

Nowoczesne konstrukcje silników trakcyjnych według opracowania BOBRME KOMEL

Wojciech Poprawski, Paweł Pistelok

W artykule omówiono nowoczesne silniki indukcyjne opracowane przez BOBRME Komel przeznaczone do napędu trakcji elektrycznej. Dodatkowo zaprezentowano pojazdy, w których te silniki pracują. W dalszej części pracy przedstawiono cztery konstrukcje silników klatkowych przystosowanych do zasilania z falowników dla pojazdów trakcyjnych. W opracowanych przez BOBRME Komel konstrukcjach silników asynchronicznych zostały zastosowane najnowsze technologie projektowania i wykonania poszczególnych elementów składowych silnika. Omówiono konstrukcję kadłubów, wirników oraz stojanów zaprezentowanych silników.



mgr inż.
Wojciech Poprawski
BOBRME Komel Katowice
w.poprawski@komel.katowice.pl



mgr inż. Paweł Pistelok
BOBRME Komel Katowice
p.pisteloki@komel.katowice.pl



1. Silnik EY541X4, 800 kW, do napędu lokomotywy typu EU07

Ważnym elementem nowoczesnego układu napędowego o prędkości regulowanej jest silnik elektryczny. To od parametrów elektromagnetycznych i właściwości mechanicznych silnika elektrycznego zależy w dużym stopniu zakres regulacji prędkości obrotowej, sprawność energetyczna oraz niezawodność napędu. W klasycznych napędach trakcyjnych stosowano silniki prądu stałego, których eksploatacja sprawiała wiele trudności. Elementem który przysparza najwięcej problemów jest komutator mechaniczny. Silniki prądu stałego są sukcesywnie wypierane z rynku przez dużo tańsze, trwalsze i prostsze w obsłudze silniki klatkowe. Dlatego w ostatnich latach można było zaobserwować sukcesywną wymianę maszyn prądu stałego, które przez długie lata pracowały w przemyśle i trakcji. Również w krajowych taborach szynowych rozpoczęto dynamiczną modernizację i unowocześnianie jednostek napędowych. Głównym elementem podlegającym wymianie jest niskosprawny i zawodny układ napędowy składający

się z silnika prądu stałego i rezystorowego układu regulacji. Układ ten jest zastępowany energoelektronicznymi układami regulacji. Układy te, coraz wydajniejsze, pozwoliły w miejsce klasycznego silnika prądu stałego zastosować nowoczesne silniki indukcyjne. Dzięki dynamicznie rozwijającej się dziedzinie przekształtników energoelektronicznych są one coraz częściej stosowane w układach napędowych pojazdów szynowych. Pozwala to na płynną regulację obrotów silnika indukcyjnego pracującego w pojeździe trakcyjnym.

Silnik trakcyjny do lokomotywy EU07

W 2009 roku w Instytucie BOBRME KOMEL rozpoczęto projektowanie asynchronicznego silnika klatkowego do zastosowań trakcyjnych przeznaczonego do napędu lokomotywy typu EU07. Lokomotywa ta

przed modernizacją pracowała z układem napędowym opartym na szeregowym silniku prądu stałego typu EE541. W celu unowocześnienia napędu lokomotywy przy możliwie niskich kosztach, nowy obwód elektromagnetyczny silnika indukcyjnego został tak zaprojektowany, aby mógł pracować w kadłubie silnika prądu stałego. Pozwoliło to na montaż nowego silnika na wózku lokomotywy bez dodatkowych większych zmian konstrukcyjnych. Układ chłodzenia został wykonany z przewietrzaniem obcym. Tak zaprojektowany silnik klatkowy został zaprezentowany na rysunku 1.

Nowy silnik trakcyjny pod względem konstrukcji jest zamiennikiem silnika prądu stałego typu EE-541 produkcji Dolmel Wrocław. Posiada budowę dostosowaną do montażu w konstrukcji wózka napędowego lokomotywy 303Ea, z jednym napędowym czopem wału. Silnik przystosowany jest do

Tab.1: Zestawienie wybranych parametrów silnika trakcyjnego dedykowanego do lokomotywy EU07

Typ	EY541X-4
2p [-]	4
PN [kW]	800
UN [V]	2340
IN [A]	237
f [Hz]	41
cos φ	0.88
n [obr/min]	1208
n _{max} [obr/min]	3300
η [%]	94.6
TN [Nm]	6324
T _{max} [Nm]	18972
Klasa izolacji	H
Masa [kg]	3930
Sposób chłodzenia	Wentylacja obca

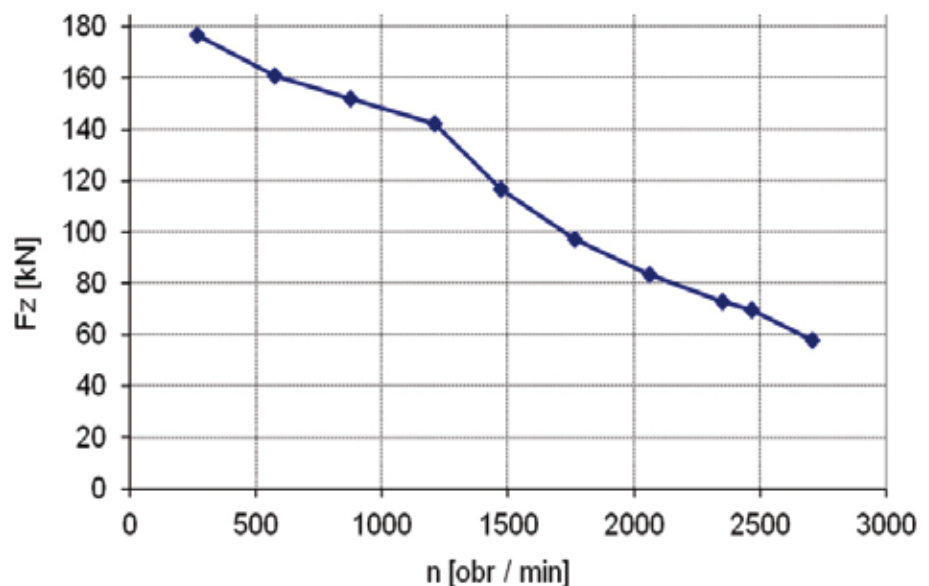


2. Lokomotywa typu EU-07

pracy poziomej, a obudowa silnika zapewnia stopień ochrony IP 21. Parametry znamionowe silnika zaprezentowano w tabeli 1.

Silnik trakcyjny został zamontowany w lokomotywie typu EU-07A która została zaprezentowana na rysunku 2. Kadłub nowego silnika jest konstrukcją odlewaną. Pakiet blach magnetycznych stojana jest wciśnięty do kadłuba [8]. Uzwojenie stojana składa się z regularnych cewek, nawiniętych miedzianym drutem prostokątnym, izolowanych taśmą typu Samicapor. Uzwojenie wykonane jest w klasie izolacji H. Impregnacja uzwojenia została wykonana próżniowo pod ciśnieniem (VPI - Vacuum Pressure Impregnation). Wirnik składa się ze spakietowanych w specjalnym przyrządzie pakietu blach magnetycznych. Uzwojenie klatkowe wirnika wykonano z miedzi. Wał wirnika wykonany został ze stali stopowej o wysokiej wytrzymałości. Na wale umieszczony jest wentylator zasysający powietrze chłodzące z kanałów osiowych znajdujących się w pakiecie blach wirnika. Tak zaprojektowany silnik zapewnia wytworzenie przez lokomotywę odpowiedniej siły trakcyjnej (rys.3). Na rysunku 3 zaprezentowano obliczeniową charakterystykę trakcyjną silnika EY541X4.

Zaprojektowany w BOBRME KOMEL a wykonany w fabryce maszyn elektrycznych EMIT S.A. w Żychlinie silnik trakcyjny, pracuje bez żadnych zastrzeżeń. Obecnie nowa lokomotywa pokonuje dziennie ok. 900 km jeżdżąc od ok. 5 miesięcy w pełni wykorzystując potencjał silników napędowych. Warto również dodać, że lokomotywa z nowymi silnikami ma najkrótszy czas przejazdu na trasie Warszawa-Wrocław w porównaniu z innymi lokomotywami.



3. Obliczeniowa charakterystyka trakcyjna silnika EY541-X4 do napędu lokomotywy EU07

Silnik trakcyjny do Metra Warszawskiego

W 2004 roku w BOBRME Komel został rozpoczęty proces projektowy specjalnego wykonania silników asynchronicznych klatkowych do zastosowań trakcyjnych. Jednym z pierwszych wyników pracy ośrodka był bezkadłubowy projekt silnika trakcyjnego o mocy 180 kW zasilanego z falownika (rys.4) przeznaczonego do napędu pojazdu trakcyjnego typu METROPOLIS.

Nowy silnik musiał być w pełni zamienny z silnikami trakcyjnymi typu 4 EXA2130 produkcji ALSTOM obecnie zastosowanymi w wagonach Metropolis w Metrze Warszawskim (rys.5). Było to zadanie szczególnie trudne z uwagi na konieczność zapewnienia

identycznych i powtarzalnych charakterystyk mechanicznych (moment i prędkość obrotowa) w całym zakresie regulacji, jak w dotychczas stosowanych silnikach [1]. Wynika to stąd, że silniki pracują parami zasilane z jednego falownika i przy losowo zabudowanych silnikach jednego lub drugiego typu, muszą się równomiernie obciążać (muszą mieć identyczne charakterystyki mechaniczne). Wagon, w którym pracują silniki opracowane przez BOBRME Komel, pochodzą z nowej serii METROPOLIS (rys.5), opracowanej przez firmę ALSTOM. Konstrukcja pudła jest aluminiowo – stalowa, nitowania poszycia wykonane są w sposób niewidoczny a wyposażenie wnętrza zmontowane bez użycia śrub. Wagon są wypo-



4. Silnik STDa280-4B, 180 kW, do napędu metra Warszawskiego



5. Pojazd typu METROPOLIS metra Warszawskiego

Tab.2: Zestawienie podstawowych parametrów silnika produkowanego w fabryce EMIT S.A. w Żychlinie wg opracowania BOBRME Komel oraz silników producentów zagranicznych

Firma	EMIT	ALSTOM	SKODA
Seria	STDa 280-4B	4 EXA2130	MLU 3649 k/9
Rok	2007	1993	brak danych
2p [-]	4	4	4
PN [kW]	180	180	183
UN [V]	500	500	420
IN [A]	260	259	307
f [Hz]	63	63	50
n [obr/min]	1839	1839	1476
η [%]	94	94	brak danych
TN [Nm]	935	935	1186
T_{max} [Nm]	1520	1510	brak danych
Klasa izolacji	200	200	200
Waga [kg]	650	630	650

sażone w komputerowy system sterowania ruchem i diagnozowania pojazdu. Metro posiada 108 wagonów a w skład pojazdu typu METROPOLIS wchodzi sześć wagonów, z czego cztery wagony są napędowe a pozostałe dwa są wagonami doczepnymi. W jednym wagonie pracuje osiem silników zasilanych z czterech falowników. Silniki trakcyjne typu STDa280-4B opracowane w BOBRME Komel są w pełni zamienne z silnikami produkcji ALSTOM i pozwalają na uzyskanie następujących parametrów technicznych i ruchowych w metrze warszawskim:

- napięcie silnika przy rozruchu – 290 V,
- napięcie w trybie hamowania – 320 V,
- przyspieszenie do prędkości 25 km/h – 1.2 m/s^2 ,
- maksymalna prędkość - 90 km/h,
- czas osiągnięcia 90 km/h - 43.6 sek.,
- poziom hałasu w przedziale - max. 80 dB,
- poziom hałasu w kabinie - max. 70 dB,
- nominalna pojemność pociągu 6 wagonowego 1454 osoby , co daje masę 285 ton,
- mikroprocesorowy 32-bitowy układ sterowania,
- modułowa konstrukcja podzespołów i urządzeń,
- diagnostyka stacjonarna - poprzez przenośny PC.

Podstawowym elementem usprawniającym obsługę jest zaprojektowanie podzespołów wagonu jako jednostek modułowych, które są wymienne. Wszystkie urządzenia są podłączone do komputerowego systemu diagnozowania. W modułowo zbudowanym osprzęcie elektrycznym, urządzenia (silniki) są ciągle monitorowane, a te które wykazują usterki, są łatwo wykrywane i na czas diagnozowane. Zastosowanie silników opracowanych przez BOBRME Komel w pojeździe trakcyjnym METROPOLIS świadczy o wysokim standardzie, jakości i trwałości tych maszyn. Wychodząc na przeciw oczekiwaniom rynku i w porozumieniu z Zakładem Maszyn Elektrycznych „EMIT” S.A. z Żychlina została opracowana nowoczesna konstrukcja silnika indukcyjnego przeznaczonego do pojazdu trakcyjnego metra warszawskiego.

Projekt był zrealizowany w ramach projektu celowego pt.: „Silnik asynchroniczny 180 kW do napędu pojazdów trakcyjnych metra”. Organem odpowiedzialnym za wykonanie dokumentacji konstrukcyjnej, obliczeń elektromagnetycznych, mechanicznych i cieplnych oraz opracowanie programu i metodyki badań silnika modelowego był BOBRME Komel z Katowic. Do najtrudniejszych problemów przy realizacji powyższego projektu, ze względu na bardzo dużą gęstość mocy z jednostki objętości, było zoptymalizowanie obwodu elektromagnetycznego w celu zminimalizowania koniecznych do odprowadzenia strat oraz dopasowanie charakterystyki me-

chanicznej silnika prototypowego do silnika typu 4EXA2130, którego opracowany silnik jest zamiennikiem. Nowoczesny silnik asynchroniczny jest przystosowany do zasilania z tradycyjnego (powszechnie dostępnego) przemiennika częstotliwości sterowanego metodą modulacji szerokości impulsów (PWM). Zastosowanie tego falownika umożliwia płynną regulację prędkości obrotowej całego napędu.

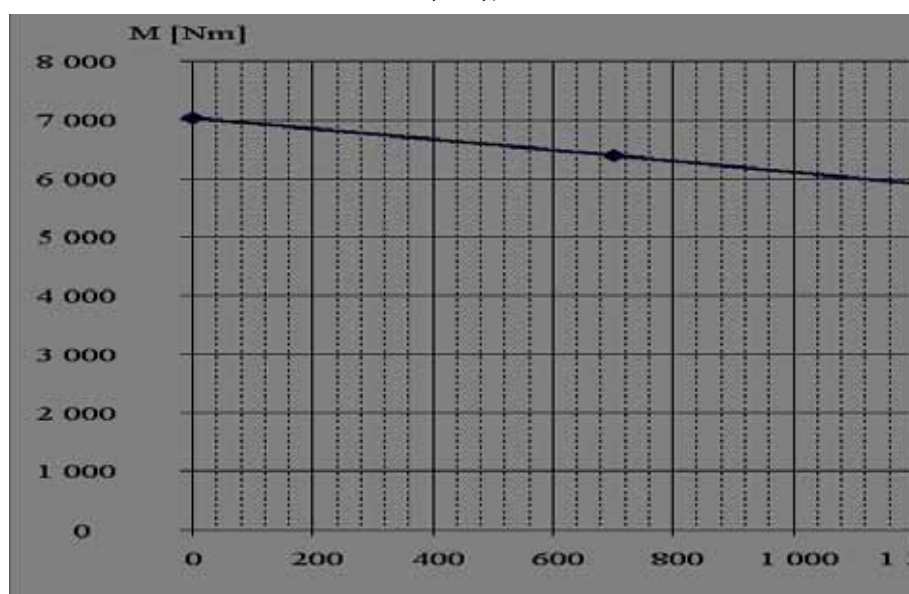
Nowe silniki projektowane są z wykorzystaniem najnowszych możliwości projektowo-obliczeniowych metodą polowo-obwodową, tym samym zapewniając równomierne, optymalne wykorzystanie obwodu elektromagnetycznego. Uzwojenie silnika zostało wykonane według najnowszej technologii VPI [4], co powoduje lepsze odprowadzanie ciepła, a tym samym obniżenie przyrostów temperatury w uzwojeniu silnika. Wydajniejsze chłodzenie powoduje zwiększenie sprawności danej maszyny, co znacznie wydłuża żywotność silnika. Tak opracowana konstrukcja staje się konkurencyjna na rynku maszyn elektrycznych zwłaszcza, iż nowe silniki tego samego typu (tab. 2) oferowane przez zagranicznych producentów są 2-3 krotnie droższe od silników zaprojektowanych w BOBRME Komel, a wyprodukowanych w EMIT S.A. w Żychlinie. Kadłub jest konstrukcją spawaną, wykonaną z pakietu blach magnetycznych spawanych pomiędzy dwoma obrabianymi mechanicznie pierścieniami stalowymi. Mechaniczne własności konstrukcji uzyskuje się poprzez przyspawanie czterech wzdłużnych płyt ustawionych pod kątem do pakietu blach magnetycznych, czołowo przyspawanych do pierścieni końcowych, a także przyspawanych wzdłuż całego obwodu magnetycznego.

Silnik do napędu lokomotywy E6ACT

Kolejną nowoczesną konstrukcją maszyny asynchronicznej opracowaną przez BOBRME Komel jest silnik trakcyjny typu STx500-4A (rys.8) przeznaczony do napędu lokomotywy typu E6ACT (rys.6). Lokomotywa jest pojazdem towarowym 6-osiowym o indywidualnym napędzie każdej osi i prędkości maksymalnej 120 km/h (dla pociągów towarowych jest to górna granica techniczna). Lokomotywa przeznaczona jest do prowadzenia ciężkich pociągów towarowych o masie do 3200 ton typowych dla kruszyw, piasku, węgla czy stali. Lokomotywa posiada sumaryczną moc ciągłą 4.98 MW. Silniki stanowiące napęd każdej z osi, zasilane są parami (każda para z jednego falownika), dlatego też muszą posiadać identyczne charakterystyki trakcyjne (rys.7). Do niniejszego układu zaprojektowano czterobiegunowy silnik (rys.8) o mocy 830 kW przy napięciu zasilania 2150 V oraz częstotliwości



6. Lokomotywa typu E6ACT



7. Obliczeniowa charakterystyka trakcyjna silnika STx 500-4A do napędu lokomotywy E6ACT

44 Hz. Znamionowa prędkość silnika wynosi 1296 obr/min. W silniku zastosowano system chłodzenia powietrzem z wydajnością 100 m³/min.

Od strony napędowej silnik współpracuje z przekładnią Voight a cała konstrukcja silnika została tak zaprojektowana, aby umożliwić przenoszenie sił poosiowych. Zastosowane w lokomotywie silniki asynchroniczne opracowane w BOBRME Komel pozwalają na osiągnięcie przez lokomotywę maksymalnej siły rozruchowej 374 kN oraz na osiągnięcie zdolności prowadzenia pociągów o masie:

- 3200 ton na profilu 0‰ z prędkością 115 km/h;
- 3200 ton na profilu 6‰ z prędkością 58 km/h;
- 2500 ton na profilu 6‰ z prędkością 74 km/h;
- 2080 ton na profilu 10,2‰ z prędkością 63 km/h.

Nowoczesna aparatura energoelektroniczna zamontowana w lokomotywie zapewnia bezzakłócenia pracę pojazdu, a kom-

puterowy system diagnostyki i sterowania dopasowuje tryb działania lokomotywy do zmieniających się warunków pracy. System kontrolny monitorujący urządzenia pracujące w lokomotywie umożliwia łatwą lokalizację uszkodzeń i informuje o zbliżaniu się do parametrów granicznych diagnozowanych urządzeń (np. silnika napędowego). Dzięki zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych maksymalnie zostało ograniczone niekorzystne oddziaływanie lokomotywy na środowisko naturalne.

Rdzeń stojana jest konstrukcją spawaną, wykonaną z pakietu blach magnetycznych znajdujących się pomiędzy dwoma obrabianymi mechanicznie pierścieniami stalowymi. Pakiet blach posiada osiowe otwory wentylacyjne. Na obwodzie pakietu i pierścieni rozmieszczone są żebra oraz dwa zespoły łap, które stanowią element nośny rdzenia. Całą konstrukcję łączą trzy płaszczyzny przyspawane do zewnętrznych elementów stojana [5]. Uzwojenie wykonane jest w klasie izolacji H impregnowane w technologii VPI.



8. Silnik STx 500-4A, 830 kW do napędu lokomotywy E6ACT



9. Pojazd kolejowy typu EN57

Silnik do napędu pojazdu typu EN-57

Inną nowoczesną konstrukcją silnika trakcyjnego jest silnik typu LK 450 X6 do napędu pociągu typu EN57 (rys.9). Silnik ten jest trójfazowym silnikiem asynchronicznym o sześciu biegunach. Wirnik zbudowany jest jako jednoklatkowy, prętowany. Obudowa silnika posiada stopień ochrony IP22. Silnik jest przystosowany do zasilania z przetwornika częstotliwości, co umożliwia napędowi pracę z płynną regulacją prędkości obrotowej. Silnik pod względem konstrukcji jest

zamiennikiem silnika prądu stałego typu LKF-450.

Pręty wirnika oraz pierścienie zwierające wykonane są ze specjalnego stopu miedzi zastosowanego w celu podwyższenia wytrzymałości mechanicznej uzwojenia wirnika [6]. Wirnik, podobnie jak w poprzednich silnikach trakcyjnych, od strony napędowej jest przystosowany do zamontowania sprzęgła zębatego połączonego z przekładnią. Na końcu wału od strony przeciw napędowej zamocowana jest tarcza czujnika obrotów.

Podsumowanie

Przemysł trakcyjny obecnie skupia się na nowoczesnych konstrukcjach silników asynchronicznych klatkowych. Maszyny te dobrze radzą sobie z trudnymi warunkami pracy [1, 2, 3], odznaczają się prostą konstrukcją, niskim kosztem wytworzenia oraz są praktycznie bezawaryjne, czego nie można powiedzieć o maszynach prądu stałego (przeanalizujmy chociażby ze względu na komutator). Na życzenie klienta, już na etapie projektowym dopasowuje się charakterystykę silnika do charakterystyki bazowej. Takie podejście umożliwia zastosowanie nowo projektowanych silników z maszynami innego typu w tym samym pojeździe trakcyjnym. Obecnie na rynku królują silniki klatkowe, gdyż są tańsze (produkcja) w porównaniu chociażby z silnikami z magnesami trwałymi. Jesteśmy przekonani, że zaprojektowane przez BOBRME KOMEL silniki trakcyjne sprawdzą się w reżimach pracy wymaganych przez trakcyjne pojazdy kolejowe, co więcej uważamy, iż popularność silników klatkowych z uwagi na stosunkowo taną produkcję, układy i algorytmy sterowania będzie coraz bardziej wzrastać, wypierając z rynku awaryjne i mało efektywne silniki prądu stałego. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Bernatt J., Glinka T.: „Problemy konstrukcji maszyn elektrycznych w aktualnych pracach BOBRME Komel”. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2009, Nr83.
- [2] Bernatt J., Poprawski W., Pistelok P., Śladowski M.: „Nowoczesne silniki trakcyjne według opracowania BOBRME Komel”, Materiały konferencyjne Modern Electric Traction, Gdańsk 2009.
- [3] Pistelok P., Czaja T.: „Silnik klatkowy jako napęd wentylatora w trudnych warunkach pracy”. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2011 (89), nr 1.
- [4] BOBRME Komel: „Dokumentacja techniczno-ruchowa”, Praca niepublikowana, 2007, nr CS4-99048.
- [5] BOBRME Komel: „Dokumentacja techniczno-ruchowa”. Praca niepublikowana, 2008, nr CS4-99049.
- [6] BOBRME Komel: „Dokumentacja techniczno-ruchowa”. Praca niepublikowana, nr CS4-99051, 2008.
- [7] Glinka T.: „Maszyny elektryczne zbudowane magnesami trwałymi”. Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2002.
- [8] BOBRME Komel: „Dokumentacja techniczno-ruchowa”. Praca niepublikowana, 2009, nr CS4-099063.