

Perspektywy zastosowania napięcia 25 kV 50 Hz w Polsce

Marek GRAFF¹

Streszczenie

W artykule przedstawiono perspektywę wdrożenia napięcia 25 kV 50 Hz na sieci PLK. Porównano także oba rodzaje napięcia – 3 kV DC oraz 25 kV 50 Hz wykorzystując doświadczenie krajów sąsiadujących z Polską, którzy stosują prąd przemienny i stały na własnej sieci kolejowej: Czech, Słowacji i Ukrainy. Liniami, w Polsce gdzie potencjalnie można by wdrożyć napięcie 25 kV 50 Hz, są m.in. eksploatowane linie CMK, LHS czy planowana linia Y. W Czechach i Słowacji zaplanowano sukcesywną reelektryfikację wybranych linii (3 kV DC → 25 kV 50 Hz), które rozłożono w czasie, z powodu znacznych kosztów. Przewaga napięcia 25 kV 50 Hz nad 3 kV DC jest na tyle duża (niższy koszt budowy oraz eksploatacji linii), iż zasadność jego wdrożenia jest sprawdzona, w szczególności na liniach najbardziej obciążonych przewozami.

Słowa kluczowe: napięcie zasilania, 3 kV DC, 25 kV 50 Hz, Polska, PKP

1. Wstęp

Dyskusja, czy wprowadzić napięcie 25 kV 50 Hz na sieci PKP pojawiła się jeszcze w latach 50. XX w. [1]. Obecnie należy przedyskutować i dostosować plan modernizacji do czasów współczesnych [2]. Wprawdzie w 1961 r. porównano koszt elektryfikacji dwóch linii: Kraków – Przemyśl – Medyka (LK 91) i Poznań – Szczecin (LK 351) oboma systemami zasilania, jednak ostatecznie z powodów ekonomicznych, system 25 kV 50 Hz został zarzucony. Obie linie zostały zelektryfikowane napięciem 3 kV DC, odpowiednio w 1964 r. i 1978 r. Obawiano się jednak nie tylko wyższych kosztów przy systemie 25 kV 50 Hz, ale przede wszystkim problemów producentów taboru kolejowego, którzy mogliby nie sprostać konieczności wytwarzania pojazdów przystosowanych do eksploatacji pod dwoma różnymi systemami zasilania. Budowa pojazdów dwusystemowych przed rewolucją krzemową z lat 70. XX w. była dużo bardziej skomplikowana technicznie. O ile wówczas produkcja taboru na napięcie 25 kV 50 Hz była znacznie droższa niż na napięcie 3 kV DC, to już dla elektryfikacji linii kolejowych, jest tańsza dla napięcia 25 kV 50 Hz. Obecnie przy modułowej budowie pojazdów, różnica pomiędzy kosztem budowy taboru na prąd przemienny i stały jest mniejsza. Jednak obecnie powszechne stało się wytwarzanie pojazdów wielonapięciowych (rodzina lokomotyw *Traxx*, *Vectron*, *Prima*), gdyż wraz z liberalizacją przewozów w krajach UE, produkcja

pojazdów jednonapięciowych jest praktykowana w ograniczonym zakresie i dotyczy tylko jednego lub dwóch krajów. Są to np. wybrane serie *Traxx*-ów czy konstrukcja *Smartron* (jednonapięciowa wersja *Vectrona*), *Griffin* i *Dragon* (Newag) oraz *Gama* (Pesa).

2. Zasadność wprowadzenia napięcia 25 kV 50 Hz w Polsce

Obecnie, wraz z perspektywą budowy linii dużych prędkości w Polsce, pojawiła się konieczność (wynikająca z dyrektywy UE i dotycząca Interoperacyjności kolei dla eksploatacji linii o prędkościach $V > 250$ km/h) wdrożenia napięcia 25 kV 50 Hz na sieci PLK [3, 4]. Wydaje się, iż całość będzie zmierzać w kilku prognozowanych kierunkach:

1. Zmiana napięcia na całej sieci PLK (3 kV → 25 kV) nie wydaje się celowa. Pomijając koszty konwersji, które byłyby ogromne, w Polsce dochodzi jeszcze deficyt taboru przystosowanego do eksploatacji pod napięciem 25 kV 50 Hz.
2. Wnioski płynące z krajów UE (czyli z Belgii i Włoch), które podobnie jak Polska stosują napięcie 3 kV DC, jest przykładem, że linie dużych prędkości (czyli zbudowane od podstaw zostały zelektryfikowane napięciem 25 kV 50 Hz, a na większości sieci kolejowej jest stosowane nadal napięcie 3 kV DC), ich konwersja na 25 kV 50 Hz nie jest obecnie planowana.

¹ Dr; Instytut Chemii i Techniki Jądrowej; e-mail: marek.graff@infotransport.pl.

Podobna sytuacja jest na sieci kolejowej w Holandii, gdzie stosuje się napięcie 1,5 kV DC, a np. HSL-Zuid² zelektryfikowano napięciem 25 kV 50 Hz. Analogicznie jest na sieci kolejowej we Francji (SNCF Réseau), gdzie zastosowano napięcie 1,5 kV DC oraz 25 kV 50 Hz, odpowiednio w południowej i północnej części kraju (w obrębie węzła Paryża zastosowano oba rodzaje napięcia), przy czym wszystkie nowe linie dużych prędkości (LN, LGV) zelektryfikowano napięciem 25 kV 50 Hz.

3. W Polsce, koncepcja linii Y, ewentualnie modyfikacji linii dojazdowych do CPK (ostatecznie, to jest dla linii dużej prędkości – docelowy przebieg bardzo zbliżony) zakłada podobne podejście, jak w wymienionych krajach – nowa linia byłaby zelektryfikowana napięciem 25 kV 50 Hz, a linie dojazdowe pozostają przy 3 kV DC.
4. Zmiana napięcia na CMK (LK 4) obecnie nie jest planowana z powodu poczynionych znacznych inwestycji w ostatnich latach, przede wszystkim w linie zasilające i podstacje trakcyjne (rys. 1). Nie jest to oczywiście wykluczone w przyszłości, ale wpływ na to mogą mieć np. przyszłe potoki pasażerskie czy wykorzystanie linii w szybkim ruchu towarowym (np. pociągi kontenerowe kursujące nocą). Jednak trudno jest przewidywać sytuację na linii za np. 30 lat – decyduje o tym zbyt duża liczba zmiennych, które mają wpływ na ocenę ostatecznego zapotrzebowania i wielkość przewozów.



Rys. 1. Stacja Włoszczowa Płn. na CMK (LK 4) po modernizacji (16.08.2018 r.) [fot. M. Graff]

5. Napięcie 25 kV 50 Hz stosują poza Niemcami – wszyscy sąsiedzi Polski³, przy czym ww. napięcie przy stacjach granicznych PKP z BC czy UZ (1520 mm) jest już stosowane (odpowiednio, stacje Brześć i Izów), a z LG Infra pojawi się wraz z budowaną obecnie linią Rail Baltica⁴ (1435 mm), rysunki 2, 3 i 4.



Rys. 2. Stacja Przemyśl Gł., stacja graniczna z siecią UZ: po lewej stronie znajduje się zelektryfikowane napięciem 3 kV DC: LK 91 (1435 mm), po prawej – LK 92 (1520 mm) (16.09.2016 r.) [fot. M. Graff]



Rys. 3. Stacja Kuźnica Białostocka (LK 6), stacja graniczna z siecią BC (16.04.2016 r.) [fot. M. Graff]

² Linia dużych prędkości Amsterdam – Haga – Rotterdam – Breda (– granica z Belgią – Antwerpia – Bruksela).

³ RZD stosują napięcie 3 kV DC i 25 kV 50 Hz, przy czym w Obwodzie Królewieckim graniczącym z Polską, używane jest napięcie 3 kV DC. W przypadku BC, odcinki zelektryfikowane napięciem 3 kV DC to krótkie linie dojazdowe z Polski – Terespol – Brześć i Kuźnica Białostocka – Grodno (1435 mm).

⁴ Po stronie niemieckiej przy granicy PL-D znajdują się także 2 odcinki pomiędzy systemami zasilania 3 kV DC (PLK) i 15 kV 16,7 Hz (DB Netz) – w środkowej części stacji Frankfurt (Oder) Oderbrücke i 1,576 km od granicy państwowej na linii Węgliniec – Horka – Rosslau (Elbe) (PLK 295 + DB 6207). Trzeci podobny odcinek powstanie wraz z obecnie realizowaną elektryfikacją linii Szczecin Gumieńce – Angermünde (PLK 409 + DB 6328).



Rys. 4. Stacja Brześć Centr. na granicy polsko-białoruskiej i tzw. część warszawska dworca: dwa tory od lewej o rozstawie 1435 mm i zelektryfikowane napięciem 3 kV DC, a dwa kolejne (od prawej strony) – tory szerokie (1520 mm) zelektryfikowane napięciem 25 kV 50 Hz (25.02.2018 r.) [fot. M. Graff]

6. Zarządcy infrastruktury w Czechach czy Słowacji, czyli SŽ i ŽSR oraz dodatkowo na Ukrainie – UZ, którzy stosują oba rodzaje napięcia w obrębie własnych sieci kolejowych, za bardziej ekonomiczne uznali napięcie 25 kV 50 Hz niż 3 kV DC. Nowe odcinki natomiast w większości elektryfikują napięciem 25 kV 50 Hz (3 kV DC jest stosowane tylko w szczególnych przypadkach, np. dokończenie elektryfikacji danej linii). Pokazuje to przewagę systemu 25 kV 50 Hz wobec 3 kV DC w praktyce.
7. Potencjalne wdrożenie napięcia 25 kV 50 Hz w Polsce może nastąpić na LHS (Linii Hutniczej Szerokotorowej) [5], ewentualnie na odcinku Hrubieszów LHS – Granica Państwa (– Izów – Kowel): UZ wykonały elektryfikację linii Kowel – Włodzimierz Wołyński – Izów napięciem 25 kV 50 Hz [6, 7] (około 80 km, proces zakończono w czerwcu 2022 r. [8] – w warunkach wojny w kraju!). Choć UZ apelowały do PKP o podjęcie elektryfikacji odcinka granicznego, apel pozostał bez odzewu.
8. Planowana elektryfikacja LHS (LK 65; 396,4 km) nie będzie realizowana w najbliższym czasie – linia nie jest wpisana do sieci TEN-T, co znacząco utrudnia pozyskanie funduszy UE na potencjalną elektryfikację. Szacunkowo, przy nakładach min. 4,7 mln PLN za 1 km (porównywalny koszt, jak dla PKM [9]), wydatek byłby równy około 2 mld PLN, zatem bez pomocy państwa czy wsparcia UE, elektryfikacja wydaje się niewykonalna. Wprawdzie dla napięcia 25 kV 50 Hz, ów koszt byłby niższy (przewody o mniejszej średnicy, mniejsza liczba podstacji zasilających – co 50 km zamiast 10–12 km), ale prawdopodobnie 1 mld PLN, to absolutne minimum. Szacunkowa elektryfikacja odcinka granicznego (Izów –) Granica Państwa – Hrubieszów LHS, czyli około 5–8 km, to koszt 24–35 mln PLN. Należy dodać, iż znaczenie linii LHS, zwłaszcza w ruchu

towarowym, zostało docenione w ostatnich latach (np. przewóz kontenerów z Chin), a w lutym 2022 r. po agresji Rosji na Ukrainę w szczególności (np. transport ukraińskiego zboża eksportowego). Napięcie 25 kV 50 Hz jest wręcz idealne dla ruchu towarowego, ponieważ łatwość uzyskania dużych mocy na pantografie powoduje, iż bezproblemowe staje się prowadzenie ciężkich pociągów. Określa to wzór (1):

$$P = I \cdot U \quad (1)$$

gdzie: P – moc, I – natężenie, U – napięcie.

Aby do napięcia 3 kV dostarczyć moc porównywalną jak dla 25 kV konieczne jest około 8 razy wyższe natężenie prądu, aby uzyskać porównywalną moc, jak dla 25 kV czyli przewody sieci trakcyjnej muszą mieć większy przekrój, aby zmniejszyć oporność, czy straty ciepłne; podobnie pantograf musi mieć ramiona o większym przekroju zgodnie z (2):

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \Delta Q \quad (2)$$

gdzie: W – praca, t – czas, Q – ciepło, R – oporność (rezystancja).

Poza tym, obecność odcinków zelektryfikowanych napięciem 25 kV 50 Hz, (wprawdzie na sieci kolejowej 1520 mm), byłaby dla polskich przewoźników czy zarządcy infrastruktury znakomitym poligonem w celu zdobycia doświadczenia z napięciem 25 kV 50 Hz.

Poniżej przedstawiono charakterystykę konwersji linii zelektryfikowanych napięciem 3 kV DC na napięcie 25 kV 50 Hz w Czechach i Słowacji oraz elektryfikację nowych linii napięciem 25 kV 50 Hz na Ukrainie. W Czechach i na Słowacji stosowane są dwa rodzaje napięcia: 3 kV DC oraz 25 kV 50 Hz do zelektryfikowania sieci kolejowej. Pierwszy, stosowany od dwudziestolecia międzywojennego, a drugi – od lat 50. XX wieku. W Czechach działalność prowadzi także producent – Škoda, wytwarzający tabor nie tylko na rynek krajowy, ale także na eksport. Zakłady Škoda dostarczyły ponad 5 tys. lokomotyw, zespołów trakcyjnych i inne, a w niektórych krajach, poza Czechami i Słowacją, lokomotywy wyprodukowane w Pilźnie od dzisiaj są podstawą ruchu pasażerskiego (UZ, BC, RŽD, BDŽ itp.). W ostatnich latach zarządcy infrastruktury kolejowej w obu krajach zaczęli poważnie rozważać zmianę napięcia 3 kV DC na 25 kV 50 Hz, aby uzyskać korzystniejsze wyniki eksploatacyjne i obniżyć koszty (rys. 5, 6 i 7).



Rys. 5. Stacja Międzylesie (LK 276), stacja graniczna z siecią SŽ / ČD (8.03.2017 r.) [fot. M. Graff]



Rys. 6. Dwunapięciowa stacja Bratislava Petržalka (25 kV 50 Hz, 15 kV 16,7 Hz) (22.06.2019 r.) [fot. M. Graff]



Rys. 7. Stacja Pribeník na linii Koszyce – Čierna na Tisou (3 kV DC), Słowacja (4.09.2022 r.) [fot. M. Graff]

Czechy

Na posiedzeniu w dniu 20.12.2016 roku Centralna Komisja Ministerstwa Transportu zatwierdziła opracowanie pt. „Koncepcja przejścia na jednolity system elektroenergetyczny w odniesieniu do priorytetów okresu programowania 2014–2020 i spełnienia wymagań TSI ENE” [10]. Przyjęto także długoterminowy cel zakładający ujednolicenie systemów zasilania

trakcyjnego sieci kolejowej w Czechach, która obecnie jest zasilana 2 systemami napięcia – 3 kV DC w północnej części kraju i 25 kV 50 Hz w części południowej. Badanie przeprowadzone wspólnie przez spółki SUDOP Praha i SUDOP Brno potwierdziło, że system prądu stałego jest już niewystarczający dla obecnych potrzeb eksploatacyjnych, a jego wzmocnienie przyniosłoby jedynie ograniczone korzyści przy nieproporcjonalnie wysokich nakładach inwestycyjnych. Zatem rozwiązaniem jest stopniowe przejście na korzystniejszy system prądu przemiennego. Dodatkowo, konwersja z systemu 3 kV DC na system 25 kV 50 Hz umożliwi osiągnięcie następujących celów:

- Zwiększenie efektywności transportu kolejowego przez wydajniejsze zasilanie.
- Zwiększenie efektywności energetycznej przez zmniejszenie strat energii (niższe natężenie przesyłanego prądu).
- Redukcję kosztów elektryfikacji nowych linii, w tym: mniejszy przekrój przewodu jezdnego, ewentualnie zastosowanie jednego przewodu jezdnego zamiast dwóch, co powoduje, że sieć trakcyjna ma niższą masę.
- Wprowadzie budowa pojazdów na napięcie 25 kV 50 Hz jest droższa niż na napięcie 3 kV DC, jednak do zasilania silników trakcyjnych w pojeździe, transformator umożliwia bardziej optymalne dobranie wartości napięcia i natężenia prądu z odczepów uzwojenia wtórnego transformatora. Zatem tworzy bardziej korzystną charakterystykę techniczno-eksploatacyjną lokomotyw czy eoz; dodatkowo, transformator korzystniej tłumi wahania napięcia dopływającego do przekształtników trakcyjnych czy wcześniej bezpośrednio silników trakcyjnych pojazdu w porównaniu z filtrami i dławikami w pojazdach na napięcie 3 kV DC.
- Hamowanie rekuperacyjne dla napięcia 25 kV jest możliwe w znacznie szerszym zakresie wartości napięć niż dla 3 kV DC, z powodu wymogu nieprzekraczania wartości 3,9 kV DC dla sieci zelektryfikowanej 3 kV DC, co wynika z przyjętych granicznych wartości napięcia dla eksploatowanych pojazdów trakcyjnych (2,0–3,9 kV DC).
- Eliminację konieczności przetwarzania prądu w podstacjach, zasilanych napięciem 110 kV (dla 25 kV 50 Hz) zamiast 22 kV (dla 3 kV DC).
- Kompatybilność zasilania przyszłych linii dużych prędkości z konwencjonalną siecią kolejową.
- Usprawnienie ruchu pociągów przez bardziej optymalne wykorzystanie parametrów technicznych nowoczesnych pojazdów trakcyjnych.

Szacunkowe koszty inwestycyjne oraz odnowienia urządzeń zasilających w ramach konwersji systemu prądu stałego na prąd przemienny szacuje się na 79,3 mld koron czeskich (3,35 mld euro) w ciągu

30 lat. Z drugiej strony, utrzymanie systemu prądu stałego (a tym samym dwóch różnych systemów zasilania) wymagałoby nakładu 70,8 mld CZK (2,99 mld euro) potrzebnych na niezbędne wzmocnienie systemu, aby spełnić obecne i przyszłe wymagania dotyczące eksploatacji i regularnej wymiany wyposażenia po zakończeniu jego eksploatacji. Analiza kosztów i korzyści została wykorzystana do zweryfikowania społeczno-ekonomicznych korzyści opcji przejścia. Główną korzyścią ekonomiczną systemu prądu przemiennego jest redukcja kosztów eksploatacji (redukcja strat energii i większe wykorzystanie odzysku energii podczas hamowania) oraz eliminacja uszkodzeń od skutków prądów błędnych i kosztów ich eliminacji. Wewnętrzny stopę zwrotu obliczono na 6,88%, czyli powyżej wymaganego limitu dla projektów inwestycyjnych w bieżącym okresie programowania (5,00%). W przyszłości można spodziewać się innych korzyści ekonomicznych, których jednak nie uwzględniono w analizie zysków i strat ze względu na poprawność metodologiczną. Według autorów raportu, elektryfikacja w systemie prądu przemiennego jest o 30–50% tańsza w porównaniu z systemem prądu stałego. W przyszłości, nowe linie dużych prędkości będą mogły być w prostszy sposób zintegrowane z istniejącą konwencjonalną siecią kolejową. Wyniki studium będą ważnym dokumentem do przygotowania założeń modernizacji sieci kolejowej w Czechach w celu uzyskania dofinansowania z funduszy UE w kolejnych budżetach Wspólnoty, tak aby zminimalizować niezbędne koszty przyszłego przejścia na system prądu przemiennego. Jednocześnie proponowane są zmiany przepisów w związku z obecnie stosowanymi materiałami i technologiami oraz rozwojem i eksploatacją nowoczesnych pojazdów trakcyjnych. Zaproponowany harmonogram przejścia na system 25 kV 50 Hz (2019–2037) został przyjęty jako rekomendowany. W zależności od planowanych działań modernizacyjnych infrastruktury kolejowej nastąpi wówczas realizacja budowli towarzyszących. Samo przejście na system prądu przemiennego powinno również uwzględniać możliwości operacyjne przewoźników.

Na początku stycznia 2020 r. zarządca infrastruktury kolejowej w Czechach (SŽ) ogłosił kontrakt na sporządzenie studium wykonalności określające termin i sposób rozpoczęcia przełączania systemu zasilania z prądu stałego na prąd przemienny na wybranych obszarach w celu podania zarządcom kolei dokładniejszej daty rozpoczęcia przebudowy w regionach Nymburka, Hradca Králové i Pardubic. Zgodnie z założeniem, studium powinno zawierać szczegółowy i kompleksowy harmonogram przełączania obszaru objętego zmianą z uwzględnieniem procedury przełączania oraz zakresu rozdzielanych sekcji w poszczególnych etapach [11]. Studium powinno również odnosić się do wymagań przewoźników w zakresie

procesów modernizacji i odnowy taboru. Opracowanie obejmie linie bardzo obciążone przewozami, jak np. linię Kolín – Chocna (część magistrali Praga – Ostrawa) czy fragment linii Praga – Děčín (– Drezno – Berlin), tzw. prawobrzeżną, biegnącą wzdłuż prawego brzegu Łaby, obecnie zelektryfikowaną napięciem 3 kV DC. Według SŽ, oprócz zrealizowanej w 2021 r. przebudowy pomiędzy stacjami Nedakonice i Říkovice (obecny styk systemów 25 kV 50 Hz i 3 kV DC) na linii Ostrawa – Brzeclaw (– Wiedeń), data przełączenia napięcia pomiędzy stacjami Střelna na granicy ze Słowacją i Vsetín nastąpi w 2025 r., a inne odcinki są obecnie w trakcie realizacji. Na podstawie przygotowanego studium, zostaną opracowane konkretne projekty inwestycyjne.

Pod koniec września 2020 r. rozpoczęła się modernizacja linii Dětmarovice – Petrovice u Karviné (– Zebrzydowice) w Czechach dotycząca projektu współfinansowanego w ramach CEF Blending, złożonego z Connecting Europe Facility (CEF) finansowanego przez UE (20%) i European Investment Bank (EIB, 30%), plus środki budżetu państwa (50%) [12]. Jako wykonawcę wybrano konsorcjum firm Strabag Rail i OHL ŽS, a zakres prac obejmuje modernizację 2-torowego odcinka o długości 10,8 km oraz 1-torowego odcinka Závada – Koukolná, umożliwiającego omińnięcie stacji Petrovice u Karviné na drodze Zebrzydowice – Karviná. Zmodernizowanych zostanie 6 przejazdów kolejowych oraz stacje Dětmarovice, Závada i Petrovice u Karviné, na których będzie wymieniona nawierzchnia umożliwiająca podniesienie prędkości przejazdu. Modernizacja obejmie również sieć trakcyjną oraz podstacje zasilające, które zostaną przystosowane do przyszłej zmiany napięcia z 3 kV DC na 25 kV 50 Hz.

W odpowiedzi na plany zarządcy infrastruktury przewoźnik – ČD zdecydował, iż część taboru – przede wszystkim najmłodszego – zostanie przebudowana z systemu jednonapięciowego (3 kV DC) na dwusystemowy. Ponieważ proces konwersji napięcia jest obliczony na około 20 lat, nie wydaje się konieczne, aby podobne zabiegi były celowe w przypadku starszych pojazdów z powodu naturalnego cyklu życia pojazdu szynowego, obliczonego na 30–40 lat.

Słowacja

Na początku sierpnia 2015 r. na sieci ŽSR zmieniono punkty styku systemów zasilania 3/25 kV z dotychczasowego, położonego na km 155,521 na odcinku Púchov – Ladce (– Bratysława) i utworzeniu dwóch nowych systemów [13]:

- pierwszy na 158,6 km na odcinku Púchov – Považská Bystrica, czyli przy wyjeździe ze stacji Púchov w kierunku Żyliny;
- drugi na 0,894 km na odcinku Púchov – Lúky pod Makytou, przy czym jest to rozwiązanie

tymczasowe, ponieważ wraz z postępującą unifikacją systemu zasilania sieci ŽSR na Słowacji, punkty styczne zostaną przesunięte w kierunku stacji Żylina i Lúky pod Makytou.

Wszystkie prace związane ze zmianą zasilania były prowadzone w trakcie modernizacji stacji, a po jej zakończeniu przełączono zasilanie z podstacji 22/3 kV na istniejącą stację transformatorową 110/25 kV lokalnej elektrowni trakcyjnej (TNS). Obecna podstacja 22/3 kV pozostanie w eksploatacji do momentu przełączenia systemu zasilania na 25 kV na linii przez Lúky pod Makytou wzdłuż granicy państwowej z Czechami, co było planowane w 2017 r. Zasilanie odcinka Púchov – Považská Bystrica jest dotychczas realizowane z ruchomej podstacji 22/3 kV zlokalizowanej na czole stacji w Żylinie, ale później będzie wykonywane z nowej stacji transformatorowej 110/25 kV. Podczas operacji przełączania napięcia, realizowanej podczas weekendu, do prowadzenia pociągów dalekobieżnych wykorzystano lokomotywy spalinowe serii 754 i 742, niekiedy w trakcji podwójnej, a ruch pociągów lokalnych został wstrzymany i uruchomiono komunikację autobusową. Maksymalne opóźnienia, jakie zanotowano, nie przekraczały 20 min.

Równocześnie wraz z modernizowaną linią Bratislava – Żylina – Koszyce, będącej główną arterią komunikacyjną Słowacji, zdecydowano się wykonać korektę przebiegu linii na odcinku Púchov – Milochoch, którego przebieg – wzdłuż meandrującej rzeki Wag i zbiornika Nosice, uniemożliwiał podniesienie prędkości do 140–160 km/h z powodu łuków o małych promieniach oraz znacznych pochyłości terenu. Zatem długość odcinka Púchov – Milochoch skrócono o 2,814 km (z 18,742 km do 15,928 km). Zbudowano również 6 nowych mostów drogowych i wiaduktołów oraz 4 dwupoziomowe przejścia drogowe i pieszce,

11 przepustów, a także zlikwidowano 4 przejazdy kolejowe (jednopoziomowe). Projektantem była firma REMING CONSULT, Bratislava, a wykonawcami przedsiębiorstwa: Doprastav Bratislava (lider) oraz TSS GRADE Bratislava, Subterra, Praha i Elektrizace železnic Praha. Wartość prac wynosiła 365 mln euro netto, co jest największą i jednocześnie najbardziej wymagającą inwestycją w historii ŽSR [14]. Zakończenie prac zaplanowano na grudzień 2021 r., tj. 64 miesiące po rozpoczęciu budowy we wrześniu 2016 r. (początkowo zaplanowano styczeń 2016 r.), z powodu konieczności przesunięcia linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia, co nie zostało uwzględnione w dokumentacji projektowej. Problemem były także trudne warunki geologiczne na wzgórzu Stavná, czy konieczność prowadzenia złożonych prac w tunelu Milochoch o długości 1861 m (niezbędne były zmiany w pierwotnej okładzinie tunelu). Innymi problemami były stanowiska archeologiczne, zatem wystąpiła konieczność czasowego przerwania prac budowlanych, a także starego, ukrytego wysypiska śmieci, które musiano zlikwidować. Docelowo, odcinek Púchov – Považská Bystrica zostanie wyposażony w system ETCS 1.

Ukraina

Na Ukrainie (pomimo wojny toczonyj po agresji Rosji w lutym 2022 r., choć kolej funkcjonuje w ekstremalnych warunkach), zrealizowano elektryfikację napięciem 25 kV 50 Hz dwóch odcinków – Kowel – Izów przy granicy z Polską oraz Czerkassy – im. T. Szewczenko (planowano zakończenie w 2022 r., dane UZ). UZ eksploatują sieć kolejową zelektryfikowaną oboma rodzajami napięcia 3 kV DC i 25 kV 50 Hz (tabl. 1), przy czym około połowa linii kolejowych jest zelektryfikowana, z lekką przewagą napięcia 25 kV 50 Hz (5500 km wobec 4500 km), rysunek 8. Choć większość obecnie eksploatowanego

Tablica 1

Specyfika zelektryfikowanych sieci kolejowych napięciem 3 kV DC i 25 kV 50 Hz w Czechach, Słowacji, Polsce i Ukrainie

| Parametr | Czechy | Słowacja | Polska | Ukraina |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| Rozstaw szyn (dominujący) [mm] | 1435 | 1435 | 1435 | 1520 |
| Stosowane napięcie na sieci kolejowej | 3 kV DC, 25 kV 50 Hz | 3 kV DC, 25 kV 50 Hz | 3 kV DC | 3 kV DC, 25 kV 50 Hz |
| Dostępność taboru 3 kV DC / 25 kV 50 Hz | duża | duża | duża / niewielka | duża |
| Dostępność taboru wielosystemowego | duża | duża | niewielka | niewielka |
| Doświadczenie z eksploatacją linii na napięciu 3 kV DC / 25 kV 50 Hz | duże | duże | duże / brak | duże |
| Doświadczenie przy budowie taboru 3 kV DC / 25 kV 50 Hz | duże | niewielkie | duże / niewielkie | średnie |
| Wybór napięcia przy elektryfikacji nowych linii, uwzględniając doświadczenie przy eksploatacji linii oraz budowie taboru | 25 kV 50 Hz | 25 kV 50 Hz | 3 kV DC | 25 kV 50 Hz |

[Opracowanie własne].

przez UZ taboru została wyprodukowana dla SŽD (przed 1991 r.), jednak producenci ukraińscy dostarczyli niewielkie liczby pojazdów (w większości nienowoczesnych) opcjonalnie na oba rodzaje napięcia. Ukraina dysponuje doświadczeniem z eksploatacją napięcia 25 kV 50 Hz, a przewaga ekonomiczna tego systemu zasilania zdecydowała o wyborze prądu przemiennego dla odcinka Kowel – Izów⁵. Nie bez znaczenia są moce lokomotyw eksploatowanych przez UZ: elektrycznych serii WL80 (6400 kW) oraz spalinowych serii 2TE116 (4500 kW) i 2M62 (2940 kW) [15]. Zatem możliwe jest zestawianie cięższych pociągów oraz uzyskanie wymiernych oszczędności w eksploatacji taboru.



Rys. 8. Lwów Gł. jest stacją zmiany napięcia – poszczególne odcinki mają opcjonalną możliwość zasilania napięciem przemiennym lub stałym: WL40-1457-1 (1520 mm, 25 kV 50 Hz) z poc. dalekobieżnym do Kijowa (wagony UZ) i WL10-1478 (1520 mm, 3 kV DC) z poc. dalekobieżnym rel. Czop – Kijów – Moskwa (wagony RŽD) (28.04.2013 r.) [fot. M. Graff]

Dla strony polskiej, potencjalny wybór napięcia 25 kV 50 Hz, nawet dla odcinka granicznego LHS, w tym stacji Hrubieszów LHS, wiązałby się nie tylko z koniecznością poznania specyfiki nowego napięcia, ale także uzyskaniem taboru na prąd przemienny⁶, który w Polsce dopiero zaczyna być produkowany, np. dwusystemowe lokomotywy *Dragon* serii ET43 (Newag) dla PKP Cargo, czy zespoły *Elf II* serii 654 dla przewoźnika *RegioJet* z Czech (Pesa)⁷. Zatem dla UZ sama elektryfikacja odcinka Kowel – Izów oraz wybór napięcia były znacznie prostsze niż dla LHS i PKP. Natomiast decyzja o pozostawieniu napięcia 3 kV DC dla przyszłej elektryfikacji LHS wiązałaby się z koniecznością utworzenia odcinka przejściowego, ewentualnie stacji zmiany napięcia, czy elektryfikacji wschodniej części stacji Hrubieszów LHS napięciem 25 kV 50 Hz, a zachodniej – 3 kV DC (analogia do stacji DB Netz Frankfurt (Oder) Oderbrücke na linii Berlin – Warszawa). Prawdopodobnie zdecydowano by się na drugie rozwiązanie, ponieważ nie wymagałoby to pozyskania taboru dwusystemowego, co w przypadku LHS i tak podnosiłoby duże koszty elektryfikacji. Dla UZ byłoby wprawdzie wykonalne, chociaż kłopotliwe z powodu niewielkiej liczby podobnych lokomotyw (seria WL82). Niewykluczona elektryfikacja sektorowa, jak opisana dla stacji Hrubieszów LHS, mogłaby zostać zrealizowana dla stacji Izów, czy raczej przystosowania części ww. stacji do zasilania także napięciem 3 kV DC, poza 25 kV 50 Hz (rys. 9a, b).

a)



b)



Rys. 9. Przewody jezdne sieci trakcyjnej i różnice między systemem 3 kV oraz 25 kV): a) stacja LG Wilno (1520 mm, 25 kV 50 Hz (20.03.2016 r.), b) RŽD Swietlogorsk-2 (niem. Rauschen-Düne, pol. Ruszowice), O. Królewiecki (1520 mm, 3 kV DC) (2.05.2016 r.) [fot. M. Graff]

⁵ Linia biegnąca do Kowla od strony wschodniej jest zelektryfikowana napięciem 25 kV 50 Hz.

⁶ Lokomotywy dla LHS miałyby rozstaw kół 1520 mm, co jednak nie wydaje się problemem przy obecnej modułowej budowie taboru.

⁷ Obecnie Alstom realizuje kontrakt na dostawę wielosystemowych zespołów trakcyjnych dla NS i SNCB (pojazdy powstają w zakładzie koncernu w Chorzowie), jednak korzysta z technologii opracowanej wcześniej poza Polską.

Napięcie 25 kV 50 Hz ma znacznie większy zakres tolerancji w porównaniu z 3 kV DC (tab. 2), co jest o tyle możliwe, iż wahania napięcia są tłumione przez transformator w znacznie większym stopniu niż filtry i dławiki napięcia dla systemu zasilania 3 kV DC [16–18]. Kryteria oceny współpracy między pantografem a górną siecią jezdnią w aspekcie zapewnienia interoperacyjności są określone przez normę EN 50367, a koordynacja pomiędzy systemem zasilania a taborem w aspekcie interoperacyjności – przez normę EN 50388 [19, 20].

Tablica 2

Wahania wartości napięcia dla systemów zasilania 25 kV 50 Hz i 3 kV DC, według BS EN 50163:2004

| System zasilania | 25 kV 50 Hz | 3 kV DC |
|---|-------------|---------|
| Napięcie nominalne [kV] | 25 | 3,0 |
| Napięcie minimalne eksploatacyjne [kV] | 19 | 2,0 |
| Napięcie minimalne dozwolone [kV] | 17,5 | 2,0 |
| Napięcie maksymalne eksploatacyjne [kV] | 27,5 | 3,6 |
| Napięcie maksymalne dozwolone [kV] | 29 | 3,9 |
| Zakres dopuszczalnych napięć [kV] | 19–27,5 | 2,0–3,6 |

[Opracowanie własne].

4. Perspektywy wdrożenia napięcia 25 kV 50 Hz w Polsce

Obecnie, wdrożenie napięcia 25 kV 50 Hz w Polsce wydaje się możliwe w przyszłości, po zbudowaniu linii Y [21], ewentualnie na CMK [22], co wynika z dużego natężenia ruchu oraz dużych prędkości (> 200–250 km/h) wymuszających duże zapotrzebowanie na moc podstacji zasilających (tabl. 3). Korzystając z przykładów z Czech czy Słowacji, reelektryfikacja linii jest uzasadniona, ale musi być rozłożona w czasie, aby uniknąć dużych kosztów (casus CMK).

Dla LHS, która jest linią towarową (przebiega w oddaleniu od większych czy nawet średnich ośrodków miejskich), perspektywa uruchomienia ruchu pasażerskiego jest nierealna [23], a obecne natężenie ruchu towarowego jest zbyt niskie, aby elektryfikacja miała sens (rys. 10). Wydaje się także, iż konieczność wyasygnowania > 1,0–1,5 mld PLN z budżetu państwa (LHS nie uzyska podobnej kwoty, np. z kredytów bankowych bez poręczenia państwa) spowoduje zaniechanie elektryfikacji LHS.

Proces odbudowy Ukrainy, czy obecnie tranzyt ukraińskiego zboża eksportowego będzie wymagał od strony polskiej zapewnienia wydajnego transportu, w tym kolejowego. Zatem LHS – z racji wyposażenia w stacje

Tablica 3

Linie kolejowe w Polsce z perspektywą wdrożenia napięcia 25 kV 50 Hz

| Linia | CMK | LHS | Linia Y |
|--|---|---------------------|---|
| Status linii | w eksploatacji | w eksploatacji | planowana |
| Rodzaj linii | dużych prędkości z ruchem mieszanym | klasyczna | dużych prędkości |
| Dominujące przeznaczenie linii | ruch pasażerski, w mniejszym stopniu towarowy | ruch towarowy | ruch pasażerski |
| Długość linii [km] | 223,8 | 394,6 | ~450 |
| Prędkość eksploatacyjna [km/h] | 200–250 | 80–100 | 300–350 |
| Rozstaw szyn [mm] | 1435 | 1520 | 1435 |
| Elektryfikacja | 3 kV DC | brak | 25 kV 50 Hz |
| Eksploatowany tabor (dominujący) | lokomotywy + wagony oraz ezt | lokomotywy + wagony | ezt dużych prędkości |
| Liczba pociągów na dobę | 30–40 (obecnie) | 10 (obecnie) | 30–40 (szacunkowo) |
| Korzyści z wprowadzenia napięcia 25 kV 50 Hz | niższe koszty eksploatacyjne | obecnie umiarkowane | stosowanie napięcia 3 kV DC na liniach dużych prędkości nie jest dopuszczalne (wynika to z rozporządzenia UE dot. interoperacyjności kolei [24–26]) |
| Celowość wprowadzenia napięcia 25 kV 50 Hz | racjonalna w przyszłości | duże w przyszłości | uzasadniona dużym natężeniem ruchu |

[Opracowanie własne].

przeładunkowe (1435 + 1520 mm) potencjalnie może odciążyć główne stacje graniczne z Ukrainą takie, jak Medyka, Żurawica, Dorohusk. Elektryfikacja linii – na przykładzie zrealizowanych w 2021 r. LK 71 (odcinek Rzeszów – Ocice) i w 2020 r. LK 68 (odcinek Stalowa Wola Rozwadów – Lublin Zemborzyce) wpływa na wzrost przepustowości, podniesienie prędkości czy zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych. Zatem elektryfikacja LHS może mieć uzasadnienie już w perspektywie średnioterminowej.



Rys. 10. Stacja Sławków LHS / LK 65 (1520 mm), zachodnia głowica wyjazdowa (25.06.2016 r.) [fot. M. Graff]

5. Wnioski

Unifikacja systemów zasilania w kierunku reelektryfikacji (3 kV DC → 25 kV 50 Hz) w Czechach i Słowacji wydaje się logiczna zwłaszcza, iż prowadzi do obniżenia kosztów utrzymania sieci kolejowej. Rozłożenie procesu na lata, powiązanie całości z sukcesywną modernizacją poszczególnych linii powoduje, iż możliwe jest obniżenie koniecznych do poniesienia nakładów. W Polsce, napięcie 25 kV 50 Hz prawdopodobnie pojawi się w perspektywie 10–15 lat wraz z budową linii Y oraz linii Rail Baltica, na odcinku pomiędzy Polską i Litwą. Perspektywę zmiany napięcia na całej czy znacznej części sieci PLK należy uznać raczej za mało prawdopodobną z powodu znacznych kosztów. Elektryfikacja LHS, jeśli miałaby być zrealizowana i to napięciem 25 kV 50 Hz, obecnie nie jest realna do przeprowadzenia z przyczyn ekonomicznych.

Literatura

1. *Historia elektryki polskiej* (praca zbiorowa), Tom V – Trakcja elektryczna, WN-T, Warszawa, 1971.
2. Szafranski Z.: *Stały czy przemienny?* Kurier Kolejowy 07.07.2019.
3. Madrjas J.: *Polska będzie miała nowe napięcie sieci trakcyjnej. 25 kV na nowych liniach* Rynek Kolejowy 28.02.2019.
4. Madrjas J. *Zmiana napięcia na 25 kV w całej Polsce? Eksperti mają wątpliwości* Rynek Kolejowy 05.03.2019.
5. *PKP LHS analizuje możliwość elektryfikacji linii szerokotorowej* Wydarzenia LHS 13.12.2017.
6. *Nacziatłas' elektrifikacyja železnoj dorogi ot Kowiewla do polskoj granicy* Passażyrskij transport (Началась электрификация железной дороги от Ковеля до польской границы Пассажи́рский транспорт) 02.08.2021.
7. Kuś Ł.: *Koleje Ukrainie elektryfikują linię Kowel – Izów – granica państwowa* Intermodal.news.pl (03.08.2021).
8. Kolisniczenko W.: *Ukrzaliznicja zawieršyla elektrifikacyju ucziastka Kowiel – Izow – Gosgranica* [Колисниченко В. Укрзалізниця завершила электрификацию участка Ковель – Изов – Госграница] delo.ua 16.06.2022.
9. Szymajda M.: *Pomorskie potwierdza: Będą elektryczne pociągi na PKM*, Rynek Kolejowy 23.05.2023.
10. *Koncepcje přechodu na jednotnou napájecí soustavu na české železniční síti* 20.01.2017. Železniční infrastruktura <https://www.mdcz.cz/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura/Koncepcje-prechodu-na-jednotnou-napajeci-soustavu-n>.
11. *SŽ chystá „jízdni řád” pro přepínání na střídavý proud v Polabí* ZDopravy.cz 02.01.2020. <https://zdopravy.cz/szdc-chysta-jizdni-rad-pro-prepinani-na-stridavy-proud-v-polabi-39705/>.
12. *Work starts on Czech-Polish border line upgrade* International Railway Journal Sep 28, 2020.
13. Kuchta T. *Nový styk napěťových soustav v Púchově* Železniční magazín 7/2015.
14. Pernička J.: *Z Púchova do Považské Bystrice po nové trati (částečně)*, Železniční magazín, 2020, nr 10.
15. Badionkin S., Graff M., Kulgejko M.: *Koleje Ukrainie w 2017 roku*, TTS Technika Transportu Szynowego, IN-W TTS Radom, 2018, nr 4.
16. Kocaarslan İ. et.al.: *Creation of a dynamic model of the electrification and traction power system of a 25 kV AC feed railway line together with analysis of different operation scenarios using MATLAB*, Simulink Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences (2017) 25: 4254–4267.
17. Xu S.Y., Li W., Wang Y.Q.: *Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit systems*, IEEE T Veh Technol 2013; 62: 3569–3580.
18. Raygani S.V. et.al.: *Load ow analysis and future development study for an AC electric railway*, IET Electr Syst Transport 2012; 2: 139–147.
19. Rojek A., Kaniewski M., Czarniecki R.: *Interoperacyjność układu zasilania trakcji elektrycznej – nowe normy EN 50367 i EN 50388*, TTS Technika Transportu Szynowego Emi-Press Łódź 1–2/2006.

20. Czarnecki R., Rojek A.: *Prace normalizacyjne w dziedzinie systemów zasilania trakcji elektrycznej*, XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2004, Zakopane, 2004.
21. Celiński K.: *Koleje Dużych Prędkości PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.*, Warszawa 4.07.2007.
22. Augustowski T., Gołaszewski A.: *Czterdzieści lat Centralnej Magistrali Kolejowej*, Problemy Kolejnictwa, 2015, z. 167.
23. Graff M.: *Linia Hutnicza Szerokotorowa*, TTS Technika transportu szynowego, Instytut Naukowo-Wydawniczy TTS Radom, 2019, nr 4, s. 35–45.
24. *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej* (wersja przekształcona) (Tekst mający znaczenie dla EOG) L 138/44 Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej 26.05.2016.
25. *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 7 czerwca 2021 r. w sprawie interoperacyjności* Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej Warszawa, dnia 9 czerwca 2021 r. Poz. 1042.
26. *Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1301/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Energia” systemu kolei w Unii.*

Współpraca i podziękowania – inż. Jaromír Pernička (Railvolution, Železniční magazín).