

Andrzej Stobiecki, Roman Dudek
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

UKŁADY NAPĘDOWE WIELOSYSTEMOWYCH POJAZDÓW TRAKCYJNYCH

DRIVE SYSTEMS OF MULTI-SYSTEM TRACTION VEHICLES

Streszczenie: Trwające od lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku procesy zjednoczeniowe w Europie spowodowały wzrost zapotrzebowania na międzynarodowy transport kolejowy. We wstępnej części artykułu pokrótce przedstawiono problemy utrudniające kolejowy ruch transgraniczny, do których należą przede wszystkim różnice w prześwicie toru, różne systemy zabezpieczania ruchu pociągów oraz różne systemy zasilania trakcji. Pojazdy trakcyjne przystosowane do poboru energii z kilku różnych systemów zasilania umożliwiają pokonanie ostatniego z wymienionych ograniczeń. W Europie stosowane są cztery główne systemy zasilania trakcji elektrycznej przewodowej: dwa systemy napięcia stałego 1,5 kV i 3 kV oraz dwa napięcia przemiennego – 15 kV 16,7 Hz i 25 kV 50 Hz. Struktura układu napędowego pojazdu wielosystemowego zależy od rodzaju systemów, do współpracy z którymi pojazd jest przystosowany, od rodzaju zastosowanych silników trakcyjnych oraz od rodzaju i parametrów dostępnych elementów energoelektronicznych. W artykule przedstawiono układy napędowe wybranych pojazdów wielosystemowych, zarówno starszej generacji, wyposażonych w jednofazowe silniki komutatorowe, jak i budowanych współcześnie, napędzanych indukcyjnymi silnikami klatkowymi albo silnikami synchronicznymi wzbudzonymi magnesami trwałymi.

Abstract: The unification processes in Europe, begun in the 1950s, increased the demand for international rail transport. The preliminary part of the paper briefly presents the problems hindering rail cross-border traffic, which mainly include differences in the track gauge, different railway signalling systems and various electric traction supply systems. Traction vehicles adapted to energy supply from several different traction systems allow to overcome the last of the mentioned limitations. In Europe, four main power systems for electric traction supply are used: two DC systems 1.5 kV and 3 kV and two AC systems – 15 kV 16.7 Hz and 25 kV 50 Hz. The structure of multi-system vehicle drive system depends on the type of systems for which the vehicle is adapted, on the type of traction motors used and on the type and parameters of available power electronics components. The article presents drive systems for selected multi-system vehicles, both older generation, equipped with single-phase commutator motors, and currently built ones, driven by induction cage motors or PMSM's.

Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, pojazdy wielosystemowe, układy napędowe

Keywords: electric traction, multi-system vehicles, drive systems

1. Wstęp

Integracja krajów Europy, rozpoczęta podpisaniem w 1951 roku traktatu paryskiego, spowodowała wzrost zapotrzebowania na kolejowe przewozy transgraniczne. Poza problemami natury organizacyjno-prawnej [np. 1], międzynarodowy ruch kolejowy utrudniają także problemy natury technicznej.

2. Bariery techniczne utrudniające transgraniczny ruch kolejowy

Bariery te związane są przede wszystkim z występowaniem w różnych krajach:

- różnych szerokości toru,
- różnych systemów sterowania ruchem kolejowym,
- różnych systemów zasilania elektrycznej trakcji przewodowej.

Szerokości toru występujące w kolejnictwie krajów europejskich zestawiono w tabeli 1. Przewozy kolejowe między sieciami o różnych szerokościach toru mogą odbywać się z przeładunkiem towarów na specjalnie przygotowanej stacji, nazywanej „suchym portem”, albo z wymianą wózków lub zestawów kołowych w wagonach (rozwiązanie częściej stosowane w ruchu pasażerskim) [2]. Czasami budowane są linie kolejowe o określonej szerokości toru na terenie, na którym sieć kolejowa ma inny prześwit. Przykładem takiej linii może być Linia Hutnicza Szerokotorowa w Polsce lub linia granica Polski – Kowno [3]. Opracowano także kilka odmian torowych stanowisk przestawczych, umożliwiających pociągowi o specjalnie przygotowanych zestawach kołowych przejazd

na tor o innej szerokości [4-8].

Tab. 1. Szerokości torów stosowane w kolejach magistralnych państw europejskich [4,5]

szerokość toru	kraj
1435 mm	większość kolei, Polska
1520/1524 mm	Białoruś, Estonia, Finlandia, Litwa, Łotwa, Rosja, Ukraina, LHS (Polska)
1600 mm	Irlandia
1668 mm	Hiszpania, Portugalia

Koleje europejskie wykorzystują kilkanaście różnych systemów sterowania ruchem kolejowym. Przykładowo są to systemy: ASFA, ATB, AVV, AWS, BACC, KVB, Ebicab, EVM, Indusi, JZG, KHP, LZB, RSSD, SELCAB, SIGNUM, TBL, TVM i ZUB [9-11]. Ze względów finansowych i ze względu na ograniczoną ilość miejsca bardzo trudne byłoby wyposażenie pojazdu w urządzenia umożliwiające współpracę z każdym z tych systemów. Dodatkowo niektóre czujniki stosowane w różnych systemach zakłócają się wzajemnie [9]. Rozwiązaniem może być szersze wprowadzenie europejskiego systemu sterowania ruchem kolejowym ETCS [11], wdrażanego na nowobudowanych i modernizowanych liniach kolejowych, szczególnie na liniach dużych prędkości i przebiegających w głównych korytarzach transportowych [12].

W Europie stosuje się cztery podstawowe systemy zasilania elektrycznej trakcji przewodowej: dwa napięcia stałego (1,5 kV i 3 kV) oraz dwa napięcia przemiennego (25 kV 50 Hz i 15 kV 16,7 Hz). Zasięg terytorialny poszczególnych systemów pokazano na rysunku 1. Linie dużych prędkości w krajach wykorzystujących systemy DC zasilane są zwykle napięciem 25 kV 50 Hz.

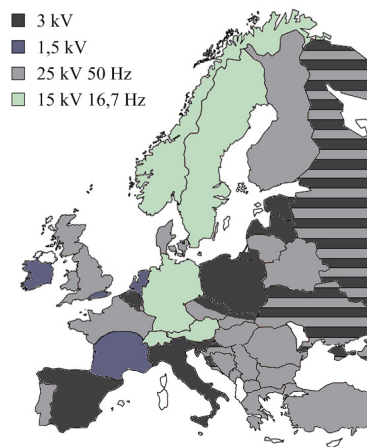
Pokonywanie punktów styku systemów może się odbywać z wykorzystaniem:

- pojazdów autonomicznych (głównie spalinowych),
- pojazdów jednosystemowych i dworców dwusystemowych [13],
- pojazdów wielosystemowych.

Dworzec dwusystemowy ma znacznie bardziej skomplikowany układ elektryczny, niż jednosystemowy, a przejazd przez niego pociągiem prowadzonym lokomotywami jednosystemowymi wymaga czasu 7 – 10 minut [13]. Przekroczenie punktu styku systemów przez pojazd wielosystemowy nie wiąże się z dodatkowym

nakładem czasu, zaś taki punkt może być zlokalizowany poza dworcem.

Pojazdy wielosystemowe wykonuje się jako dwu-, trzy- lub czterosystemowe. Lokomotywa wielosystemowa jest droższa i bardziej skomplikowana niż jednosystemowa, więc zwykle pojazd jest wyposażony tylko w aparaturę konieczną do pracy w minimalnej niezbędnej ilości systemów.



Rys. 1. Systemy zasilania trakcji elektrycznej przewodowej w Europie [14-16]

Do rozwoju pojazdów wielosystemowych znacznie przyczyniło się uruchomienie w zachodniej Europie w 1957 roku sieci szybkich i komfortowych połączeń międzynarodowych Trans-Europ-Express (TEE). Początkowo realizowano je trakcją spalinową, ale w miarę elektryfikacji linii kolejowych i wprowadzania do eksploatacji pojazdów elektrycznych wielosystemowych przejmowały one obsługę tych połączeń, szczególnie w trudnym terenie (na przykład połączeń transalpejskich) [17].

Układom napędowym kolejowych pojazdów wielosystemowych poświęcone jest to opracowanie.

3. Układy napędowe z silnikami komutatorowymi

Tradycyjnymi silnikami trakcyjnymi są silniki szeregowe: prądu stałego (przy zasilaniu pojazdu z sieci napięcia stałego) oraz jednofazowe komutatorowe prądu przemiennego (przy zasilaniu z sieci napięcia przemiennego). Przy zasilaniu z prostownika albo przerywacza stałoprądowego wykorzystywane są silniki prądu tętniącego, nieznacznie różniące się konstrukcyjnie od silników prądu stałego i pracujące w znacznie lepszych warunkach, niż silniki prądu przemiennego. Dla danej mocy największe wymiary i masę ma silnik komutatorowy

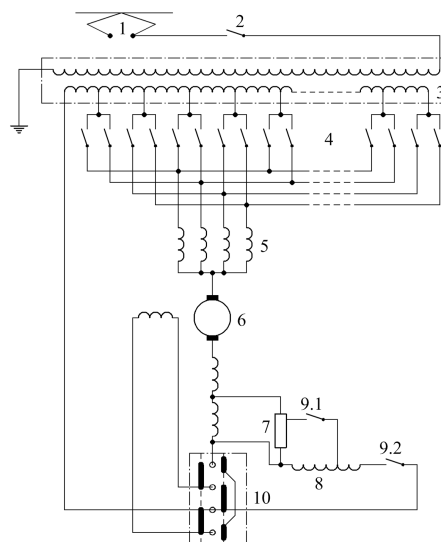
prądu przemiennego, zaś najmniejsze – silnik prądu stałego [18].

Wczesne pojazdy wielosystemowe były dwusystemowe. W 1957 roku koleje belgijskie i holenderskie wprowadziły do eksploatacji „dwunapięciowe” wagony silnikowe przeznaczone do pracy w obu systemach napięcia stałego (3 kV w Belgii i 1,5 kV w Holandii). Napęd pojazdów stanowiły cztery silniki prądu stałego na napięcie 1,5 kV, tworzące dwie grupy. W każdej grupie było możliwe połączenie silników szeregowo lub równoległe. Podczas pracy przy wyższym napięciu grupy łączono szeregowo, a podczas pracy w systemie holenderskim – równoległe. Zgodnie z ówczesnym stanem techniki zastosowano oporowy rozruch pociągu [19].

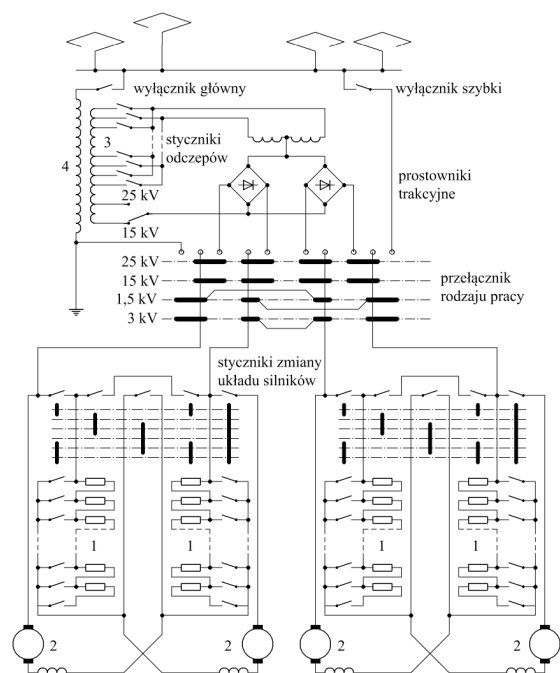
Przykładem pojazdu „dwuczęstotliwościowego”, przystosowanego do pracy w systemach napięcia przemiennego 15 kV 16 2/3 Hz (16,7 Hz) oraz 25 kV 50 Hz, jest szwajcarska lokomotywa manewrowa Ee 3/3 II 16503 (1957 r.) [20]. Trzyosiowy elektrowóz wyposażono w silnik jednofazowy komutatorowy prądu przemiennego o mocy ciągłej 532 kW. Schemat obwodu głównego pojazdu przedstawiono na rysunku 2. Napięcie sieci trakcyjnej podawane jest poprzez pantograf (1) i wyłącznik główny (2) na transformator (3). Przełącznik odczepów (4) umożliwia regulację wartości skutecznej napięcia, którym zasilany jest silnik (6). Dławiki (5) ograniczają wpływ przełączania odczepów na siłę pociągową lokomotywy oraz prądy styczników przełącznika (4) przy przełączaniu. Stykami (9.1) i (9.2) wybierano konfigurację bocznika uzwojenia biegunów pomocniczych: przy pracy w systemie 16,7 Hz równoległe do bocznika rezystancyjnego (7) dołączany jest bocznik indukcyjny (8), który wykorzystywano także w systemie 50 Hz, ale tylko dla małych prędkości jazdy (do 5 km/h). Nawrotnik (10) umożliwia zmianę kierunku ruchu lokomotywy. Jak wynika ze schematu, układ napędowy elektrowozu tylko nieznacznie różni się od typowego dla pojazdu jednosystemowego, ale transformator i silnik trakcyjny zostały zaprojektowane do pracy w obu systemach zasilania.

Zbudowanie efektywnie działającego pojazdu pracującego zarówno w systemie AC, jak i w systemie DC stało się możliwe po wprowadzeniu prostowników. Początkowo stosowano prostowniki rtęciowe [np. 20,21], a później – półprzewodnikowe. Typowym przykładem po-

jazdu wyposażonego w układ napędowy z prostownikiem diodowym jest szwajcarski czterosystemowy pociąg RAe TEE II, jeden z bardziej znanych przedstawicieli pociągów TEE (1961 r.) [22]. Uproszczony schemat układu napędowego tego pociągu pokazano na rysunku 3. Pojazd jest napędzany czterema silnikami prądu tętniącego o łącznej mocy ciągłej 2048 kW. Jego prędkość maksymalna wynosi 160 km/h.



Rys. 2. Uproszczony schemat układu napędowego lokomotywy Ee 3/3 II 16503 [20]



Rys. 3. Uproszczony schemat układu napędowego pociągu RAe TEE II dla stanu jazdy [22]

Przy zasilaniu napięciem stałym rozruch pociągu odbywa się z wykorzystaniem oporników

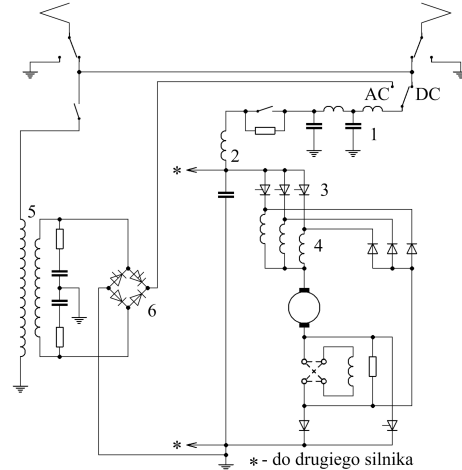
rozruchowych (1) oraz zmiany konfiguracji układu silników (2). W pierwszej fazie rozruchu w systemie 1,5 kV silniki są połączone szeregowo w dwóch grupach dwusilnikowych, a grupy połączone równolegle. Następnie wszystkie silniki łączone są równolegle. Rozruch pociągu w systemie 3 kV rozpoczyna się przy szeregowym połączeniu silników, które następnie są przełączane w dwie szeregowo połączone grupy obejmujące po dwa silniki połączone równolegle. Przy zasilaniu w systemach napięcia przemiennego na połączone równolegle silniki podawane jest napięcie wyprostowane, którego wartość jest regulowana poprzez zmianę wykorzystywanych odczepów (3) transformatora (4).

W innym wariantcie układu napędowego z prostownikiem niesterowanym transformator ma stałą przekładnię, a rozruch oporowy stosowany jest do rozpędzania pojazdu także przy zasilaniu z sieci napięcia przemiennego [np. 21,23-25].

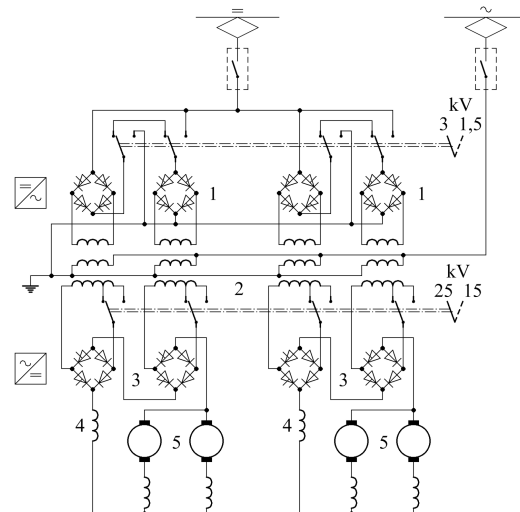
Wprowadzenie tyrystorów umożliwiło rezygnację z wykorzystywania oporników rozruchowych. Przy zasilaniu napięciem przemiennym silniki lokomotywy zasilane były napięciem o regulowanej wartości średniej z transformatora o stałej przekładni poprzez prostownik sterowany (rys. 5). Powstały także pojazdy wyposażone w przerywacze stałoprądowe. Przykładem takiego pojazdu jest francuska lokomotywa BB 22200, przystosowana do pracy w systemach 1,5 kV DC oraz 25 kV 50 Hz (1976 r.) [14,26]. Elektrowóz napędzają dwa silniki szeregowo prądu tętniącego o łącznej mocy 4400 kW [26]. Każdy z nich połączony jest przez przekładnię z dwoma zestawami kołowymi jednego wózka. Uproszczony schemat obwodu głównego pojazdu pokazano na rysunku 4. Przy pracy w systemie 1,5 kV każdy silnik trakcyjny zasilany jest przez filtr przeciwzakłóceń (1), filtr wejściowy LC (2), trzygałęziowy przerywacz tyrystorowy (3) oraz dławiki wygładzające (4). Impulsy poszczególnych przekształtników w gałęziach przerywacza są przesunięte względem siebie o 1/3 okresu impulsowania. Przy pracy w układzie AC napięcie wyjściowe transformatora (5) jest prostowane prostownikiem (6) i podawane na filtr wejściowy.

W zdecydowanej większości wielosystemowych pojazdów prostownikowych napięcie przemiennie sieci trakcyjnej jest transformowane i prostowane, zaś stałe podawane bezpośrednio na układ silników trakcyjnych. Zupełnie

inną koncepcję przyjęto w niemieckiej lokomotywie czterosystemowej BR 184 (E 410, wariant AEG, 1966 r.) [27,28]. Elektrowóz napędzają cztery silniki szeregowo o łącznej mocy ciągłej 3 MW, a jego prędkość maksymalna wynosi 150 km/h. Schemat obwodu głównego pojazdu zaprezentowano na rysunku 5.



Rys. 4. Uproszczony schemat układu napędowego lokomotywy BB 22200 dla stanu jazdy [26]



Rys. 5. Uproszczony schemat układu napędowego lokomotywy BR 184 dla stanu jazdy [27,28]

Napięcie stałe sieci trakcyjnej podawane jest na cztery tyrystorowe falowniki o komutacji wymuszonej (1), które je przetwarzają na napięcie przemiennie o częstotliwości 100 Hz. Przy pracy pojazdu w systemie 1,5 kV wszystkie falowniki połączone są równolegle, zaś przy zasilaniu z sieci 3 kV – równolegle w dwóch grupach, w których dwa falowniki są połączone szeregowo. Dzięki przetworzeniu napięcia stałego sieci trakcyjnej na przemiennie układ zasilania

silników pozostaje taki sam dla każdego systemu trakcyjnego. Napięcie uzwojenia wtórnego transformatora (2) podawane jest na cztery prostowniki półsterowane (3), połączone szeregowo po dwa. Każda grupa prostowników zasilana napięciem o regulowanej wartości średniej, poprzez dławik wygładzający (4), dwa silniki trakcyjne (5) połączone na stale równolegle.

4. Układy napędowe z silnikami trójfazowymi

Jako silniki trakcyjne stosowane są silniki synchroniczne ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, indukcyjne silniki klatkowe i silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi.

Silniki synchroniczne wzbudzone elektromagnetycznie wykorzystują głównie koleje francuskie, w takich pojazdach wielosystemowych jak lokomotywy pociągu TGV Atlantique czy elektrowozy Sybic [14,29-31]. W każdym z nich silniki trakcyjne są zasilane z tyrystorowego falownika prądu komutowanego siłami elektromotorycznymi poszczególnych faz silnika. Koncepcję układu napędowego pociągu TGV Atlantique opisano w pracy [32].

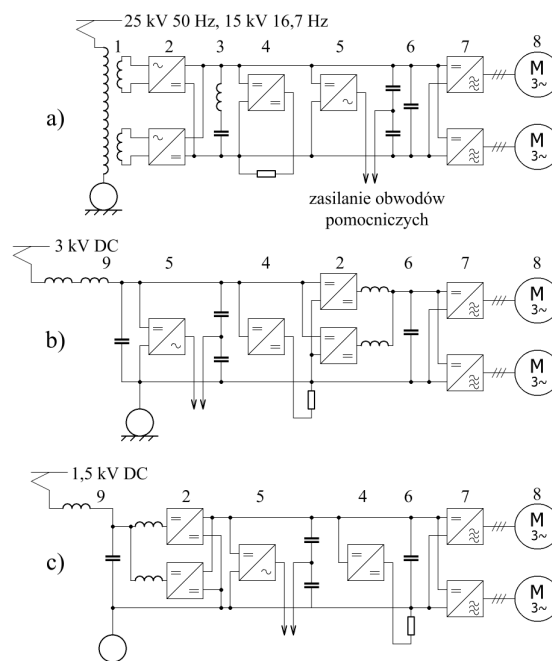
Wprowadzenie wyłączalnych energoelektronicznych elementów mocy, jak tyrystory GTO, a później tranzystory IGBT, umożliwiło budowę efektywnych układów napędowych z silnikami indukcyjnymi. Takie silniki napędzają zdecydowaną większość obecnie produkowanych pojazdów trakcyjnych. Typowa struktura układu napędowego lokomotywy wielosystemowej przy zasilaniu napięciem przemiennym obejmuje transformator pokładowy, przekształtnik czterokwadrantowy pracujący jako prostownik, obwód pośredniczący napięcia stałego, falownik napięcia oraz silnik trakcyjny. Przy zasilaniu napięciem stałym można wyróżnić kilka rozwiązań konstrukcyjnych [32], z których aktualnie stosowane są dwa:

- układy z falownikami dwupoziomowymi, w których wartość napięcia w obwodzie pośredniczącym jest inna, niż napięcie w sieci trakcyjnej,
- układy z falownikami dwupoziomowymi i obwodem pośredniczącym zasilanym napięciem sieci trakcyjnej.

W układach napędowych wykonanych według koncepcji *a* można zastosować elementy energoelektroniczne na napięcie niższe niż 6,5 kV oraz wybrać napięcie znamionowe silnika.

Jako przykład pojazdu wyposażonego w układ napędowy wykonany według koncepcji

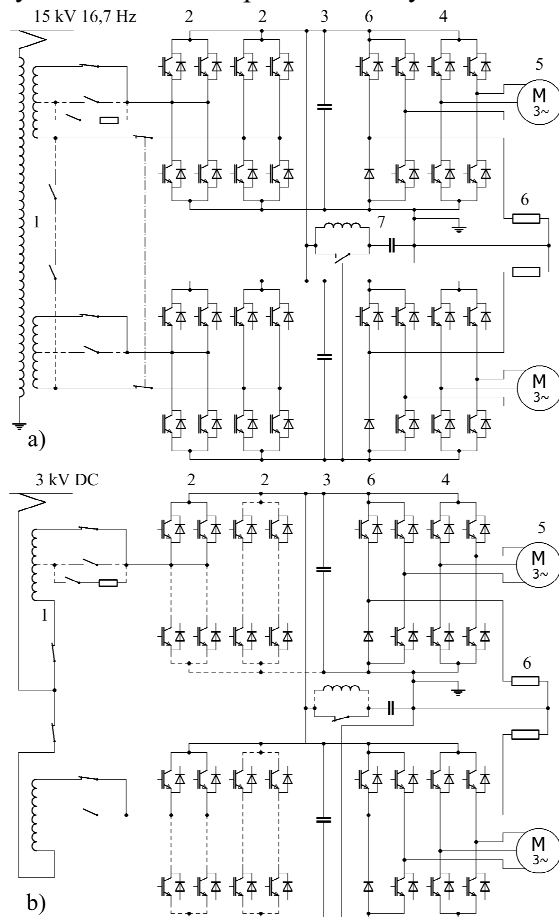
a można wskazać czteroosiową lokomotywę E186, należącą do rodziny Traxx. Elektrowóz jest przystosowany do zasilania w systemach 3 kV DC i 15 kV 16,7 Hz, ale może być wykonany jako czterosystemowy. Moc pojazdu wynosi 5,6 MW, a prędkość maksymalna – 140 km/h [33]. Uproszczony schemat układu napędowego lokomotywy Traxx pracującej w różnych układach zasilania pokazano na rysunku 6. W przekształtnikach lokomotywy zastosowano tranzystory IGBT.



Rys. 6. Uproszczony schemat układu napędowego dla jednego wózka lokomotywy Traxx zasilanej: a) napięciem przemiennym, b) w systemie 3 kV DC, c) w systemie 1,5 kV DC [33]

Podczas pracy w systemach AC napięcie przemiennie sieci trakcyjnej obniżane jest w transformatorze (1, rys. 6a) i prostowane przekształtnikami czterokwadrantowymi (2). Układ (3) filtruje składową zmienną napięcia, wprowadzaną w trakcie pracy przekształtników czterokwadrantowych. Kondensator (6) służy jako dynamiczne źródło napięcia dla falowników trakcyjnych (7). Lokomotywę napędzają silniki indukcyjne (8). W obwodzie jest jeszcze przerywacz układu hamowania elektrodynamicznego (4) oraz przekształtnik zasilający przetwornice obwodów pomocniczych (5). Napięcie 3 kV podawane jest na filtr wejściowy LC (9, rys. 6b). Jako dławik filtra wykorzystuje się uzwojenia wtórne transformatora trakcyjnego. Przekształtniki czterokwadrantowe pracują jako

przerywacze obniżające napięcie do poziomu wymaganego w obwodzie pośredniczącym. Przy zasilaniu pojazdu napięciem 1,5 kV DC (rys. 6c) przekształtniki czterokwadrantowe podwyższają napięcie. Niezależnie od systemu zasilania napięcie w obwodzie pośredniczącym utrzymuje się w granicach 2,1 – 2,8 kV [33]. Stosunkowo nieliczne pojazdy kolejowe napędzane są silnikami synchronicznymi wzbudzanymi magnesami trwałymi. Jednym z takich pojazdów jest czterosystemowy elektryczny zespół trakcyjny dużej szybkości AGV [34]. Moc napędu pociągu wynosi 6 – 12 MW (zależnie od ilości wagonów), a prędkość maksymalna – 360 km/h [35]. Uproszczony schemat układu napędowego pojazdu przy pracy w wybranych systemach zasilania pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Uproszczony schemat układu napędowego pociągu AGV dla jednego wózka przy zasilaniu: a) napięciem 15 kV 16,7 Hz, b) napięciem stałym 3 kV [39]

Przy zasilaniu napięciem przemiennym struktura układu napędowego jest typowa (rys. 7a), obejmując transformator pokładowy (1), przekształtniki czterokwadrantowe (2) działające jako prostowniki, obwód pośredniczący z kon-

densatorem (3), falowniki trakcyjne (4) oraz silniki trakcyjne (5). Numerem (6) oznaczono układ hamowania elektrodynamicznego, a numerem (7) – filtr składowej zmiennej napięcia obwodu pośredniczącego. Napięcie w tym obwodzie wynosi 3600 V. Podczas pracy w systemie 3 kV DC napięcie sieci trakcyjnej jest podawane na kondensator obwodu pośredniczącego (rys. 7b), czyli realizowana jest koncepcja b budowy układu napędowego. Również w tym przypadku uzwojenia wtórne transformatora wykorzystywane są jako dławiki filtra wejściowego.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcje układów napędowych elektrycznych kolejowych pojazdów wielosystemowych, zarówno starszej generacji, jak i budowanych współcześnie. Takie pojazdy są obecnie powszechnie stosowane. Znajdują się one także w ofercie większości producentów środków trakcyjnych [np. 36-40]. Wydaje się, że różne systemy zasilania nie stanowią już istotnej bariery w dążeniu do uzyskania w Europie interoperacyjnej kolei.

6. Literatura

- [1]. A. Mężyk „Bariery liberalizacji europejskiego rynku kolejowego i perspektywy zmian”, *Technika Transportu Szynowego*, nr 11-12, str. 8-13, 2012.
- [2]. T. Basiewicz, A. Gołaszewski, L. Rudziński „Infrastruktura transportu”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [3]. M. Graff „Budowa linii normalnotorowej Kowno – Mockava (– granica z Polską) na terenie Litwy”, *Technika Transportu Szynowego*, nr 10, str. 6-9, 2013.
- [4]. M. Graff „System SUW 2000 w komunikacji przestawczej 1435/1520 mm”, *Technika Transportu Szynowego*, nr 1-2, str. 34-53, 2016.
- [5]. R.M. Suwalski „Wózek do wagonów towarowych z zestawem przestawnym 1435/1520 mm”, *Technika Transportu Szynowego*, nr 10, str. 32-38, 2005.
- [6]. A.G. Álvarez „Automatic track gauge changeover for trains in Spain”, 2010. http://81.47.175.201/livingrail/docs/2010_Track_gauge_changeover.pdf (02.2018).
- [7]. M. Graff, A. Nakamura „Kikanka – pociągi Shinkansen w Japonii ze zmiennym rozstawem kół”, *Technika Transportu Szynowego*, nr 11-12, str. 53-57, 2014.
- [8]. J.L. Lopez Gomez „Talgo – automatyczny system zmiany rozstawu kół wagonów w ruchu pasażerskim i towarowym”, *Technika Transportu Szynowego*, nr 5, str. 14-18, 1998.
- [9]. G. Skarpetowski „Multisystem Locomotives.

- The Future of European Railways”, https://www.pk.edu.pl/images/jubileusz/materialy/presentation/conference/K4_4_Prof_Skarpetowski.pdf (01.2018).
- [10]. B. Eschermann, K. Forsgran „European train protection system for cross-border railway operation”, *ABB Review*, nr 8, str. 17-22, 1995.
- [11]. J. Dyduch, M. Pawlik „Systemy automatycznej kontroli jazdy pociągu”, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2002.
- [12]. The European Rail Traffic Management System. Deployment world map. http://www.ertms.net/?page_id=55 (02.2018)
- [13]. U. Behmann „Stromsystemwechselstellen und Mehrsystemtriebfahrzeuge in Westeuropa”, *Elektrische Bahnen*, nr 4, str. 74-84, 1971.
- [14]. A. Steimel „Under Europe’s Incompatible Catenary Voltages. A Review of Multi-System traction Technology”, Conference „Electrical Systems for Aircraft, Railway, and Ship Propulsion”, 16-18 Oct. 2013, Bolonia.
- [15]. A. Baranecki, J. Nichthausser, T. Płatek „Wielosystemowe przetwornice statyczne”, *Technika Transportu Szybnego*, nr 1-2, str. 66-39, 2004.
- [16]. A. Szelaż, L. Mierzejewski „Systemy zasilania linii kolejowych dużych prędkości jazdy”, *Technika Transportu Szybnego*, nr 5-6, str. 80-90, 2005.
- [17]. U. Behmann „Übergang des Trans-Europ-Express-Verkehrs auf elektrische Traktion”, *Elektrische Bahnen*, nr 8, str. 187-190, 1974.
- [18]. J. Kuhlow „Fahrmotoren für Stromrichterfahrzeuge”, *Elektrische Bahnen*, nr 10, str. 224-226, 1967.
- [19]. F. Baeyens „Die Elektrisierung der Strecke Antwerpen – Roosendaal und die neuen Triebwagen der Belgischen und Niederländischen Eisenbahnen”, *Elektrische Bahnen*, nr 7, str. 164-167, 1958.
- [20]. H.H. Weber „Die Zweifrequenz-Rangier-lokomotiven der SBB”, *Elektrische Bahnen*, nr 5, str. 97-110, 1960.
- [21]. A. Peters „Die Zweisystemlokomotive 20005 der SNCF”, *Elektrische Bahnen*, nr 11, str. 255-257, 1961.
- [22]. R. Giugnard, K. von Meyenburg „Die elektrischen Trans-Europ-Express-Züge der SBB”, *Elektrische Bahnen*, nr 4, str. 80-93, 1963.
- [23]. A. Peters „Elektrische Dreisystemlokomotive der SNCB”, *Elektrische Bahnen*, nr 11, str. 261, 1962.
- [24]. J. Neruez „Die elektrische Viersystemlokomotive der SNCB, Bauart 160”, *Elektrische Bahnen*, nr 6, str. 128-136, 1967.
- [25]. R. Le Berrigaud, A. Cossí „Die Europa-Viersystemlokomotiven CC 40101 bis 40104 der SNCF”, *Elektrische Bahnen*, nr 8, str. 180-186, 1967.
- [26]. A. Cossí „Evolution de la locomotive à thyristors à la S.N.C.F.”, *Elektrische Bahnen*, nr 2, str. 52-60, 1981.
- [27]. C. Tietze „Die elektrische Ausrüstung der Mehrsystemlokomotiven E 410 und E 310 mit Thyristorleistungsstromrichtern, Bauart AEG”, *Elektrische Bahnen*, nr 11, str. 259-265, 1966.
- [28]. E. Gierth „Die Mehrsystemlokomotiven E410 und E310 der Deutschen Bundesbahn”, *Elektrische Bahnen*, nr 11, str. 250-259, 1966.
- [29]. W. Runge „Bahntriebssysteme mit synchronen Fahrmotoren”, *Elektrische Bahnen*, nr 7, str. 205-217, 1987.
- [30]. F. Jonard „Die Geschwindigkeitssteuerung und der im TGV-Atlantique verwendete selbstgeführte Synchronmotor”, *Elektrische Bahnen*, nr 12, str. 351-355, 1989.
- [31]. J.-C. Boutonnet „Lokomotive Baureihe 26000 Sybic der Société Nationale des Chemins de fer Français”, *Elektrische Bahnen*, nr 1-2, str. 38-46, 1994.
- [32]. A. Stobiecki, R. Dudek „Układy napędowe pojazdów trakcyjnych z trójfazowymi silnikami prądu przemiennego”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 1, str. 49-55, 2017.
- [33]. K. Gawłowski „Lokomotywa wielosystemowa typu E186 serii EU43”, *Technika Transportu Szybnego*, nr 1-2, str. 17-24, 2008.
- [34]. M. Mermet-Guyennet „New Power Technologies for Traction Drives”, 2010 International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion, str. 719-723, Piza 2010.
- [35]. M. Graff „AGV – nowy pociąg dużych prędkości”, *Technika Transportu Szybnego*, nr 4, str. 18-21, 2008.
- [36]. M. Krzyżanowski, J. Pawlak, J. Vitins „Traxx – platforma lokomotyw dla Europy”, *Technika Transportu Szybnego*, nr 9, str. 17-25, 2006.
- [37]. „Lokomotywa ES64U4”, *Technika Transportu Szybnego*, nr 12, str. 45-51, 2009.
- [38]. R. Rusak „Lokomotywy elektryczne i spalinowe Prima”, *Technika Transportu Szybnego*, nr 6, str. 18-26, 2009.
- [39]. „Platforma lokomotyw Gama”. <http://www.pesa.pl/produkty/lokomotywy/> (02.2018)
- [40]. „Lokomotywy elektryczne”. <http://www.nowag.pl/oferta/lokomotywy-elektryczne/> (02.2018)

Autorzy

dr inż. Andrzej Stobiecki

dr inż. Roman Dudek

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział EAIiIB, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, email: astob@agh.edu.pl, roman.dudek@agh.edu.pl