

Tadeusz Maciołek

Zagadnienia ochrony przed napięciem rażeniowym w halach do obsługi taboru zelektryfikowanego

W artykule przedstawione zostało zagadnienie koordynacji zabezpieczenia przed napięciem rażeniowym w halach obsługi taboru zelektryfikowanego. Opisana jest analiza wielkości napięć rażeniowych w warunkach roboczych i różnych warunkach awaryjnych. W analizie wykorzystano model układu powrotnego wielotorowego, który pozwala na wyznaczenie maksymalnych, możliwych do wystąpienia, napięć. Przedstawiony jest również sposób zapewnienia ochrony dla urządzeń i konstrukcji wymagających uziemienia lub uszynienia przy zachowaniu izolacji szyn od uziemienia.

Hale warsztatowe do obsługi elektrycznego taboru tramwajowego, kolejowego w Polsce wymagają modernizacji. Obecność sieci trakcyjnych zasilanych napięciem stałym 600 V dla tramwajów lub 3 kV dla pociągów i jednocześnie pracy instalacji i urządzeń z zasilaniem 230/400 V 50 Hz wywołuje komplikacje ze względu na różne wymagania dotyczące ochrony przeciwporażeniowej.

Dla systemu zasilania trakcyjnego prądu stałego wymagane jest uszynienie konstrukcji znajdujących się w strefie zagrożenia. Dla instalacji prądu przemiennego i konstrukcji wewnątrz hal wymagane jest ich uziemienie. Jednocześnie szyny torów powinny być odizolowane od ziemi ze względu na ochronę

przed prądami błądzącymi [10, 7]. Wymagania techniczne dla układu zasilania elektrotrakcyjnego, realizowanego przez sieć trakcyjną górną i powrotną, dotyczą między innymi bezpieczeństwa personelu oraz ograniczenia negatywnego oddziaływania na urządzenia i elementy infrastruktury w otoczeniu systemu zelektryfikowanego transportu (zwarcia, napięcia rażeniowe, spadki napięć, EMC, w tym prądy błądzące).

Napięcia doziemne dla układu uziemienia, uszynienia

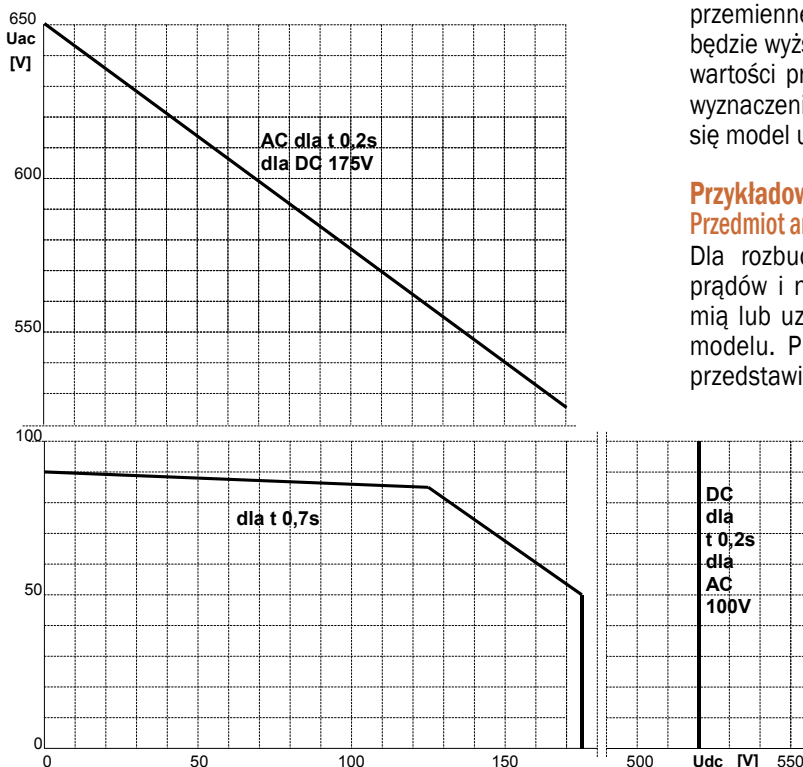
Ze względów bezpieczeństwa personelu i urządzeń elektrycznych ograniczeniu podlegają napięcia i czas ich występowania w szynowej sieci powrotnej i elementów uszynionych w stosunku do otaczającej ziemi i uziemionych części. Ograniczenia te wynikają z normy PN-EN 50122-1:2011 [9]. W przypadku warsztatów dopuszczalne napięcie stałe dotykowe DC długotrwałe wynosi 60 V. W przypadku zasilania sieci trakcyjnej pojazdów w trakcie awarii może pojawić się poza siecią trakcyjną napięcie 600 V lub 3 kV DC. Teoretycznie może wystąpić wspólne napięcie stałe i przemienne w chwili jednoczesnej awarii izolacji urządzeń prądu przemiennego 230 V/400 V/50 Hz (co jest mało prawdopodobne). Dla takiego nakładania się napięć norma [11] przewiduje wymóg spełnienia charakterystyki przedstawionej poniżej na rys. 1. Przy czasach krótszych napięcia te mogą być wyższe.

Dla czasu 0,7 s i poniżej dopuszcza się napięcie dotykowe przemienne AC nie wyższe niż 87 V, gdy napięcie stałe DC nie będzie wyższe niż 127 V. Wielkość napięć doziemnych zależy od wartości prądów maksymalnych i od rezystancji obwodów. Dla wyznaczenia parametrów prądowych i napięciowych opracowuje się model układu zasilania i wykonuje obliczenia [14, 2, 10, 1].

Przykładowy model sieci powrotnej dla układu wielotorowego

Przedmiot analiz

Dla rozbudowanych układów torów potrzebna jest analiza prądów i napięć, jakie mogą wystąpić między szynami a ziemią lub uziemionymi elementami za pomocą rozbudowanego modelu. Przykładowy model 10-torowy dla hali tramwajowej przedstawiono na rys. 2. W trakcji tramwajowej w halach występują większe prądy trakcyjne niż w halach kolejowych. Analizie poddane zostają warunki pracy standardowe i awaryjne. Szyny torów zelektryfikowanych mogą być połączone w sposób trwały elektrycznie z szynami torów poza halą. Eliminuje to konieczność stosowania wydzielonych zespołów prostownikowych dla torów w hali. Przez tory w hali mogą przepływać zarówno prądy robocze, jak i prądy zwarciove. Podczas pracy musi być zapewniony niski poziom napięcia między poszczególnymi elementami, w pobliżu których mogą znaleźć się pracownicy. Podstawowym kryterium jest tu poziom napięcia między szynami torów zelektryfikowanych a elementami uziemionymi lub bezpośrednio



Rys. 1. Przykładowe poziomy dopuszczalne napięcia kombinowanego AC i DC dla czasu 0,2 s i do 0,7 s [11]

ziemią. Za pomocą obliczeń dla opracowanego modelu wyznaczone zostają poziomy tych napięć.

Przyjęty układ szyn odizolowanych od ziemi powoduje, że napięcie w stosunku do ziemi zmienia się w zależności od wielkości i drogi przepływów prądu. Analizy prowadzone są dla najbardziej niekorzystnego przypadku pracy awaryjnej układu powrotnego. Wyniki dotyczą napięcia między analizowanym punktem torów w hali i szyną minusową podstacji.

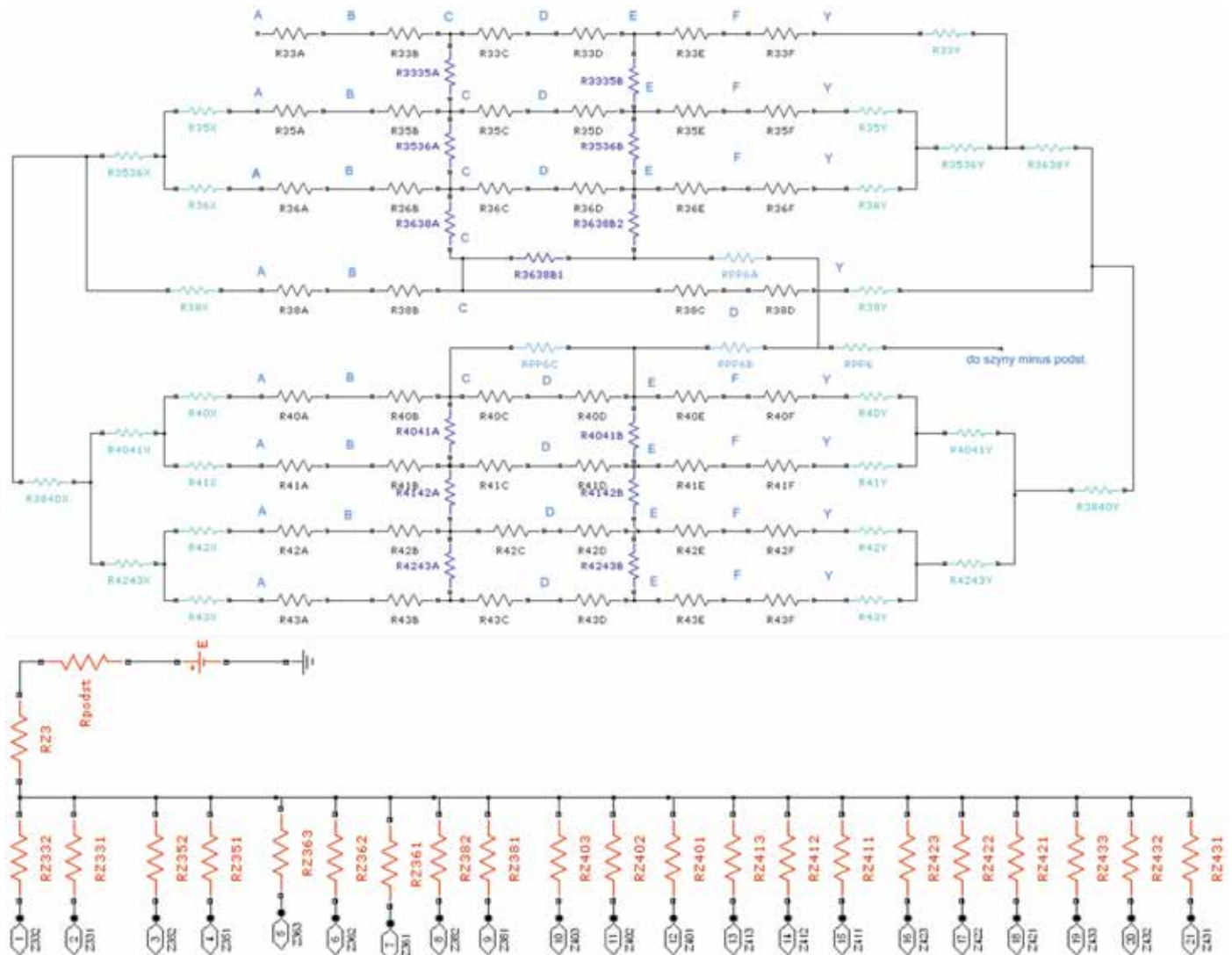
Przeanalizowana została praca przykładowego układu w dwóch stanach:

- ❖ **praca w stanie awaryjnym**, gdy pracuje tylko 1 kabel powrotny dołączony do układu torowiska hali. Rezystancja uziomu hali jest uszkodzona, jest znacznie większa niż rezystancja uziomu podstacji i rezystancja upływności szyn do ziemi. Prawdopodobieństwo pracy w stanie awaryjnym jest bardzo niskie;
- ❖ **praca w trybie normalnym**, gdy pracują wszystkie kable powrotne sieci na terenie zajezdni. Rezystancja uziomu hali jest zgodna z projektem, niższa lub porównywalna z rezystancją uziomu podstacji.

Stan obciążenia

W stanie obciążenia na poziomy napięć mają wpływ prądy płynące we wszystkich torach w hali i poza nią. Wpływ prądów tramwajów znajdujących się poza halą jest ograniczony i rozproszony. Do analizy przyjęty został przypadek skrajny – awaryjny, w którym tory hali przyłączone są do szyn minusowych podstacji trakcyjnej tylko jednym kablem powrotnym. Udział tramwajów poza halą został pominięty. Najistotniejszy jest tu jednak prąd płynący w analizowanym torze. Prąd pobierany przez 1 tramwaj zależy od fazy jazdy i prędkości tego tramwaju. Ograniczenie prędkości do kilkunastu km/h oraz ograniczenie przyspieszeń na terenie zajezdni powoduje, że prąd pobierany przez 1 tramwaj nie powinien przekroczyć wartości 400 A.

W trakcie analizy uwzględniony został skrajny przypadek jednoczesnego rozruchu 2 tramwajów i przepływ prądów postojowych 4 tramwajów, co zwiększyło prąd do wartości 1000 A. Wartości poziomów napięć między szynami torów a ziemią dla prądu zastępczego 1 000 A dla wszystkich przypadków wynoszą w najbardziej niekorzystnych warunkach awaryjnych 11 V. W trybie normalnym pracy układu zasilania jest ono kilkukrot-



Rys. 2. Schemat układu powrotnego zasilania

nie niższe. Napięcia są więc mniejsze od dopuszczalnego ciągłego napięcia 60 V.

Stan zwarcia wyłączanego przez wyłącznik szybki

Zwarcia metaliczne charakteryzują się szybkim narastaniem wielkości prądu ze stałą czasową równą kilkunastu milisekundom. Ze względu na dużą moc zwarciovą układu zasilania i przewidywaną pracę równoległą zespołów prostownikowych w stanach ustalonych prądy te mogą przekroczyć 20 kA [16]. Poprawnie pracujące wyłączniki szybkie ograniczają wartość maksymalną prądu do około 4 kA. Wyłączenie zwarcia następuje w czasie poniżej 0,1 s. Wyniki poziomów napięć między szynami torów a ziemią dla prądu zastępczego 4 000 A dla wszystkich przypadków wynoszą w najbardziej niekorzystnych warunkach awaryjnych do 45 V. Również są niższe od dopuszczalnego ciągłego napięcia 60 V.

Stan zwarcia wyłączanego przez wyłącznik mocy

Prąd zwarcia metalicznego może osiągnąć wartość ustaloną w przypadku awarii wyłącznika szybkiego [6]. Niewłaściwie pracujący (zwały) wyłącznik szybki ogranicza wartość maksymalną prądu w niewielkim stopniu i nie przerywa jego przepływu. Są to zjawiska zmienne i trudny jest do oszacowania wpływ takiego wyłącznika na wielkość prądu ustalonego. Dla tego przypadku analizy wartości prądu zwarcia zostały przyjęte jak dla zwarcia metalicznego bez efektu ograniczania. Wyłączenie zasilania następuje poprzez wyłącznik mocy po stronie prądu przemiennego w czasie poniżej 0,2 s. Dla tego przypadku dokonana została analiza stanów granicznych. Uzyskane wyniki poziomów napięć między szynami torów a ziemią dla zwarcia z prądem ustalonym dla wszystkich przypadków wynoszą w najbardziej niekorzystnych warunkach awaryjnych do 195 V o czasie trwania do 0,2 s. Przeprowadzona analiza i obliczenia układu w trybie normalnym pracy wszystkich kabli powrotnych w przykładowej hali wykazały napięcie między punktem zwarcia a szyną minusową podstacji, wynoszące 66 V. Po uwzględnieniu rozkładu napięć doziemnych szyn w stosunku do ziemi bliskiej napięcie to nie powinno przekroczyć wartości 33 V. Napięcia, zarówno w trybie awaryjnym, jak i normalnej pracy, są niższe od wartości dopuszczalnej, wynoszącej 245 V dla czasu trwania 0,2 s. Dodatkowo w przypadku pracy w trybie awaryjnym napięcie między szynami a uziemieniem w hali powinno wywołać zadziałanie elektronicznego ogranicznika i nastąpić jego zmniejszenie do 2 V w czasie rzędu 1 ms.

Stan zwarcia do obwodu uziemienia

W przypadku zwarcia w hali sieci górnej do elementów dołączonych do uziemienia (uszkodzenie izolatora) może na konstrukcji pojawić się punktowo napięcie sieciowe. Przy napięciu wyższym od 60 V powinien zareagować elektroniczny ogranicznik (rys. 3) i napięcie na konstrukcji będzie zmniejszone do 2 V w czasie rzędu 1 ms. W okresie (do 1 ms) do momentu zadziałania tyrystora ogranicznika napięcie ograniczone jest do poziomu około 300 V za pomocą warystorów [12, 4,7, 5]. Dopuszczalne napięcie wg tab. 2 dla czasu poniżej 20 ms wynosi 870 V. Zwarcie doziemne powinno wywołać zadziałanie EZZ (Elektroniczne Zabezpieczenie Ziemnozwarciowe) w podstacji.

Maksymalne napięcie między szynami w hali a ziemią i elementami uziemionymi w czasie normalnej pracy układu powrotnego zasilania nie przekracza 60 V, niezależnie od wielkości prądów. Dotyczy to stanów obciążeniowych, jak i zwarć

wyłączanych i niewyłączanych przez wyłącznik szybki zasilacza. W takich warunkach nie zareaguje elektroniczny ogranicznik napięcia TZD między układem szyn i uziemieniem. Między uziemieniem i szynami będzie zachowana izolacja niedopuszczająca do przepływu prądów błądzących.

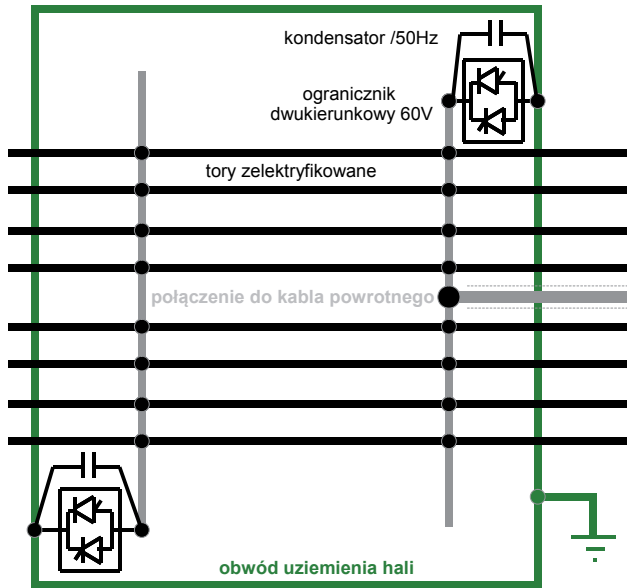
Tylko w przypadku uszkodzeń pozostałych kabli powrotnych w zajeźdni (oprócz kabla powrotnego z hali) i przepływu prądów z torów w hali poprzez 1 kabel powrotny wraz z jednoczesnym uszkodzeniu wyłącznika szybkiego w trakcie zwarcia może się pojawić napięcie do 200 V. Czas trwania takiego zwarcia wyniesie poniżej 0,2 s w trakcie wyłączania zwarcia poprzez wyłącznik mocy AC w podstacji [6]. Jednocześnie dodatkowe obniżenie napięcia do 2 V zapewni elektroniczny ogranicznik. Należy podkreślić, że taki przypadek jest mało prawdopodobny w trakcie pracy hali.

Proponowany układ połączeń ochrony z użyciem elektronicznych ograniczników przedstawiony jest na rys. 3. Rozwiązanie to zabezpiecza również hale i urządzenia w przypadku przepływów prądu od wyładowań atmosferycznych. Wyładowanie może nastąpić do konstrukcji hali lub pobliskiej konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej na zewnątrz hali. Należy się liczyć z pojedynczymi przypadkami w ciągu roku. W przypadku wyładowania atmosferycznego – bezpośredniego uderzenia pioruna – prąd kanału głównego osiąga typowo wartość około 100 kA. Czas wyładowania to kilkadziesiąt μ s. Nawet przy przepływie tak dużego prądu warystor wbudowany w ogranicznik zmniejsza wartość napięcia do poziomu rzędu 300 V.

Ograniczniki napięcia stanowią w większości przypadków drugi dodatkowy stopień ochrony, gdyż wyłącznik szybki i wyłącznik mocy zapewniają odpowiednio szybkie wyłączenie zasilania. Stanowią one podstawowy sposób ograniczenia poziomu napięcia w przypadku awarii podstawowego sposobu ochrony, jak i przy zwarciu doziemnym w hali i bliskich wyładowaniach atmosferycznych.

Układ sieci powrotnej

W halach i warsztatach często stosowano rozwiązania z izolowaniem szyn od układu torów poza halą i bezpośrednie ich uziemianie. Wynikało to z konieczności stosowania uziemienia obwodów elektrycznych, obudów urządzeń, jak i konstrukcji hali. Obecnie możliwe jest również bezpośrednie połączenie szyn torów zelektryfikowanych z szynami torów poza halą. Ze względu na zjawiska elektrokorozyjne w układach trakcyjnych w systemie prądu stałego DC szyny – jako elementy obwodu powrotnego – izoluje się od ziemi i w tym wypadku również izoluje od obwodów uziemień, co zabezpiecza przed przepływem prądów błądzących wg zaleceń normy PN-EN 50122-2:2003 [10]. Dostępność elektronicznych – tyrystorowych – ograniczników [12] umożliwia zachowanie izolacji między szynami systemu trakcyjnego a elementami uziemionymi dla dopuszczalnego poziomu napięć. Jednocześnie ograniczniki zapewniają ciągłą kontrolę napięcia między ziemią (systemem uziemienia) a szynami. Przekroczenie dopuszczalnego napięcia powoduje zwarcie tych 2 obwodów z ograniczeniem napięcia do 2 V. Jest to element ochrony przed porażeniem. Czas występowania napięcia ograniczonego przez warystory do około 300 V przed zadziałaniem tyrystora wynosi około 1 ms. Po przerwaniu przepływu prądu ogranicznik wraca do stanu izolującego te 2 obwody. Urządzenie ograniczające potencjał szyn jest przewidziane do stosowania zgodnie z normą [9]. Ze względu na fakt przepływu przez szyny prądów roboczych i zwarciovych szyny torów w hali



Rys. 3. Połączenia sieci powrotnej torów zelektryfikowanych i uziemienia przez ograniczniki
 Źródło: oprac. własne.

powinny zostać połączone między sobą dodatkowymi połączeniami międzyszynowymi i międzytorowymi w pobliżu granic izolowanych sekcji.

Obwody uziemienia konstrukcji i urządzeń hali

Urządzenia elektryczne nietrakcyjne, konstrukcje w hali powinny być uziemiane. Układ uziemienia nie powinien być połączony bezpośrednio z układem szyn trakcyjnych. Dla zapewnienia dodatkowej ochrony między szynami a obwodem uziemienia powinny być włączone elektroniczne ograniczniki dwukierunkowe. Dla zwiększenia stopnia pewności działania należy włączyć w obwód 2 ograniczniki zlokalizowane po przeciwnych stronach hali, a obwód główny uziemienia powinien tworzyć pętlę (rys. 3).

Kondensator o pojemności kilku μF zapewnia przepływ prądu przemiennego dla poprawnej pracy wyłącznika różnicowo prądowego, chroniącego urządzenie zasilane z sieci 50 Hz przy przebiciu izolacji i przepływie prądu do szyn lub do taboru znajdującego się na torze. Pojemność kondensatora uzależniona jest od wartości prądu różnicowego. W przypadku urządzeń chronionych przez wyłączniki różnicowo prądowe właściwe jest stosowanie dwójników RC. Zapewniają one przepływ prądu przemiennego różnicowego, co zapewnia właściwe działanie wyłączników różnicowych. Jednocześnie chronią przewody sieci PE przed przepływem prądu stałego o dużej wartości.

Bibliografia

1. Drażek Z., Mierzejewski L., Szelaż A., *Metoda symulacyjna obliczania obciążeń sieci tramwajowej*, „Technika Transportu Szynowego” 2002, nr 2.
2. Drażek Z., Mierzejewski L., Szelaż A., *Obliczenia metodami analitycznymi parametrów sieci zasilającej i powrotnej układów zasilania trakcji tramwajowej (1)*, „Technika Transportu Szynowego” 2001, nr 7-8.
3. Drażek Z., Mierzejewski L., Szelaż A., *Obliczenia metodami analitycznymi parametrów sieci zasilającej i powrotnej układów zasilania trakcji tramwajowej (2)*, „Technika Transportu Szynowego” 2001, nr 9.

4. Kolen, *Ograniczniki niskonapięciowe typu TZD-1NR i TZD-1NR/T*: <http://www.kolen.hekko24.pl/sites/default/files/pliki/tzd-1nr1nrt.pdf> (dostęp 17.10.2015)
5. Maciołek T., Mierzejewski L., Szelaż A., *Analiza porównawcza zwierników napięciowych w obwodach uszynienia konstrukcji w strefie oddziaływania trakcji elektrycznej*, XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo elektryczne”, Politechnika Wrocławska, Wrocław 15-17 IX 1999.
6. Maciołek T., Mierzejewski L., Szelaż A., *Wyłączanie zwarców w systemie trakcji elektrycznej prądu stałego poprzez wyłączniki szybkie i wyłączniki mocy*, „Technika Transportu Szynowego” 2001, nr 3.
7. Mierzejewski L., Szelaż A., *Sieci powrotne zelektryfikowanego szynowego transportu miejskiego*, „Technika Transportu Szynowego” 2005, nr 11.
8. PN-EN 50119 - *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacyjne. Sieć jezdna górna trakcji elektrycznej*.
9. PN-EN 50122-1:2011 - *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacyjne. Bezpieczeństwo elektryczne, uziemianie i sieć powrotna. Część 1: Środki ochrony przed porażeniem elektrycznym*.
10. PN-EN 50122-2:2003 (U) - *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacyjne. Część 2: Środki ochrony przed oddziaływaniem prądów błędzących wywołanych przez trakcję elektryczną prądu stałego*.
11. PN-EN 50122-3:2011 - *Zastosowania kolejowe. Urządzenia stacyjne. Bezpieczeństwo elektryczne, uziemianie i sieć powrotna. Część 3: Oddziaływanie wzajemne systemów trakcji prądu przemiennego i stałego*.
12. PN-EN 60099-5:1999 - *Ograniczniki przepięć. Zalecenia wyboru i stosowania (ze zmianą A1:2004)*.
13. PN-K-92002:1997 - *Komunikacja miejska. Sieć jezdna tramwajowa i trolejbusowa*.
14. Szelaż A., *Obliczanie tramwajowej sieci powrotnej w celu zmniejszenia upływu z szyn jezdnych prądów błędzących*, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Trakcja elektryczna w komunikacji miejskiej” TRAM'96, Gdańsk 9-11 V 1996.
15. Szelaż A., *Wymiarowanie granicznych zdolności przesyłu energii w sieci zasilającej i powrotnej trakcji tramwajowej*, SEMTRAK'96.
16. Wdowiak J., Mierzejewski L., Szelaż A., *Projektowanie układów zasilania trakcji elektrycznej systemu prądu stałego. Podstacje trakcyjne*, WPW, Warszawa 1993.

Autor:

doc. dr inż. Tadeusz Maciołek – Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych, Zakład Trakcji Elektrycznej

Problems of protection against electric shock voltage in depots for electric rolling stock

Problems of electric shock-protection coordination in depots and workshops of electric traction vehicles are presented in the paper. Results of analysis of electric shock voltage under normal and different fault conditions of operation are described. A multi-track model of a return network was applied in the analysis, which allowed to assess values of maximum voltages which could appear during fault conditions. There is presented a study-case of a protection system for devices and installation requiring earthing or bonding with assuring isolation of rails from an earth.