

Dr hab. inż. Zygmunt Giziński
Profesor Instytutu Elektrotechniki w Warszawie

Tramwaj 116N

Tyrystorowy układ regulacji

W artykule podano parametry techniczno-ruchowe i opis głównych układów elektrycznych tramwaju 116N. Nowy niskopodłogowy tramwaj 116N wyposażony jest w nowoczesny układ regulacji tyrystorowej (GTO oraz mikroprocesorowy sterownik napędu. Tramwaj napędzany jest czterema silnikami prądu stałego. Napęd zapewnia wymagane parametry trakcyjne oraz prędkość handlową powyżej 25 km/h, a także hamowanie odzyskowe w pełnym zakresie prędkości. Prototypowy tramwaj przeszedł pomyślnie badania typu i poddany jest próbie eksploatacyjnej w Warszawie.

1. Wstęp

Wieloletnie prace doświadczalne prowadzone przez Instytut Elektrotechniki z impulsowymi układami regulacji tramwajowych układów napędowych prądu stałego doprowadziły do seryjnej produkcji tyrystorowych GTO dla układów napędowych. W roku 1997 wyprodukowana została seria 16 tramwajów typu 105N 2k wyposażonych w przekształtniki GTO, a w roku bieżącym realizowana jest produkcja 24 takich tramwajów dla Warszawy. Wyposażenie dla tych tramwajów zostało wykonane przez Instytut

Elektrotechniki i WOLTAN. Dla modernizacji tramwajów 105N przygotowana jest również wersja układu z modułami IGBT.

Eksploatacja prototypów i serii informacyjnej tych tramwajów potwierdziła przewidywane zalety tyrystorowych układów regulacji, a pewność pracy i gotowość ruchowa tramwajów typu 105N 2k znacznie przewyższa te parametry osiągane przez tramwaje klasyczne. Skłoniło to Tramwaje Warszawskie do rezygnacji z zamówień nowych tramwajów z klasycznym rozrusznikowym układem regulacji i zamówienia tramwajów 105N 2k z nowoczesnym

układem regulacji.

Jednocześnie potrzeby eksploatacyjne komunikacji miejskiej, a zwłaszcza sprostanie tendencji niskiej podłogi w tramwajach, doprowadziły do budowy prototypów tramwajów 112N, 114N oraz 116N. Tramwaj 112N napędzany sześcioma silnikami posiadający tylko 20% niskiej podłogi nie znalazł uznania eksploatorów i powstał projekt tramwaju 116N, napędzanego czterema silnikami z bezosiowym niskim wózkiem członu środkowego. Projekt układu elektrycznego tego tramwaju opracował Instytut Elektrotechniki, wykonawcą urządzeń prototypowych jest Instytut Elektrotechniki i WOLTAN, a silników DOLMEL Drives.

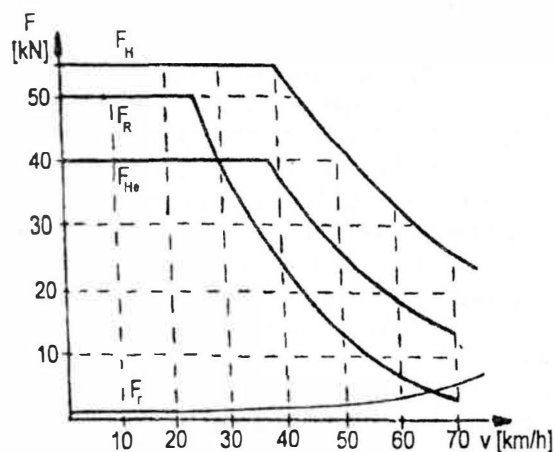
Równolegle wykonany został prototyp tramwaju 116Na z napędem asynchronicznym f-mi ELIN.

Producentem tramwajów jest GEC - ALSTHOM KONSTAL S. A.

2. Parametry techniczno-ruchowe

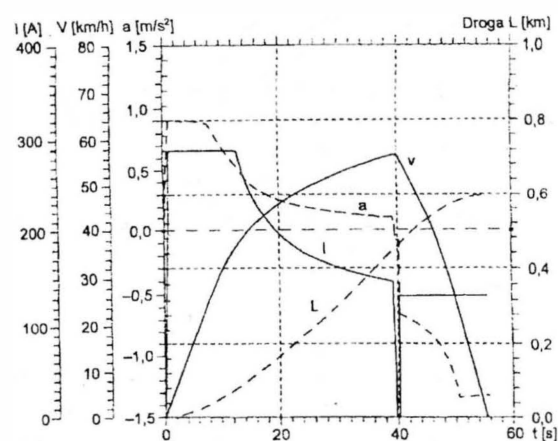
- typ napędu	Bo 2 Bo
- masa własna tramwaju	29 Mg
- masa tramwaju obciążonego	53 Mg
- liczba osi napędowych	4
- liczba osi tocznych	2
- liczba miejsc siedzących	40
- maksymalna pojemność	232 osoby
- liczba drzwi	4
- niska podłoga	60%
- napięcie pracy	400 ÷ 780V
- moc silników	4 x 55 kW
- prąd rozruchu	2x50 ÷ 300A
- prąd hamowania	2x50 ÷ 230A
- minimalny stopień wzbudzenia	0,4
- maksymalna siła rozruchowa	50 kN
- maksymalna siła hamowania elektrodynamicznego	40 kN
- przyspieszenie rozruchu do V=30 km/h	1,2 m/s ²
- przyspieszenie rozruchu maksymalne	1,3 m/s ²
- opóźnienie hamowania służbowe	1,4 m/s ²
- opóźnienie hamowania awaryjne	3 m/s ²
- prędkość maksymalna wagonu pustego przy U _Z =650V	65 km/h
- prędkość techniczna wagonu obciążonego 2/3 na odcinku 600m	35 km/h
- prędkość handlowa wagonu obciążonego 2/3 na odcinku 600m	27 km/h

Charakterystyka trakcyjna tramwaju pokazana jest na rys.1, przejazd tramwaju na rys.2 i charakterystyka prądowa na rys.3.

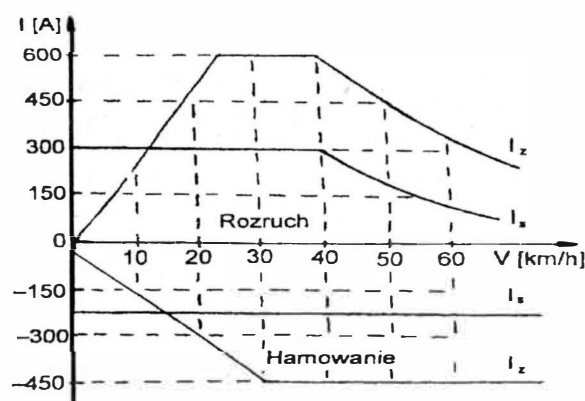


Rys.1 Charakterystyka trakcyjna tramwaju 116N.

F_R -siła rozruchowa; F_{He} -siła hamowania elektrodynamicznego
 F_H -siła hamowania służbowego (elektrodynamiczne + tarczowe)
 F_r -opory ruchu tramwaju (tor prosty, poziomy)



Rys.2 Przejazd tramwaju typu 116N, obciążony, 16,3 Mg, 650 V, 600 m.



Rys.3 Charakterystyka $I_s=f(V)$

I_s -prąd grupy silników, I_z -prąd sieci trakcyjnej.

3. Napęd

Tramwaj napędzany jest czterema silnikami typu LTA-240 prądu stałego o wzbudzeniu szeregowym, produkcji DOLMEL DRIVES Ltd o mocy 55 kW każdy.

Silniki połączone są w dwie niezależne grupy po dwa w szereg i regulowane są za pomocą osobnych przekształtników tyrystorowych GTO. Silniki zabudowane są w pierwszym i trzecim wózku i napędzają zestawy kołowe za pomocą przekładni dwustopniowej.

Bezosiowy wózek środkowy wyposażony jest w hamulce tarczowe zapewniające skuteczne hamowanie 1/3 masy tramwaju. Podczas hamowania służbowego hamulec ten działa tylko przy hamowaniu maksymalnym.

Wszystkie zestawy kołowe wyposażone są w tarczowe hamulce postojowe.

Maksymalnemu prądowi rozruchu tramwaju 2 x 300 A odpowiada siła napędowa 50 kN zapewniająca maksymalną wartość przyspieszenia wozu pu tego 1,3 m/s², a dla zakresu prędkości 0 ÷ 30 km/h średnia wartość przyspieszenia wynosi ok. 1,2 m/s².

Maksymalnemu prądowi hamowania 2 x 230 A odpowiada siła ok. 40 kN zapewniająca maksymalne opóźnienie hamowania elektrodynamicznego 1,3 m/s².

Przy współdziałaniu hamulców tarczowych wózka środkowego maksymalna wartość opóźnienia hamowania służbowego wynosi ok. 1,5 m/s².

Zastosowany układ regulacyjny realizuje płynne osłabienie wzbudzenia silników, dzięki temu średnia wartość siły napędowej w zakresie prędkości 22 ÷ 42 km/h wynosi ok. 35 kN i odpowiada przyspieszeniu ok. 0,9 m/s².

Układ regulacji realizuje hamowanie odzyskowe, oporowe lub odzyskowo-oporowe przy stałej niezależnej od napięcia sieci wartości s e m silników 650 ÷ 750 V; dzięki temu uzyskuje się deklarowaną wartość 40 kN siły hamowania dla napięcia sieci trakcyjnej niższego niż 600 V.

Układ ten zapewnia hamowanie elektrodynamiczne z pełnymi parametrami również podczas zwarcia sieci trakcyjnej ($U_z = 0$).

4. Układ elektryczny

Dwie grupy silników zasilane są przez oddzielne przekształtniki tyrystorowe GTO lub tranzystorowe IGBT.

W prototypowym tramwaju zastosowano tyrystory GTO jako elementy pewniejsze, bardziej odporne na przepięcia i przetężenia prądowe sprawdzone już eksploatacyjnie w 17 tramwajach.

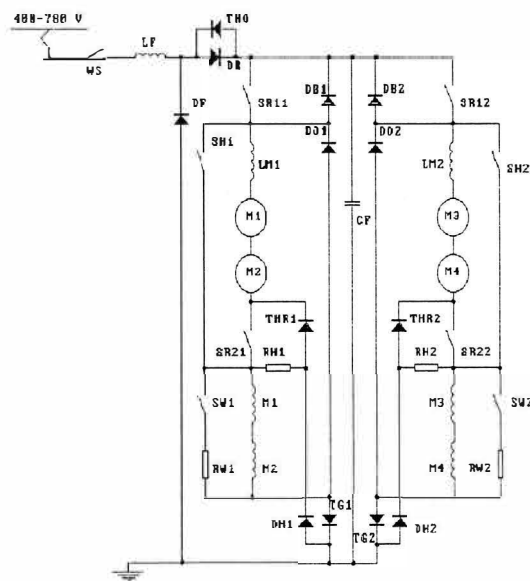
Opracowane i zbadane są również przekształtniki IGBT, które na życzenie Zamawiającego mogą być montowane w miejsce przekształtników GTO.

Podczas rozruchu przekształtniki pracują z częstotliwością 300 Hz, a faza włączenia tyrystorów przesunięta o 180° el.. Prąd rozruchu regulowany jest w granicach 50 ÷ 300 A utrzymując stałą zadaną przez motorniczego wartość.

Po osiągnięciu prędkości ok. 25 km/h następuje włączenie osłabienia wzbudzenia i samoczynna regulacja stopnia wzbudzenia od ok. 0,9 do 0,4 przy utrzymaniu stałej wartości prądu wirników. Po osiągnięciu prędkości

ok. 40 km/h przekształtniki przechodzą na pełne przewodzenie i realizowana jest jazda przy stopniu 40% wzbudzenia silników.

Podczas hamowania obydwie grupy silników pracują niezależnie. Zadana wartość prądu silników regulowana jest przez przekształtniki tyrystorowe pracujące z częstotliwością 60 ÷ 600 Hz.



Rys. 4. Schemat elektryczny tramwaju 116 N
WS - wyłącznik główny, LF-CF - filtr sieciowy, M - silnik trakcyjny LM - dławik wygładzający, SR - stycznik jazdy, SW - stycznik osłabienia wzbudzenia, RH - opornica hamowania, PT - przekształtnik tyrystorowy, TG - tyrystor główny GTO, TH0 - tyrystor hamowania odzyskowego GTO, D - dioda

Silniki pracują jako szeregowo samowzbudne, a energia zwracana jest do kondensatora filtru i sieci trakcyjnej. W zakresie prędkości powyżej 40 km/h następuje dostosowanie s e m silników do wartości napięcia sieci przez samoczynne osłabianie wzbudzenia silników. Układ taki stosowany jest od szeregu lat przez Instytut Elektrotechniki m. in. w tramwajach typu 106N i 105N 2k.

Hamowanie odzyskowe realizowane dla napięcia sieci trakcyjnej 750 V > U_z > 400 V. Schemat elektryczny napędu pokazany jest na rys. 4.

Przy braku możliwości odbioru energii przez sieć trakcyjną napięcie filtru rośnie i gdy osiągnie wartość > 750 V włączone zostaną tyrystory THR hamowania oporowego i dalej realizowane jest hamowanie oporowe.

Przy zbyt niskim napięciu sieci lub zwarcia sieci trakcyjnej do masy, hamowanie elektrodynamiczne dla $V > 30$ km/h byłoby mało efektywne. Siła hamująca maleje wówczas proporcjonalnie do wartości napięcia sieci. Dla zapewnienia wymaganej wartości opóźnienia hamowania, również w przypadkach awaryjnych, w układzie tramwaju 116N zastosowano dodatkowo tyrystor TH0 odcinający układ regulacyjny od sieci trakcyjnej gdy napięcie $U_z < 400$ V. Po wyłączeniu tyrystora TH0 napięcie kondensatora filtru rośnie i gdy osiągnie wartość 750 V następuje

Samoczynne włączenie hamowania oporowego zapewniającego żądany moment hamujący.

5. Układ sterowania

Sterowanie tramwaju zrealizowane jest za pomocą systemu mikroprocesorowego składającego się ze sterownika tramwaju (PLC) i mikroprocesorowego sterownika napędu.

Sterownik tramwaju realizuje funkcje trakcyjne oraz sterowanie hamulcami szynowymi i tarczowymi. Sterownik napędu steruje pracą przekształtników tyrystorowych, tyrystorami hamowania odzyskowego i oporowego, a także zabezpieczeniami nadprądowymi napięciowymi oraz kontrolą i likwidacją poślizgu.

Przebieg procesów rozruchu i hamowania jest samoczynny. Realizowane są funkcje zadane przez motorniczego za pomocą przełączników umieszczonych na pulpicie oraz ręcznego nastawnika jazda - hamowanie. System realizuje rozruch ze stałym zadaniem przez motorniczego momentem napędowym, płynne osłabianie wzbudzenia silników, a także jazdę jedną grupą silników i jazdę do tyłu z ograniczoną prędkością do 5 km/h z pełnym momentem napędowym.

6. Wyposażenie elektryczne

Wyposażenie elektryczne umieszczone jest w trzech skrzyniach na dachu tramwaju oraz w dwóch

skrzyniach podwieszonych pod podłogą przed pierwszym i za trzecim wózkiem.

Trzy przekształtniki tyrystorowe GTO wraz z kondensatorem filtru i wyłącznikiem głównym znajdują się w skrzyni na dachu pierwszego członu tramwaju.

W skrzyni umieszczonej na dachu trzeciego członu znajduje się dławik filtru, nawrotnik grupy drugiej silników i przetwornica statyczna, a także opornica hamowania RH6N.

W skrzyni podpodłogowej członu pierwszego znajduje się dławik wygładzający i nawrotnik pierwszej grupy silników.

Sterownik mikroprocesorowy, nastawnik jazdy i pulpit sterowniczy usytuowane są w kabinie maszynisty.

7. Wnioski

Eksploatacja prototypów tramwajów 116N i 116Na powinna określić zalety i wady rozwiązań układu napędowego z silnikami prądu stałego i silnikami synchronicznymi. Porównywane powinny być parametry ruchowe, zużycie energii, niezawodność pracy układu, a także możliwość jazdy w przypadku awarii poszczególnych podzespołów i w stanach awaryjnych układu zasilania sieci trakcyjnej. Przy wyborze rodzaju napędu do dalszej produkcji powinny być wzięte pod uwagę koszty eksploatacyjne, w tym zwiększone wydatki na przeglądy silników prądu stałego oraz wyższy koszt zakupu napędu asynchronicznego, a także gotowość ruchowa tramwaju.

