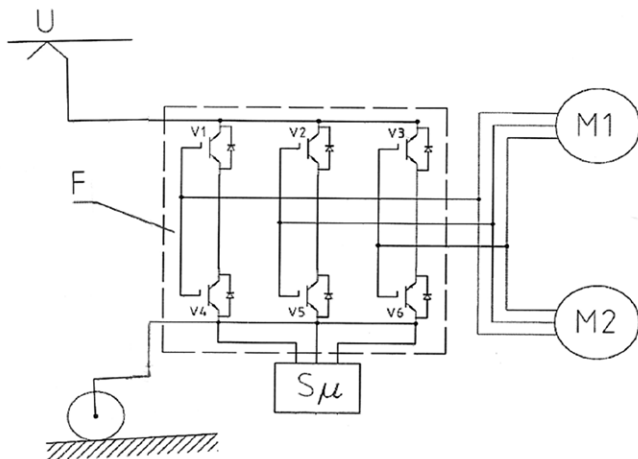


# Trakcyjny układ napędowy z silnikami indukcyjnymi

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka

## 1. Wstęp

Układy napędowe pojazdów trakcyjnych z silnikami indukcyjnymi stosowane są obecnie w lokomotywach, pociągach i tramwajach. Układy te składają się z dwóch bądź trzech zespołów napędowych. W skład jednego zespołu napędowego wchodzi jeden falownik F i dwa silniki indukcyjne klatkowe M1 i M2, jak to pokazano na rys. 1. Wszystkie silniki w danym pojeździe są identyczne, o tej samej liczbie par biegunów uzwojenia stojana  $p = 2$  lub  $p = 3$ .



Rys. 1. Zespół napędowy pojazdu trakcyjnego: M1 i M2 – silniki napędowe; F – falownik; S $\mu$  – sterownik mikroprocesorowy

W pojazdach trakcyjnych o prędkości maksymalnej nieprzekraczającej  $v_{max} \leq 120$  km/godz silniki trakcyjne standardowo są zabudowane na wózkach i sprzęgnięte poprzez przekładnie z kołami jezdnyymi. Takie rozwiązanie stosowane jest w tramwajach, pociągach metra, zespołach trakcyjnych E57 i lokomotywach. W pociągach o prędkości jazdy większej od 120 km/godz, np. Pendolino, silniki trakcyjne są zamocowane na wagonach pod podłogą wagonów, a napęd na koła jest przekazywany wałem Kardana na przekładnię różnicową umieszczoną na wózku i sprzęgniętą z kołami jezdnyymi.

Silniki pracują w dwóch strefach regulacji prędkości obrotowej. Pierwsza strefa regulacji  $0 \leq n \leq n_N$  jest realizowana poprzez zmianę napięcia  $U$  i częstotliwości  $f$ , przy  $\frac{U}{f} = \text{constans}$ . Druga strefa regulacji  $n_N < n \leq n_{max}$  jest realizowana poprzez zmianę częstotliwości  $f > f_N$ , przy  $U = U_N$ . Parametry  $U_N$ ,  $f_N$  i  $n_N$  są parametrami znamionowymi silników, przy czym znamionowa prędkość obrotowa silników  $n_N$  jest mniejsza o poślizg (około 2%) od prędkości synchronicznej  $n_1 = 60 \frac{f_N}{p}$ . W pierwszej strefie moment napędowy silników jest stały  $T = \text{constans}$ , co

**Streszczenie:** Trakcyjne silniki indukcyjne klatkowe mają inne charakterystyki mechaniczne niż silniki prądu stałego o wzbudzeniu szeregowym. Układy napędowe pojazdów trakcyjnych składają się z dwóch lub trzech zespołów dwumaszynowych zabudowanych na wózkach jezdnych. W pociągach szybkojezdnych silniki są zamocowane pod podłogą wagonów. Zespół dwumaszynowy jest zasilany z jednego falownika. Wszystkie silniki mają tę samą liczbę par biegunów. W artykule przedstawiono układ napędowy lokomotywy Bo-Bo zabudowany na dwóch skrajnych wózkach, przy czym na jednym wózku są umieszczone silniki o liczbie par biegunów  $p = 3$ , a na drugim silniki o liczbie par biegunów  $p = 2$ . Taki układ napędowy korzystniej wpisuje się w charakterystyki trakcyjne pojazdu.

Słowa kluczowe: trakcyjne układy napędowe, silniki indukcyjne klatkowe, liczba par biegunów uzwojenia

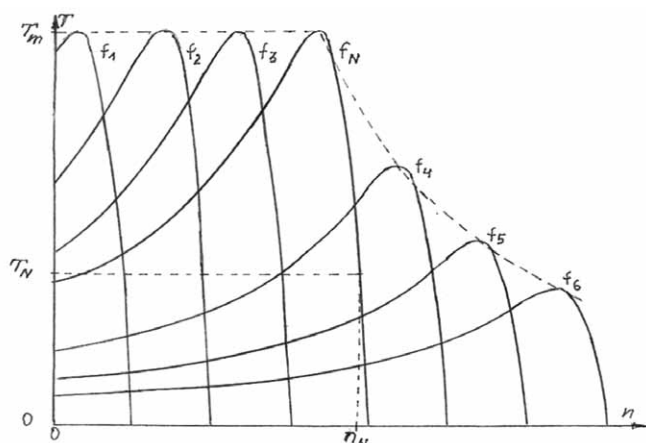
## TRACTION PROPULSION SYSTEM WITH INDUCTION MOTORS

**Abstract:** Traction squirrel-cage induction motors have different mechanical characteristics than DC motors with series excitation. Traction vehicles' drive systems consist of two or three two-machine units built on trolleys. In high-speed trains, the engines are mounted under the wagon floor. The two-machine unit is powered from one inverter. All motors have the same number of pole pairs. The article presents the propulsion system of the Bo-Bo locomotive built on two extreme bogies, with engines with the number of pole pairs  $p = 3$  placed on one bogie and engines with the number of pole pairs  $p = 2$  on the other. Such a propulsion system fits more favorably in vehicle traction characteristics.

Keywords: traction propulsion systems, squirrel-cage induction motors, number of winding pole pairs

przekłada się na stałą siłę pociągową  $F = \text{constans}$ . W drugiej strefie moment napędowy silników zmniejsza się z kwadratem częstotliwości  $T = T_m \left(\frac{f_N}{f}\right)^2$ , jak to pokazano na rys. 2. Pierwsza strefa regulacji odpowiada prędkości jazdy pociągu  $0 \leq v \leq v_N$ . Druga strefa regulacji odpowiada prędkości jazdy pociągu  $v_N < v \leq v_{max}$ .

Moment maksymalny  $T_m$ , który układ napędowy może rozwijać, jest momentem utyku napędu i jest on równy momentowi maksymalnemu silnika w danych warunkach zasilania:  $U, f$ . Moment utyku  $T_m$  musi być większy od momentu obciążenia, gdyż jest to warunek *sine qua non* ruchu pojazdu. W pierwszej



Rys. 2. Dwie strefy regulacji prędkości obrotowej silników indukcyjnych

strefie regulacji układ napędowy jest w stanie rozwinąć znacznie większy moment  $T$  w stosunku do potrzebnej siły pociągowej  $F$  pokonującej siłę oporu jazdy, dzięki czemu pociąg rusza i przyspiesza. W drugiej strefie regulacji moment utyku  $T_m$  zespołów napędowych ogranicza prędkość maksymalną jazdy  $v_{max}$ .

W pojazdach trakcyjnych napędzanych silnikami indukcyjnymi prędkość znamionową (graniczną)  $v_N$  ustala się na etapie projektowania układu napędowego. Prędkość  $v_N$  ustala się poprzez dobór:

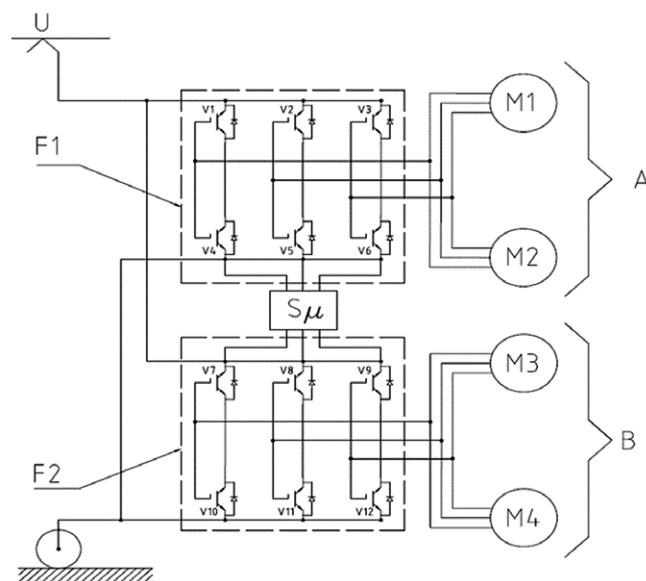
- przełożenia przekładni mechanicznej;
- liczby par biegunów uzwojenia stojana;
- częstotliwości  $f_N$  odpowiadającej znamionowym parametrom pracy silników.

Pierwsze dwa sposoby zmieniają prędkość  $v_N$  w sposób skokowy, trzeci sposób umożliwia ustalenie dowolnej prędkości  $v_N$ , oczywiście w ograniczonym zakresie.

W artykule rozpatrzmy tylko wpływ liczby par biegunów uzwojenia na prędkość graniczną  $v_N$  pojazdu trakcyjnego.

Napęd pojazdu trakcyjnego silnikami indukcyjnymi różni się od napędu silnikami prądu stałego między innymi tym, że:

- w silnikach prądu stałego można, poprzez zmianę danych nawojowych uzwojenia, ustalić prędkość znamionową i prędkość ta może być identyczna przy liczbie par biegunów  $p = 3$  i  $p = 2$ , a ponadto moment obrotowy silnika, w drugiej strefie regulacji prędkości obrotowej  $n_N < n \leq n_{max}$ , jest funkcją hiperboliczną prędkości ( $T = T_N \frac{n_N}{n}$ );
- w silnikach indukcyjnych, przy tej samej częstotliwości napięcia zasilania, prędkość synchroniczna zmienia się skokowo, np. przy  $p = 3, f_N = 50$  Hz,  $n_1 = 1000$  obr./min, a przy  $p = 2, f_N = 50$  Hz,  $n_1 = 1500$  obr./min, a w drugiej strefie regulacji prędkości obrotowej  $n_N < n \leq n_{max}$  moment maksymalny jest funkcją hiperboliczną prędkości w kwadracie  $T_{m,n} = T_m (\frac{n_N}{n})^2$ .



Rys. 3. Układ napędowy pojazdu trakcyjnego napędzany dwiema grupami silników A i B

Stwarza to inne warunki doboru liczby biegunów uzwojenia i znamionowego punktu pracy silników indukcyjnych. Zmiana liczby biegunów uzwojenia z  $p = 3$  na  $p = 2$ , przy tej samej częstotliwości napięcia, powoduje skok prędkości synchronicznej o 50%. Wpływ tego skoku przeliczonego na prędkość jazdy pociągu  $v$  można zmniejszyć, stosując dwie grupy silników: silniki A o liczbie par biegunów  $p_A = 3$  i silniki B o liczbie par biegunów  $p_B = 2$ .

## 2. Wpływ liczby par biegunów na prędkość graniczną

Standardowo wszystkie silniki w danym pojeździe trakcyjnym mają jednakową liczbę par biegunów. Przeanalizujemy jednak przypadek, że w pojeździe mamy dwie grupy silników napędowych: silniki A o liczbie par biegunów  $p_A = 3$  i silniki B o liczbie par biegunów  $p_B = 2$ , jak to pokazano na rys. 3.

Silniki M1–M2 są zasilane z falownika F1 trójfazowego DC/AC. Silniki M3–M4 są zasilane z identycznego falownika F2. Falownik F1 składa się z sześciu zaworów energoelektronicznych V1–V6. Falownik F2 składa się z sześciu zaworów energoelektronicznych V7–V12. Wszystkie zawory V1–V12 są sterowane z bloku mikroprocesorowego  $S_\mu$ . Zespoły trakcyjne A i B są zasilane napięciem stałym z sieci trakcyjnej: kolej o napięciu  $U = 3$  kV, metro o napięciu 750 V i tramwaje o napięciu 600 V.

Rozpatrzmy charakterystyki mechaniczne silnika z grupy A i silnika z grupy B. Załóżmy, że moce znamionowe  $P_N$  silnika A i B są równe, wówczas moment znamionowy  $T_N$  silnika A jest większy od momentu znamionowego silnika B [3].

$$T_N = \frac{P_N}{\omega_N}$$

gdzie:  $\omega_N = \pi \frac{n_N}{30}$ .

Jest to równanie ogólne i obowiązuje także dla momentów maksymalnych  $T_{Am} > T_{Bm}$ , które są równe momentowi utyku.

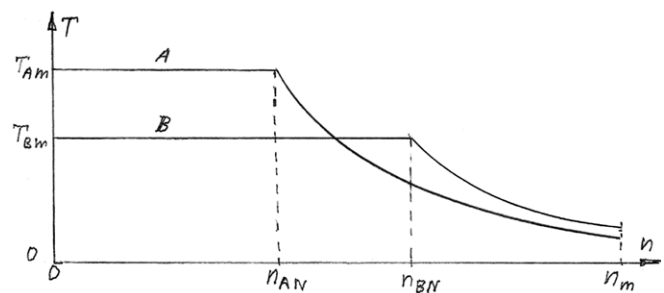
Na rysunku 4 przedstawiono wykres momentu utyku  $T_m$  silników, o liczbie par biegunów  $p_A = 3$  i  $p_B = 2$ , w funkcji prędkości obrotowej  $n$ . Silnik A o liczbie par biegunów  $p_A = 3$  ma prędkość graniczną  $n_{AN}$ , a silnik B o liczbie par biegunów  $p_B = 2$  ma prędkość graniczną  $n_{BN} = 1,5n_{AN}$ . Skok prędkości wynosi 50% i jest stosunkowo duży.

Pojazdy trakcyjne są napędzane dwoma lub trzema zestawami napędowymi. Stwarza to trzecią możliwość ustawienia charakterystyki mechanicznej układu napędowego pojazdu trakcyjnego  $T = f(v)$ , to jest charakterystyki pośredniej między charakterystykami silników A i B. Ta trzecia charakterystyka AB może korzystnie dopasowywać się do charakterystyki obciążenia pojazdu trakcyjnego.

Układ napędowy pojazdu trakcyjnego, przedstawiony na rys. 3, przy tej samej mocy silników można zrealizować jako jeden z trzech wariantów rozwiązania:

- silniki M1–M4 mają liczbę par biegunów  $p_A = p_B = 3$ ;
- silniki M1–M4 mają liczbę par biegunów  $p_A = p_B = 2$ ;
- silniki M1 i M2 mają liczbę par biegunów  $p_A = 3$ , a silniki M3 i M4 mają liczbę par biegunów  $p_B = 2$ .

Zostanie rozpatrzony przykład układu napędowego lokomotywy Bo-Bo o masie 88 ton przedstawionej w publikacji

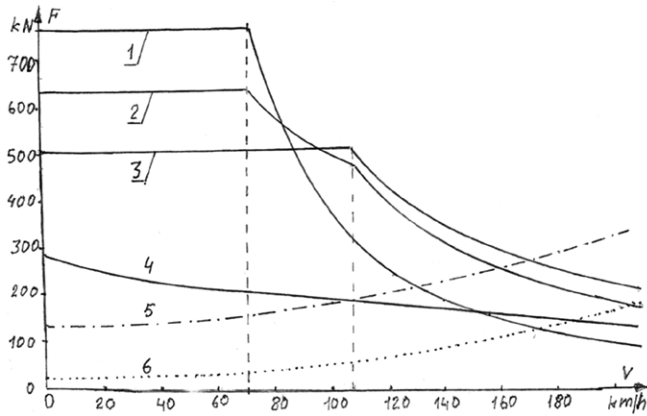


Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne silników A i B o tej samej mocy znamionowej, tej samej znamionowej częstotliwości napięcia i różnej liczbie par biegunów

[8 – rys. 10 i 11]. Na jednym wózku są umieszczone dwa silniki A, a na drugim wózku dwa silniki B.

Zakładamy w każdym wariantcie rozwiązania identyczne przełożenie przekładni mechanicznej i tę samą średnicę kół jezdnych.

W pierwszych dwóch wariantach, gdy  $p_A = p_B$ , zespoły napędowe A i B pracują w dwóch strefach regulacji prędkości obrotowej, przy stałym momencie i stałej mocy.



Rys. 5. Wykresy siły utoyku układu napędowego lokomotywy Bo-Bo w trzech wariantowych rozwiązaniach: linia 1 -  $p_A = p_B = 3$ ; linia 2 -  $p_A = 3, p_B = 2$ ; linia 3 -  $p_A = p_B = 2$ ; linia 5 - maksymalna siła przyczepności; linia 6 - siła oporu jazdy

Pierwsza strefa regulacji prędkości jazdy lokomotywy  $0 \leq v \leq v_N$  jest realizowana poprzez zmianę napięcia  $U$  i częstotliwości  $f$ , przy  $\frac{U}{f} = \text{constans}$ . Znamionową prędkość jazdy (prędkość graniczną -  $v_N$ ) pojazd uzyskuje przy pełnym wystęrowaniu zaworów V1-V12:

- gdy  $p_A = p_B = 3$ , częstotliwość  $f_N = 50$  Hz, to  $v_{AN} = 70$  km/h, siła utoyku wynosi  $F_{AN} = 760$  kN;
- gdy  $p_A = p_B = 2$ , częstotliwość  $f_N = 50$  Hz, to  $v_{BN} = 107$  km/h, siła utoyku wynosi  $F_{BN} = 505$  kN.

Druga strefa regulacyjna  $v_N < v \leq 200$  km/h jest realizowana poprzez zmianę częstotliwości  $f$ , przy  $U = \text{constans}$ . Moment maksymalny każdego silnika zmniejsza się z kwadratem częstotliwości  $T = T_m \left(\frac{f_N}{f}\right)^2$ . Przy maksymalnej prędkości jazdy  $v_{max} = 200$  km/h i:

- $p_A = p_B = 3$ , częstotliwość  $f_A = 145$  Hz, a siła utoyku wynosi 90 kN;
- $p_A = p_B = 2$ , częstotliwość  $f_B = 94$  Hz, a siła utoyku wynosi 143 kN.

W trzecim wariantcie rozwiązania, gdy  $p_A = 3$  a  $p_B = 2$ , układ napędowy ma trzy strefy regulacji prędkości obrotowej:

- w strefie pierwszej prędkość pojazdu  $0 < v \leq 70$  km/h, siła utoyku jest stała i wynosi  $F_{ABN} = 0,5(F_{AN} + F_{BN}) = 632$  kN, a częstotliwości  $0 < f_A \leq f_{AN} = 50$  Hz i  $0 < f_B \leq 33$  Hz;
- w strefie drugiej prędkość pojazdu  $70 < v \leq 107$  km/h, częstotliwość  $50 < f_A \leq 76$  Hz i  $33 < f_B \leq f_{BN} = 50$  Hz, siła utoyku wynosi  $632 > F_{AB} = 0,5(F_{AN} \left(\frac{f_N}{f_A}\right)^2 + F_{BN}) \geq 417$  kN;
- w strefie trzeciej prędkość pojazdu  $107 < v \leq 200$  km/h, częstotliwość  $76 < f_A \leq 145$  Hz i  $50 < f_B \leq f_{BN} = 94$  Hz, siła utoyku wynosi  $417 > F_{AB} = 0,5(F_{AN} \left(\frac{f_N}{f_A}\right)^2 + F_{BN} \left(\frac{f_N}{f_B}\right)^2) \geq 117$  kN.

Wyniki te dla przejrzystości zestawiono w tabeli 1.

Przy ruszaniu lokomotywy ( $v = 0$ ) częstotliwość napięcia wynosi około  $0,1 f_N$ . Przy tej częstotliwości uzyskuje się maksymalny moment obrotowy silników. Jednak moment maksymalny uzyska się tylko wówczas, gdy falownik nie ograniczy prądu silników, który wynosi około  $3 I_N$ . Jeśli falownik ograniczy prądy silników do  $2 I_N$ , to siła utoyku lokomotywy przy ruszaniu zmniejszy się do około 60% wartości podanych w tabeli 1.

Trakcyjny układ napędowy z zespołami napędowymi A + B o różnej liczbie par biegunów ma lepiej ukształtowaną charakterystykę siły pociągowej  $F_{A+B} = f(v)$  od charakterystyki  $F_{A+A} = f(v)$  zespołów napędowych o identycznej biegunowości. Charakterystyka  $F_{A+B} = f(v)$  jest znacznie lepiej dostosowana do charakterystyki oporów jazdy  $R = f(v)$  pojazdu trakcyjnego. Pojazd trakcyjny przy charakterystyce pociągowej  $F_{A+B} = f(v)$  uzyskuje większą prędkość maksymalną.

Jeśli układ napędowy składa się trzech zespołów napędowych A, B, C, to projektując układ napędowy, można przeanalizować pięć wariantowych związań:

- wszystkie silniki mają liczbę par biegunów  $p_A = p_B = p_C = 3$ ;
- wszystkie silniki mają liczbę par biegunów  $p_A = p_B = p_C = 2$ ;
- dwa silniki, np. w zespołach A i B, mają liczbę par biegunów  $p_A = p_B = 3$ , a w zespole C liczbę par biegunów  $p_C = 2$ ;
- jeden silnik, np. w zespole A, ma liczbę par biegunów  $p_A = 3$ , a silniki w zespołach B i C mają liczbę par biegunów  $p_B = p_C = 2$ ;
- silniki w każdym zespole mają inną liczbę biegunów:  $p_A = 4, p_B = 3, p_C = 2$ .

Kolejność usytuowania zespołów napędowych w pociągu, lokomotywie lub tramwaju może być dowolna.

Tabela 1. Parametry pracy lokomotywy Bo-Bo w trzech wariantowych rozwiązaniach napędów

Wariant napędu		Parametr		Prędkość lokomotywy $v$ [km/h]		
				0-70	70-107	107-200
I	$p_A = p_B = 3$ M1-M4	Częstotliwość	Hz	5-50	50-76	76-145
		Siła utoyku	kN	760	760-329	329-90
II	$p_A = p_B = 2$ M1-M4	Częstotliwość	Hz	3-33	33-50	50-94
		Siła utoyku	kN	505	505	505-143
III	$p_A = 3$ M1-M2	Częstotliwość	Hz	5-50	50-76	76-145
		Siła utoyku	kN	632	632-417	417-117
	$p_B = 2$ M3-M4	Częstotliwość	Hz	3-33	33-50	50-94

## Podsumowanie

Silniki indukcyjne stosowane w napędach pojazdów trakcyjnych mają inne charakterystyki trakcyjne niż silniki prądu stałego o wzbudzeniu szeregowym. Dotyczy to przede wszystkim charakterystyki momentu utyku silników w funkcji prędkości jazdy. W pierwszej strefie prędkości jazdy pojazd moment utyku jest stały, a prędkość znamionowa zależy od liczby biegunów uzwojenia silników. W drugiej strefie regulacji moment utyku zmniejsza się z kwadratem prędkości jazdy i on ogranicza maksymalną prędkość jazdy pojazdu trakcyjnego.

W napędach trakcyjnych stosuje się zwykle silniki o liczbie par biegunów 3 bądź 2. Daje to duży skok prędkości znamionowej (granicznej) silnika, przy tej samej częstotliwości znamionowej napięcia. Projektując układ napędowy pojazdu trakcyjnego, korzystnie jest także przeprowadzić analizę napędu przy silnikach o dwóch liczbach par biegunów, np. 3 i 2. Może się okazać, że charakterystyki silników o różnej liczbie par biegunów  $p_A \neq p_B$  lepiej wpisują się w potrzeby napędowe pojazdu trakcyjnego.

Charakterystyki przedstawione na rysunkach 4 i 5 obowiązują przy założeniu stałej mocy silników. Założenie to w silnikach trakcyjnych jest znacznym przybliżeniem, gdyż silniki mają ten sam gabaryt determinowany wymiarami wózka, na którym są osadzone. Przy tym samym gabarycie silniki o mniejszej liczbie par biegunów mogą mieć większą moc. Projektując układ napędowy, w tym dobierając silniki trakcyjne, należy to uwzględnić.

## Literatura

- [1] BERNATT J., GAWRON S., GLINKA T.: *Układ napędowy pojazdu trakcyjnego z silnikami indukcyjnymi*. Patent RP Nr 231294 z dnia 4.10.2018.
- [2] BERNATT J., GAWRON S., GLINKA T.: *Układ napędowy pojazdu trakcyjnego*. Patent RP Nr 209760 B1 z dnia 31.10.2011 r.
- [3] BERNATT J., GAWRON S., GLINKA T., POLAK A.: *Induction motors in traction drives, service tests*. „Technical Transactions”, 10(115)/2018.
- [4] BILIŃSKI J., FRYDRYSIAK R., GMURCZYK E.: *Modernizacja systemu napędu elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57 z zastosowaniem silników asynchronicznych*. „Technika Transportu Szynowego”, 12/2008.
- [5] GLINKA T.: *Maszyny elektryczne i transformatory*. PWN, Warszawa 2018.
- [6] GURGUL A.: *Silnik LKa-470 do modernizacji zespołów trakcyjnych EN57*. „Technika Transportu Szynowego”, 04/1997.
- [7] LAL GANESH R.N.: *Development of reliable designs of squirrel cage rotors for traction motors used in locomotives working in arduous operating conditions*. Published in IET Electric Power Applications Received on 5th December 2008 Revised on 17th March 2009; doi: 10.1049/iet-epa.2008.0284.
- [8] LIPIŃSKI L., MISZEWSKI M.: *Wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych pojazdów kolejowych z asynchronicznymi napędami trakcyjnymi*. „Zeszyty Problematyczne – Maszyny Elektryczne”, 1/2012.
- [9] PN-EN 60349-2 (IEC60349-2) styczeń 2011. *Trakcja Elektryczna – Elektryczne maszyny wirujące do pojazdów szynowych i drogowych – Część 2. Maszyny prądu przemiennego zasilane z przekształtników elektronicznych*.
- [10] SKARPETOWSKI G.: *Uszkodzenie klatki wirnika silnika trakcyjnego LK 450 X6*. Politechnika Krakowska. Em. Bombardier Transportation CH. 7 Juli 2014 r.
- [11] SZCZĘSNY D.: *Nowoczesne asynchroniczne silniki trakcyjne*. „Technika Transportu Szynowego”, 12/1997.
- [12] *Power vehicle control device using induction motor (w j. japońskim)*. Patent JPS 57-62795.



Jakub Bernatt, Stanisław Gawron,  
Tadeusz Glinka  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych  
KOMEL

artykuł recenzowany

reklama