

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

TRAKCYJNY UKŁAD NAPEĐOWY Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI

TRACTION PROPULSION SYSTEM WITH INDUCTION MOTORS

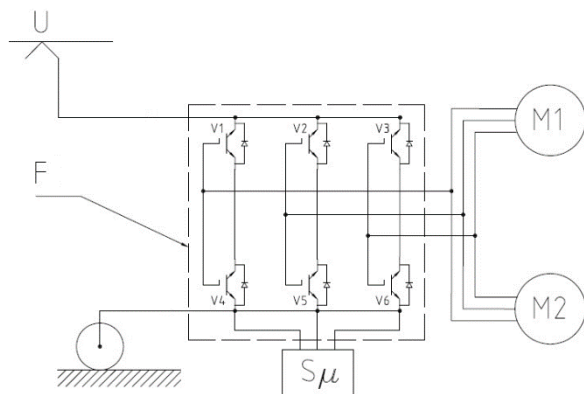
Streszczenie: Trakcyjne silniki indukcyjne klatkowe mają inne charakterystyki mechaniczne niż silniki prądu stałego o wzbudzeniu szeregowym. Układy napędowe pojazdów trakcyjnych składają się z dwóch lub trzech zespołów dwumaszynowych zabudowanych na wózkach jezdnych. W pociągach szybkojezdnych silniki 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.

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 motors 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 end bogies, with motors with the number of pole pairs $p = 3$ placed on one bogie and motors with the number of pole pairs $p = 2$ on the other. Such a propulsion system fits more favorably in vehicle traction characteristics.

Słowa kluczowe: trakcyjne układy napędowe, silniki indukcyjne klatkowe, liczba par biegunów uzwojenia
Keywords: traction propulsion systems, squirrel-cage induction motors, number of winding pole pairs

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 $p = 3$.

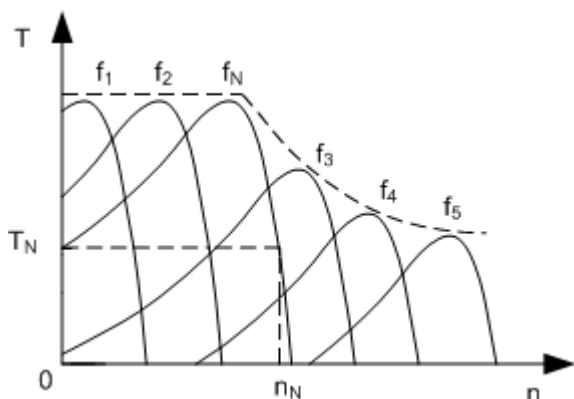


Rys. 1. Zespół napędowy pojazdu trakcyjnego: $M1$ i $M2$ - silniki napędowe, F - falownik, $S\mu$ - sterownik mikroprocesorowy

W pojazdach trakcyjnych o prędkości maksymalnej nie przekraczającej $v_{max} \geq 120$ km/godz., silniki trakcyjne standardowo są zabudowane na wózkach i sprzęgnięte poprzez przekładnię z kołami jezdными. Takie rozwiązanie stosowane jest w tramwajach, pociągach metra, zespołach trakcyjnych EN57 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 jezdными.

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 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 $v_N < v \leq v_{max}$.



Rys. 2. Dwie strefy regulacji prędkości obrotowej silników indukcyjnych

Moment maksymalny T_m , który może układ napędowy 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 strefie regulacji układ napędowy jest w stanie rozwinąć znacznie większy moment T w stosunku do potrzebnej siły pociągowej F pokonującej siłę oporu jazdy, dzięki temu 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.

2. Silnik indukcyjny, silnik prądu stałego

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

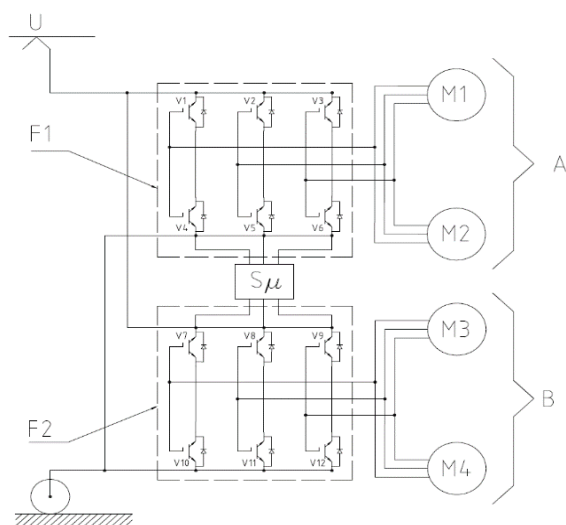
- w silnikach prądu stałego można, poprzez zmianę danych nawojowych uzwojenia, ustalić prędkość znamionową i prędkość ta może być identyczna przy liczbie par biegunów $p = 3$ i $p = 2$, ponadto moment obrotowy silnika, w drugiej strefie regulacji prędkości obrotowej $n_N < n \leq n_{max}$, jest funkcją 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 $p = 3, f_N = 50 \text{ Hz}, n_1 = 1000 \text{ obr/min}$, a przy $p = 2, f_N = 50 \text{ Hz}, n_1 = 1500 \text{ obr/min}$, a w drugiej strefie regulacji prędkości obrotowej $n_N < n \leq n_{max}$ moment maksymalny jest funkcją hiperboliczną prędkości w kwadracie $T_{m,n} = \left(\frac{n_N}{n}\right)^2$.

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 $p_B = 2$.

3. Wpływ liczby par biegunów na prędkość graniczną v_N

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.



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

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_μ. 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.

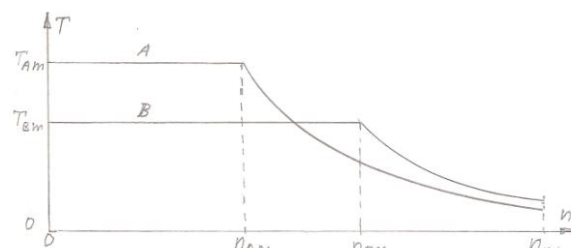
Rozpatrzmy charakterystyki mechaniczne silnika z grupy A i silnika z grupy B. Załóżmy, że moce znamionowe P_N silnika A i B są równe, wówczas moment znamionowy T_N silnika A jest większy od momentu znamionowego silnika B, [3].

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

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

Jest to równanie ogólne i obowiązuje także w przypadku 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.

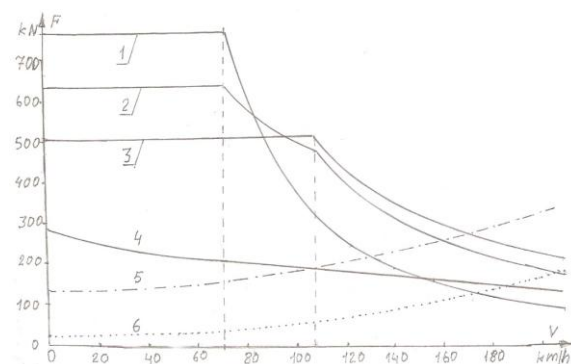
Pojazdy trakcyjne są napędzane dwoma lub trzema zestawami napędowymi. Stwarza to trzecią możliwość ustawienia charakterystyki mechanicznej układu napędowego pojazdu trakcyjnego T = f(v), to jest charakterystyki pośredniej między charakterystykami silników A i B. Ta trzecia charakterystyka AB może korzystniej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



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

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.



Rys. 5. Wykresy siły utyku 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; oraz linia 5 – maksymalna siła przyczepności i linia 6 – siła oporu jazdy

Zostanie rozpatrzony przykład układu napędowego lokomotywy Bo – Bo o masie 88 ton przedstawionej w publikacji [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.

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 wystawieniu zaworów V1÷V12:

➤ gdy $p_A = p_B = 3$, częstotliwość

a częstotliwość $0 < f_A \leq f_{AN} = 50$ 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 utyku wynosi

$$632 > F_{AB} = 0,5 \left(F_{AN} \left(\frac{f_N}{f_A} \right)^2 + F_{BN} \right) \geq 417 \text{ kN},$$

➤ 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 utyku wynosi $417 > F_{AB} = 0,5 \left(F_{AN} \left(\frac{f_N}{f_A} \right)^2 + F_{BN} \left(\frac{f_N}{f_A} \right)^2 \right) \geq 117 \text{ kN}$.

Wyniki te dla przejrzystości zestawiono w tabeli 1.

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 utyku	kN	760	760 ÷ 329	329 ÷ 90
II	$p_A = p_B = 2$ M1 ÷ M4	Częstotliwość	Hz	3 ÷ 33	33 ÷ 50	50 ÷ 94
		Siła utyku	kN	505	505	505 ÷ 143
III	$p_A = 3$ M1 – M2	Częstotliwość	Hz	5 ÷ 50	50 ÷ 76	76 ÷ 145
		Siła utyku	kN	632	632 ÷ 417	417 ÷ 117
	$p_B = 2$ M3-M4	Częstotliwość	Hz	3 ÷ 33	33 ÷ 50	50 ÷ 94

$f_N = 50$ Hz, to $v_{AN} = 70$ km/h, siła utyku wynosi $F_{AN} = 760$ kN,

➤ gdy $p_A = p_B = 2$, częstotliwość $f_N = 50$ Hz, to $v_{BN} = 107$ km/h, siła utyku 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 utyku wynosi 90 kN,

➤ $p_A = p_B = 2$, częstotliwość $f_B = 94$ Hz, a siła utyku 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 utyku jest stała i wynosi $F_{ABN} = 0,5(F_{AN} + F_{BN}) = 632$ kN,

Przy ruszaniu lokomotywy ($v = 0$) częstotliwość napięcia wynosi około $0,1f_N$. 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 $3I_N$. Jeśli falownik ograniczy prądy silników do $2I_N$, to siła utyku 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 z trzech zespołów napędowych A, B, C, to

projektując układ napędowy można przeanalizować pięć wariantowych rozwiązań:

- 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.

4. 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 pojazdu 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 okazać się, 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. Czasopismo Techniczne. Issue 10/ Volume 2018 (115) ISSN 0011-4561. Str. 85 – 98.
- [4]. Biliński J., Frydrysiak R., Gmurczyk E.: „*Modernizacja systemu napędu elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57 z zastosowaniem silników asynchronicznych*”. Technika Transportu Szynowego. Nr 12/2008 r.
- [5]. Glinka T.: „*Maszyny elektryczne i transformatory*”. PWN, 2018 r.
- [6]. Gurgul A.: „*Silnik LKa-470 do modernizacji zespołów trakcyjnych EN57*”. Technika Transportu Szynowego. Nr 04/1997. ISSN: 1232-3829.
- [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 Revisited on 17th March 2009; doi: 10.1049/iet-epa.2008.0284.
- [8]. Lipiński L., Miszewski M.: „*Wyznaczanie charakterystyk trakcyjnych pojazdów kolejowych z asynchronicznymi napędami trakcyjnymi*”. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 1/2012. Str. 67 - 74.
- [9]. PN-EN 60349-2 (IEC60349-2) styczeń 2011. Trakcja Elektryczna – Elektryczne maszyny wirujące do pojazdów szynowych i drogowych – Cz. 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]. Szcęsny D.: „*Nowoczesne asynchroniczne silniki trakcyjne*”. Technika Transportu Szynowego. Nr 12/1997. ISSN: 1232-3829.
- [12]. www.komel.com.pl.

Autorzy

dr inż. hab. Jakub Bernatt, prof. KOMEL
 dr inż. Stanisław Gawron
 prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka
 e-mail: info@komel.katowice.pl
 Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut
 Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL,
 al. Roździeńskiego 188,
 40-203 Katowice, tel. +48 (32) 258 20 41