

Tadeusz Glinka, Barbara Kulesz

Wariantowe rozwiązania silników napędu głównego tramwaju

Moc znamionowa ciągła (S1) silników napędowych tramwaju typu 105Na wynosi 4×40 kW. Napęd ten stanowią cztery silniki szeregowo prądu stałego LTa-220 bądź LTb-220, różniące się jedynie liczbą zwojów uzwojenia wzbudzenia. W silniku LTb-220 jest o 40% więcej zwojów uzwojenia wzbudzenia przy proporcjonalnie mniejszym przekroju przewodów. Wykonania fabryczne tramwaju typu 105Na mają zarówno rozruch, jak i hamowanie rezy-stancyjne.

Nowsze rozwiązanie tramwajów typu 105N2k mają zainstalowane te same silniki napędowe, lecz układy rozruchowe energoelektroniczne. Układy napędowe w tych tramwajach można zmodernizować podwyższając równocześnie zarówno ich moc, jak i sprawność. Są trzy możliwości rozwiązania, przy zachowaniu kształtu i wymiarów zewnętrznych silników LT-220:

- w obecnych silnikach LT-220 można zastąpić wzbudzenie elektromagnetyczne magnesami trwałymi Nd Fe B, umożliwiając to zwiększenie średnicy wirnika, a tym samym mocy znamionowej silnika,
- zastosować silniki indukcyjne klatkowe zasilane z falowników,
- zastosować silniki bezszczotkowe prądu stałego wzbudzone magnesami trwałymi Nd Fe B z komutatorem elektronicznym.

Schematy wymienionych układów napędowych (dotyczące jednego silnika) przedstawiono na rysunku 1, na którym nie zaznaczono obwodów regulacyjnych, sterujących i sprzężeń zwrotnych, gdyż te obwody nie są przedmiotem analizy.

Porównuje się:

- moc znamionową S1 silników mieszczącą się w gabarycie silnika LT- 220,
- straty i sprawność silnika napędowego,
- przeciążalność momentem,
- charakterystykę $M = f(\omega_m)$.

Warto nadmienić, że wyprodukowany przez ALSTOM KONSTAL S.A. w Chorzowie tramwaj typu 116N jest napędzany czte-

rema silnikami szeregowymi prądu stałego Lta-240 o mocy 55 kW. ALSTOM KONSTAL S.A w Chorzowie wyprodukował także tramwaj CITADIS niskopodłogowy napędzany przez cztery silniki indukcyjne o mocy znamionowej 140 kW, zasilane z dwóch falowników.

Napęd silnikami prądu stałego LT-220

Klasyczne rozwiązanie napędu tramwaju typu 105Na jest realizowane za pomocą silników szeregowych prądu stałego LTa-220 lub LTb-220 o mocy znamionowej S1 40 kW (rys. 2), zasilanych, poprzez układ rezystorów z sieci trakcyjnej prądu stałego 600 V. Właściwości napędowe tego układu są dobrze znane i opisane w literaturze.

Napęd ten wyróżniają:

- dwie strefy regulacji prędkości obrotowej: przy pełnym wzbudzeniu, tj. przy stałym momencie ($M = \text{const}$) i przy osłabieniu wzbudzenia, tj. przy stałej mocy ($P = \text{const}$) – rysunek 3;
- dopuszczalne chwilowe przeciążenia prądowe (zwykle do $1,5I_N$), co daje przy pełnym wzbudzeniu ponad dwukrotne przeciążenie momentem.

Napędy te są modernizowane poprzez zastąpienie rozruchu rezystorowego łącznikiem energoelektronicznym DC/DC.

Sprawność katalogowa silnika LTa-220 dla pracy ciągłej S1 wynosi 88,8%, a dla silnika LTb-220 – 89,2%. Uwzględniając niepewność pomiarową wyznaczenia sprawności oraz rozbieżność technologiczną parametrów silników, można założyć sprawność silników LT-220 (bez wyróżnienia a lub b) równą 89%. Wy-chodząc z definicji sprawności można obliczyć całkowite straty mocy w silniku dla znamionowych parametrów pracy:

$$\Delta P = P_N \frac{1 - \eta}{\eta} = 40 \frac{1 - 0,89}{0,89} = 4,94 \text{ kW}$$

w tym straty wzbudzenia w silniku LTa-220 w temperaturze 75°C wynoszą:

$$\Delta P_{fa} = R_{fa} I_N^2 = 0,0315 \cdot 150^2 = 708 \text{ W}$$

a w silniku LTb – 220

$$\Delta P_{fb} = R_{fb} (0,715 I_N)^2 = 0,065 \cdot (0,715 \cdot 150)^2 = 747 \text{ W}$$

gdzie:

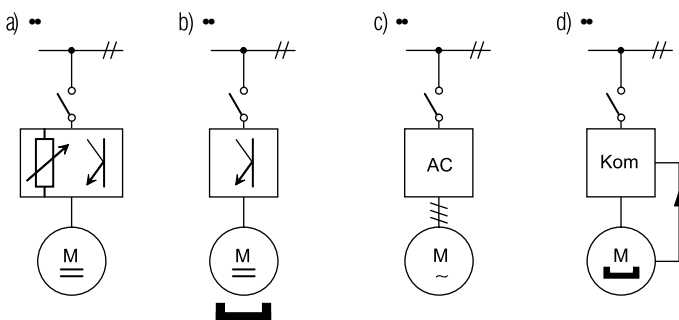
$R_{fa} = 0,0315 \text{ W}$ w temperaturze 75°C,

$R_{fb} = 0,065 \text{ W}$ w temperaturze 75°C.

Do dalszego bilansu mocy przyjmuje się straty wzbudzenia $\Delta P_f = 747 \text{ W}$.

Silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi

Uzwojenie wzbudzenia w silniku LT-220 można zastąpić magnesami trwałymi Nd Fe B (rys. 4). W konstrukcji tej zachowuje się długość łuku bieguna wzbudzenia $b_1 = b_2 = 115 \text{ mm}$ oraz przekrój uzwojenia komutacyjnego. Indeks 1 dotyczy silnika LT-220,



Rys. 1. Cztery warianty rozwiązań układów napędowych tramwaju 105N: a - silnik LT-220 z rozruchem rezystorowym bądź z czoperem, b - silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi plus czoper, c - silnik indukcyjny klatkowy plus falownik, d - bezszczotkowy napęd prądu stałego

a indeks 2 nowego silnika. W nowym silniku brak jest uzwojenia wzbudzenia, można zatem zmniejszyć przekrój okna między biegunami wzbudzenia i biegunami komutacyjnymi, gdyż w oknie tym mieści się jedynie uzwojenie biegunów komutacyjnych. Dzięki temu można powiększyć średnicę wirnika nowego silnika. Moc znamionową nowego silnika P_{2N} można oszacować z relacji [2]:

$$P_{2N} = P_{1N} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{4}{3}}$$

Objętość twornika (wirnika) silnika LT-220 wynosi [1]:

$$V_1 = \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot l = \frac{\pi}{4} \cdot 220^2 \cdot 38 = 38\,000 \text{ mm}^3$$

$$D_1 = 220 \text{ mm}$$

Średnica D_2 nowego silnika będzie większa z uwagi na zmniejszenie przekroju okna między biegunem głównym i biegunem komutacyjnym.

W oknie uzwojenia wzbudzenia silnika LT-220 na wysokości bieguna są umieszczone dwa przewody płaskie o wymiarach miedzi ($a \times b$), przy czym $a = 1,3 \text{ mm}$, $b = 20 \text{ mm}$. Okno w nowym silniku może być zmniejszone w wymiarze promieniowym o jeden przewód (b) minus długość promieniowa magnesu trwałego (l_m), czyli o wartości $(b - l_m)$.

Zachowując tę samą indukcję w szczelinie silnika oraz przyjmując długość szczeliny $\delta_2 = 2 \text{ mm}$ (w silniku LT-220 szczelina $\delta_1 = 3 \text{ mm}$), długość magnesu trwałego Nd Fe B powinna wynosić $l_m = 6 \text{ mm}$, wynika to z obliczenia indukcji na powierzchni wirnika przy wzbudzeniu obwodu magnetycznego magnesami trwałymi [2].

Średnica wirnika nowego silnika wynosi zatem:

$$D_2 = D_1 + 2(b - l_m + \delta_1 - \delta_2) = 220 + 2(20 - 6 + 3 - 2) = 250 \text{ mm}$$

Objętość nowego wirnika:

$$V_2 = \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot l = \frac{\pi}{4} \cdot 250^2 \cdot 38 = 49\,000 \text{ mm}^3$$

Moc znamionowa nowego silnika dla pracy ciągłej S1:

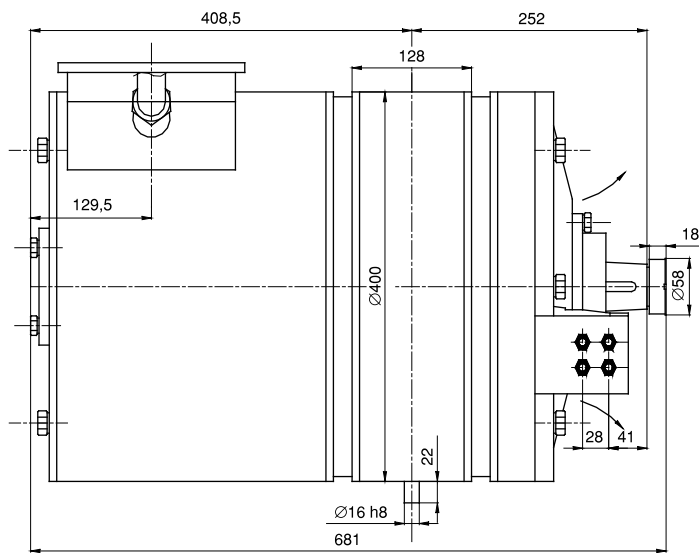
$$P_{2N} = 40 \left(\frac{49\,000}{38\,000} \right)^{\frac{4}{3}} = 56 \text{ kW}$$

Sprawność nowego silnika będzie wyższa, gdyż straty wzbudzenia ΔP_f w nowym silniku będą równe zero. Zmniejszają się także straty mocy w nabiegunkach biegunów głównych, a generowane przez pulsacje:

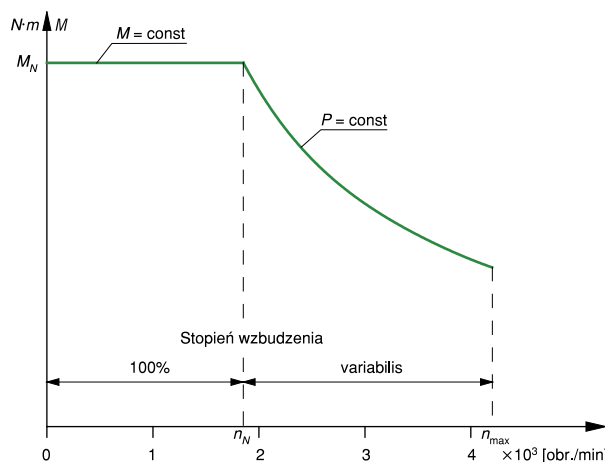
- żłobkowe indukcji wzbudzenia,
- indukcji oddziaływania twornika pochodzące od łącznika energoelektronicznego, gdyż dla składowych zmiennych indukcji zwiększy się szczelina magnetyczna z $\delta_1 = 3 \text{ mm}$ do $(\delta_2 + l_m) = 8 \text{ mm}$, strat tych w bilansie mocy się nie uwzględnia.

W stosunku do silnika LT-220, straty mocy w tworniku silnika wzrosną proporcjonalnie do wzrostu objętości silnika:

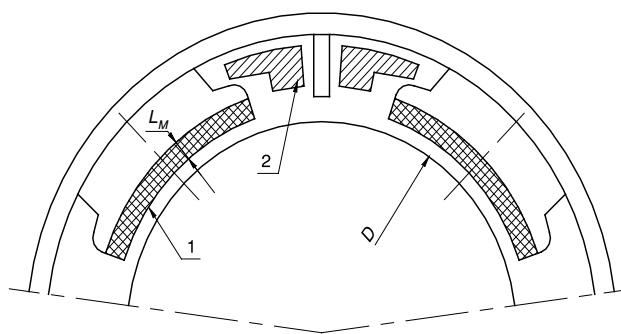
$$\Delta P = (\Delta P - \Delta P_{f1}) \frac{V_2}{V_1} = (4940 - 747) \frac{49}{38} = 5406 \text{ kW}$$



Rys. 2. Szkic wymiarowy silnika trakcyjnego LT-220



Rys. 3. Charakterystyka silnika trakcyjnego LT-220



Rys. 4. Obwód magnetyczny silnika trakcyjnego wzbudzany magnesami trwałymi (1), z uzwojeniem biegunów komutacyjnych (2)

Straty te są większe od strat całkowitych w silniku LT-220. Aby zachować bilans cieplny silnika, sumaryczna moc strat nie powinna przekroczyć wartości 4940 W, jak w silniku LTb-220. Można to uzyskać zmniejszając moc znamionową silnika o 5%, tj. z wartości 56 kW do 53 kW. Straty mocy w silniku zmniejszą się do:

$$\Delta P = 5406 \left(\frac{53}{56} \right)^2 = 4842 \text{ W}$$

Tak więc w gabarycie zewnętrznym silnika LT-220 można zbudować silnik o mocy znamionowej S1 większej o około 32,5% i o większej sprawności:

$$\eta = \frac{53 \cdot 100}{53 + 4,842} = 91,6\%$$

Nowy silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi Nd Fe B będzie silnikiem obcowzbudnym o jednej strefie regulacji prędkości obrotowej $M = \text{const}$ (rys. 3).

Silnik indukcyjny klatkowy zasilany z falownika

Silnik indukcyjny klatkowy, w gabarycie silnika LT-220, został zaprojektowany przez T. Glinkę i wykonany przez fabrykę EMIT w Żychlinie [3]. Jest to silnik oznaczony symbolem STD 200 L4. Dane konstrukcyjne oraz charakterystyki elektromechaniczne były prezentowane na konferencji SEMTRAK 92 [4] i nie będą tutaj powtarzane. Ograniczymy się do wyznaczania strat mocy i sprawności silnika.

Straty mocy w silniku określa się na podstawie danych z protokołu próby fabryki EMIT:

$$\Delta P_N = P_o + 3 [R_1 (I_{1N}^2 - I_{10}^2) + R_2 I_{2N}^2]$$

gdzie:

$P_o = 770 \text{ W}$ – moc strat biegu jałowego przy $U_N = 380 \text{ V}$ 60 Hz,

$I_{1N} = 71,7 \text{ A}$ – prąd znamionowy,

$I_{10} = 18,8 \text{ A}$ – prąd biegu jałowego,

$R_1 = 0,059 \Omega$ – w temperaturze 28°C,

$R_2 = 0,070 \Omega$ – w temperaturze 75°C.

Parametry uzwojenia klatkowego ($R_2; I_{2N}$) są niemierzalne, a zatem założono, że straty mocy w uzwojeniu wirnika są równe stratom mocy w uzwojeniu stojana:

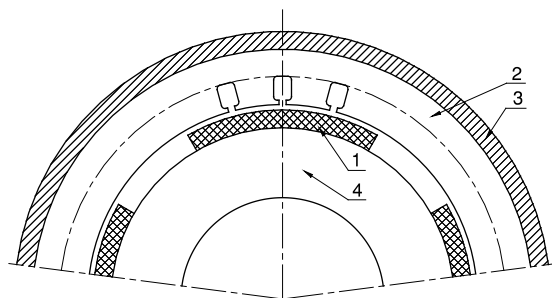
$$m_2 R_2 I_{2N}^2 = m_1 R_1 I_{1N}^2$$

Tak więc straty mocy w silniku STD 200 L4 w znamionowych warunkach pracy $\Delta P_N = 2860 \text{ W}$.

Zakładając w silniku STD 200 L4 identyczne warunki wentylacyjne jak w silniku LT-220, można dopuścić zwiększenie strat mocy do wartości 4940 W, stratom tym będzie odpowiadać zwiększenie mocy znamionowej silnika.

Zwiększenie mocy znamionowej silnika STD 200 L4 będzie w przybliżeniu proporcjonalne do zwiększenia strat w potęgę 0,5:

$$P_N = 40 \left(\frac{4940}{2860} \right)^{0,5} = 53 \text{ kW}$$



Rys. 5. Obwód magnetyczny silnika z komutatorem elektronicznym: 1 – magnes trwały NdFeB, 2 – pakiet blach stojana, 3 – kadłub, 4 – żarzmio ferromagnetyczne wirnika

Sprawność znamionowa silnika wynosi:

$$\eta = \frac{P_{2N} \cdot 100}{P_{2N} + \Delta P_N} = \frac{53 \cdot 100}{53 + 4,94} = 91,5\%$$

Prąd znamionowy silnika:

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} U_N \eta \cos \varphi} = \frac{53 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,915 \cdot 0,96} = 91,6 \text{ A}$$

Przy czym obliczono, z mocy biegu jałowego i mocy znamionowej, wartość $\cos \varphi = 0,96$.

Silniki indukcyjne mogą pracować przy sterowaniu skalarnym w dwóch strefach regulacji prędkości obrotowej (rys. 3), a także przy sterowaniu wektorowym, co zwiększa dynamikę napędu, zbliżając ją do dynamiki silników prądu stałego.

Silnik bezszczotkowy z komutatorem elektronicznym

Obwód magnetyczny silnika bezszczotkowego z komutatorem elektronicznym przedstawiono na rysunku 5. Stojan silnika wraz z uzwojeniem jest identyczny jak w silniku indukcyjnym STD 200L4. Można zachować długość pakietu blach równą 300 mm. Z uwagi na to, że wirnik nie ma uzwojenia, pod czołami stojana można umieścić na wirniku odblaskowy układ śledzenia położenia magnesów trwałych, umieszczonych na wirniku w stosunku do osi uzwojenia. Silnik z komutatorem elektronicznym przy mocy obciążenia S1 – 53 kW będzie miał parametry pracy korzystniejsze od silnika indukcyjnego.

Prąd płynący w uzwojeniu będzie miał tylko składową czynną:

$$I_1 = I_{1N} \cos \varphi = 91,6 \cdot 0,96 = 88 \text{ A}$$

Straty mocy czynnej w silniku:

$$\Delta P = P_o + 3R_1 (I_1^2 - I_{10}^2)$$

gdyż straty mocy w wirniku i straty mocy w uzwojeniu stojana spowodowane składową bierną prądu są równe zero.

$$\Delta P = 770 + 3 \cdot 0,07 (88^2 - 18,8^2) = 2322 \text{ W}$$

Sprawność silnika zwiększa się do wartości

$$\eta = \frac{53 \cdot 100}{53 + 2,322} = 95,8\%$$

Sprawność silnika z komutatorem elektronicznym zwiększa się o 4,3% w stosunku do sprawności silnika indukcyjnego.

Natomiast jeśli założyć, że w silniku bezszczotkowym z komutatorem elektronicznym jest identyczne oddawanie ciepła do otoczenia, jak w silniku STD 200 L4, wówczas poziom strat mocy w silniku może zwiększyć się do $\Delta P = 4940 \text{ W}$, a moc znamionowa silnika – do wartości $P_{1N} = 77 \text{ kW}$.

W gabarycie silnika LT 220 można więc uzyskać silnik z komutatorem elektronicznym, wzbudzany magnesami trwałymi Nd Fe B o mocy 77 kW i sprawności:

$$\eta = \frac{77 \cdot 100}{77 + 4,94} = 94,0\%$$

Ten typ silnika umożliwia uzyskanie najwyższej mocy przy zadanej objętości i najwyższej sprawności. Silnik pracuje podobnie jak silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi, tzn. tylko w jednej strefie regulacji prędkości obrotowej ($M = \text{const}$), regulację tę uzyskuje się poprzez zmianę napięcia silnika.

Zaletą tego typu silnika jest także duża przeciążalność momentem determinowana prądem dopuszczalnym tranzystorów i wytrzymałością mechaniczną: wału, sprzęgła i przekładni.

Wnioski

W tablicy zestawiono parametry charakterystyczne 4 rodzajów silników trakcyjnych (rys. 1), które stosuje się, bądź można zastosować do napędu tramwaju 105N.

Zestawienie podstawowych parametrów silników napędu głównego tramwaju 105N

Parametr	Rodzaj silnika				
	LTb-220 rys. 1a	DC+mag. tr. rys. 1b	indukcyjny rys. 1c	z komut. elektr. rys. 1d	
Moc znamionowa S1 [kW]	40	53	53	53	77
Napięcie znamionowe [V]	300	300	380	380	380
Moc pobierana [kW]	44,94	57,84	57,94	55,32	81,94
Straty mocy [W]	4940	4842	4940	2320	4940
Sprawność [%]	89	91,6	91,5	95,8	94,0

Z zestawienia tego wynika, że silnik prądu stałego wzbudzany magnesami trwałymi (rys. 1b) i silnik indukcyjny (rys. 1c) mają prawie identyczną moc znamionową i sprawność znamionową. Najkorzystniejszym rozwiązaniem napędu tramwajów typu 105N z uwagi na moc silników napędowych i ich przeciążenie momentem umożliwiają silniki z komutatorem elektronicznym wzbudane magnesami trwałymi (rys. 1d).

Silniki te mają jedną strefę regulacji prędkości obrotowej (rys. 3), regulacja ta odbywa się poprzez zmianę napięcia zasilania. Silniki z komutatorem elektronicznym gwarantują największą

przeciążalność momentem. Silnik z komutatorem elektronicznym ma trwałość i niezawodność pracy podobną jak silniki indukcyjne. Silniki z komutatorem elektronicznym mogą być znacznie łatwiejsze i tańsze w produkcji, gdyż można ich obwód magnetyczny oprzeć na wykrojach blach silników indukcyjnych, np. STD 200L4.

W bilansie strat energii układu napędowego należy uwzględnić także straty w układzie energoelektronicznym, którymi w artykule nie się zajmowano. □

Literatura

- [1] Dokumentacja konstrukcyjna silnika LT-220.
- [2] Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudane magnesami trwałymi*. Wyd. Pol. Śląskiej. Gliwice 2002.
- [3] Dokumentacja konstrukcyjna i protokół próby silnika STD 200 L4.
- [4] Glinka T.: *Silnik trakcyjny przeznaczony do napędu tramwaju*. Materiały V Konferencji SEMTRAK 92. Politechnika Krakowska 1992.
- [5] Giziński Z.: *Krajowy tabor trakcyjny – stan obecny, perspektywy, zagrożenia*. Wiadomości Elektrotechniczne 3/2003.

Autorzy

prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka – Politechnika Śląska, Gliwice
tglinka@polsl.gliwice.pl

dr inż. Barbara Kulesz – Politechnika Śląska, Gliwice
bkulesz@polsl.gliwice.pl

➤ Dokończenie ze s. 69

Literatura

- [1] Praca zbiorowa. *60 lat elektryfikacji PKP*. Centralna Dyrekcja Okręgowa Kolei Państwowych. Warszawa 1996.
- [2] Małewski R., Rojek A., Duart J.C.: *Zastosowanie izolacji NOMEX-celuloza do transformatorów prostownikowych zasilających sieć trakcyjną*. VIII Symposium – Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia. Zakopane 2001.
- [3] Korzycki E., Sakowicz S., Świątek H., Zymmer K.: *Zespoły prostownikowe 12-pulsowe do podstacji trakcyjnych PKP zasilanych średnim napięciem*. Technika Transportu Szynowego 3-4/2002.
- [4] *Trakcyjne zespoły prostownikowe o pulsacji 12-fazowej i napięciu 3 kV*. Centralne Biuro Projektowo-Badawcze Budownictwa Kolejowego. Warszawa 1987.
- [5] *WTO-41/4LA/98 – Prostownik diodowy – typ PD-17/3,3 – wersja konterenerowa*. ABB Industry Sp. z o.o. Łódź 1998.
- [6] *Dokumentacja techniczna. Postownik diodowy 1700 A, 3300 V dla zespołu prostownikowego z jednostopniową transformacją napięcia 110/*

/3 kV. Instytut Elektrotechniki. Zakład Przekształtników Mocy. Warszawa 1998.

- [7] *Karta katalogowa nr 93.13 – Wyłacznik szybki prądu stałego BWS*. Fabryka Aparatów Elektrycznych „Apena”. Bielsko-Biała 1993.
- [8] *Karta katalogowa nr 97.03 – Wyłacznik szybki prądu stałego BWS-50*. Fabryka Aparatów Elektrycznych „Apena”. Bielsko-Biała 1997.
- [9] *Nadzór na wdrożeniu i eksploatacją nowych urządzeń zasilania, automatyki i zabezpieczeń podstacji trakcyjnych*. Praca CNTK nr 3041/28. Warszawa 2001.

Autor

dr inż. Artur Rojek

Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa w Warszawie