane, 13-15 października 2016.
- OPEUS D6.1 Modelling and strategies for the assessment and Optimisation of Energy Usage aspects of rail innovation. DEL 6.1 Innovative technologies outlook update. [http://opeus-project.eu/IMG/pdf/opeus\\_d61\\_innovative\\_technologies\\_outlook\\_update.pdf](http://opeus-project.eu/IMG/pdf/opeus_d61_innovative_technologies_outlook_update.pdf)
- IEC TS 60034-25:2014 Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide.
- IEC 62864-1: Railway applications – Rolling stock – Power supply with onboard energy storage system – Part 1: Series hybrid system.
- Biliński J. Napędy trakcyjne z zasobnikami energii (typy, konfiguracje, ograniczenia). Technika Transportu Szynowego nr 10, 2016.

**Literatura uzupełniająca:**

- ABB Group. Power Electronic Transformer for railway on-board applications: An overview. Zurich, Switzerland: ABB Group, 2013.
- Allenbach JM, Chapas P, Compte M, Caller T. Traction Electric. Lausanne, Switzerland: Presses polytechnique et universitaires romandes, 2008.
- Bose BK. Modern Power Electronics And AC Drives. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- De Doncker RWAA, Divan DM, Kheraluwala MH. A three-phase soft-switched high-power-density dc/dc converter for high power applications. IEEE Trans. Ind. Appl. 1991; 27(1): 63–73.
- Dujic D. Power Electronic Transformer for Railway On-board Applications: An overview. Zurich, Switzerland: ABB.
- Eckel H-G, Bakran MM, Krafft EU, Nagel A. A new family of modular IGBT converters for traction applications, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1665438>, 2005.
- Ehsani M., Gao Y., Gay S.E., Emadi A.: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design. CRC Press, 2005.
- Gerekial W. Bi-directional Power Converters for Smart Grids: Isolated bidirectional DC/DC converter. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 2014.
- Gu S. Research on control strategy of the emergency self-traction system in urban rail transit. International Conference on Electrical and Control Engineering, 2011 Yichang, China.

- IEC 62864-1: Railway applications – Rolling stock – Power supply with onboard energy storage system – Part 1: Series hybrid system
- Inoue S., Akagi H.: A bi-directional DC/DC converter for an energy storage system. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, 25 February to 1 March 2007: 761–767.
- Kheraluwala M.H., Gascoigne R.W., Divan D.M.: Performance characterization of a high-power dual active bridge dc-to-dc converter. IEEE Trans. Ind. Appl. 1992; 28(6): 1294–1301.
- Link A.N., O'Connor A.C., Scott T.J.: Battery Technology for Electric Vehicles. Routledge, 2015
- Nikowitz M.: Advanced Hybrid and Electric Vehicles. System Optimization and Vehicle Integration. Springer, 2016.
- Ngo T. A single-phase bidirectional dual active half-bridge converter. Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, 5–9 February 2012: 1127–1133.
- Perez-Pinal F.J.: An Integrated Electric Vehicle Curriculum. Electric Vehicles. The Benefits and Barriers. InTech, 2011.
- Steimel A. Electric Traction Motive Power and Energy Supply. Munich, Germany: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2008.
- Young K., Wang C., Wang L., Strunz K. Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Power Electronics and Power Systems. Springer, 2013.
- Yuana D. Design and analysis of emergency self-traction system for urban rail transit vehicles. International Conference on Future Energy, Environment, and Materials, 2012, Suzhou, China.
- Zhao B., Song Q., Liu W, Sun Y. Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC–DC converter for high-frequency-link power-conversion system. IEEE Trans Power Electron, 2014; 29(8): 4091–4106.
- Schuderer J., Liu Ch., Pavlicek N., Salvatore G., Loisy J.-Y., Schröder A., , Torresin D., Gradinger T., Baumann D., Mohn F., Andreas Apelsmeier A.: High-Power SiC and Si Module Platform for Automotive Traction Inverter. Published at PCIM Europe 2019, [www.pcim-europe.com](http://www.pcim-europe.com).
- Yamamoto T.: Trends in Recent Research on Main Circuits and Traction Systems for Railway Vehicles. QR of RTRI, Vol. 59, No. 1, Feb. 2018.

**Autorzy:**

**Janusz Biliński, Marta Malczewska** – MEDCOM

**Artur Rojek, Włodzimierz Kruczek** – Instytut Kolejnictwa

**Traction inverters for railway vehicles -  
technical solutions and development of constructions**

*Innovative technology and continuous development of the electronic components industry enables creation of components of higher energy-efficiency, lighter, quieter and even smaller traction systems [1]. The article presents different traction systems with their parameters which are highly depend on the vehicle architecture. The vehicle architecture is strongly related to the catenary line voltage and type of service provided by vehicles (urban, regional, fast, cargo) [2].*

**Keywords:** railway vehicles, traction inverters.