

# Zasilanie elektrycznej trakcji miejskiej

## - wybrane zagadnienia

Jarosław Gruszczałak

*W referacie zdefiniowano sposoby zasilania elektrycznej trakcji miejskiej począwszy od trakcji tramwajowej, poprzez trakcję trolejbusową, skończywszy na metrze. Przedstawiono możliwości sekcjonowania sieci jezdnej oraz omówiono sposoby zasilania sieci trakcyjnej. Scharakteryzowano stacje prostownikowe trakcyjne wraz z wyposażeniem. Opisano system zdalnego sterowania w stacjach oraz oddziaływanie stacji na środowisko. Poruszono kwestię rekuperacji energii elektrycznej na przykładzie metra warszawskiego. Podano wnioski dotyczące całości omawianego zagadnienia.*

*Artykuł jest przerobioną wersją referatu z V. konferencji „Zintegrowany system transportu miejskiego”, która odbyła się we Wrocławiu 12-13 maja 2011 r.*



mgr inż.  
Jarosław Gruszczałak  
Projektant w Elektroprojekt SA Oddział w Łodzi

Ważnym składnikiem miejskiego transportu zbiorowego jest trakcja elektryczna. Dotychczas energia elektryczna wykorzystywana była w miejskim transporcie zbiorowym do napędu w tramwajach, trolejbusach i w metrze. Wszystkie te rodzaje transportu są stosowane w Polsce.

Zasilanie trakcji jest bardzo znaczącym elementem tego rodzaju transportu. Zarówno rozwiązania techniczne układów zasilania jak i znaczące koszty inwestycyjne i eksploatacyjne stwarzają konieczność poważnego potraktowania inwestycji już na etapie przygotowywania. Decydenci (najczęściej samorządy i władze miast) powinny zdawać sobie sprawę, że wybór sposobu zasilania musi być poprzedzony opracowaniem całościowej koncepcji zasilania i obliczeniami tzw. „obszaru zasilania” (szczególnie ważne dla trakcji tramwajowej), aby zasilanie począwszy od sieci energetyki do sieci trakcyjnych (tramwaj, trolejbus, metro) było racjonalne pod względem technicznym, ekonomicznym i uwzględniało plany przestrzenne rozbudowy miast. Brak takich opracowań powoduje niejednokrotnie zupełnie nieuzasadniony bardzo znaczący wzrost nakładów inwestycyjnych, perturbacje w rozwoju miast jak i w przyszłości znaczny wzrost kosztów eksploatacyjnych.

Poniżej przedstawiam dla przybliżenia tego tematu podstawowe informacje i charakterystyczne układy zasilania w/w środków transportu.

### Trakcja tramwajowa

Sieć tramwajowa w Polsce zasilana jest napięciem stałym 660 V. Sieć trakcyjna tramwajowa jest bardzo zróżnicowana z powodu dużej różnorodności infrastruktury miejskiej. Tramwaje zasilane są prądem elektrycznym dostarczanym do nich za pośrednictwem sieci trakcyjnej, która składa się z sieci jezdnej (napowietrznej) i sieci powrotnej (torów). Podział ten jest konieczny ze względów fizycznych, gdyż aby istniał przepływ prądu konieczne jest istnienie obwodu, czyli dwóch biegunów elektrycznych - dodatniego i ujemnego - połączonych odbiornikiem energii, którym jest tramwaj. Typowa sieć trakcyjna ma doprowadzony biegun dodatni (+) do sieci jezdnej, a biegun ujemny (-) do szyn.

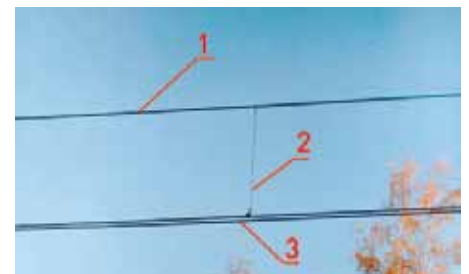
Prąd w ten sposób płynie z podstacji trakcyjnej biegunem dodatnim do sieci jezdnej. Stamtąd dostaje się do urządzeń elektrycznych tramwaju, a z nich wraca szynami do bieguna ujemnego podstacji trakcyjnej. Wyjątkiem w biegunowości sieci trakcyjnej jest np. miasto Łódź, gdzie sieć jezdna ma biegun ujemny, a tory mają biegun dodatni.

Sieć górna (napowietrzna) to część sieci trakcyjnej, która zawieszana jest nad torem. Głównym jej elementem jest przewód jezdny, po którym ślizga się odbierak prądu pobierając energię elektryczną. Przewód jezdny może występować sam i taką sieć jezdną nazywamy siecią płaską (rys.1) lub może być podwieszany do liny nośnej za pomocą specjalnych linek zwanych wieszakami. Ten rodzaj sieci nazywamy siecią łańcuchową (rys.2).

Przewód jezdny (rys.3) to pręty miedziane o przekroju okrągłym z dwoma podłużnymi rowkami w górnej jego części. Rowki służą do mocowania do przewodu jezdnygo różnego rodzaju uchwytów, wieszaków, jak również oznaczeń. W sieci tramwajowej stosuje się przeważnie przewody jezdne typu Djp 100 o przekroju 100mm<sup>2</sup>. Zasilanie



1. Sieć płaska



2. Sieć łańcuchowa (1-lina nośna, 2 – wieszak, 3- przewód jezdny)



3. Przekrój przewodu jezdnygo

sieci górnej odbywa się kablami trakcyjnymi poprzez punkty zasilające (rys.4). Szyny jezdne połączone są kablami ze stacją poprzez punkty powrotne.

## Sekcjonowanie sieci górnej

Stosowane są dwa sposoby podziału sieci trakcji tramwajowej: sekcjonowanie wzdłużne i sekcjonowanie wzdłużno-poprzeczne. Sekcjonowanie wzdłużne polega na zasilaniu sekcji sieci trakcyjnej wspólnym zasilaczem dla obu kierunków jazdy tramwaju, sekcje obu kierunków jazdy są zwarte. Zasilanie awaryjne sekcji w przypadku uszkodzenia kabla zasilacza trakcyjnego realizowane jest poprzez zamykanie łączników zwieraczy sekcyjnych i zasilanie obu sekcji jednym zasilaczem. W przypadku uszkodzenia wyłącznika zasilacza trakcyjnego w rozdzielnicy prądu stałego w stacji trakcyjnej uszkodzony wyłącznik zastępowany jest wyłącznikiem rezerwowym i poprzez szynę obejściową zasilana jest wybrana sekcja sieci. Sekcjonowanie wzdłużno-poprzeczne polega na zasilaniu sekcji sieci trakcyjnej oddzielnymi zasilaczami dla obu kierunków jazdy tramwaju. Zasilanie awaryjne sekcji, w przypadku uszkodzenia kabla zasilacza trakcyjnego, realizowane jest poprzez zamknięcie drugiego łącznika sieciowego zasilacza trakcyjnego dla drugiego kierunku jazdy. W tym przypadku sprawny zasilacz trakcyjny zasilą oba kierunki jazdy tramwaju. Gdy nastąpi uszkodzenie wyłącznika trakcyjnego w rozdzielnicy prądu stałego w stacji trakcyjnej, podobnie jak przy sekcjonowaniu wzdłużnym, uszkodzony wyłącznik zastępowany jest wyłącznikiem rezerwowym i poprzez szynę obejściową zasilana jest wybrana sekcja sieci.

## Sposoby zasilania sieci górnej

Stosowane są dwa sposoby zasilania sekcji sieci górnej:

- zasilanie jednostronne polegające na zasilaniu sekcji sieci trakcyjnej jednym zasilaczem. (ten sposób zasilania przedstawiono na rysunku 5 przy omawianiu sposobów podziału sekcji);
- zasilanie dwustronne (rys.6) sieci polega na zasilaniu sekcji sieci trakcyjnej dwoma zasilaczami trakcyjnymi (ten sposób zasilania może mieć zastosowanie dla obu sposobów podziału sieci, sekcjonowania wzdłużnego jak i wzdłużno-poprzecznego).

W praktyce zasilanie sekcji odbywa się z dwóch sąsiadujących ze sobą stacji prostownikowych.

Porównując rozwiązania sposobu zasilania trakcji tramwajowej w kraju – z rozwiązaniami w krajach zachodnich – można stwierdzić, że nasze realizacje nie ustępują rozwiązaniom w krajach wysoko rozwiniętych.

## Charakterystyka stacji prostownikowych trakcyjnych

W stacji prostownikowej trakcyjnej energia elektryczna prądu przemiennego jest przetwarzana na energię prądu stałego 660 V i za pomocą kabli, przesyłana do sieci jezdnej trakcji tramwajowej.

Stacja obejmuje następujące podstawowe elementy:

- budynek,
- linie kablowe średniego napięcia (SN),
- rozdzielnice średniego napięcia,
- zespoły prostownikowe,
- rozdzielnice prądu stałego,
- potrzeby własne wraz z transformatorem,
- linie kablowe rezerwowego zasilania potrzeb własnych nn,
- linie kablowe trakcyjne,
- urządzenie zdalnego sterowania.

Na rysunku 7 pokazano przykładowe rozmieszczenie urządzeń w budynku a na rysunku 8 schemat strukturalny stacji. Urządzenia stacji mogą być również instalowane w kontenerach lub w częściach pomieszczeń budowli o innym przeznaczeniu np. wiadukty, garaże podziemne.

## Zasilanie po stronie średniego napięcia (SN)

Stacje prostownikowe trakcyjne tramwajowe zasilane są najczęściej dwoma liniami SN. Przeważnie stosowane są dwa sposoby ich zasilania:

- zasilanie dwoma liniami SN wyprowadzonymi z różnych sekcji jednego GPZ lub z dwóch niezależnych GPZ (rys.9),
- zasilanie w systemie „dwójkowym”.

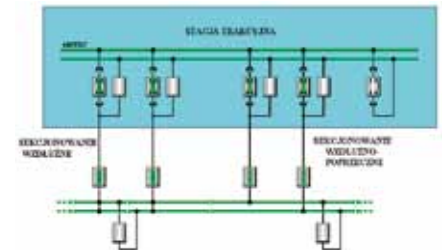
W drugim układzie współpracują ze sobą dwie stacje prostownikowe. Każda ze stacji zasilana jest jedną linią wyprowadzoną z GPZ. Zasilanie rezerwowe, dla obu stacji stanowi linia SN ułożona pomiędzy tymi stacjami, która przejmuje zasilanie stacji w przypadku zaniku napięcia na zasilaniu podstawowym z GPZ (rys.10).

## Rozdzielnice średniego napięcia

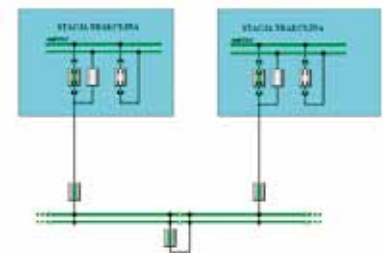
W latach 80. XX. wieku i wcześniej stosowane były przeważnie rozdzielnice typu RUW i RD-2 z izolacją powietrzną z wyłącznikami stacjonarnymi małoolejowymi. Obecnie instalowane są rozdzielnice z izolacją powietrzną – ale z wyłącznikami próżniowymi umieszczonymi na wózkach – stanowiącymi człon ruchomy rozdzielnic. Ponadto na życzenie użytkownika lub w przypadku ograniczonego miejsca w stacji, mogą mieć zastosowanie rozdzielnice z izolacją z SF6 lub izolacją powietrzną z wyłącznikami z SF6. Jednak izolacja z SF6 nie jest zalecana dla rozdzielnic SN stacji trakcyjnych z uwagi na m.in. konieczność zajmowania się gospodarką SF6.



4. Punkt zasilający



5. Sekcjonowanie sieci górnej



6. Zasilanie dwustronne – sekcjonowanie wzdłużne

## Zespoły prostownikowe

W odległej przeszłości używano zespołów prostownikowych z prostownikami rťciowymi i transformatorami olejowymi o oddziaływanu 6-pulsowym. W latach 70. ubiegłego wieku zastąpiono je prostownikami krzemowymi i transformatorami olejowymi o oddziaływanu 6-pulsowym.

Obecnie jako standard stosowane są zespoły z transformatorami żywicznymi i prostownikami krzemowymi o oddziaływanu 12-pulsowym. Transformatory prostownikowe mogą być instalowane w istniejących komorach transformatorowych dla stacji w modernizowanych budynkach. W tym celu adaptuje się komory transformatorów olejowych, dla potrzeb nowych transformatorów w izolacji żywicznej. Dla stacji nowo projektowanych transformator wraz z prostownikiem instalowany jest w pomieszczeniu stacji na wydzielonych stanowiskach. Coraz częściej stosowane są zespoły prostownikowe kompaktowe.

W zespole kompaktowym transformator żywiczny jest połączony fabrycznie z prostownikiem i zamknięty we wspólnej obudowie. W tym przypadku zbędne jest wygrzanie oddzielnych stanowisk zespołów.

## Rozdzielnice prądu stałego

Rozdzielnice prądu stałego w przeszłości stosowane były z wyłącznikami szybkimi prądu stałego stacjonarnymi typu WSe z grupową próbą linii. Obecnie wykorzystuje się rozdzielnice z wyłącznikami prądu stałego, ale umieszczonymi na wózku – stanowiącym człon ruchomy z indywidualną próbą linii. W rozdzielnicach są instalowane również wyłączniki typu GERAPID lub Secheron.

W ostatnich latach prowadzone są próby zastosowania w rozdzielnicach prądu stałego – jako wyłącznika szybkiego – wyłącznika próżniowego nowej generacji, wykonanego przez pracowników naukowych Politechniki Łódzkiej.

## Zabezpieczenia

Zastosowanie techniki cyfrowej do zabezpieczeń spowodowało znaczący rozwój aparatów zabezpieczających. Stare zabezpieczenia elektromechaniczne zostały zastąpione cyfrowymi, programowalnymi. Umożliwiają one skuteczniejszą ochronę urządzeń. W stacjach trakcyjnych ważnym urządzeniem, wymagającym zabezpieczenia, są zespoły prostownikowe. Obecnie używany sposób zabezpieczenia zespołu polega na zastosowaniu cyfrowego zabezpieczenia o charakterystyce czasowo zależnej. Dodatkowo zespół może być wyposażony w zabezpieczenie od przeciążeń za pomocą wieloprogowego zabezpieczenia nadprądowo - czasowego zrealizowanego w oprogramowaniu sterow-

nika zespołu. Transformator prostownikowy żywicznym jest fabrycznie wyposażony w zabezpieczenie temperaturowe.

Drugim ważnym urządzeniem wymagającym zabezpieczeń są zasilacze trakcyjne w rozdzielnicy prądu stałego. Są one zabezpieczone za pomocą wyzwalaczy nadprądowych bezzwłocznych, instalowanych fabrycznie na wyłączniku szybkim, działających przy zwarcia i przeciążeniach. Dodatkowo zasilacze trakcyjne mogą być zabezpieczone za pomocą wieloprogowego zabezpieczenia nadprądowo – czasowego oraz zabezpieczenia różniczkującego, odróżniającego zwarcia od przeciążeń, w cyfrowym zespole automatyki zasilacza trakcyjnego.

## Sterowanie, blokady i sygnalizacja

Sterowanie stacją może być ręczne, automatyczne lub zdalne z Centralnej Dyspozytorni za pomocą telemechaniki.

Podstawowe układy automatyki, które mogą występować w stacji trakcyjnej to:

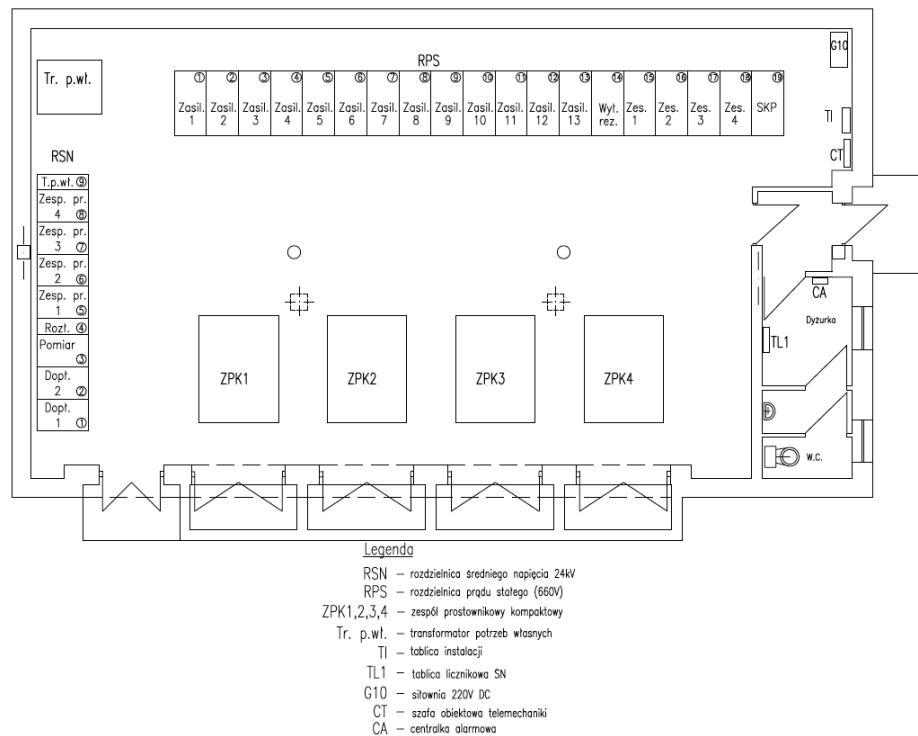
- automatyka zasilaczy trakcyjnych obejmująca samoczynne powtórne załączenie z uprzednią próbą linii na zwarcie,
- automatyka SZR na zasilaczach SN i nn.

Stacje wyposażone są w wymagane przepisy i warunkami eksploatacji blokady. Tradycyjny sposób sygnalizacji optycznej stanów położenia łączników oraz stanów awaryjnych polegał na zainstalowaniu lampek, wskaźników położenia czy przekaźników sygnalizacyjnych. Obecnie obok sygnalizacji tradycyjnej stosowane są monitory ciekłokrystaliczne dotykowe, na których mogą być prezentowane schematy stacji i tekstowe komunikaty o stanach awaryjnych.

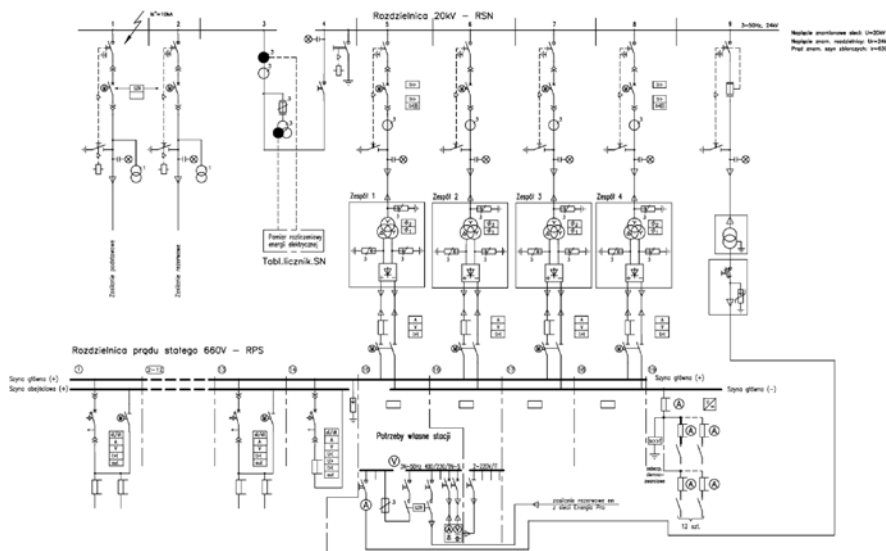
## Napięcia pomocnicze

Podstawowym źródłem zasilania napięć pomocniczych jest transformator potrzeb własnych. Rezerwowo obwody pomocnicze zasilane mogą być z przyłącza niskiego napięcia Zakładu Energetycznego. W zależności od preferencji użytkownika występują dwa rodzaje napięć 230V AC lub 220V DC. W stacjach, w których obwody pomocnicze zasilane są wyłącznie napięciem przemianym, wszystkie aparaty – w tym cewki wyłączników szybkich zasilaczy trakcyjnych – są przystosowane do napięcia przemianego. Obwody pomocnicze, wymagające napięcia gwarantowanego, takie jak obwody zabezpieczeń czy wybrane obwody sterownicze zdalnego sterowania, zasilane są z UPS.

W stacjach z obwodami pomocniczymi na napięciu stałym – stosowane są kompletne siłownie z redundancją posiadające we wspólnej obudowie kasetowe zasilacze impulsowe, kasetowe moduły pomiarowe oraz baterie akumulatorów bezobsługowych żelowych.



7. Rozmieszczenie urządzeń w stacji prostownikowej trakcyjnej „Bardzka” we Wrocławiu



8. Schemat strukturalny stacji prostownikowej „Bardzka” we Wrocławiu

## Instalacje elektryczne

Poza instalacją oświetleniową i siłową w nowobudowanych i modernizowanych stacjach, na życzenie użytkownika, mogą być wprowadzone dodatkowe instalacje:

- instalacja przeciwpożarowa – wyposażona w czujniki dymu i centralkę umożliwiającą bezpośrednie powiadomienie straży pożarnej i dyspozytora systemu zdalnego sterowania stacjami trakcyjnymi o wystąpieniu zagrożenia pożarowego,
- instalacja antywłamaniowa – wyposażona w czujniki obecności (czujniki podczerwieni, ultradźwiękowe, kontaktronowe) i centralkę systemu antywłamaniowego umożliwia powiadomienie służby ochrony obiektu i dyspozytora systemu zdalnego sterowania stacjami trakcyjnymi o obecności osób niepowołanych na terenie stacji,
- instalacja identyfikacji wejścia – wyposażona w system identyfikacji osób za pomocą np. kart zbliżeniowych, umożliwia identyfikację i rejestrację osób wchodzących na stację (system ten jest powiązany z systemem zdalnego sterowania stacją).
- instalacja ogrzewania i wentylacji, pomieszczenia stacji coraz częściej ogrzewane są za pomocą ogrzewaczy promiennikowych.

Z uwagi na to, że budynki stacji zlokalizowane są często w pobliżu siedzib ludzkich, do wentylacji stacji zaleca się stosowanie

wentylatorów cichobieżnych. Obecnie instalacja ogrzewania i wentylacji pracuje w systemie w pełni zautomatyzowanym. Sterownik instalacji zapewnia automatyczne sterowanie ogrzewaczami, wentylatorami oraz napędami przepustnic w celu uzyskania określonej przez użytkownika temperatury powietrza w pomieszczeniach stacji.

## Zdalne sterowanie i transmisja danych

Obecnie większość stacji tramwajowych w Polsce jest wyposażona w system zdalnego sterowania. Najczęściej jest to system rozproszony. Niezależne sterowniki swobodnie programowalne obsługują poszczególne pola lub grupy pól rozdzielnic SN oraz rozdzielnic prądu stałego. Programy sterowników realizują autonomicznie automatyki stacji takie jak:

- automatykę zasilaczy trakcyjnych z dwu lub trzykrotną próbą linii,
- automatykę SZR na liniach zasilających SN i nn,
- automatykę zespołów prostownikowych.

Poszczególne sterowniki połączone są magistralą komunikacyjną, umożliwiającą wymianę danych pomiędzy sterownikami oraz podłączenie urządzeń cyfrowych zabezpieczeń. Wyposażenie sterowników w moduły transmisyjne pozwala na obsługę stacji z centralnej dyspozytorni.

Wymiana danych między stacjami, a centralną dyspozytornią, realizowana jest najczęściej za pomocą łączy przewodowych lub radiowych. Łącza przewodowe to wydierżawione stałe łącza operatora telefonicznego. Obecnie możliwe jest wykupienie usługi polegającej na transmisji danych, gdzie opłata jest uzależniona od ilości przesyłanych danych. Podobną usługę można wykupić także od operatorów telefonów komórkowych.

Połączenia liniami światłowodowymi są stosowane w metrze warszawskim, gdzie liniowe usytuowanie stacji trakcyjnej umożliwiło ułożenie w tunelu metra własnej linii światłowodowej.

## Oddziaływanie stacji na środowisko

Oddziaływanie zespołów na sieć zasilającą może przejawiać się w:

- odkształceniu krzywej napięcia zasilającego,
- gospodarce mocą bierną,
- wahaniami napięć zasilających,
- innymi uciążliwościami.

Problem odkształceń napięć zasilających istniał dla transformatorów prostownikowych dwuuzwojeniowych dających oddziaływanie 6-pulsowe. Obecnie stosowane są transformatory trójuzwojeniowe oddziaływujące na sieć 12-pulsowo. Zespoły te spełniają wymogi zarówno Rozporządzenia Ministra Gospodarki z 25.09.2000 r. jak i normy PN/EN 50160, który to współczynnik wynosi odpowiednio 5% i 8%. Wymóg ten zespoły o oddziaływaniu 12-pulsowym spełniają ze znacznym zapasem i nie ma potrzeby stosowania zespołów o wyższej pulsacji. Powrót do stosowania o oddziaływaniu 6-pulsowym byłby podążaniem wstecz.

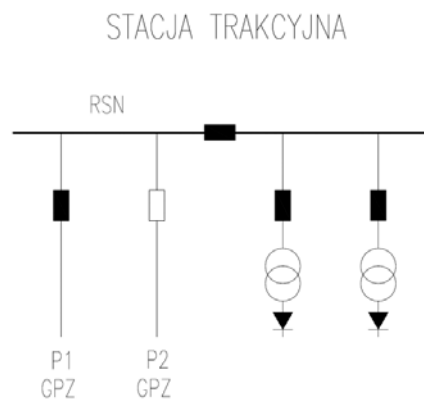
Z uwagi na wysoki współczynnik mocy zespołów prostownikowych o oddziaływaniu 12-pulsowym ( rzędu 0,95 ), w stacjach prostownikowych tramwajowych nie ma potrzeby stosowania urządzeń do kompensacji mocy biernej.

W trakcji wahania, które są powodowane przez rozruch wozów tramwajowych, nie mają negatywnego wpływu na pracę tych pojazdów – tramwaje przystosowane są do pracy przy dużej zmienności napięcia. Ponadto, z uwagi na duże moce zwarciove, wahania powodowane przez rozruchy wozów nie są odczuwalne przez sieć zasilającą.

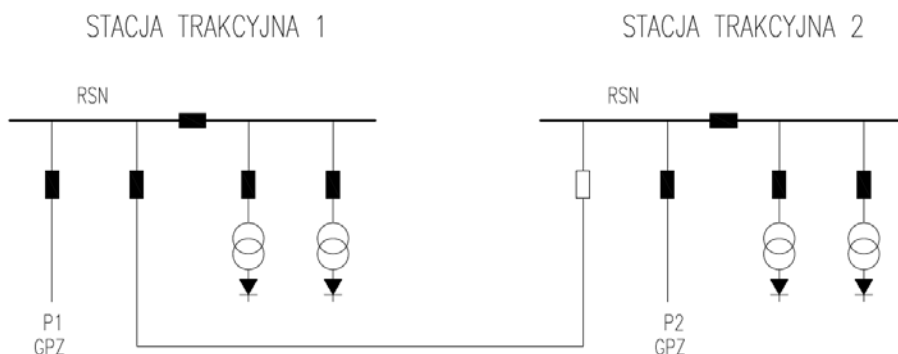
Stacje nie są uciążliwe pod względem akustycznym dla otoczenia. Urządzenia stacji nie mają żadnych podzespołów wirujących. Stosowane transformatory o obniżonym poziomie indukcji są mało hałaśliwe. Jedynymi urządzeniami wirującymi są wentylatory przewietrzające pomieszczenia. Jednakże pracują one w czasie zwiększonego obciążenia stacji czyli w dzień, gdzie tło akustyczne otoczenia jest znacznie większe od hałasu wentylatorów. Natomiast w porze nocnej są one wyłączone.

Stacje z obecnie stosowanymi urządzeniami nie wydzielają oparów i wyciewów żrących. Stosowanie transformatorów suchych, wyłączników SN próżniowych, rozdzielnic w izolacji powietrznej, wyłączników szybkich z komorami bezazbestowymi powoduje, że stacje są obojętne dla środowiska naturalnego.

Zasilanie stacji napięciami do 20 kV i występujące obciążenia prądowe na poziomie kilku kA nie wywołują negatywnych skutków przez promieniowanie elektromagnetyczne. Prawidłowe zaprojektowanie rozmieszczenia kabli powrotnych minimalizuje wpływ prądów błądzących z sieci powrotnej do ziemi.



9. Zasilanie z dwóch GPZ



10. Zasilanie w systemie „dwójkowym”

## Trakcja trolejbusowa

Dostarczana z sieci kablami 15 kV energia elektryczna prądu przemiennego przetwarzana jest w stacjach prostownikowych na energię prądu stałego i za pomocą kabli trakcyjnych przesyłana do sieci jezdnej trolejbusowej. Stacje prostownikowe wymagają rezerwowego zasilania potrzeb własnych z sieci nn ZE. Elementami układu zasilania trakcji są:

- sieć kabli zasilających 15 kV i 0,4 kV prądu przemiennego,
- stacje prostownikowe (budynki z przyłączami i wyposażeniem elektroenergetycznym),
- sieć kabli trakcyjnych (plusowych i minusowych),
- sieć jezdna trolejbusowa.

W systemie trolejbusowym występują dwa rodzaje odbiorników energii elektrycznej:

- odbiorniki zasilane z sieci trakcyjnej prądu stałego,
- odbiorniki zasilane bezpośrednio z sieci prądu przemiennego.

Odbiorniki zasilane z sieci trakcyjnej to silniki prądu stałego i odbiorniki nieatrakcyjne (oświetlenie, ogrzewanie) zainstalowane w pojazdach trakcyjnych, do których energia doprowadzana jest za pośrednictwem odbieraka zamontowanego na dachu trolejbusu.

Odbiorniki zasilane z sieci prądu przemiennego to odbiory energetyczne (zajezdni) oraz potrzeby własne stacji prostownikowych. Wszystkie odbiory związane z obsługą linii trolejbusowej wymagają pewnego zasilania.

Stacje charakteryzują się następująco:

- napięcie zasilania – 10,5÷21 kV,
- napięcie na szynach prądu stałego – 660 V,
- bieguny (+) i (-) izolowane,
- napięcie pomocnicze 400/230 V prądu przemiennego i 220 V prądu stałego,
- zespoły prostownikowe podobnie jak w trakcji tramwajowej,
- zasilacze trakcyjne z wyłącznikami szybkimi prądu stałego 1000 A.

Stacje składają się z następujących elementów:

- rozdzielnica SN,
- zespoły prostownikowe,
- rozdzielnica prądu stałego wraz z potrzebami własnymi,
- siłownia 220 V prądu stałego,
- tablice licznikowe.

Energia prądu stałego od stacji prostownikowej do sieci jezdnej trakcyjnej przesyłana jest kablami trakcyjnymi zasilającymi (+) i (-) ułożonymi w ziemi. Każda sekcja układu jest zasilana kablami wprowadzonymi na sieć poprzez rozłączniki z napędem silnikowym. Zapewnia to pracę normalną i awaryjną po spięciu miejscowo lub zdalnie dwóch sąsiednich sekcji w przypadku uszkodzenia jednego z zasilaczy (+) lub (-).

Zazwyczaj sieć jezdna występuje jako płaska:

- sztywna na skrzyżowaniach i pętlach,

- elastyczna na odcinkach prostych i łukach. Wysokość zawieszenia przewodów jezdnych wynosi 5,5m od poziomu jezdni. Wysokość ta może być zmniejszona do 4,5m w przypadku prowadzenia przewodów pod mostami lub wiaduktami. W wyjątkowych przypadkach wysokość zawieszenia przewodów może być zmniejszona do 4,2m po uzgodnieniu z właściwymi władzami. Odległość pozioma między przewodami o biegunowości plus i minus dla jednego kierunku jazdy wynosi 0,6m z odchyleniem  $\pm 0,05m$ . W sieci dwutorowej odległość pomiędzy wewnętrznymi przewodami nie powinna być mniejsza niż 2m. Przewód jezdny minusowy powinien być prowadzony od strony chodnika. Odległość w płaszczyźnie poziomej rzutu przewodu jezdnego od krawężnika jezdni wynosi co najmniej 2m. Przy zbliżeniach do krawężnika nie dłuższych niż kilka metrów odległość ta może być zmniejszona do 1m.

Pomocnicze źródła zasilania trolejbusów to:

- napęd pomocniczy akumulatorowy,
  - pomocniczy napęd spalinowy,
  - superkondensatorowe zasobniki energii.
- Nadmienia się, że w/w źródła służą do elastyczniejszego wykorzystania możliwości trakcji trolejbusowej.

## Metro

Sieć trakcyjna I. linii metra w Warszawie zasilana jest napięciem stałym 825 V z podstacji prostownikowych trakcyjnych zlokalizowanych na co drugiej stacji pasażerskiej. Stacje pasażerskie wyposażone są również w podstacje energetyczne. Przeznaczeniem podstacji energetycznych jest zasilanie w energię elektryczną potrzeb własnych stacji pasażerskich jak i wszelkich pomieszczeń znajdujących się na ich terenie. Taki sposób rozmieszczenia powoduje, że długość wydzielonych odcinków sieci trakcyjnej zasilanych z dwóch kolejnych następujących po sobie podstacji trakcyjno-energetycznych wynosi ok. 2 km. Na rysunku 11 przedstawiono schemat zasilania podstacji metra.

Z Rysunku 11 wynika, że każda z podstacji trakcyjno-energetycznych zasilana jest dwoma oddzielnymi, niezależnymi liniami kablami 15 kV z różnych sekcji RPZ lub z różnych RPZ. Przy czym każda z linii wprowadzona jest na oddzielną sekcję rozdzielnic 15 kV. Każda z sekcji rozdzielnic 15 kV zasilają zespoły prostownikowe, które włączane są na różne sekcje rozdzielnic prądu stałego. Ponadto każda z sekcji rozdzielnic 15 kV zasilają jedną z sekcji rozdzielnic głównej niskiego napięcia.

Taki sposób zasilania zespołów prostownikowych i rozdzielnic prądu stałego powoduje, że w przypadku zwarcia po stronie prądu stałego urządzenia narażone są na mniejsze prądy zwarcia (brak dosilania z podstacji dalszych). Jednakże ogranicza to możliwość zużytkowania rekuperowanej energii - z uwagi na małe prawdopodobieństwo pojawienia się na zasilanym w ten sposób ok.

2 km odcinku dwóch pociągów, z których jednocześnie jeden hamuje a drugi dokonuje rozruchu. W związku z tym zasilanie sieci trakcyjnej z każdej podstacji dokonuje się jakby z dwóch niezależnych podstacji znajdujących się w tym samym pomieszczeniu.

W metrze stosuje się sekcjonowanie wzdłużno-poprzeczne i zasilanie dwustronne. Oznacza to, że każda sekcja trzeciej szyny zasilana jest dwoma zasilaczami znajdującymi się na dwóch różnych kolejno następujących po sobie podstacjach prostownikowych.

Poniżej przedstawiono podstawowe urządzenia wyposażenia elektroenergetycznego podstacji I. linii metra w Warszawie. Wyposażenie to stanowi materializację polskiej myśli technicznej.

Na pierwszym odcinku tj. do A13 "Centrum" zastosowano w każdym zespole po dwa transformatory dwuuzwojeniowe - mające odmienne grupy połączeń Yd11 i Dd0 - które zasilając odpowiednio zestawy diodowe skojarzone po stronie prądu stałego równolegle oddziałują na sieć 12-to pulsowo. Są to transformatory suche dwuuzwojeniowe o mocy po 1600 kVA.

Parametry zespołu dla trakcji metra są następujące:

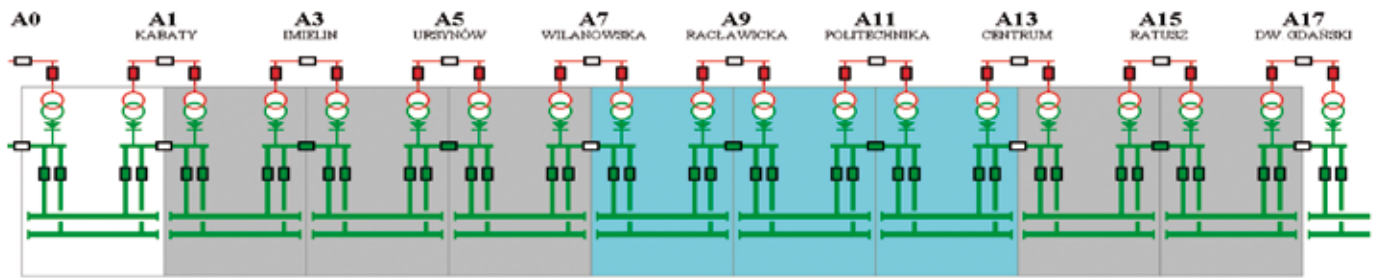
- znamionowe napięcie zasilające 15,75 kV,
- znamionowy prąd wyprostowany 3200 A,
- znamionowe napięcie wyprostowane 825 V,
- przeciążalność zespołu w kl. III wg IEC 146 tzn. 3200 A ciągle, 4800 A w ciągu 2 minut, 6400 A w ciągu 10 s.

Początkowo poczynając od stacji A1 "Kabaty" aż do stacji A11 "Politechnika" podstacje wyposażono tylko w dwa zespoły prostownikowe z dwoma transformatorami po 1600 kVA każdy, zostawiając rezerwę na zespół trzeci. Podstację A13 "Centrum" wyposażono od razu w trzy zespoły, każdy składający się z dwóch oddzielnych transformatorów 1600 kVA. Natomiast poczynając od stacji A15 "Ratusz" podstacje wyposażane są od razu w cztery zespoły ale z transformatorami trójuzwojeniowymi każdy po 2400 kVA. Nadmienia się, że do stacji A4 "Ursynów" są to transformatory o izolacji papierowej natomiast od A7 "Wilanowska" są to transformatory już o izolacji żywicznej. Ponadto w międzyczasie doposażono stacje A3 "Imielin", A5 "Ursynów", A7 "Wilanowska", A9 "Racławicka" i A11 "Politechnika" w trzecie zespoły składające się z dwóch transformatorów po 1600 kVA ale już w izolacji żywicznej.

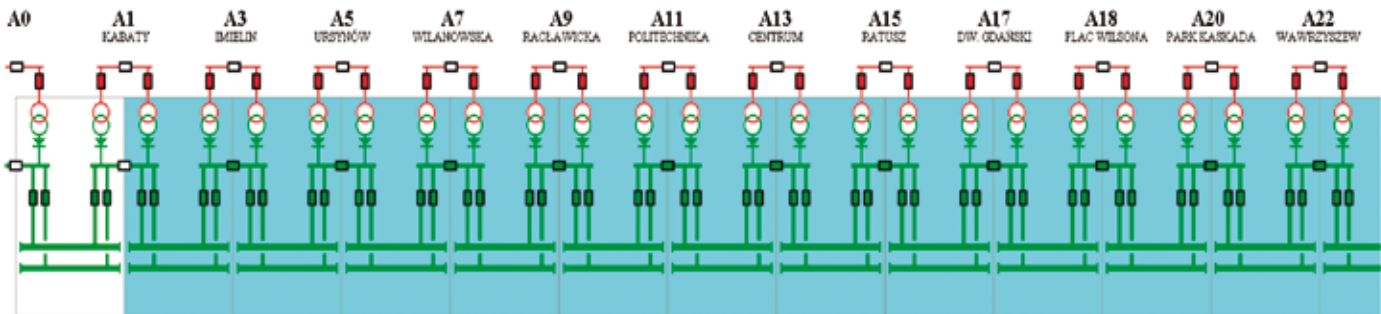
Parametry zespołów na stacjach czterozespołowych są następujące:

- znamionowe napięcie zasilające 15750 V,
- znamionowy prąd wyprostowany 2400 A,
- przeciążalność zespołu w klasie III wg IEC 146 tzn. 2400 A ciągle, 3600 A 2 minuty, 4800 A 10 s.

Rozdzielnica na napięcie robocze 17,5 kV jest wolnostojąca posiada pojedynczy układ szyn zbiorczych z wyłącznikami na wózkach umożliwiającymi ich łatwe wystawienie. Po wysunięciu wózka system blokad umożliwia



11. Schemat zasilania trzeciej szyny - obecny



12. Schemat zasilania trzeciej szyny - przyszłościowy

dość do części będących pod napięciem. Ponadto jest łukochrona tzn. w przypadku zwarcia wewnątrz łuk elektryczny na zewnątrz wydostać się nie może przez co nie ma możliwości porażenia osób będących w jej pobliżu w przypadku wystąpienia takiego zwarcia.

Rozdzielnica prądu stałego jest dwusekcyjna. Rozdzielnica taka składa się z czterech pól zasilaczy trakcyjnych zasilania podstawowego, dwóch pól zasilaczy zasilania rezerwowego, trzech lub czterech pól zespołów prostownikowych, pola odłącznika sekcyjnego (obecnie wyłącznika) oraz pola zasilacza torów odstawkowych (tylko tam gdzie są tory odstawkowe).

Parametry rozdzielnicy prądu stałego związane są przede wszystkim z wyłącznikami z szybkością zasilaczy. Są to:

- prąd znamionowy wyłączników szybkich,
- zdolność wyłączania przez wyłącznik szybki spodziewanego ustalonego prądu zwarcia,
- zakres wyzwalaczy nadprądowych wyłączników szybkich.

Wyłączniki szybkie zasilaczy posiadają następujące parametry:

- napięcie znamionowe 825 V,
- prąd znamionowy 3500 A,
- zakres wyzwalaczy zwarciovych od 4 do 8,5 kA,
- zdolność wyłączania spodziewanego ustalonego prądu zwarciovego 90 kA.

Instalowane są na wózkach dla ułatwienia przeglądów – indywidualną próbą linii.

Rozdzielnica główna niskiego napięcia to wielopolowa rozdzielnica 0,4 kV wyposażona w wyłączniki typu DS. na dopływach oraz rozłączniki bezpiecznikowe na odpływach. Rozłączniki bezpiecznikowe. Są to pokrywowe łączniki manewrowe z bezpiecznikami mocy zapewniające całkowite bezpieczeństwo w trakcie manewrów łączeniowych i wymianie wkładek.

Rekuperacja energii elektrycznej polega na oddawaniu jej do sieci prądu stałego podczas hamowania pociągu. Wykorzystanie wytworzonej podczas hamowania energii pociągów może następować poprzez:

- zużycie jej przez inny pociąg będący w pobliżu a dokonujący w tym samym czasie rozruchu,
- oddanie jej do sieci zasilającej dostawcy energii,
- zużycie jej na potrzeby nie trakcyjne stacji.

Wymienione wyżej ostatnie dwa przypadki mają miejsce w krajach Ameryki Południowej oraz w niektórych krajach azjatyckich.

Aby zużycie energii przez inny pociąg mogło nastąpić muszą być spełnione dwa warunki:

- pojazdy muszą być wyposażone w urządzenia mogące zwracać energię hamowania,
- sieć trakcyjna powinna być tak skonfigurowana, aby w obszarze oddającego energię był pojazd dokonujący w tym samym czasie rozruchu.

Przy obecnych częstotliwościach kursowania pociągów co kilka minut jest znikome prawdopodobieństwo aby na odcinku 2 km jednocześnie następowała rekuperacja energii przez pociąg hamujący i rozruch innego pociągu. Aby to prawdopodobieństwo zwiększać Metro Warszawskie postanowiło wydłużyć równolegle zasilane przez podstacje odcinki trzeciej szyny. To wydłużenie realizowano poprzez zamykanie odłączników sekcyjnych w rozdzielnicach prądu stałego podstacji A3, A5, A9, A11, A15 i A18 (rys. 11). Dla zwiększenia manewrowości tymi odłącznikami zastąpiono je na tych stacjach wyłącznikami szybkimi. W ten sposób wydzielono na eksploatowanym obecnie odcinku I linii metra poprzez zamknięcie wyłączników sekcyjnych na podstacjach ww. a otwarcie odłączników sekcyjnych na

podstacjach A1, A7 i A13 trzy obszary zasilania, w których oddzielnie dokonuje się zużycie rekuperowanej energii. Podział obecnie eksploatowanego odcinka metra na trzy oddzielne odcinki zasilania umożliwi większą efektywność wykorzystania energii pochodzącej z hamowania odzyskowego. Jednakże największą efektywność wykorzystania tej energii hamowania odzyskowego osiągnie się przy zamknięciu łączników sekcyjnych na wszystkich rozdzielnicach prądu stałego.

Należy mieć nadzieję, że zebrane doświadczenia eksploatacyjne w wykorzystywaniu energii rekuperowanej w obecnych trzech obszarach pozwolą na płynne przejście do innych układów w tym do układu, w którym cała I linia metra będzie stanowić jeden obszar (rys. 12).

## Wnioski

1. Zarówno doświadczenie europejskie jak i krajowe wskazują, że miejski transport zbiorowy wykorzystujący energię elektryczną będzie się rozwijał.
2. Nowoczesne linie szybkiego tramwaju, metra oraz trolejbusowe budowane są w wielu krajach europejskich.
3. W polskich miastach modernizowane i rozbudowywane są istniejące linie tramwajowe i trolejbusowe.
4. Przewiduje się trakcję tramwajową i trolejbusową w miastach nie posiadających takiej komunikacji. Budowana jest II. linia warszawskiego metra.
5. Zarówno modernizację istniejących układów zasilania jak i budowa nowych układów związanych z rozbudową bądź budową trakcji musi być poprzedzona opracowaniem całościowych koncepcji obejmujących istniejącą zabudowę jak i przyszłościową rozbudowę miast. ◀