

Urządzenia prostownikowe w podstacjach trakcyjnych systemu zasilania trakcyjnego prądu stałego

Włodzimierz KRUCZEK¹

Streszczenie

W artykule przedstawiono rozwój systemu zasilania trakcyjnego 3 kV prądu stałego, od momentu uruchomienia na linii kolejowej pierwszego systemu zasilania trakcyjnego prądem stałym do czasów współczesnych, ze zwróceniem szczególnej uwagi na rozwój urządzeń prostownikowych. Opisano urządzenia prostownikowe stosowane w systemach zasilania trakcyjnego prądu stałego oraz zasadę działania poszczególnych urządzeń prostownikowych. Scharakteryzowano wymagania wynikające z przepisów dotyczących współczesnych prostowników trakcyjnych, montowanych w podstacjach trakcyjnych zasilających linie kolejowe PKP PLK. Przedstawiono niektóre wyniki badań laboratoryjnych zespołów prostownikowych przeprowadzonych w Zakładzie Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa oraz możliwości techniczno-badawcze w zakresie badań zespołów prostownikowych.

Słowa kluczowe: Trakcja prądu stałego, urządzenia prostownikowe, prostowniki trakcyjne

1. Wstęp

Początki trakcji elektrycznej na prąd stały sięgają XIX wieku. W 1879 roku na wystawie w Berlinie zaprezentowano kolejkę Wernera Siemens, która obwoziła zwiedzających po trasie o długości 300 m. Kolejka była zasilana napięciem 150 V DC za pomocą trzeciej szyny, umieszczonej pomiędzy szynami jezdny. Dwa lata później w Lichterfelde na przedmieściach Berlina, uruchomiono pierwszy tramwaj elektryczny, zasilany prądem o stałym napięciu 180 V. Kursował on na odcinku o długości 2,4 km po, dostosowanej do ruchu pojazdu elektrycznego, istniejącej trasie linii tramwaju konnego. Na rysunku 1 przedstawiono tablicę pamiątkową, znajdującą się w pobliżu dworca kolejowego Lichterfelde Ost w Berlinie, upamiętniającą pierwszą na świecie elektryczną linię tramwajową.

Wybrany system zasilania przez dwie szyny sprawiał wiele kłopotów. Chociaż wstęp na tory był zabroniony, źródła historyczne [12] podają, że wiele ludzi i koni zostało porażonych prądem elektrycznym. Odnotowano również akty wandalizmu, polegające na zarzucaniu na tory siatki metalowej, co dawało wizualne efekty powstawania łuków oraz iskier elektrycznych. W 1891 roku linię przebudowano, wprowadzając zasilanie z napowietrznego przewodu jezdny. W ten sposób na linii prowadzono ruch tramwajów elektrycznych do 1931 roku. Linia była zasilana bezpośrednio z przeznaczonej dla niej elektrowni prądu stałego. System zasilania trakcyjnego

prądu stałego, o strukturze podobnej do istniejącej obecnie, miał swoje początki na przełomie XIX i XX wieku.



Rys. 1. Tablica pamiątkowa upamiętniająca pierwszą linię tramwaju elektrycznego [12]

Duży ruch pociągów trakcji parowej w Nowym Jorku na Manhattanie powodował znaczne zadymienie i degradację

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: wkruczek@ikolej.pl.

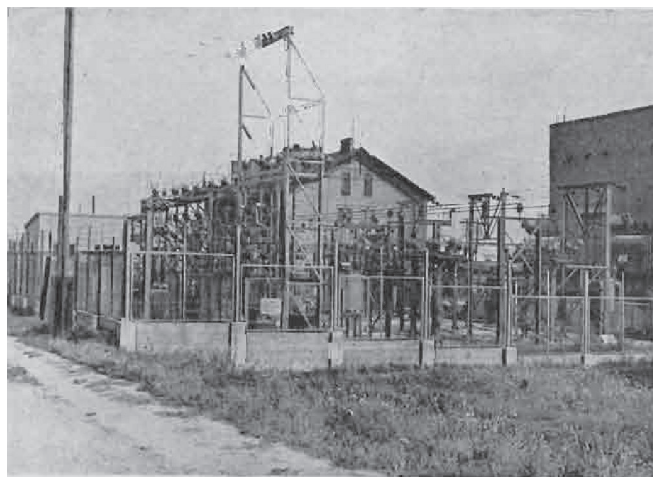
środowiska. Z tego względu pod koniec XIX wieku cztery główne tory, prowadzące do dworca Grand Central, przebudowano i poprowadzono w tunelu pod Park Avenue, co doprowadziło do katastrofy kolejowej. W dniu 8 stycznia 1902 roku, z powodu dużego zadymienia tunelu, pociąg ekspresowy przejechał sygnał świetlny i uderzył w tył pociągu podmiejskiego. Wypadek ten, do tej pory jest uznawany za najtragiczniejszy wypadek kolejowy w Nowym Jorku. W wyniku tego wypadku zakazano ruchu lokomotyw parowych, a przedsiębiorstwo kolejowe New York Central Railroad podjęło się elektryfikacji tej linii kolejowej. Rezultatem tej decyzji była budowa dzisiejszego Grand Central Terminal, który został otwarty w 1913 r. i elektryfikacja linii kolejowych w Nowym Jorku. Linie kolejowe zelektryfikowano napięciem 600 V DC z wykorzystaniem trzeciej szyny. Cała instalacja została zaprojektowana przez General Electric Company. Pociągi były prowadzone lokomotywami elektrycznymi znanymi jako „S motors”.

Do zasilania powstałego systemu trakcyjnego wybudowano dwie elektrownie prądu zmiennego, wytwarzające napięcie trójfazowe 11 kV o częstotliwości 25 Hz. Prąd trójfazowy przesyłano do wielu podstacji trakcyjnych, zlokalizowanych wzdłuż linii kolejowych. Zadaniem podstacji była przemiana zmiennego napięcia trójfazowego na napięcie stałe o wartości 600 V. Od tego czasu, tj. od początku XX wieku, do chwili obecnej struktura systemu zasilania pojazdów trakcyjnych prądem stałym wygląda podobnie. Wartość napięcia 600 V DC utrzymała się do tej pory przy zasilaniu linii metra i sieci tramwajowej. Do zasilania linii kolejowych stosuje się obecnie napięcie 3 kV DC, ale w niektórych państwach lokalnie jest jeszcze eksploatowany system 1,5 kV DC. Transformacja napięcia i jego prostowanie w systemie napięcia trakcyjnego prądu stałego, odbywa się zawsze w podstacjach trakcyjnych, w których jednym z najważniejszych urządzeń są prostowniki trakcyjne.

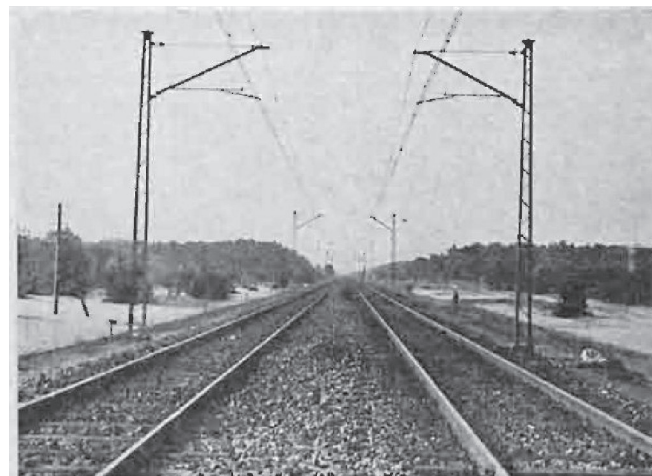
Pierwszą linią kolejową zelektryfikowaną napięciem 3 kV DC była linia kolejowa Chicago, Milwaukee, St. Paul and Pacific (CMStP & P), bardziej znana jako Milwaukee Road, po której pociągi elektryczne zaczęły kursować w 1915 r. [6]. Był to pierwszy na świecie tak duży projekt elektryfikacyjny sieci kolejowej, a dodatkowym utrudnieniem były warunki terenowe, gdyż linia przecina pięć pasm górskich. Do 1920 r. zelektryfikowano ponad 1050 km linii. Podstacje trakcyjne były zasilane liniami przesyłowymi prądu zmiennego o napięciu 100 kV i wyposażone w transformatory 100/2,3 kV. Do przemiany energii prądu zmiennego na prąd stały służyły zespoły maszynowe, składające się z silnika asynchronicznego napędzającego dwie prądnice prądu stałego 1,5 kV połączone szeregowo.

W Polsce, pierwszy projekt elektryfikacji Kolejowego Węzła Warszawskiego był opracowany w 1921 roku przez prof. R. Podoskiego. Do elektryfikacji przystąpiono dopiero w 1933 roku, w wyniku rozstrzygnięcia ogłoszonego przez Ministerstwo Komunikacji przetargu, po podpisaniu umowy z dwiema angielskimi firmami: The English Electric Co. Ltd i The Metropolitan Vickers Electrical Export Co. Ltd [7]. Do

wybuchu wojny zelektryfikowano trzy linie w Węźle Warszawskim: linię dęblińską – do Otwocka, linię siedlecką – do Mińska Mazowieckiego i linię piotrkowską – do Żyrardowa. Podstacje trakcyjne były zasilane napięciem przemiennym 35 kV, z dwóch elektrowni: Warszawskiej i Okręgu Warszawskiego w Pruszkowie [7]. Rysunek 2 przedstawia przedwojenną podstację trakcyjną, na rysunku 3 przedstawiono widok zelektryfikowanego odcinka linii kolejowej w 1937 roku.



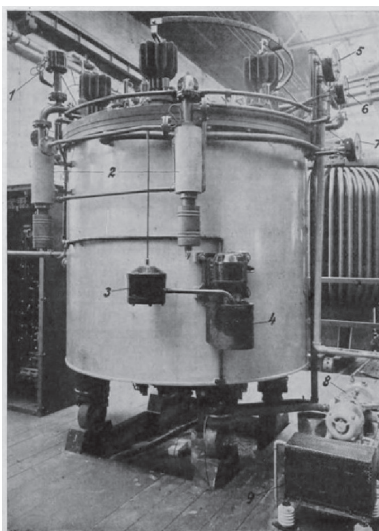
Rys. 2. Widok przedwojennej podstacji trakcyjnej [7]



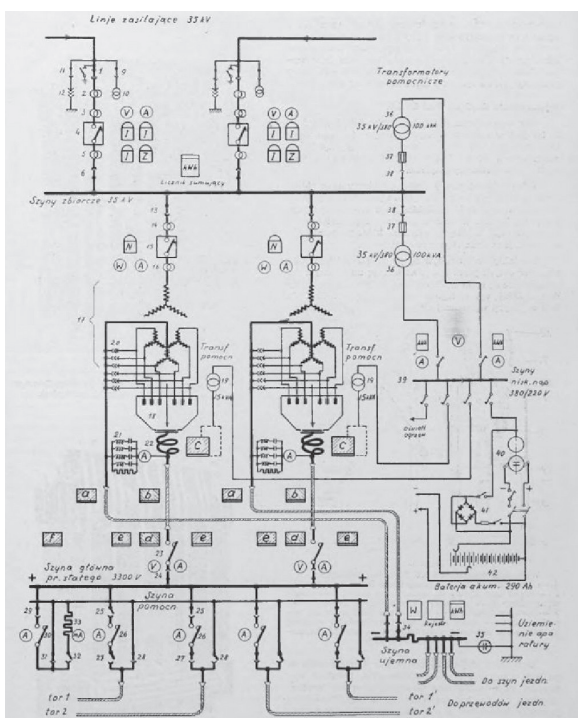
Rys. 3. Widok zelektryfikowanej linii kolejowej w Polsce w roku 1937 [7]

Główna różnica pomiędzy współczesną podstacją trakcyjną i rozwiązaniem przedwojennym występuje w zespole prostownikowym. W rozwiązaniu sprzed 1939 r., do zasilania prostownika rtęciowego sześciopododowego, stosowano transformatory o mocy 2500 kW, trójfazowe o przekładni $35000/2650 \sqrt{3}/57,8\sqrt{3}$. W tych transformatorach uzwojenie pierwotne połączone w gwiazdę, główne uzwojenie wtórne jest połączone w gwiazdę sześciopododową, której fazy są przyłączone do anod prostownika, a zero jest ujemnym biegunem systemu prądu stałego. Trzecie uzwojenie jest pomocniczym uzwojeniem wtórnym sześciopododowym, służącym do formowania prostownika (poddanie obciążeniu nowo zmontowanego prostownika zasilanego niskim napię-

ciem ze wspomnianego uzwojenia, przy stałej obserwacji i przy nieustannym pompowaniu powietrza w celu podtrzymania próżni, aż do usunięcia gazów zawartych w ścianach naczyń oraz w materiale anod). Taki układ podstacji trakcyjnych stosowany był również w nowo budowanych podstacjach powojennych do czasu wprowadzenia prostowników półprzewodnikowych. Na rysunku 4 przedstawiono stosowany na podstacjach trakcyjnych prostownik rtęciowy [1], rysunek 5 przedstawia schemat obwodu głównej podstacji trakcyjnych budowanych przed 1939 rokiem, zasilających linie Warszawskiego Węzła Kolejowego [1].



Rys. 4. Prostownik rtęciowy produkcji firmy English Electric, stosowany na polskich podstacjach trakcyjnych [1]



Rys. 5. Schemat obwodu głównej podstacji trakcyjnej zasilającej w 1938 roku linie Warszawskiego Węzła Kolejowego [1]

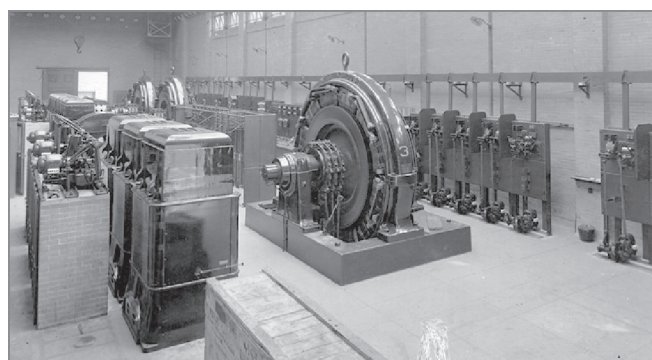
Podczas II Wojny Światowej wszystkie urządzenia trakcyjne z terenu Polski, w tym również tabor elektryczny, zostały zrabowane i wywiezione przez Niemców.

2. Przemiana energii prądu zmiennego na energię prądu stałego

W początkowym okresie rozwoju trakcji elektrycznej, proces przemiany energii prądu zmiennego na energię prądu stałego był realizowany w maszynach elektrycznych. Pierwsze podstacje były wyposażane w wirujące przetwornice dwumaszynowe, w których silnik synchroniczny prądu zmiennego napędzał prądnicę prądu stałego o odpowiednim napięciu. Ten rodzaj przetwarzania energii miał jednak wiele wad takich, jak: mała sprawność, konieczność częstej konserwacji, duże gabaryty obydwu maszyn elektrycznych oraz przeniesienie dużej mocy mechanicznej na wale zespołu maszyn. Innymi maszynami, wykorzystywanymi do przemiany energii prądu zmiennego na prąd stały, były tak zwane przetwornice jednotwornikowe (ang. *rotary converters*). W następnych latach, wraz z rozwojem energoelektroniki, proces ten był realizowany przez tzw. zawory jonowe (prostowniki rtęciowe, ignitrony, tyratrony). Współcześnie stosowane są tylko elementy półprzewodnikowe.

2.1. Przetwarzanie elektromaszynowe

W 1906 roku w Nowym Jorku, przy stacji metra 50. Ulica oddano do eksploatacji jedną z pierwszych podstacji trakcyjnych prądu stałego. Zamontowano w niej 7 przetwornic jednotwornikowych o łącznej mocy trakcyjnej 14 500 kW. Rysunek 6 przedstawia widok tej podstacji z zamontowaną przetwornicą jednotwornikową.



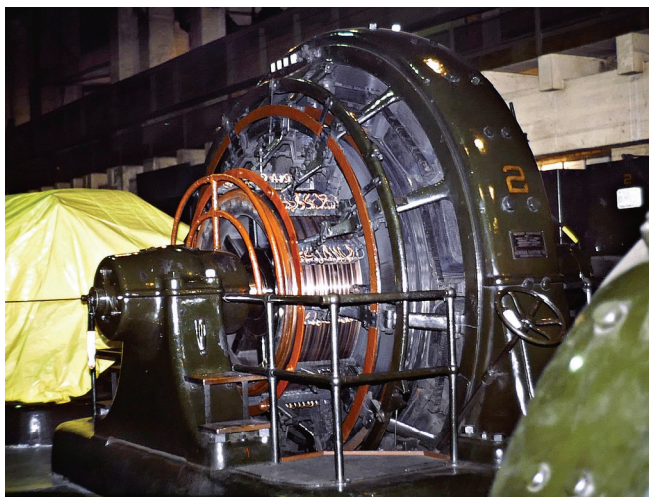
Rys. 6. Wnętrze podstacji trakcyjnej nr 1 przy 50. Ulicy [13]

Przetwornica jednotwornikowa jest maszyną elektryczną, która łączy cechy maszyny prądu stałego i maszyny synchronicznej. Jej zaletą, w porównaniu do zespołu dwóch oddzielnych maszyn połączonych mechanicznie wspólnym wałem, jest wyeliminowanie konwersji energii elektrycznej na mechaniczną i następnie konwersji energii mechanicznej na energię elektryczną. Część energii elektrycznej

przepływa bezpośrednio z wejścia na wyjście, dzięki czemu konwerter obrotowy jest znacznie mniejszy i lżejszy niż zestaw silnika i prądnicy o równoważnej mocy.

Do utrzymania w ruchu twornika przetwornicy jednotwornikowej jest konieczny tylko moment obrotowy, pokonujący jedynie straty mechaniczne. Przez wał urządzenia nie przenosi się moment odpowiadający jego mocy obciążenia. Napęd polega na silnikowym działaniu części synchronicznej przetwornicy. W nomenklaturze technicznej maszyna ta jest często nazywana transformatorem wirującym. Maszyny tego typu były powszechnie stosowane na podstacjach trakcyjnych prądu stałego. Nawet powszechna dostępność w późniejszym czasie prostowników rtęciowych i prostowników półprzewodnikowych nie eliminowała tych maszyn z niektórych podstacji trakcyjnych, gdyż były one niezawodne i pracowały bezobsługowo. Ponadto miały one zaletę, niestety niewykorzystywaną podczas ich pracy, polegającą na tym, że jak każda maszyna elektryczna, mogły one przejść do stanu pracy prądnicowej i wówczas oddawać energię do zasilającej sieci trójfazowej. Do tego konieczne jednak było hamowanie odzyskowe w pojazdach trakcyjnych, które w tamtych czasach nie było jeszcze stosowane.

Na rysunku 7 przedstawiono widok przetwornicy jednotwornikowej. Urządzenie to pracowało do 1989 r. w podstacji trakcyjnej metra w Nowym Jorku, do której w 1929 r. przeniesiono większość wyposażenia z likwidowanej podstacji trakcyjnej przy 50. Ulicy.



Rys. 7. Jeden z ostatnich zachowanych egzemplarzy przetwornicy jednotwornikowej, pracującej do 1989 roku [14]

2.2. Prostowniki rtęciowe

Prostowniki rtęciowe (ang. *mercury – arc rectifiers*) należą do grupy tzw. urządzeń energoelektroniki jonowej. Prace nad zastosowaniem tego typu urządzeń w trakcji elektrycznej trwały od 1902 roku, kiedy to Peter Cooper Hewitt (1861–1921) wynalazł pierwszą lampę rtęciową. W latach 20. XX wieku, ze względu na zbyt małe możliwości prądo-

we i dużą zawodność, prostowniki rtęciowe stosowano na podstacjach trakcyjnych w ograniczonym stopniu, jako prostowniki do ładowania baterii akumulatorów i ewentualnie jako dodatkowe urządzenia wzmacniające do przetwornic obrotowych. Jako główne urządzenia prostownikowe na podstacjach trakcyjnych prądu stałego, prostowniki rtęciowe zaczęto stosować w latach 30. XX wieku. Pierwszy prostownik rtęciowy o mocy 3000 kW w podstacji trakcyjnej prądu stałego zamontowano w podstacji zasilającej metra w Nowym Jorku w 1930 roku. Również w 1930 roku, firma British Thomson-Houston dostarczyła prostowniki o mocy 1500 kW, 615 V do zasilania trakcji elektrycznej metra w Londynie. Następnym etapem rozwoju było zastosowanie chłodzenia wodnego oraz obudowy metalowej, umożliwiającej uzyskanie mocy prostowników rtęciowych do 2500 kW i wyjściowego napięcia pracy do 3 kV.

Zasada działania prostownika rtęciowego (łukowego) polega na wykorzystaniu zjawiska przepływu prądu elektrycznego w jednym kierunku w oparach rtęci. Rtęć stanowi katodę lampy. Obudowa szklana lub metalowa w zastosowaniach trakcyjnych miała sześć ramion, w których były umieszczone anody z grafitowych prętów. Do zainicjowania pracy prostownika rtęciowego wymagane było mechaniczne zbliżenie jednej z anod do katody w celu zainicjowania przepływu prądu. Mimo niewątpliwych zalet, w porównaniu z przetwornicami mechanicznymi (mniejsza masa, mniejszy koszt, mniejsze gabaryty), prostowniki rtęciowe miały również wady, z których najważniejsza, to brak odporności na wstrząsy, skomplikowany układ zapłonu i konieczność podtrzymania prądu prostownika przy braku obciążenia. Ogólny widok prostownika rtęciowego w obudowie szklanej do zastosowań trakcyjnych przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Widok prostownika rtęciowego [15]

W Polsce, pod koniec 1949 r., w zakładach Katoda w Łodzi wykonano prototyp prostownika rtęciowego, oznaczonego PR-05. Był to prostownik metalowy, chłodzony powietrzem, pompowy, z uszczelnieniami gumowymi na prąd znamionowy 500 A i napięcie 600 V. Drugą serię prostowników na prąd 600 A wyprodukowano w 1950 roku i oznaczono symbolem

PR-06 [2]. Pomimo prób, w Polsce nie opracowano prostownika trakcyjnego do podstacji trakcyjnych 3 kV prądu stałego i w związku z tym, aż do czasu wprowadzenia prostowników półprzewodnikowych, na podstacjach trakcyjnych 3 kV DC stosowano importowane prostowniki rtęciowe.

2.3. Prostowniki półprzewodnikowe

Opanowanie produkcji diody półprzewodnikowej dużej mocy, umożliwiło od 1955 roku wprowadzenie w podstacjach trakcyjnych prostowników diodowych. Ograniczenie zastosowań prostowników diodowych do podstacji tramwajowych i metra zostało szybko zniwelowane, gdyż od lat 60. XX wieku były już dostępne diody prostownicze krzemowe na prąd 600 A i napięcia wsteczne do 2 kV. Z tych elementów wiele firm budowało prostowniki trakcyjne do podstacji w systemie zasilania trakcyjnego 3 kV. Produkcja prostowników z elementów półprzewodnikowych nie była już tak skomplikowana, jak produkcja prostowników rtęciowych. Niewątpliwie zalety prostowników półprzewodnikowych, z których najważniejsze: brak wydostawania się oparów rtęci przy uszkodzeniu lub rozszczelnieniu obudowy, prostota budowy, niezawodność, łatwość automatyzacji i możliwość pracy bezobsługowej, doprowadziły do szybkiego i całkowitego wyeliminowania prostowników rtęciowych.

Produkcję prostowników diodowych do podstacji trakcyjnych 3 kV, rozpoczęła w Polsce w 1967 roku firma ELTA z Łodzi. Opracowano prostownik typu PK-0,66/3,3 o mocy 2180 kW. Następnie powstawały zespoły prostownikowe o coraz większej mocy. Prostownikiem, który spełniał oczekiwania względem mocy na podstacjach trakcyjnych, był prostownik oznaczony symbolem PK 17/3,3-3 o mocy 5600 kW i znamionowym prądzie wyjściowym 1700 A (rys. 9). Te prostowniki były montowane w większości podstacji trakcyjnych PKP i można je jeszcze spotkać w niektórych podstacjach trakcyjnych.



Rys. 9. Prostownik PK 17/3,3-3 [fot. W. Kruczek]

Prostowniki te mają strukturę mostka trójfazowego o szeregowo i równolegle połączonych diodach. W prostowniku PK 17/3,3-3 zastosowano 288 diod o prądzie znamionowym 150 A. Struktura mostka trójfazowego powoduje, że na wyjściu prostownika jest otrzymywane napięcie pulsują-

ce o sześciu pulsach w okresie. Wiadomo, że przekształcanie napięcia zmiennego na napięcie stałe w prostowniku jest związane z generowaniem wyższych harmonicznych napięcia o częstotliwościach, wynikających z zależności (1):

$$fh_n = npf_{sz} \quad (1)$$

gdzie:

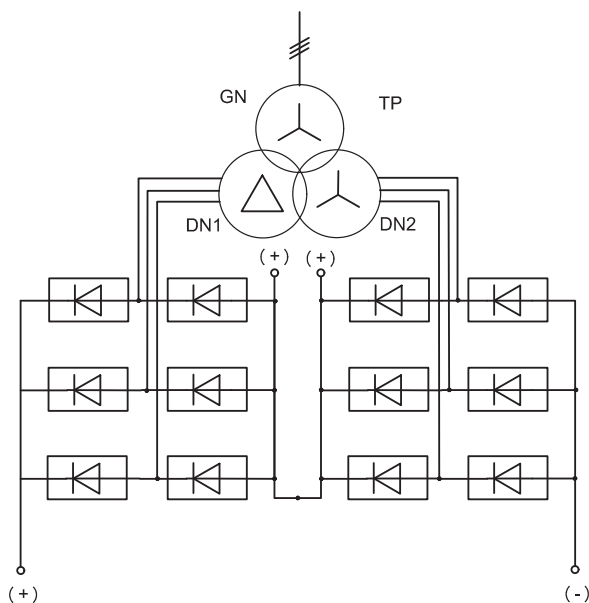
fh_n – częstotliwość harmonicznej,

n – liczba całkowita (1,2,3...),

p – liczba pulsów w okresie (zależna od struktury prostownika),

f_{sz} – częstotliwość sieci zasilającej prostownik.

Podstawiając dane do zależności 1, otrzymuje się częstotliwości napięć harmonicznych po stronie prądu stałego. I tak harmoniczne napięcia charakterystyczne dla prostownika 6-pulsowego wynoszą: 300 Hz, 600 Hz, 900 Hz, 1200 Hz, (...). Szkodliwość oddziaływania wyższych harmonicznych na systemy współpracujące z siecią trakcyjną jest znaczna, np. dla pojazdów trakcyjnych – zbędne nagrzewanie silników, zakłócenia w pracy systemów SRK i zakłócenia w pracy systemów telekomunikacji analogowej. Z tego powodu konieczne jest wyeliminowanie tych harmonicznych przez urządzenia wygładzające, co zwłaszcza dla niskich częstotliwości bywa kłopotliwe w realizacji. Ponadto, prostownik oddziałuje negatywnie na sieć zasilającą, w której powstają harmoniczne prądu sieci zasilającej. W związku z tym, konieczne było opracowanie zespołów prostownikowych 12-pulsowych. Wszystkie zespoły prostownikowe, obecnie wprowadzane do eksploatacji w podstacjach trakcyjnych, są 12-pulsowe i mają strukturę dwóch mostków trójfazowych połączonych szeregowo (rys. 10).



Rys. 10. Struktura prostownika trakcyjnego 12-pulsowego (dwa mostki trójfazowe połączone szeregowo): TP – transformator prostownikowy, GN – uzwojenie górnego napięcia, DN1 – uzwojenie dolnego napięcia połączone w trójkąt, DN2 – uzwojenie dolnego napięcia połączone w gwiazdę [rys. W. Kruczek]

2.4. Wymagania dla nowych konstrukcji zespołów prostownikowych zasilających linie PKP PLK

Obecnie, zgodnie z art. 4 ust. 52 Ustawy z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym (Dz.U. z 2016 r. poz. 1727 z późn. zm.) [11], podmiotem pełniącym funkcję operatora obiektów infrastruktury usługowej i dostawcą energii elektrycznej dla infrastruktury kolejowej w Polsce jest spółka PKP Energetyka S.A. Chcąc zapewnić odpowiednią jakość energii elektrycznej dostarczanej do infrastruktury kolejowej, spółka PKP Energetyka S.A. opracowała zbiór wymagań przeznaczonych do stosowania przy projektowaniu, budowie lub modernizacji podstacji trakcyjnych, kabin sekcyjnych, połączeń poprzecznych oraz stacji transformatorowych. W zeszycie VI tego zbioru zamieszczono wymagania dotyczące zespołów prostownikowych [10], w tym wymagania dotyczące parametrów wyjściowych (tabl. 1).

Tablica 1

Wymagania dotyczące parametrów wyjściowych zespołów [10]

Lp.	Nazwa parametru	Oznaczenie parametru	J.m.	Wartość
1	Znamionowy prąd wyprostowany ¹	I_N	[A]	≥ 1700
2	Znamionowe napięcie wyprostowane	U_N	[V]	3360
3	Sprawność przy obciążeniu znamionowym ²	η_{zp}	[-]	$\geq 98,6$
4	Wewnętrzna zmiana napięcia wyprostowanego w zakresie pomiędzy 5% i 100% prądu znamieniowego	ΔU_d	[V]	≤ 160
5	Wartość prądu zwarciovego ustalonego (w czasie 200 ms)	$I_{zw\ ust}$	[kA]	≥ 20
6	Klasa przeciążalności według pkt 6.5.1 PN-EN 60146-1-1:2010	–	[-]	III
7	Wartość zakłócającego napięcia psorfometrycznego ³ liczona w odniesieniu do napięcia wyjściowego	–	[%]	$\leq 0,5$
8	Przebiegi komutacyjne w zakresie prądu obciążenia od 0 do 200%	–	[V _{pp}]	≤ 600

¹ Wartość prądu znamionowego powinna być spełniona dla wszystkich komponentów zespołu prostownikowego, tj. transformatora, prostownika, dławika katodowego.

² Z uwzględnieniem strat mocy czynnej we wszystkich podzespołach zespołu prostownikowego.

³ Napięcie psorfometryczne jest to napięcie zastępcze o częstotliwości odniesienia $f_0 = 800$ Hz, które występując w linii trakcyjnej, wywołałoby taki sam efekt zakłócający w torach analogowej linii telekomunikacyjnej, jakie wywołuje napięcie wyprostowane istniejące w linii trakcyjnej wraz ze wszystkimi harmonicznymi.

3. Badania zespołów prostownikowych w Zakładzie Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa

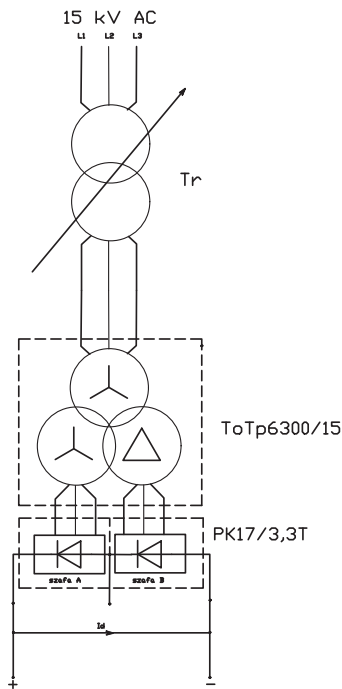
W latach 2015–2018, Zakład Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa przeprowadził badania laboratoryjne oraz nadzorował próby eksploatacyjne zespołów prostownikowych różnych producentów.

Jednym z zespołów prostownikowych, który był badany w Zakładzie Elektroenergetyki jest zespół PD17T/3,3, produkcji TRAKCJA PRKiI S.A. Prostownik współpracuje z transformatorem TOTp 6300/15 i dławikiem katodowym typu DW-4/1,7. Prostownik jest umieszczony w wolnostojącej szafie otwartej z dołu, z ażurowymi drzwiami tylnymi i przednimi u góry. Jest wyposażony w mikroprocesorowy układ diagnostyki. W szafie umieszczono dwa mostki trójfazowe połączone szeregowo. Całość jest ustawiona na stalowej ramie, która umożliwia sztywne zamocowanie. Ogólny widok prostownika przedstawiono na rysunku 11.

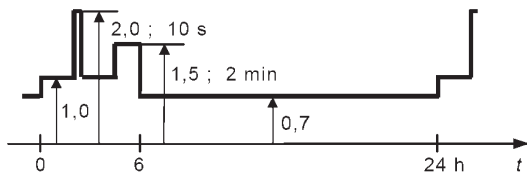


Rys. 11. Widok ogólny prostownika trakcyjnego PD17T/3,3 produkcji firmy TRAKCJA PRKiI S.A. [fot. W. Kruczek]

Przeprowadzono wiele badań laboratoryjnych, między innymi wykonano test przeciążalności prądowej i sprawdzenie klasy przeciążalności. Podczas tego badania prostownik zasilano obniżonym napięciem w układzie przedstawionym na rysunku 12. Przy zwartym wyjściu prostownika, regulowano napięcie transformatora T_r , wymuszając przepływ prądu obciążenia prostownika I_d o wartości i czasie trwania odpowiednim dla badań prostowników III klasy przeciążalności, zgodnie z rysunkiem 13. W tych warunkach sprawdzono jego funkcje kontrolne i sterownicze, a także mierzono przyrosty temperatury elementów prostownika. Wyniki pomiaru przyrostów temperatury podczas tego badania przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 12. Układ do badania przeciążalności prądowej prostownika [4]

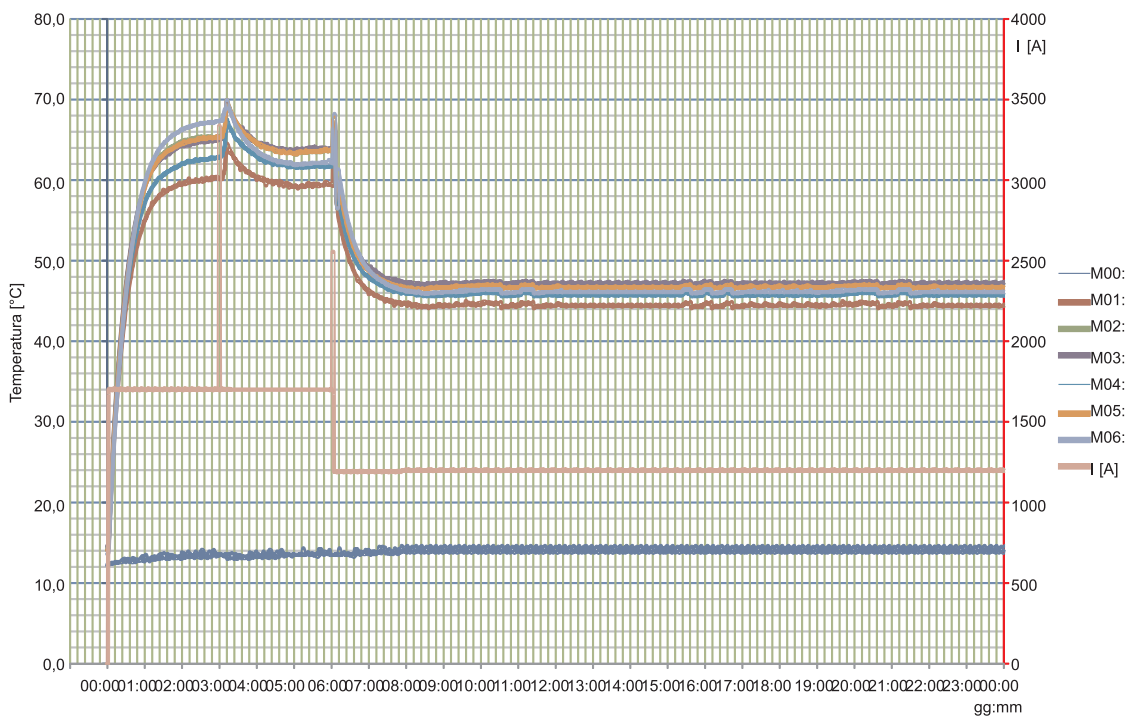


Rys. 13. Przebieg wymuszonego prądu I_d prostownika podczas badań klasy przeciążalności prostownika [4]

Badanie potwierdziło, że prostownik spełnia wymagania dla III klasy przeciążalności według normy PN-EN 60146-1-1:2010 [9].

Innym zespołem prostownikowym, badanym w Zakładzie Elektroenergetyki, był zespół PD-1700/3,3 EB produkcji firmy ELEKTROBUDOWA S.A. Prostownik tego zespołu współpracuje z transformatorem typu TJRc 6300/15 i dławikiem katodowym typu TJDw 4/17 o indukcyjności 4 mH. Jest to zespół prostownikowy przystosowany do zasilania napięciem 15 kV. Badany był również zespół prostownikowy przystosowany do zasilania wysokim napięciem 110 kV. Prostownik zespołu składa się z dwóch przedziałów. Każdy z przedziałów zawiera mostek trójfazowy oraz obwód RC. Dodatkowo, w przedziale z prawej strony, umieszczono układ diagnostyki i pomiaru. Ogólny widok prostownika przedstawiono na rysunku 15.

Przed dopuszczeniem do eksploatacji, dla tego prostownika wykonano wiele badań laboratoryjnych. Jednym z nich było badanie wytrzymałości zwarciowej na jednokrotny prąd zwarciowej dla czasu przepływu prądu zwarciowego do 20 ms i dla czasu przepływu prądu zwarciowego 200 ms. Badania te są bardzo istotne, ponieważ prostowniki diodowe najczęściej ulegają uszkodzeniu przy przepływie dużego prądu zwarciowego. Wykonano próby wytrzymałości zwarciowej przy znamionowym napięciu zasilania prostownika i przy rezystancjach pętli zwarciowej R_{pz} równych około 1 Ω , 0,5 Ω , 0 Ω . Wyłączenie prądu zwarciowego następowało przez współpracujący w obwodzie wyłącznik szybki typu BWS. Oscylogramy napięcia i prądu zwarciowego podczas próby wytrzymałości zwarciowej przedstawiono na rysunku 16 dla pętli zwarciowej 1 Ω , na rysunku 17 dla pętli zwarciowej 0,5 Ω i na rysunku 18 dla próby przy pętli zwarciowej bliskiej 0 Ω .



Rys. 14. Przyrost temperatury elementów prostownika podczas sprawdzania klasy przeciążalności: M00 – otoczenia, M01 – radiator diody L szafa A, M02 – radiator diody D szafa A, M03 – radiator diody H szafa A, M04 – radiator diody I szafa B, M05 – radiator diody E szafa B, M06 – radiator diody A szafa B [4]



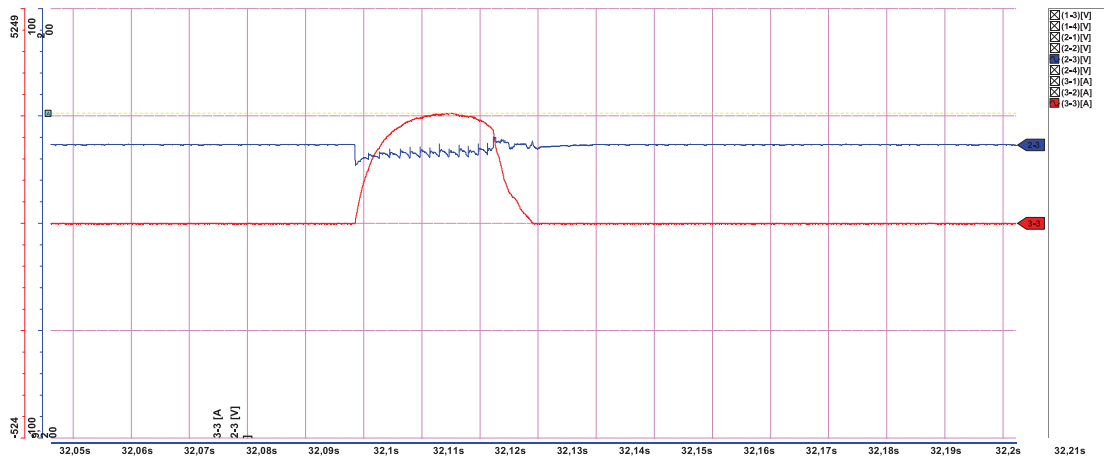
Rys. 15. Widok ogólny prostownika trakcyjnego PD-1700/3,3 EB, produkcji firmy ELEKTROBUDOWA S.A. [fot. W. Kruczek]

Po próbach wytrzymałości zwarciowej na jednokrotny prąd zwarciowej o czasie trwania 20 ms, nie stwierdzono uszkodzenia żadnej z diod prostowniczych i żadnego elementu prostownika. Podczas próby sprawdzano funkcje kontrolne i sterownicze kontrolera, który wskazywał poprawnie parametry prostownika.

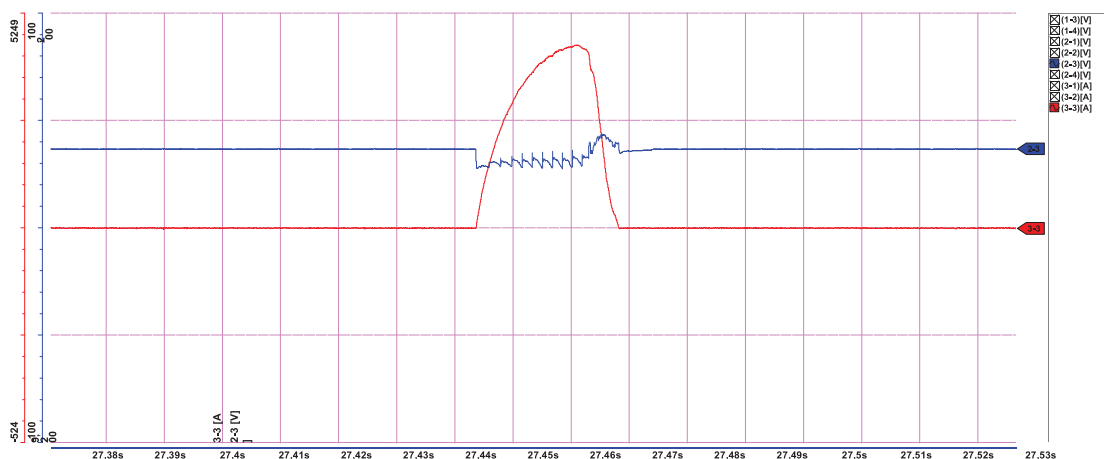
Następnym badaniem były próby wytrzymałości zwarciowej dla czasu zwarcia około 200 ms, przy znamionowym napięciu zasilania prostownika i przy rezystancji pętli zwarciowej $R_{pz} \approx 0,5 \Omega$, $R_{pz} \approx 0 \Omega$. Wyłączenie prądu zwarciowego następowało przez wyłącznik mocy zespołu prostownikowego.

Oscylogramy napięcia oraz prądu zwarciowego podczas próby wytrzymałości zwarciowej przedstawiono na rysunku 19 dla pętli zwarciowej $0,5 \Omega$, na rysunku 20 dla pętli zwarciowej bliskiej 0Ω .

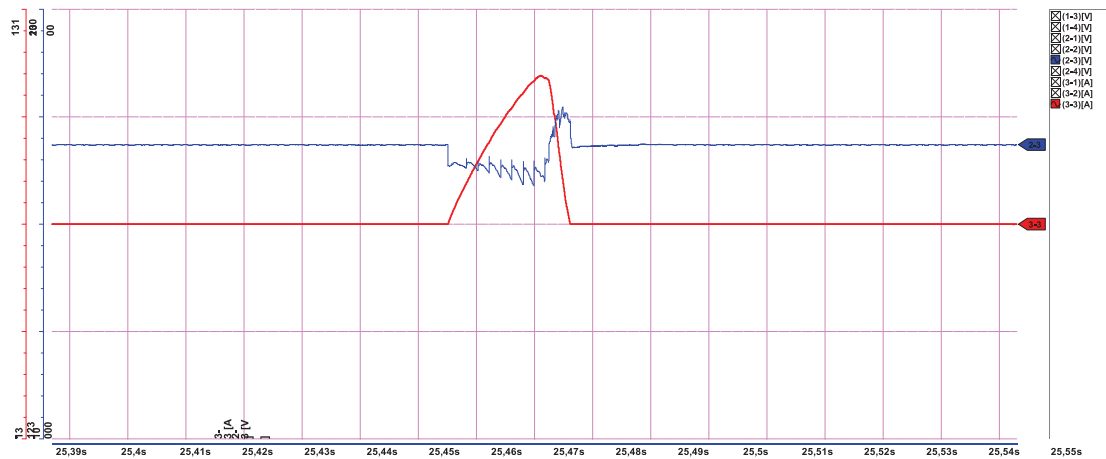
Po próbach wytrzymałości zwarciowej na jednokrotny prąd zwarciowej o czasie trwania 20 ms nie stwierdzono uszkodzenia żadnej z diod prostowniczych i żadnego ele-



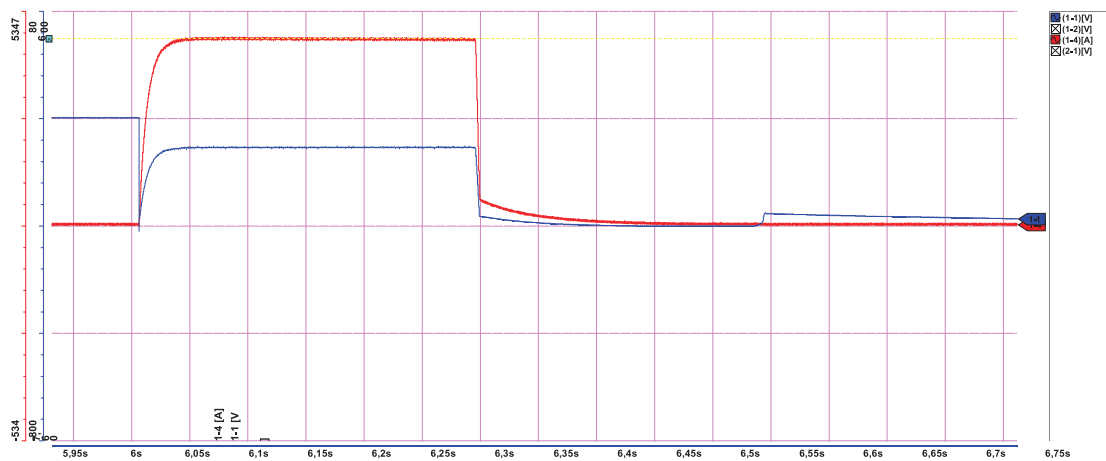
Rys. 16. Oscylogram prądu i napięcia podczas próby wytrzymałości zwarciowej na zwarcie jednokrotne, przy $R_{pz} \approx 1 \Omega$, — napięcie wyjściowe prostownika, — prąd wyjściowy prostownika [5]



Rys. 17. Oscylogram prądu i napięcia podczas próby wytrzymałości zwarciowej na zwarcie jednokrotne, przy $R_{pz} \approx 0,5 \Omega$, — napięcie wyjściowe prostownika, — prąd wyjściowy prostownika [5]



Rys. 18. Oscylogram prądu i napięcia podczas próby wytrzymałości zwarciowej na zwarcie jednokrotne, przy $R_{pz} \approx 0 \Omega$, — napięcie wyjściowe prostownika, — prąd wyjściowy prostownika [5]



Rys. 19. Oscylogram prądu i napięcia podczas próby wytrzymałości zwarciowej na zwarcie jednokrotne, przy $R_{pz} \approx 0,5 \Omega$, wyłączane przez wyłącznik mocy — napięcie wyjściowe prostownika, — prąd wyjściowy prostownika [5]



Rys. 20. Oscylogram prądu i napięcia podczas próby wytrzymałości zwarciowej na zwarcie jednokrotne, przy $R_{pz} \approx 0 \Omega$, wyłączane przez wyłącznik mocy — napięcie wyjściowe prostownika, — prąd wyjściowy prostownika [5]

mentu prostownika. Podczas próby sprawdzano funkcje kontrolne i sterownicze kontrolera, który poprawnie wskazywał parametry prostownika. Badania potwierdziły, że prostownik spełnia wymagania spółki PKP Energetyka pod względem wartości wytrzymywanego prądu zwarciego.

Firma Pluton Polska Sp. z o.o. również zleciła badanie swojego zespołu prostownikowego. Zespół prostownikowy o oznaczeniu V-TPED-2,0k-3,3k-12P-UHL4 przedstawiono na rysunku 21.



Rys. 21. Widok ogólny prostownika trakcyjnego V-TPED-2,0k-3,3k-12P-UHL4, produkcji firmy PLUTON [fot. W. Kruczek]

Badany zespół prostownikowy składa się z prostownika trakcyjnego V-TPED-2,0k-3,3k-12P-UHL4, transformatora zasilającego typu ETO-6300/15 i dławika wygładzającego o indukcyjności 4 mH typu ED1PH-4/1700. Obudowę pro-

stownika trakcyjnego stanowią dwie szafy metalowe z dostępem od frontu przez drzwi wyposażone w kratki wentylacyjne. Na prawych drzwiach szafy nr 2 jest umieszczony panel sterowania, w lewych drzwiach szafy nr 1 znajduje się amperomierz i woltomierz.

Badany zespół prostownikowy poddano między innymi badaniom jakości napięcia wyjściowego. Badania wykonano podczas pracy prostownika przy obciążeniu minimalnym, tj. o wartości około 5% prądu znamionowego, przy obciążeniu prądem o wartości 50% prądu znamionowego i przy obciążeniu znamionowym, czyli prądem 1700 A. Na rysunkach 22–24 przedstawiono oscylogramy napięcia zasilania transformatora i napięcia wyjściowego prostownika w punktach pomiarowych przed dławikiem i za dławikiem oraz prądu prostownika.

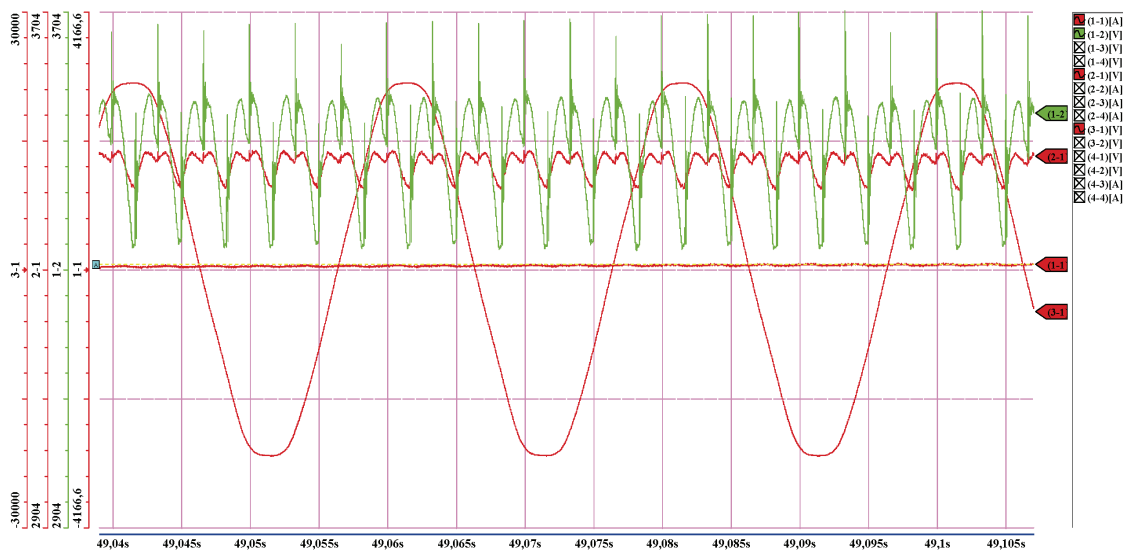
Celem określenia jakości napięcia wyjściowego prostownika, zarejestrowane przebiegi (rys. 22–24) poddano analizie FFT. Na rysunku 25 przedstawiono spektrum napięć wyjściowych prostownika przy obciążeniu minimalnym, przy obciążeniu równym 50% obciążenia znamionowego i przy obciążeniu znamionowym, w punktach pomiarowych przed dławikiem i za dławikiem.

Wynikiem analizy FFT są wartości skuteczne napięć poszczególnych harmonicznich. Wartości tych napięć wprowadzane do równania 2 umożliwiają wyznaczenie napięcia psfometrycznego U_c

$$U_c = \frac{1}{P_o} \sqrt{\sum_f K_f P_f U_f} \quad (2)$$

gdzie:

U_c – napięcie psfometryczne jest to napięcie zastępcze o częstotliwości odniesienia $f_0 = 800$ Hz, które występując w linii trakcyjnej wywołałoby taki sam



Rys. 22. Oscylogram napięcia wyjściowego przed dławikiem, za dławikiem, napięcia sieci zasilającej i prądu prostownika przy pracy prostownika z minimalnym obciążeniem: (3–1) napięcie zasilające transformator prostownikowy, (2–1) napięcie wyjściowe zespołu za dławikiem, (1–2) napięcie wyjściowe zespołu przed dławikiem, (1–1) prąd prostownika [3]

efekt zakłócający w torach analogowej linii telekomunikacyjnej, jakie wywołuje napięcie wyprostowane istniejące w linii trakcyjnej wraz ze wszystkimi harmonicznymi,

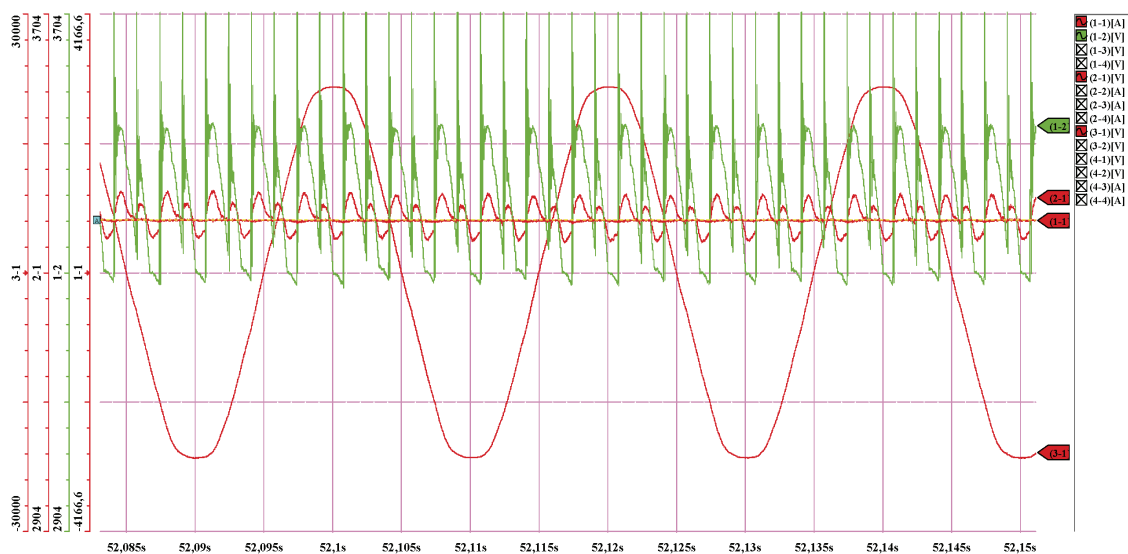
P_o – współczynnik psfometryczny ważkości częstotliwości dla częstotliwości odniesienia równej 800 Hz,

K_f – współczynnik częstotliwościowy uwzględniający zależność sprzężenia między liniami (energetycz-

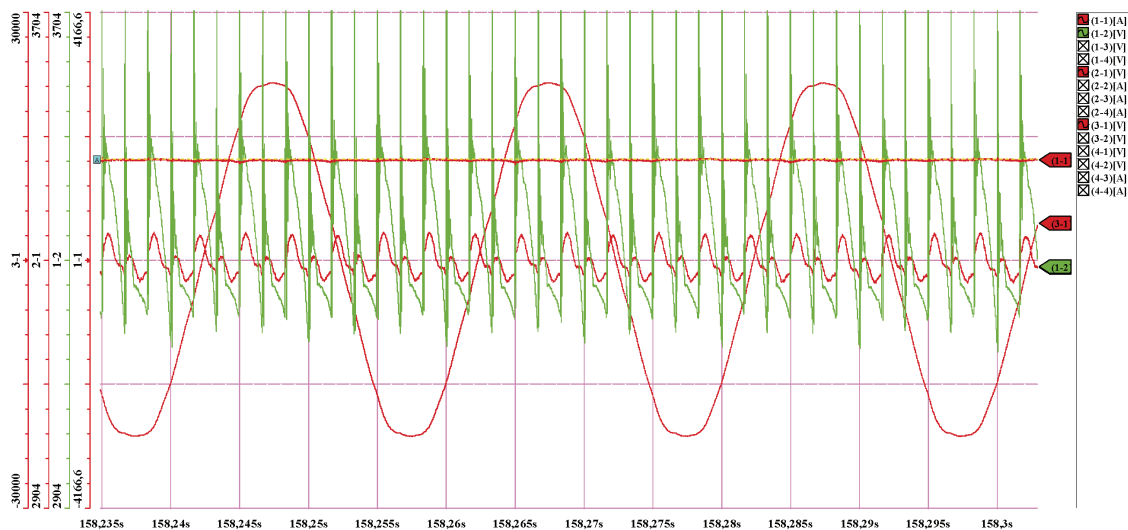
ną i trakcyjną) od częstotliwości (dla linii nawięznych $K_f = 1$),

P_f – współczynnik psfometryczny ważkości częstotliwości, odczytywany z rysunku 26, określający znaczenie poszczególnej częstotliwości w wyznaczonym napięciu psfometrycznym,

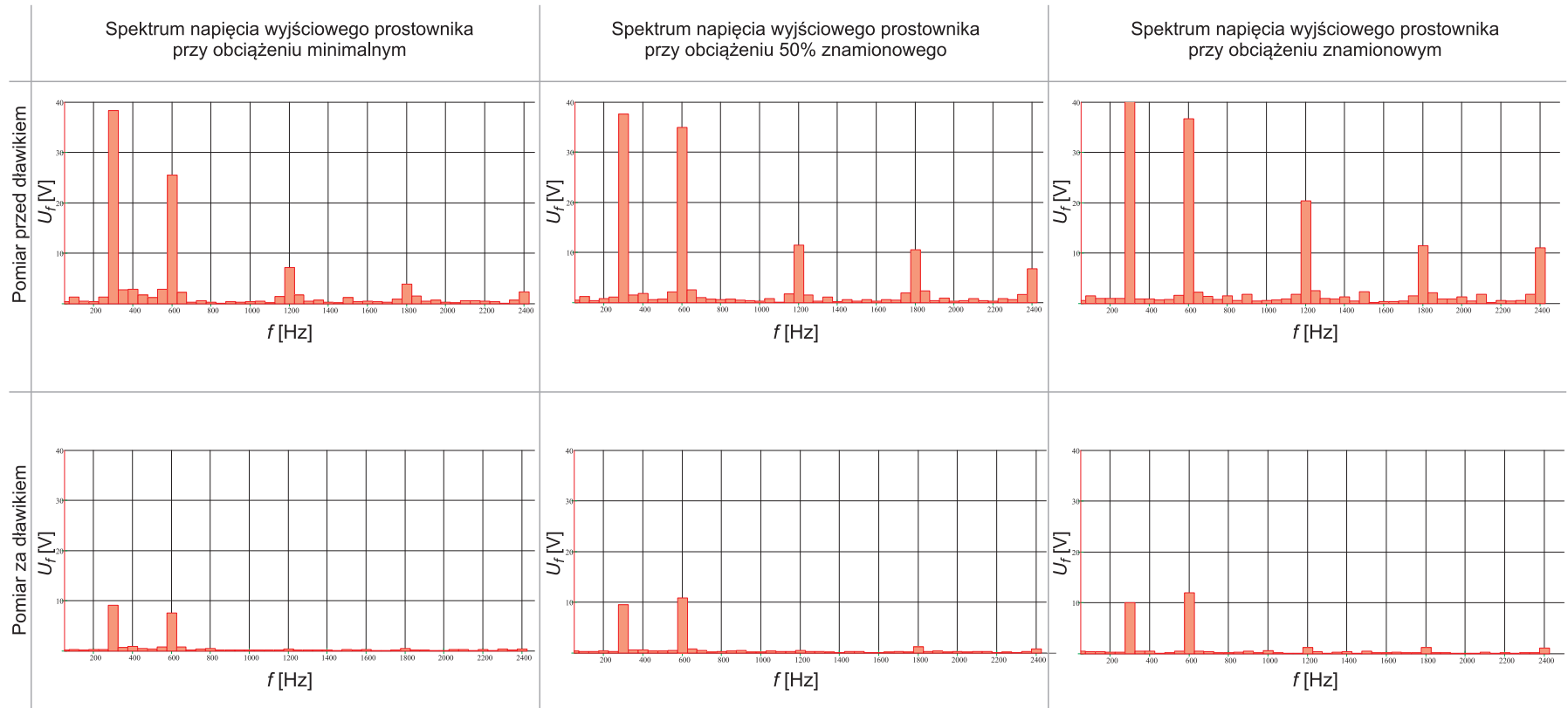
U_f – wartość skuteczna napięcia zakłócającego o częstotliwości f .



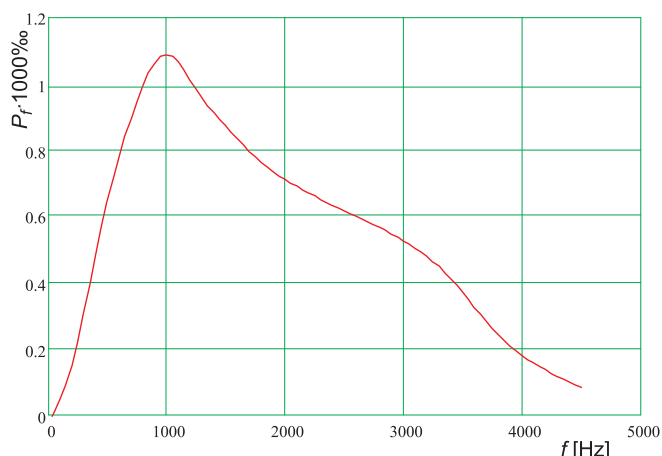
Rys. 23. Oscylogram napięcia wyjściowego przed dławikiem, za dławikiem, napięcia sieci zasilającej i prądu prostownika przy pracy prostownika z obciążeniem 850 A: (3–1) napięcie zasilające transformator prostownikowy, (2–1) napięcie wyjściowe zespołu za dławikiem, (1–2) napięcie wyjściowe zespołu przed dławikiem, (1–1) prąd prostownika [3]



Rys. 24. Oscylogram napięcia wyjściowego przed dławikiem, za dławikiem, napięcia sieci zasilającej i prądu prostownika przy pracy prostownika z obciążeniem znamionowym 1700 A: (3–1) napięcie zasilające transformator prostownikowy, (1–2) napięcie wyjściowe zespołu przed dławikiem, (1–1) prąd prostownika [3]



Rys. 25. Spektrum napięć wyjściowych prostownika przy obciążeniu minimalnym, 50% obciążenia znamionowego i przy obciążeniu znamionowym [3]



Rys. 26. Wykres przebiegu współczynnika psfometrycznej ważkości w funkcji częstotliwości według wytycznych CCIF (*International Telephone Consultative Committee*), obecnie ITU (*International Telecommunications Unii*) [opracowanie własne]

Obliczone napięcie psfometryczne nie może przekraczać wartości dopuszczalnej:

$$U_c \leq U_{cd'}$$

U_{cd} – dopuszczalna wartość równoważnego napięcia zakłócającego, w PKP zgodnie z przyjętymi standardami [10]

$$U_{cd} = 0,5\% U_{dN} = 16,5 \text{ V},$$

U_{dN} – napięcie znamionowe w sieci trakcyjnej (dla systemu zasilania 3 kV DC $U_{dN} = 3,3 \text{ kV}$).

Przy obciążeniu prostownika prądem 1700 A, wartość napięcia psfometrycznego wynosiła odpowiednio:

$U_c = 39,97 \text{ V}$ przy pomiarze harmonicznym przed dławikiem,

$U_c = 10,07 \text{ V}$ przy pomiarze harmonicznym za dławikiem.

Ze względu na przekroczenie napięcia psfometrycznego przed dławikiem, prostownik na podstacji trakcyjnej powinien współpracować z dławikiem i filtrem wygładzającym. Badania potwierdziły, że zespół prostownikowy spełnia wymagania PKP Energetyki S.A. co do jakości napięcia wyjściowego.

4. Podsumowanie

Każda podstacja trakcyjna prądu stałego jest wyposażona w zespół prostownikowy. Zespół prostownikowy składa się z: transformatora prostownikowego, prostownika trakcyjnego oraz dławika katodowego wyposażonego dodatkowo w układ przeciwprzepięciowy. Obecnie, producenci oferujący swoje rozwiązania zespołów prostownikowych do podstacji trakcyjnych prądu stałego, wykonują zespoły prostownikowe w układzie 12-pulsowym. Aby uzyskać 12-pulsowość, napięcie zasilające mostki prostownikowe musi być 6-fazowe. Napięcie to musi być wzajemnie przesunięte o kąt fazowy $\pi/6$. Można to osiągnąć stosując dwa transformatory dwuuzwojeniowe lub jeden transfor-

mator trójuzwojeniowy w grupie połączeń Yd i takie rozwiązanie jest obecnie powszechnie stosowane w podstacjach trakcyjnych. Jedną z trudności przy projektowaniu tego typu transformatorów jest uzyskanie takich samych wartości napięć wyjściowych transformatora uzwojenia gwiazdy i uzwojenia trójkąta. Możliwe jest to do uzyskania, gdy stosunek uzwojeń, uzwojenia wtórnego gwiazdy i uzwojenia wtórnego trójkąta, zbliżony jest jak najbardziej do $\sqrt{3}$, co przy wykonywaniu uzwojeń w praktyce nie jest możliwe do osiągnięcia. Dlatego napięcia uzyskane z uzwojenia gwiazdy i uzwojenia trójkąta, nigdy nie mają dokładnie takich samych wartości.

Badania laboratoryjne i badania podczas eksploatacji obserwowanych zespołów prostownikowych stanowią znaczącą część badań wykonywanych w Zakładzie Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa. Trójstronna współpraca pomiędzy Instytutem Kolejnictwa, producentami zespołów prostownikowych i spółką PKP Energetyka S.A, umożliwiła wprowadzenie do podstacji trakcyjnych kilku nowych rozwiązań zespołów prostownikowych. Zakład Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa oferuje wykonanie większości badań przewidzianych dla zespołów prostownikowych, przeznaczonych do eksploatacji w podstacjach trakcyjnych prądu stałego.

Bibliografia

1. Dzikowski J., Piasecki L.: *Wyposażenie Podstacji Trakcyjnych Węzła Kolejowego Warszawskiego*. Przegląd Elektrotechniczny, sierpień 1938, Zeszyt 16.
2. Januszewski S. et.al.: *60 Lat udziału Instytutu Elektrotechniki w pracach dotyczących zasilania sieci trakcyjnych prądu stałego*. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 233, 2007.
3. Kruczek W.: *Badania oraz nadzór nad eksploatacją obserwowaną zespołu prostownikowego produkcji PLUTON TYPU V-TPED-2,0k-3,3k-12P-UHL4*. Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki Warszawa, wrzesień 2018 r.
4. Kruczek W.: *Badania Typu Prostownika Trakcyjnego PD17T/3,3*. Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki Warszawa, kwiecień 2016 r.
5. Kruczek W.: *Badania zespołu prostownikowego typu PD-1700/3,3 EB*. Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki Warszawa, listopad 2016 r.
6. Milwaukee Electrification (The) – Prepared by the Public Relations Department of the Chicago, Milwaukee, St. Paul and Pacific Railroad Company as a special supplement to the July–August 1973 issue of The Milwaukee Road Magazine.
7. Plewako S.: *Zakończenie pierwszego etapu elektryfikacji Węzła Warszawskiego*. Inżynier Kolejowy, styczeń 1938 nr 1/161.
8. PN-EN 50328:2003: Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Elektroniczne przekształtniki mocy dla podstacji.
9. PN-EN 60146-1-1:2010: Przekształtniki półprzewodnikowe – Wymagania ogólne i przekształtniki o komutacji sieciowej – Część 1–1: Wymagania podstawowe.

10. Szczegółowe warunki techniczne dla budowy i modernizacji podstacji trakcyjnych i kabin sekcyjnych. Zeszyt VI, Zespoły prostownikowe – wymagania i parametry PKP ENERGETYKA S.A. ul. Hoża 63/67 00-681, Warszawa 09.05.2017 r.
11. Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym (Dz.U. z 2016 r. poz. 1727 z późn. zm.).
- Źródła internetowe
12. <https://www.revolvy.com/page/Gross%252DLichterfelde-Tramway> [dostęp 17.01.2019 r.].
13. <http://magazine.ieee-pes.org/july-august-2014/history-14> [dostęp 17.01.2019 r.].
14. <https://www.flickr.com/photos/55167823@N07/5506213295/in/photostream> [dostęp 17.01.2019 r.].
15. https://wikivisually.com/wiki/Mercury-arc_valve [dostęp 17.01.2019 r.].