

Józef Dąbrowski

# Jaki w polskich warunkach powinien być tramwaj dwusystemowy?

**Niebawem minie już ćwierć wieku od wprowadzenia do eksploatacji w niemieckim mieście Karlsruhe tramwaju poruszającego się po znajdujących się w tym mieście torach tramwajowych oraz kolejowych, dzięki czemu uzyskano bezprzesiadkowe połączenie z miastem Bretten [15].**

Pokonano przy tym wiele problemów legislacyjnych, wynikających między innymi ze sposobu prowadzenia ruchu na torach kolejowych i tramwajowych. Dopracowano szczegóły techniczne związane z bezpieczeństwem wysiadania i wsiadania pasażerów na peronach tramwajowych i kolejowych, które mają różne wymiary ze względu na skrajnie i wysokość podtóg w pojazdach kolejowych i tramwajowych. Dopracowano także możliwości jazdy kół i wózków tramwajowych po szynach kolejowych. Ponadto – wzorem istniejących już w owym czasie lokomotyw wielosystemowych, które mogły poruszać się po torach kolejowych zasilanych różnym napięciem trakcyjnym prądu przemiennego (np. 15 kV 16,7 Hz i 25 kV 50Hz) czy też pod napięciem prądu stałego 3 kV na tramwaju w Karlsruhe – wykorzystano doświadczenia z układu zasilania lokomotywy dwusystemowej 15 kV 16,7 Hz i 3kV DC i zaproponowano napięcie DC na poziomie 750 V. [15, 7]. Od tego czasu w Europie uruchomiono już kilkanaście linii z dwusystemowymi pojazdami. Przodują w tej dziedzinie dwa kraje – Niemcy i Francja [34]. Przez granicę tych państw od 1997 roku przejeżdża z Sarreguemines we Francji do Saarbrücken w Niemczech tramwaj dwusystemowy. Istotnym przykładem, pomocnym do rozstrzygnięcia problemu, jaki powinien być tramwaj dwusystemowy w Polsce, jest miasto Kassel, gdzie wprowadzono pojazd tramwajowy z napędem elektrycznym na napięcie trakcyjne tramwajowe 750 V DC i poruszający się po torach kolejowych za pomocą silnika spalinowego. Z uwagi na spotykane w trakcji tramwajowej dwa napięcia prądu stałego (600 i 750 V DC) w 2002 r. w mieście Chemnitz zastosowano tramwaj, który może być eksploatowany pod tymi napięciami. Różnice w napięciu nie są na tyle istotne, aby z pomocą energoelektronicznego układu pomiędzy siecią a indukcyjnymi silnikami napędowymi nie zapewnić możliwości jazdy.

Europejska definicja tramwaju dwusystemowego (niem. *Zweisystem-Stadtbahn*, fr. *Tram-train*) [por. 17]: szynowy pojazd komunikacji lokalnej, łączący w sobie właściwości pojazdu kolejowego i tramwaju, mogący poruszać się zarówno po torowiskach kolejowych, jak i tramwajowych (tzw. model Karlsruhe). Jako krótsze polskie nazwy tramwaju dwusystemowego proponuje się neologizmy koltram lub tramper; pojawiły się one w kilku opracowaniach dotyczących ewentualnego zastosowania w Polsce dwusystemowego tramwaju.

W warunkach polskich pojazd ten powinien być spalinowo-elektryczny. Czy musi być też dwunapięciowy? A może należy jeszcze inaczej rozwiązać problem zasilania napędu takiego pojazdu?

## Sytuacja w Polsce

W naszym kraju zelektryfikowane linie kolejowe są zasilane napięciem 3 kV DC, natomiast komunikacja tramwajowa zasilana jest napięciem 600 V DC. A zatem w Polsce pojazd, który może być zasilany bezpośrednio z sieci kolejowej lub tramwajowej, można uważać za pojazd dwunapięciowy, ponieważ zarówno trakcja kolejowa, jak i tramwajowa, zasilane są prądem stałym, ale o różnym poziomie napięcia. Za pierwszą próbę wprowadzenia tramwaju na zelektryfikowane polskie tory kolejowe należałoby uznać prace wykonane w Krakowie pod koniec XX w. [1, 3, 4, 6].

Faktycznie nie była to jednak pierwsza próba na ziemiach polskich. Na początku XX w., tj. w 1904 r., po wielu próbach technicznych otwarto linię tramwajową łączącą Koszalin i Mielno, przy czym część tej trasy biegła po torach boczniczy towarowej. Linia ta została zelektryfikowana napięciem tramwajowym (600 V), jednak nie przetrwała ona kryzysu międzywojennego i we wrześniu 1938 r. została zamknięta [15]. Według [15] zapomniano o tym rozwiązaniu aż do 1952 r., tj. do czasu podjęcia prac nad modelem Karlsruhe. Według informacji podanych w *tts* 9/1999, s. 46, w 1961 r. w Szczecinie, po wydzierżawionym od PKP torze kolejowym i wewnętrznej linii tramwajowej kursował z ul. Bytomskiej do Nabrzeża Ewa zasilany z prądnicy napędzanej silnikiem spalinowym przedwojenny wagon tramwajowy typu L. Zestaw z generatorem znajdował się na przyczepce. Wagon ten zastąpił kursujące na tej trasie od końca grudnia 1955 r. zasilane z akumulatorów wagony Herbrand. Przypadek ten jest swoistym pierwowzorem rozwiązania z Kassel czy Zwickau.

Na przełomie wieków XX i XXI na temat tramwaju dwusystemowego w Krakowie-Osieczanach zorganizowano Seminarium Naukowo-Techniczne *Zintegrowane systemy kolejowo-tramwajowe*. Tramwajowi temu poświęcono wiele publikacji, w tym znaczną część wspomnianego już czasopisma – podwójnego numeru *tts* z 2000 r. Pomimo niepowodzenia, czyli braku aplikacji, później tematyka ta pojawia się w związku z planami rozbudowy infrastruktury transportowej w innych miastach polskich [18, 20, 25, 28, 33, 35, 37].

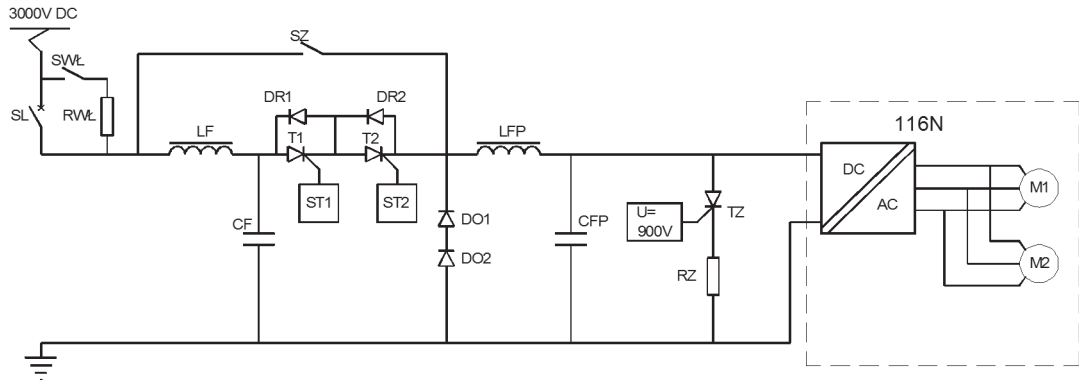
Wyszukiwarki internetowe zainteresowanych tą problematyką odsyłają na różne fora dyskusyjne, w tym także informujące o tym, że w różnych miastach kraju rozważano wykorzystanie istniejącej kolejowej infrastruktury szynowej do rozwoju i usprawnienia komunikacji tramwajowej w danym mieście i regionie [16, 18, 19, 20].

Już niejako przy okazji pierwszych w Polsce szeroko zakrojonych prac nad wprowadzeniem tramwaju na tory kolejowe pojawiły się publikacje związane z rozwiązaniem zasilania na pokładzie pojazdu tramwajowego i rodzajem napędu [9]. Wstępne koncepcje ujęte w pracy [9] zostały rozwinięte wraz z oszacowaniem ewentualnych kosztów tej rozbudowy tramwaju 116N [13]. Na rysunkach 1–3 pokazano, za [13], schematy ideowe układu dopasowania do istniejącego na pojeździe napędu zasilanego napięciem 600 V na napięcie kolejowe 3 kV. Nieco inna propozycja

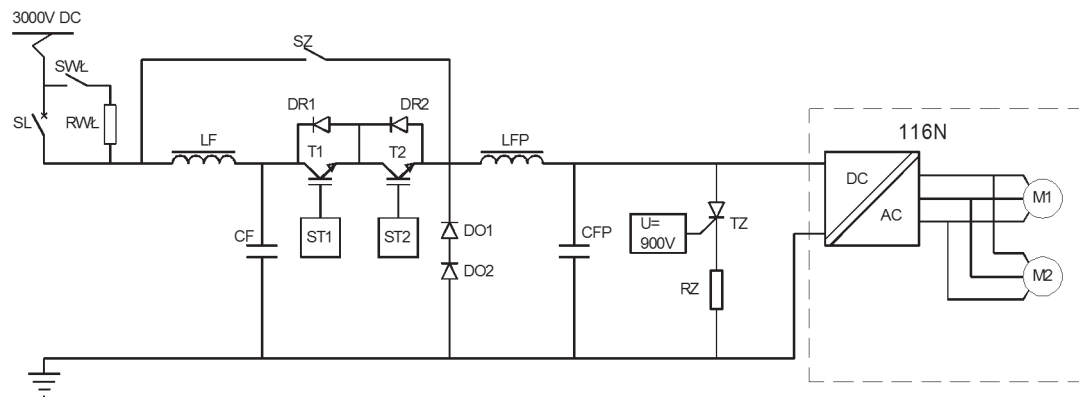
została podana w pracy [21] (rys. 4). W obu przypadkach (rys. 1 i 2 oraz z rys. 4) występuje kwestia bezpieczeństwa porażeniowego pasażerów po przejściu pojazdu na wyższe napięcie trakcyjne zasilania w postaci braku separacji galwanicznej pomiędzy obwodami na różne napięcia.

Głębokość regulacji (obniżenia napięcia) w jednostopniowym przekształtniku (czoperze) wymaga zastosowania elementów energoelektronicznych na napięciu 3kV i dodatkowo pośredniego filtra oraz zabezpieczenia nadnapięciowego, chroniącego tramwajowy układ napędowy przed zbyt wysokim napięciem. Rozwiąza-

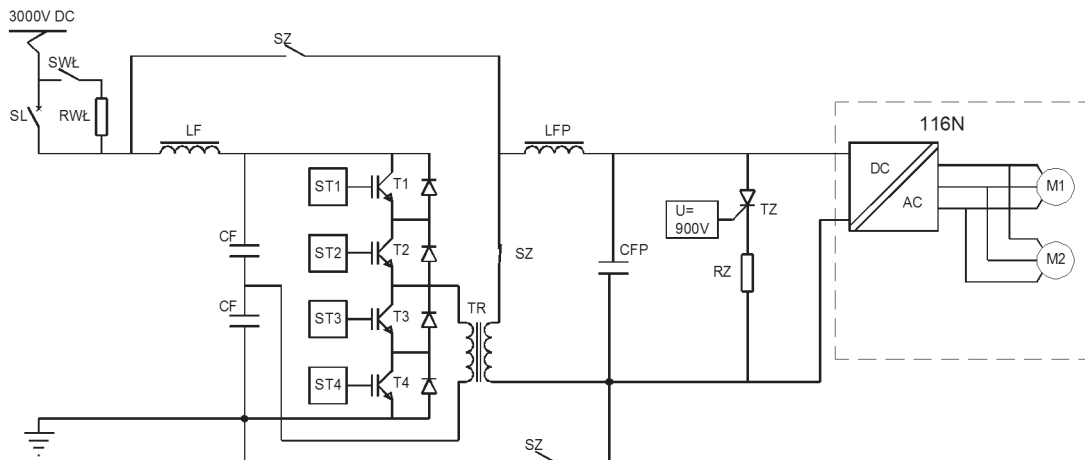
nia z elementami energoelektronicznymi nie zapewnią całkowitego bezpieczeństwa po ewentualnym przeniesieniu wysokiego napięcia sieci kolejowej na układy napędowe przystosowane do niższego napięcia. Po awaryjnym przeskoce wysokiego napięcia na układ napędowy (jego elektronikę), zgodnie z doświadczeniem eksploatacyjnym, zniszczeniu ulega cała część niskonapięciowa unieruchamiając taki pojazd. Zastosowanie separacji galwanicznej pomiędzy układy na 3 kV i 600 V DC, pokazanej na rysunku 3, powoduje znaczne zwiększenie masy, zależnie od przyjętej częstotliwości pracy i postawionych do realizacji wymagań ru-



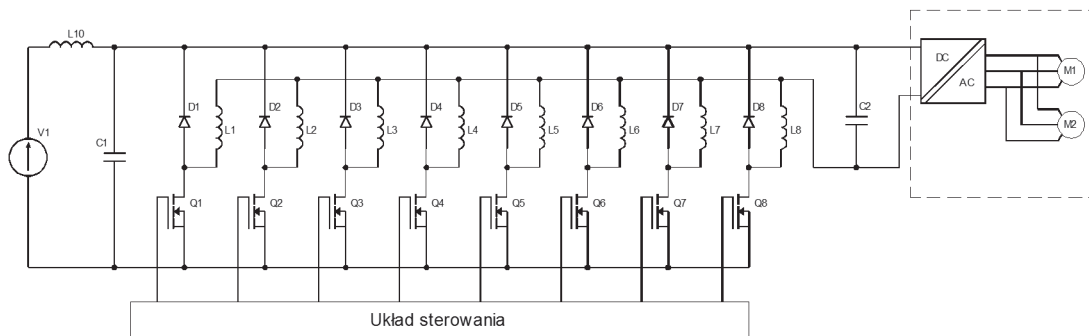
Rys. 1. Idea układu zasilania na pokładzie tramwaju dwusystemowego z użyciem przekształtnika tyrystorowego GTO, obniżającego napięcie z 3 kV do napięcia tramwajowego 600 V [13]



Rys. 2. Idea układu zasilania na pokładzie tramwaju dwusystemowego z użyciem przekształtnika tranzystorowego IGBT, obniżającego napięcie z 3 kV do napięcia tramwajowego 600 V [13]



Rys. 3. Idea układu zasilania na pokładzie tramwaju dwusystemowego z użyciem przekształtnika tranzystorowego IGBT i transformatora obniżającego napięcie z 3 kV do napięcia tramwajowego 600 V [13]

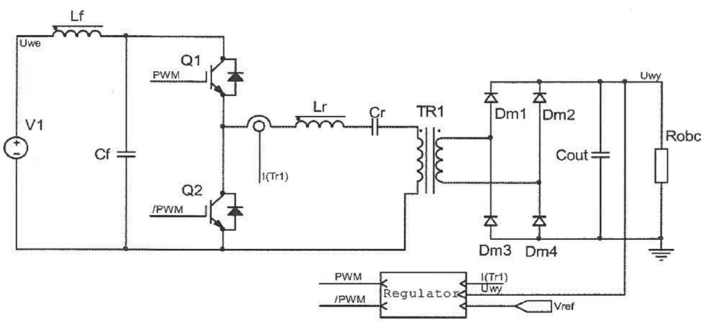


Rys. 4. Schemat laboratoryjnego układu 8-fazowego przekształtnika, obniżającego napięcie z 30 do 6 V [21]

chowych. O ile w przypadku jednostopniowego przekształtnika można wykorzystać zarówno tyrystory GTO, jak i tranzystory IGBT, to – ze względu na częstość przełączeń – przy stosowaniu transformatora separującego należy zastosować tranzystory IGBT. Pod koniec XX wieku dostępne były tranzystory na napięcie 3,3 kV, stąd na rysunkach 1–3 przewidywano po dwa elementy łączone w szereg. Obecnie realizacja tych układów byłaby możliwa na pojedynczych elementach półprzewodnikowych na napięcie 6,5 kV.

Koncepcja opisana w pracy [21] polegała na zastosowaniu przekształtnika wielofazowego (rys. 4), gdzie – dzięki odpowiedniemu sterowaniu poszczególnymi tranzystorami Q1–Q8 w poszczególnych gałęziach – można pięciokrotnie obniżyć napięcie V1. Pierwsze zaprezentowane próby laboratoryjne z elementami niskonapięciowymi skłaniały autorów do stwierdzenia, że układ taki pozwoli na spełnienie założeń oraz wymagań stawianych przez system zasilania oraz sterowania ruchem kolejowym.

Pomimo zakończenia pierwszego etapu prac nad wprowadzeniem tramwaju na tory kolejowe w Krakowie prowadzono nadal prace nad przedstawioną propozycją [21]. Związane to było z koncepcją Szybkiej Kolei Aglomeracyjnej w Krakowskiej Aglomeracji [36]. Wyniki zostały zaprezentowane w pracy [22]. Ograniczono liczbę faz do 5 i zwiększono napięcie wejściowe do 300 V, a obciążenie stanowił silnik prądu stałego o mocy 3,5 kW na napięcie 48 V, stosowany do napędu w autonomicznych pojazdach elektrycznych. Dalsze prace prowadzone w tym zakresie pokazują trudności z uzyskaniem tak głębokiej regulacji napięcia przy wymaganych mocach zainstalowanych na pojazdach szynowych oraz przy przeznaczonej dla układu napędowego mocno ograniczonej przestrzeni pojazdu. Dostępne elementy energoelektroniczne na napięcie kolejowe przy twardym przełączaniu (pod prądem), ze względu na powstające w nich straty, mogą pracować z częstotliwością poniżej 0,5 kHz. Ze względów ekonomicznych (kosztów elementów półprzewodnikowych i aparatury) oraz objętościowych doprowadzono układ zaprezentowany na rysunku 4 do dwufazowego przekształtnika. W takim przypadku konieczne staje się zmniejszenie tętnienia prądu w celu spełnienia wymagań kompatybilności elektromagnetycznej w zakresie emisji zaburzeń przewodzonych, wprowadzanych przez układ napędowy tramwaju, współpracujący z przekształtnikiem obniżającym napięcie sieci kolejowej. Uzyskuje się to, modyfikując układ przekształtnika przez wprowadzenie sprzężenia magnetycznego między istniejącymi dławikami, np. nawijając je na wspólny rdzeń magnetyczny [26]. Rozwiązanie to zmniejsza również rozmiary niezbędnego filtra wejściowego na pojeździe. Nie zmienia to fak-



Rys. 5. Idea układu przekształtnika rezonansowego z transformatorem dopasującym i separującym obwody wejścia 3kV i wyjścia 600V (wysoko- i niskonapięciowe) [26]

tu, że od niezawodności sterowania w tych konstrukcjach zależy bezpieczeństwo części tramwajowej obwodu napędowego. Dotychczasowe przepisy bezpieczeństwa porażeniowego wymagają separacji galwanicznej, a tę zapewnia układ z transformatorem (rys. 3). W pracy [26] proponowany jest sterowany układ mostkowy pomiędzy zasilaniem 3 kV a przed transformatorem TR. W wariantcie z [13] obciążeniem transformatora był filtr obwodu 600 V, zaś w pracy [26] autorzy proponują, zależnie od wariantu, układ bez rekuperacji lub z rekuperacją energii podczas hamowania – odpowiednio mostek diodowy (niesterowany) lub sterowany. Analiza energetyczna oraz objętościowa i wagowa układu energoelektroniki, dopasowującego napięcie kolejowe do napędu „klasycznego” tramwaju, prowadzi do propozycji układu z rezonansowym (miękkim) przełączaniem tranzystorów w odpowiednio dobranym półmostku sterowanym (rys. 5).

Układ ten uzupełniony o pojemnościowy dzielnik na tranzystorach Q1 i Q2 został obszernie opisany w pracy [2]. Konstrukcyjnie układ jest zbliżony do tego pokazanego na rysunku 3. Obydwa rozwiązania umożliwiają separację galwaniczną wysokiego napięcia 3 kV od układu napędowego na napięcie 600V. W porównaniu z rozwiązaniem pokazanym na rysunku 3, dzięki miękkim przełączaniom tranzystorów IGBT ogranicza się straty komutacji w elementach energoelektronicznych, co pozwala na zwiększenie częstotliwości kluczowania do 2 kHz, dzięki czemu można znacznie zmniejszyć gabaryty transformatora, dobierając odpowiedni materiał na jego rdzeń oraz licę na uzwojenie. Ta ciekawa propozycja wymaga jeszcze, zdaniem autorów, wielu badań, ale ma na razie swoistą wadę – jest nią brak możliwości zwrotu energii elektrycznej podczas hamowania.

Zgodnie z przewidywaniami zawartymi w pracy [9] w latach 2010–2011 ukazały się publikacje [29, 30], w których proponuje się – między innymi – czterofazowy układ pokazany na rysunku 6 (zwiększający napięcie 600 V do 2,4 kV, czyli najniższego do-

puszczalnego trwałego napięcia w systemie kolejowym 3 kV). Wynika z tego, że silnik napędowy w takiej wersji tramwaju dwusystemowego byłby na wyższe napięcie niż w klasycznym pojeździe. Na rynku producentów silników nie ma jeszcze konstrukcji o mocy jednostkowej ok. 150–200 kW na fazy napięcia zasilania rzędu 2 kV AC, jak również autorowi nie są znane konstrukcje maszyn prądu stałego o podobnych parametrach mocy na napięcie 3 kV. Szacując zdolności komutacyjne maszyny prądu stałego na napięcie 3 kV, korzystniej będzie konstruować maszynę o większej średnicy i krótkim pakiecie żelaza. Relatywnie silnik indukcyjny tej samej mocy będzie lżejszy i o mniejszej objętości. Dodatkowo układ napędowy z asynchronicznym przetwornikiem elektromechanicznym charakteryzuje się prostszym rozwiązaniem, niezbędnym dla prawidłowej rekuperacji energii w całym zakresie prędkości jazdy pojazdu, co pozostaje nie bez znaczenia zwłaszcza w ruchu miejskim (i w pewnym stopniu – w podmiejskim). Określoną wadą tego rozwiązania jest fakt, że ze względu na relatywnie małą moc silnik do tego pojazdu będzie charakteryzował się większą proporcją objętości izolacji niż podobnej mocy silniki niskonapięciowe. Nawet przy nowoczesnej izolacji klasy F lub H oznaczać to będzie większe straty silnika pomimo obniżonego napięcia obwodu pośredniego, które to straty wystąpią w objętości silnika, a zwłaszcza w jego izolacji przy małych prędkościach pojazdu. To ograniczenie wymagające dopasowania chłodzenia elementów napędu jest istotne ze względu na fakt, że to na sieci tramwajowej w ruchu miejskim nowoczesne pojazdy poruszają się po ciągach dla pieszych z bardzo ograniczoną prędkością.

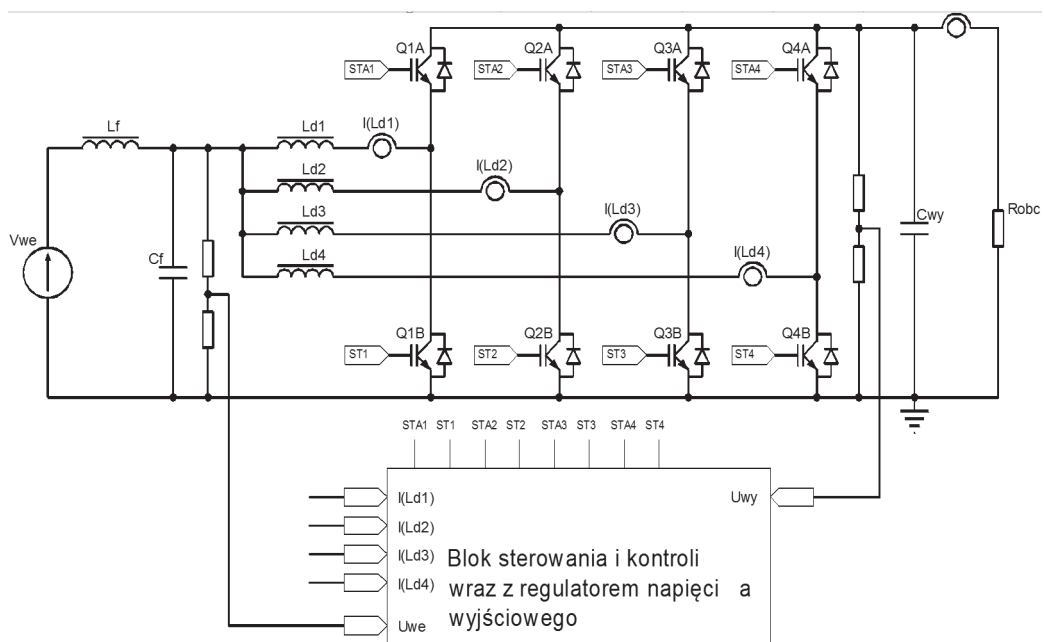
### Propozycja zmiany podejścia do zasilania tramwaju dwusystemowego w warunkach polskich

Wprowadzenie pojazdu szynowego dwusystemowego oznacza konieczność przejścia z toru tramwajowego na kolejowy i odwrotnie. Łącznie z torami przenikać się musi infrastruktura przytorowa, która w obecnej formie funkcjonuje (pracuje) w każdym z tych systemów niezależnie i jest różna. Fizycznie oznacza to zestaw zwoznic i rozjazdów wraz ze znakami sygnalizacyjnymi, zwanych

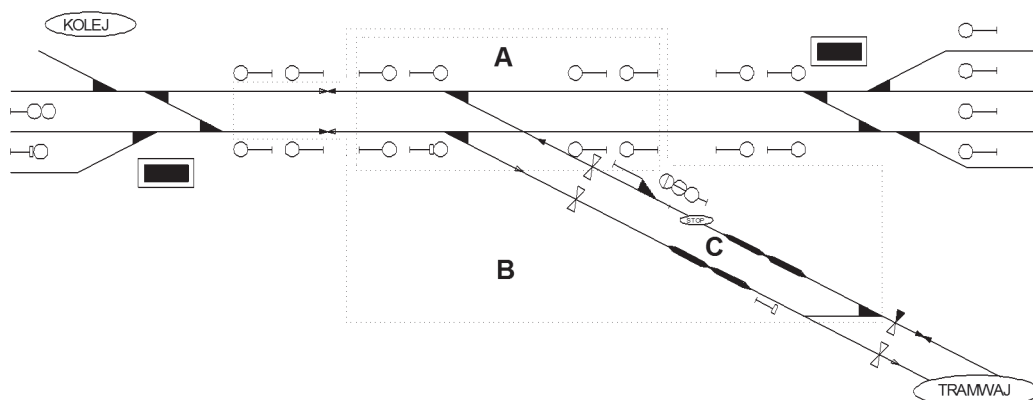
w kolejowym nazewnictwie posterunkiem rozgałęźnym. Rozmieszczenie takich posterunków jest zależne od względnej bliskości przebiegu linii tramwajowej i bocznic lub szlaku kolejowego oraz zdolności przelotowych tych linii, umożliwiającą przejazd założonej liczby pojazdów kolejowo-tramwajowych. Aby uzyskać sprawny wjazd pojazdów dwusystemowych z jednych torów na drugie [por. 14], należy posterunek rozgałęźny rozbudować do postaci stacji interoperacyjnej dla tramwaju dwusystemowego, czyli obszaru połączenia infrastruktury kolei i tramwajów. Na rysunku 7 pokazano zasady budowy połączeń infrastruktury kolejowej i tramwajowej na szlaku (z uwzględnieniem stacji interoperacyjnej). Przypadek ten przewiduje dwa różne napięcia w obu częściach: kolejowej i tramwajowej. W pracy [14] przewiduje się odcinek podwójnego toru, na którym będą łączone lub rozłączane pojazdy dwusystemowe. Z punktu widzenia pasażera rozwiązanie to oznacza dodatkowy czas oczekiwania na następny tramwaj dwusystemowy – być może innej linii – i czas niezbędny na proces łączenia (zwiększania długości składu w celu uzyskania zezwolenia na wjazd na tory kolejowe), a także ewentualny czas dopuszczenia do jazdy po torach kolejowych. Przy wyjeździe z torów kolejowych zaferowany zostaje pasażerowi czas postoju na rozpięcie składów. Jak w takiej sytuacji umożliwić przejście pasażerów z pojazdów różnych linii? Poza tą wątpliwością przedstawione zostały zasady zachowania bezpieczeństwa sterowania ruchem wynikające z działania urządzeń sterowania ruchem kolejowym (srk) na danym szlaku. Podane w pracy [14] propozycje zasad postępowania przy wjeździe i wyjeździe ze szlaku kolejowego można przyjąć za podstawę.

W większości polskich miast wprowadzenie tramwaju na tory kolejowe może polegać na wprowadzeniu ich na:

- lokalne tory niezelektryfikowane typu bocznic, rzadko używane linie kolejowe albo wręcz nieczynne linie kolejowe;
- lokalne tory kolejowe zelektryfikowane o rzadkim ruchu pojazdów kolejowych pasażerskich lub towarowych albo tylko towarowych,
- zelektryfikowane torowisko kolejowe o istniejącym ruchu kolejowym.



Rys. 6. Schemat blokowy prototypowego przekształtnika podwyższającego napięcie wejściowe [30]



Rys. 7. Zasady budowy połączeń infrastruktury kolejowej i tramwajowej na szlaku [14]:

A – posterunek odgałęźny na szlaku kolejowym, B – stacja interoperacyjna z odcinkiem torów C jako stanowiskiem do łączenia i rozłączenia pojazdów dwusystemowych

W zasadzie, niezależnie od wymienionych trzech przypadków, każdorazowo wprowadzenie tramwaju na tory kolejowe wymaga rozpatrzenia wszystkich podanych w [5, 17] problemów technicznych i rozwiązania ich poprzez:

- zastosowanie profilu obręczy kół, umożliwiającego rozsądne pokonywanie rozjazdów obu systemów (najczęściej opracowuje się profil pośredni) [patrz 23, 24],
- wdrażanie odmiennych systemów sygnalizacji i oznaczeń (konieczność wyposażenia pojazdu w dwa zestawy części urządzeń),
- zapewnienie takiej wytrzymałości przy zderzeniu, jaka charakteryzuje pojazdy kolejowe,
- wyposażenie pojazdu w rozkładane stopnie (ze względu na różnice w wysokości peronów),
- zastosowanie systemu napędu (różne napięcie elektryczne sieci trakcyjnej) – zastosowanie przetwornic i przetwornika obwodów lub używanie na linii kolejowej traktacji spalinowej z silnikami diesla; w przypadku rozwiązania z dwoma systemami elektrycznymi zmiana odcinka następuje na rampie z bezprądowym odcinkiem sieci trakcyjnej.

Ten ostatni punkt jest przedmiotem następujących rozważań.

### Przypadek 1

Wprowadzenie pojazdu tramwajowego na niezelektryfikowane torowisko kolejowe wymaga pojazdu z autonomicznym źródłem zasilania, np. spalinowego silnika, który pozwoli na przejazd po torach. Przejście na napęd diesla może następować na łącznicy między torowiskiem tramwajowym i kolejowym, odmianą stacji interoperacyjnej [14] bez zasilania trakcyjną energią elektryczną. Podobnie jest ze zjazdem z torów kolejowych na szyny tramwajowe. Rozwój techniki zasobników energii elektrycznej sprzyja przejazdowi pojazdów elektrycznych typu tramwaj na odległościach nawet do kilku kilometrów. Wskazują na to obserwacje pracy pierwszego hybrydowego tramwaju eksploatowanego w Warszawie [8, 11, 12]. Ograniczony zasięg pojazdu z zasobnikiem na niezelektryfikowanym odcinku torowiska kolejowego można zwiększyć, wprowadzając odcinki zelektryfikowane napięciem tramwajowym. We wspomnianym doświadczalnym przypadku przewidywano, że tramwaj po przejechaniu odcinka ok. 6 km bez sieci górnej – zasilania zewnętrznego – powraca na zelektryfikowane torowisko, gdzie podczas dalszej jazdy uzupełnia energię w zasobniku (np. tylko podczas własnego hamowania lub gdy na-

pięcie w sieci jest powyżej określonego poziomu). W ten sposób prowadzono później przez okres ponad pół roku eksploatacyjne doświadczenia z pozytywnym wynikiem spełniania założeń konstrukcyjnych ze stosownym naddatkiem zapewniającym trwałość eksploatacyjną zasobnika. W każdorazowym przypadku niezelektryfikowanych torów kolejowych i tramwajów z zasobnikiem należy rozpatrzyć, jaki odcinek najkorzystniej byłoby zelektryfikować tramwajowym napięciem trakcyjnym. W skrajnym przypadku, jeżeli na tramwaju nie byłby zabudowany zasobnik, to cały odcinek torów kolejowych należy zelektryfikować napięciem tramwajowym. Wymaga to prac związanych z zaprojektowaniem oraz uzyskaniem pozwoleń na wybudowanie podstacji z układem słupów trakcyjnych – konstrukcji wsporczych o skrajni kolejowej i kabli zasilania oraz powrotu (tak, aby zapewnić prawidłowe warunki zasilania pojazdu tramwajowego, nie naruszając przy tym systemu sterowania ruchem pojazdów kolejowych). W projekcie, zależnie od długości i konfiguracji elektryfikowanego odcinka torów kolejowych, należy rozpatrzyć możliwość zastosowania małych kontenerowych podstacji tramwajowych, zamiast jednej o wielu polach zasilających, oraz korzyści z tego wynikających [10, 27]. Przy elektryfikowaniu odcinka torów należy zwrócić uwagę na fakt, że torowisko kolejowe dla pojazdów niezelektryfikowanych najprawdopodobniej będzie miało konstrukcję stykową, mocowaną w łubki bez łączników wzdłużnych, zapewniających trwałe metaliczne połączenie łączonych szyn. Szyny skręcane łubkami w czasie eksploatacji podlegają korozji powierzchniowej, zależnej od warunków atmosferycznych, i przez to nie zapewniają odpowiednio dobrego styku elektrycznego. W związku z tym często nie spełniają wymagania spadku napięcia od przepływającego prądu trakcyjnego. Po sprowadzeniu torowiska do stanu (wymaganego) zalecanego dla transportu zelektryfikowanego, czyli wprowadzenia łączników szynowych wzdłużnych i ewentualnie poprzecznych międzytorowych, należy taki odcinek torów wyseparować złączkami izolującymi. Wymóg ten jest zgodny z normą [31] i zapewnia ograniczenie konduktancyjnego oddziaływania sieci powrotnej (prądy błądzące z części niezelektryfikowanej).

Ponadto należy także skorelować wprowadzenie pojazdu tramwajowego z istniejącym na tym odcinku ruchem kolejowym oraz zabezpieczyć „blokade” wjazdu pojazdu kolejowego na odcinek zajęty przez tramwaj, a także nie dopuścić do wjazdu tramwaju na odcinek zajęty przez pojazd kolejowy. Zagadnienia te będą omawiane w pozostałych przypadkach.

## Przypadek 2

W przypadku drugim, gdy tory kolejowe są już zelektryfikowane napięciem 3 kV, można stosować tabor dwunapięciowy, którego idea i możliwe warianty zostały opisane powyżej. Istnieje jednak propozycja, aby tabor poruszający się po tych torach był tylko na jedno napięcie tramwajowe. W związku z tym na podstacjach trakcyjnych, zasilających przyszły wspólny odcinek torów, należałoby zainstalować dodatkowy zespół prostowniczy na napięcie tramwajowe i na podstacji automatycznie dokonywać przetęczeń napięcia zasilania sieci zależnie od tego, jaki pojazd ma wjechać na wydzielony odcinek. W ogólnym przypadku, ze względu na jednakowe dopuszczalne procentowe spadki napięć w sieci zasilającej w obu systemach – kolejowym 3 kV i tramwajowym 600 V – przy zbliżonych wartościach prądów trakcyjnych, pobieranych przez pojazdy dopuszczalne, długości odcinków zasilania sieci trakcyjnej górnej znacząco się różnią, pomimo mniejszych rezystancji trakcyjnej sieci kolejowej, wynikających z większych przekrojów drutu sieci górnej i najczęściej cięższych szyn. W każdym rozpatrywanym przypadku należy obliczeniowo sprawdzić, czy zasilanie sieci 600 V zapewni minimalne napięcie na pantografie takiego dwusystemowego tramwaju, wymagane przez normę [32] przy pełnym obciążeniu prądowym, wynikającym z potrzeb własnych i trakcyjnych pojazdu, a tym samym umożliwi pracę układu napędowego i realizację zakładanego rozkładu jazdy.

W zdecydowanej większości przypadków kolejowe odcinki zasilania są dłuższe niż tramwajowe i dlatego na odcinku kolejowym podawanie napięcia niższego wymaga większej liczby odcinków zasilania. Z tej przyczyny na istniejących słupach trakcyjnych należy wydzielić izolatorami sekcyjnymi odcinki, które będą zasilane napięciem tramwajowym, a przy napięciu kolejowym te izolatory muszą być zwarte. Na rysunku 8 pokazano ideę takiego układu. Widoczne są podstacje trakcyjne kolejowe PTKo1 i tramwajowe PTTra, przy czym odpowiednio sprzęgnięty układ łączników zapewnia potrzebną dla danego pojazdu konfigurację zasilania. Na rys. 8 widoczny jest odcinek wspólnych torów, krótszy od odcinka zasilania kolejowego. W tym przypadku napięcie zasilania kolejowego nie musi być odtęczone w podstacji od sieci górnej. Rozłączniki na sieci górnej na styku dwóch systemów oraz

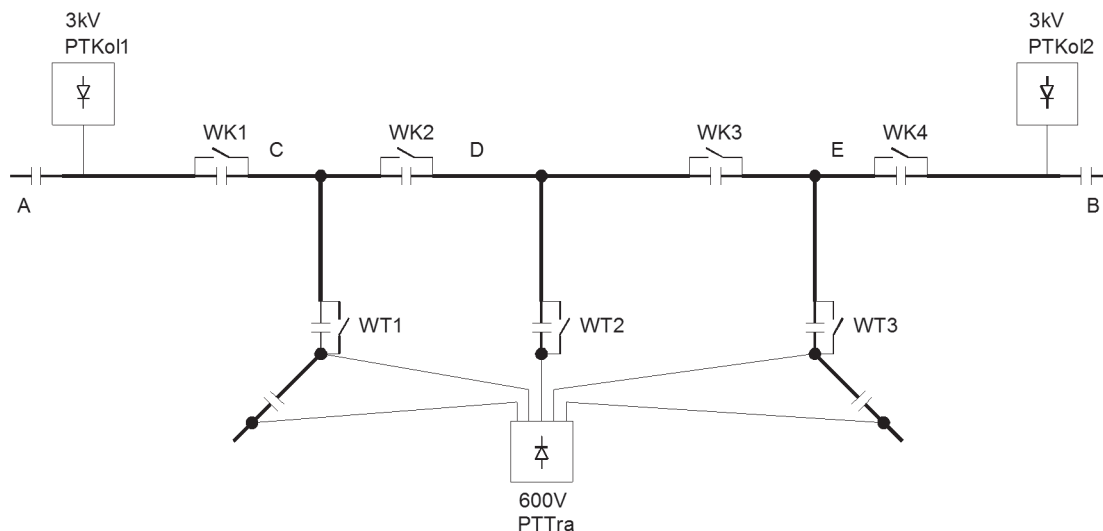
izolatory sekcyjne zapewnią ciągłość zasilania odcinka. Niewątpliwie należy rozstrzygnąć zagadnienie, czy wprowadzenie na sieć górną izolatorów sekcyjnych zwartych łącznikami WK na czas przejazdu składu kolejowego, ze względu na zmianę elastyczności tej sieci, nie ograniczy prędkości przejazdu składów zasilanych z tej sieci. W przypadku wystąpienia ograniczeń należy je uwzględnić w analizach przejazdu wspólnych tramwajowo-kolejowych odcinków. Dodatkowo zawieszenie sieci trakcyjnej kolejowej na wspólnym odcinku może wymagać nieznacznej korekty wysokości zawieszenia w celu dopasowania do maksymalnej wysokości dla sieci tramwajowej [5].

Zasada przetęczania napięcia zasilania musi być bezwzględnie skorelowana ze sterowaniem ruchu kolejowego na stacji interoperacyjnej (posterunku rozgałęzonym) i szlaku kolejowym. Stacje interoperacyjne na przykładzie z rysunku 8 znajdują się w punktach C oraz E. Zezwolenie na wjazd na dany odcinek określonego typu pojazdu tramwajowego lub kolejowego musi być związane z podaniem na sieć górną tego odcinka prawidłowego napięcia zasilania. Zjazdowi pojazdu z odcinka zasilania powinna towarzyszyć informacja o rodzaju następnego pojazdu i zależnie od tego napięcie pozostaje lub musi być przetęczone. Na przykładzie z rysunku 8 oznacza to odpowiednie zwieranie i rozwieranie łączników w grupach (warstwach WK i WT). Otwarte łączniki WT1–WT3 pozwalają zabezpieczyć podstację trakcyjną tramwajową przed podaniem napięcia kolejowego na rozdzielnicę prądu stałego tej podstacji.

Zmiana napięcia zasilania sieci trakcyjnej na wspólnym odcinku tramwajowo-kolejowym powinna być informacją o dopasowaniu czasów blokad samoczynnych lub półsamoczynnych, odpowiednio do dróg hamowania pojazdów [14]. Droga hamowania pojazdu tramwajowego jest znacznie krótsza od kolejowego.

Przetęczeniu wyższego napięcia na niższe na danym odcinku powinno towarzyszyć opóźnienie czasowe lub stosowny układ rozładowczy w celu odprowadzenia nagromadzonego ładunku elektrycznego w sieci pracującej wcześniej pod wyższym napięciem.

W stacji interoperacyjnej z rysunku 7 odcinek torów oznaczony literą C powinien stanowić bufor, w którym pojazd tramwajowy



Rys. 8. Idea zamiennego zasilania wspólnego odcinka kolejowo-tramwajowego C–E; dwustronne zasilania kolejowego odcinka szlakowego A–B napięciem 3 kV; odcinek C–D–E zasilany napięciem trakcyjnym tramwajowym z klasycznej podstacji tramwajowej o pięciu polach zasilania w rozdzielni prądu stałego (daw. zasilaczy)

wjeżdża bez napięcia sieci górnej i – po uzyskaniu zezwolenia na dalszą jazdę po torach kolejowych – zostaje załączone napięcie. Natomiast przy zjeździe z torów kolejowych, po przekroczeniu odcinka C, na stacji interoperacyjnej następuje ewentualne przełączenie napięcia (zależnie od warunków następstwa jazdy). Względny bezpieczeństwa przyczynią się do zasilania poszczególnych torów odcinka C na stacji interoperacyjnej z pojedynczych pól rozdzielni prądu stałego tramwajowej podstacji trakcyjnej.

Kable sieci powrotnej podstacji tramwajowej powinny być podłączone do szyn kolejowych z uwzględnieniem wymagań sterowania ruchem kolejowym. Przy liniach dwutorowych należy przy tym rozstrzygnąć możliwości wykonania połączeń poprzecznych międzytorowych w miejscach punktów powrotnych (przyłączenia kabli powrotnych – zasilania tramwajowego).

### Przypadek 3

Wprowadzenie tramwaju na zelektryfikowany szlak kolejowy o relatywnie dużym (gęstym) ruchu kolejowym wymaga, podobnie jak w przypadku drugim, dokładnej analizy możliwości i celowości wprowadzenia na szlak nowego (innego) taboru. Zasady ruchu i szybkość przejazdu składu tramwajowego, nawet dwusystemowego, są inne niż w przypadku składu kolejowego. Rozrzut wynikający z przejazdu tramwaju po wspólnym pasie drogowo-szynowym na ulicach miast jest znacznie bardziej prawdopodobny, chociaż może nie jest on większy niż po szlaku kolejowym czy wydzielonym torowisku tramwajowym. Oznaczać to będzie konieczność wyboru pierwszeństwa przejazdu wspólnego odcinka z zachowaniem reguł bezpieczeństwa na szlaku kolejowym. Trzeba do tego jednoznacznie określić zasady, np. że pierwszeństwo przejazdu ma pojazd kolejowy, a opóźniony tramwaj musi poczekać w strefie zmiany – stacji interoperacyjnej (rampy itd.) Należy także rozstrzygnąć, czy i kiedy – w przypadku opóźnień nadejścia składu kolejowego – można wpuścić na szlak tramwaj. Przy dużym ruchu pojazdów szynowych po wspólnym odcinku kolejowo-tramwajowym będzie wymagana zwiększona dyscyplina czasu przejazdu poszczególnych składów, aby zapewnić bezkolizyjny płynny ruch. Punktualność jazdy pociągów dalekobieżnych może wykluczyć poruszanie się tramwaju dwusystemowego po wspólnych torach z koleją. Według [14] nawet wydzielenie ruchu podmiejskiego i dalekobieżnego, jak ma to miejsce w Warszawie, może nie dać możliwości wspólnego korzystania z torów przez pociągi podmiejskie i tramwaje dwusystemowe.

### Podsumowanie

Zaproponowany w artykule pojazd tramwajowy, który będzie mógł poruszać się po istniejących torach kolejowych i tramwajowych, będzie dwusystemowy ze względów mechanicznych (odpowiednio dobrane obręcze kół [23, 24]) oraz będzie musiał mieć dopasowane wyjścia dla pasażerów na perony kolejowe. W przypadku dopasowywania układu elektrycznego pojazdu do dwóch napięć zasilania większość kosztów wprowadzenia takiego rozwiązania do eksploatacji przypada na nowy tabor [5, 14]. W proponowanym przypadku sporych nakładów finansowych wymagać będzie infrastruktura zasilania oraz sprzęgnięcie systemów sterowania ruchem ze sterowaniem obszarów zasilania. Do pokonania pozostają także bariery wynikające ze struktur firm transportu szynowego i braku tradycji (a zatem przepisów) przelączania napięcia zasilania zgłasza w trakcji (może poza przypadkiem zanikającego już w praktyce technicznej układu gwiazda-trójkąt przy rozruchu

silników asynchronicznych, zasilanych bezpośrednio z sieci przemysłowej).



### Literatura

- [1] Czauderna T.: *Próbné jazdy wagonu tramwajowego 105NT po torach kolejowych*. Technika Transportu Szynowego 7-8/1998.
- [2] Czuchra W. i in.: *Przekształtnik rezonansowy z transformatorem toroidalnym dla pojazdu tramwajowo-kolejowego*. Pojazdy Szynowe 3/2011.
- [3] Czyczuta W.: *Koncepcja zintegrowanego systemu transportu szynowego dla Krakowa*. Technika Transportu Szynowego 9/1999.
- [4] Czyczuta W.: *Koncepcja zintegrowanego systemu transportu zbiorowego dla Krakowa – dłaczego tramwaj dwusystemowy*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2000.
- [5] Czyczuta W.: *Podstawowe problemy kolejowo-tramwajowych systemów transportowych*. Problemy Kolejnictwa 2001, z. 133.
- [6] Czyczuta W., Tutecki A.: *Budowa i badania eksploatacyjne pojazdu kolejowo-tramwajowego TRAMKOL-02*. Technika Transportu Szynowego 6/2000.
- [7] Dąbrowski J.: *Dwusystemowe tramwaje – czyli tramwaj na torach kolejowych*. Technika Transportu Szynowego 7-8/1998.
- [8] Dąbrowski J. i in.: *Die Erste hybrid Strassenbahn In Warschau* [prezentacja z 37 Moderne Schienenfahrzeuge Tagung]: <http://www.schienenfahrzeuge.tagung.at> (dostęp z 15.12.2013 r.).
- [9] Dąbrowski J.: *Rozważania nad koncepcją napędu tramwaju dwusystemowego w warunkach polskich*. Technika Transportu Szynowego 9/1999.
- [10] Drażek Z., Mierzejewski L., Szelaż A.: *Zasilanie dwustronne w trakcji miejskiej*. Technika Transportu Szynowego 2/1996.
- [11] Gąsiewski M.: *Tramwaj z akumulatorowym zasobnikiem energii*. Transport Miejski i Regionalny 5/2007.
- [12] Gąsiewski M.: *Tramwaj z akumulatorowym zasobnikiem energii – wyniki eksploatacji*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2007.
- [13] Giziński Z.: *Układ elektryczny tramwaju zasilanego napięciem 600/3000 V DC*. IX Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEM-TRAK 2000, Zakopane 2000.
- [14] Gołaszewski A.: *Wykorzystanie infrastruktury kolejowej w dużych aglomeracjach miejskich*. Przegląd Komunikacyjny 12/2001.
- [15] <http://infotram.pl/text.php?id=23253#maintext> (dostęp z 17.01.2104 r.).
- [16] [http://instytut\\_ekonomiczny.wordpress.com/category/tramwaj-dwusystemowy/](http://instytut_ekonomiczny.wordpress.com/category/tramwaj-dwusystemowy/) (dostęp z 15.01.2014 r.).
- [17] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Tramwaj\\_dwusystemowy](http://pl.wikipedia.org/wiki/Tramwaj_dwusystemowy) (dostęp z 20.01.2104 r.).
- [18] <http://poselska.pl/category/tramwaj-dwusystemowy/> (dostęp z 7.01.2104 r.).
- [19] <http://sedina.pl/phpBB3/viewtopic.php?f=20&t=10901> (dostęp z 15.01.2104 r.).
- [20] <http://www.kolej.most.org.pl/csk/blt-079.htm> (dostęp z 15.01.2104 r.).
- [21] Kowalczewski M., Mysiński W., Zajac W.: *Propozycja przekształtnika dla tramwaju dwusystemowego*. IX Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2000, Zakopane 2000.
- [22] Kowalczewski M., Mysiński W., Zajac W.: *Przekształtnik obniżający napięcie dla tramwaju dwusystemowego, badania symulacyjne i laboratoryjne*. VII Międzynarodowa Konferencja Nowoczesna Trakcja Elektryczna w Zintegrowanej Europie XXI w (MET 2005), Warszawa 2005.

- [23] Lang R., Nowak R.: *Uwarunkowania dla jazdy tego samego zestawu kołowego po torze kolejowym i tramwajowym*. Pojazdy Szynowe 1/2006.
- [24] Lang R., Nowak R.: *Uwarunkowania dla jazdy tego samego zestawu kołowego po torze kolejowym i tramwajowym (2)*. Pojazdy Szynowe 3/2006.
- [25] Miechowicz W.: *Analiza celowości zintegrowania komunikacji kolejowej i tramwajowej na terenie aglomeracji poznańskiej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej Maszyny Robocze i Transport 53/2001.
- [26] Mysiński W., Skarpetowski G., Zając W.: *Rozwiązania obwodu głównego dla tramwaju dwusystemowego pojazdu trakcyjnego 3000 V dc/600 V dc*. 9-th International Conference Modern Electric Traction (MET 2009), Gdańsk 2009.
- [27] Pedall G.: *Modernisierung der Bahnenenergieversorgung der Strassenbahn Muenchen*. Elektrische Bahnen 7/1997.
- [28] Peszek P.: *Propozycja wykorzystania lekkiego pojazdu szynowego na linii Wejherowo – Gniewino*. Problemy Kolejnictwa 2006, z. 141.
- [29] Płatek T., Mysiński W., Zając W.: *Przekształtnik podwyższający napięcie 600 V/3000 V DC dla dwusystemowych pojazdów trakcyjnych*. XIV Ogólnopolska Konferencja Naukowa zakresu Trakcji Elektrycznej i VI Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEM-TRAK 2010, Zakopane 2010.
- [30] Płatek T., Mysiński W., Zając W.: *Przekształtnik podwyższający napięcie 600 V na 3000 V dla dwusystemowego pojazdu trakcyjnego*. Elektrotechnika 2011, R. 108, z. 1-E.
- [31] PN-92/E-05024 *Ochrona przed korozją. Ograniczenie upływu prądów błędzących z trakcyjnych sieci powrotnych prądu stałego*.
- [32] PN-EN 50163 *Zastosowania kolejowe. Napięcia zasilania systemów trakcyjnych*.
- [33] Poliński J.: *Tramwaj dwusystemowy w transporcie aglomeracji miejskich*. Rynek Kolejowy 7-8/2004.
- [34] Raczyński J.: *Projekty tramwajów dwusystemowych we Francji*. Technika Transportu Szynowego 10/2001.
- [35] Wild P.: *Wrocławska Kolej Metropolitalna – Rozwój infrastruktury Transportu Metropolitalnego*. Przegląd Komunikacyjny 10/2012.
- [36] *Wstępne studium wykonalności Szybkiej Kolei Aglomeracyjnej (SKA) w Aglomeracji Krakowskiej*. Raport końcowy, wersja 3. Kraków 2007: [http://www.malopolskie.pl/Pliki/2008/Raport\\_SKA.pdf](http://www.malopolskie.pl/Pliki/2008/Raport_SKA.pdf) (dostęp z 2.02.2014 r.).
- [37] Zdanowski W.: *Analiza uwarunkowań uruchomienia tramwaju dwusystemowego we Wrocławiu i Aglomeracji Wrocławskiej PROJEKT ME-TRAM* [prezentacja na Forum Inwestycji Tramwajowych]. Warszawa 2012.

Józef Dąbrowski  
Instytut Elektrotechniki, Zakład Trakcji Elektrycznej

➤ Dokończenie ze s. 51

- [11] Szeląg A., Mierzejewski L.: *Modelling and verification of simulation results in computer aided analysis of electric traction systems*. VII International Conference „Computer in Railways” Organized by Wessex Institute of Technology, COMPRAIL’2000, 11–13 IX 2000, Bologna 2000.
- [12] Szeląg A., Mierzejewski L.: *Systemy zasilania linii kolejowych dużych szybkości*. Technika Transportu Szynowego 5-6/2005.
- [13] Szeląg A.: *Energetyczne aspekty modernizacji taboru i zwiększenia prędkości ruchu pociągów elektrycznych*. Technika Transportu Szynowego 11/2009.
- [14] Szeląg A.: *Wpływ napięcia w sieci trakcyjnej 3kV DC na parametry energetyczno-trakcyjne zasilanych pojazdów*. Instytut Naukowo-Wydawniczy „Spatium”, Radom 2013.

mgr inż. Włodzimierz Jefimowski  
doktorant w Zakładzie Trakcji Elektrycznej  
Instytut Maszyn Elektrycznych Politechniki Warszawskiej