

Jacek DUDZIŃSKI

TYPOSZEREG SILNIKÓW DO NAPĘDU BEZPOŚREDNIEGO MAŁYCH POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH

STRESZCZENIE *W artykule opisano zaprojektowany w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki typoszereg silników przeznaczonych do napędu małych pojazdów elektrycznych, w tym także skuterów inwalidzkich. Opisano cechy konstrukcyjne zaprojektowanych silników.*

Słowa kluczowe: *pojazd elektryczny, napęd bezpośredni, algorytm obliczeniowy, typoszereg, cykl życia silników*

1. WSTĘP

Silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi można spotkać w urządzeniach wywodzących się z wielu różnych gałęzi przemysłu. Są stosowane w różnego rodzaju robotach, lodówkach, sprzęcie medycznym, motoryzacji, sprzęcie komputerowym, obrabiarkach numerycznych itp. Zyskują popularność również jako napędy pojazdów elektrycznych jedno- i dwuśladowych. Pojazdy te poruszają się np. po obiektach przemysłowych, terenach trawiastych, ośrodkach wypoczynkowych, centrach handlowych. Służą w strefach ograniczonego ruchu w miastach np. do obsługi służb komunalnych czy dla mieszkańców. Używane są również jako pojazdy dla inwalidów.

2. ZALETY NAPĘDU BEZPOŚREDNIEGO

Pojazdy elektryczne są pojazdami wymagającym stosunkowo dużego momentu obrotowego. Duży stosunek momentu do prędkości obrotowej, jaki występuje w silnikach BLDC, jest dużą zaletą i powoduje, iż silniki takie szczególnie nadają się do

mgr inż. Jacek DUDZIŃSKI
e-mail: dudz@iel.waw.pl

Zakład Maszyn Elektrycznych, Instytut Elektrotechniki
ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

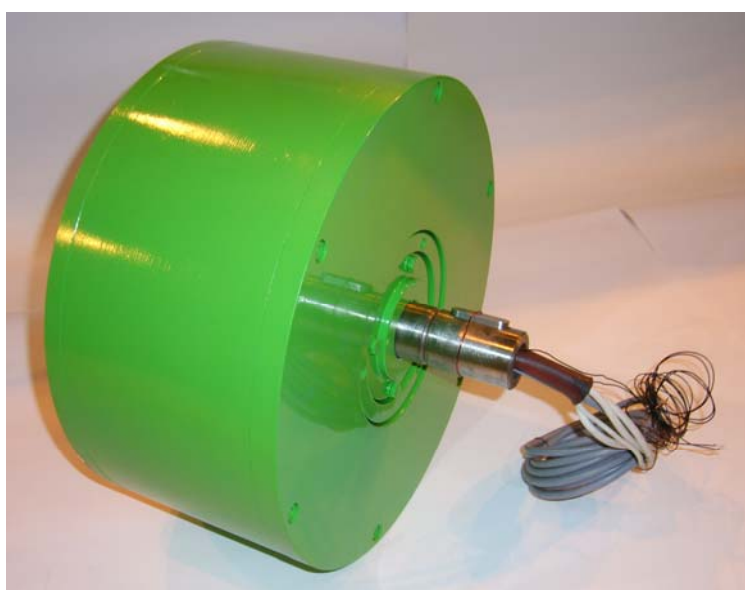
PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 264, 2014

napędu bezpośredniego w tego typu pojazdach. Zajmują one mniej miejsca w pojeździe w porównaniu do innego typu silników o podobnych parametrach, a więc masa całkowita układu napędowego jest mniejsza. Prostsza jest także konstrukcja całego napędu. Dzięki stosunkowo małemu momentowi bezwładności i dużej przeciążalności napęd działa z dużą dynamiką. Duża przeciążalność wynika z braku wirujących styków elektrycznych oraz liniowej zależności momentu od prądu obciążenia [4]. Komutator elektroniczny zapewnia również większą żywotność silnika.

Wirnik silnika BLDC wytwarza pole magnetyczne wzbudzenia dzięki namagnesowanym naprzemiennie magnesom trwałym. Takie rozwiązanie eliminuje straty w wirniku oraz zwiększa sprawność małych silników zwykle do ponad 80%. Straty w uzwojeniu stojana w porównaniu do innych silników są również mniejsze, ponieważ silniki z magnesami trwałymi wymagają mniejszej liczby zwojów na fazę oraz mniejsza jest rezystancja uzwojenia.

3. TYPOSZEREG SILNIKÓW PRZEZNACZONYCH DO NAPĘDU BEZPOŚREDNIEGO

Silniki elektryczne przeznaczone do napędu bezpośredniego pojazdów elektrycznych są od kilku lat projektowane w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki [1, 2]. Powstało już kilka typów takich silników o strukturze z nieruchomym wewnętrznym twornikiem oraz magnesami trwałymi umieszczonymi w zewnętrznym wirniku. Są to silniki wolnoobrotowe. Wymagają stałego napięcia zasilania o wartości $U = 96 \text{ V}$. Wykonywane próby drogowe pojazdów wyposażonych w te silniki potwierdzają ich przydatność i ekonomiczność. Przykładową wersję silnika o momencie znamionowym $M_N = 180 \text{ Nm}$ i prędkości obrotowej $n_N = 107 \text{ min}^{-1}$ przedstawiono na rysunku 1. Jest to jeden z dwóch silników przeznaczonych do napędu pojazdu o masie całkowitej do 1 tony.

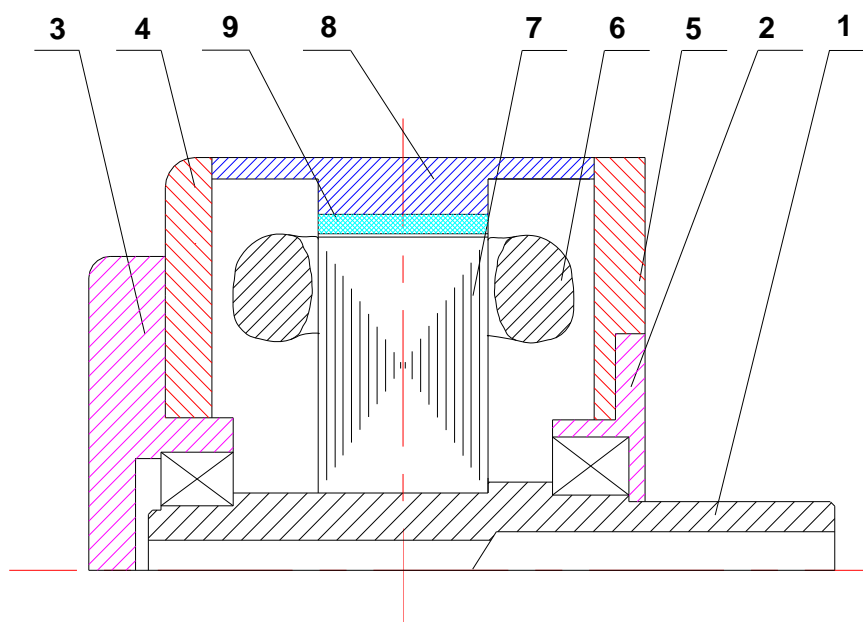


Rys. 1. Silnik typu ETMm-180/12 przeznaczony do napędu pojazdu elektrycznego o masie całkowitej 1 tony [2]

W ostatnim czasie zaprojektowano zunifikowany typoszereg silników przeznaczonych do napędu małych pojazdów elektrycznych. Silniki posiadają następujące cechy:

- rodzaj symetrii – walcowa,
- wzajemne położenie głównych elementów: stojan wewnętrzny, wirnik zewnętrzny,
- stopień ochrony – IP44 lub IP55,
- położenie osi wału – poziome,
- połączenie z urządzeniem napędzanym – koło pojazdu mocowane do tarczy łożyskowej silnika,
- posadowienie – mocowanie do konstrukcji pojazdu,
- połączenie ze źródłem napięcia – poprzez trzy przewody dwuwarstwowego uzwojenia trójfazowego skojarzonego w gwiazdę i doprowadzone do wyjścia zasilacza półprzewodnikowego,
- sposób sterowania – poprzez specjalny impulsator z trzema transoptorami odbiciowymi umieszczonymi na tarczy nieruchomej względem stojana i odpowiednio ustawionej względem początku pasma fazowego.

Na rysunku 2 przedstawiono w sposób uproszczony konstrukcję tego typu silników.



Rys. 2. Przekrój silnika przeznaczonego do napędu bezpośredniego:

1 – wałek, 2 – gniazdo łożyskowe wewnętrzne, 3 – gniazdo łożyskowe zewnętrzne, 4 – tarcza łożyskowa zewnętrzna, 5 – tarcza łożyskowa wewnętrzna, 6 – uzwojenie stojana, 7 – stojan, 8 – korpus, 9 – magnes

Silniki posiadają strukturę o nieruchomym wewnętrznym tworniku oraz z magnesami trwałymi umieszczonymi w zewnętrznym wirniku [3], podobnie jak wykonywane wcześniej silniki o większych mocach znamionowych. Poniżej zestawiono podstawowe parametry silników.

TABELA 1

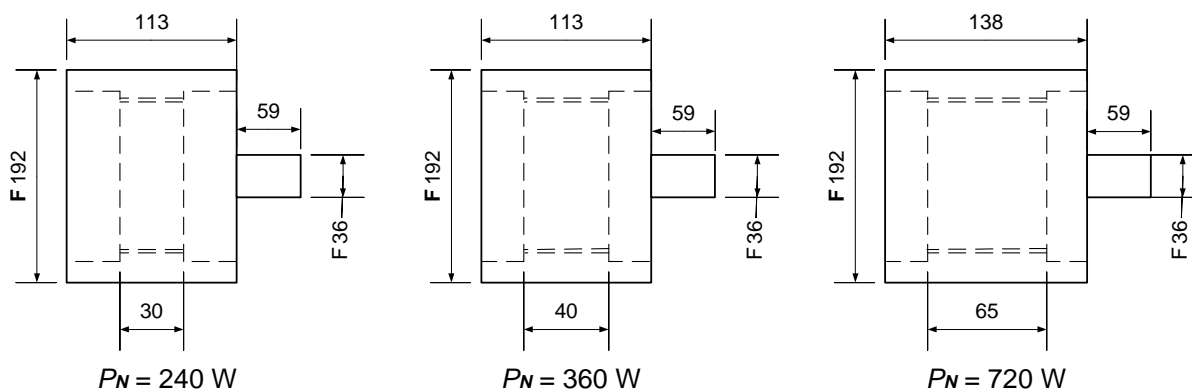
Podstawowe parametry zunifikowanego typoszeregu silników magnetoelektrycznych z zewnętrznym wirnikiem

Lp.	M_N [Nm]	n_N [min^{-1}]	P_N [W]	D – średnica zewnętrzna [mm]	L – długość zewnętrzna [mm]
1.	10	230	240	192	113
2.	15	230	360	192	113
3.	30	230	720	192	138

Silniki posiadają następujące zunifikowane elementy konstrukcyjne:

- blachy pakietu stojana,
- łożyska,
- tarcze łożyskowe,
- gniazda łożyskowe,
- pierścienie dystansowe – zewnętrzny oraz tarczy ruchomej,
- tarcze impulsatora – ruchoma oraz nieruchoma,
- wpusty i uszczelnienia wałka.

Różnice w wymiarach występują jedynie dla wersji silnika o największej mocy. Dotyczą one wałka oraz kadłuba. Są spowodowane różnicą w długości pakietu blach stojana. Na rysunku 3 przedstawiono różnice w podstawowych wymiarach silników wchodzących w skład zunifikowanego typoszeregu.



Rys. 3. Podstawowe wymiary silników zaprojektowanego typoszeregu

W celu obniżenia kosztów wykonania silników zastosowano uproszczenia w ich konstrukcji. Pierwszym uproszczeniem jest wykonanie kadłubów jako jednego elementu łącznie z jarzmem zewnętrznego wirnika. Zwiększa to nieco masę silników oraz powoduje zmianę wysokości jarzma, co zostało uwzględnione w obliczeniach, ale znacznie upraszcza konstrukcję. Zastosowane rozwiązanie eliminuje konieczność wciskania stalowego jarzma w kadłub, co z kolei wymaga zastosowania specjalnego oprzyrządowania. Drugim uproszczeniem jest osadzenie rdzenia wewnętrznego stojana bezpośrednio na wałkach silników z pominięciem piasty. Takie rozwiązanie również obniża koszty wykonania.

4. ALGORYTM OBLICZENIOWY SILNIKÓW

Do obliczeń zunifikowanego typoszeregu silników użyto oprogramowania opracowanego w Zakładzie Maszyn Elektrycznych pod nazwą „Design of the DC brushless Motors with permanent Magnets”. Oprogramowanie to zostało stworzone w oparciu o opracowaną metodę obliczeń bezszczotkowych silników prądu stałego o magnesach trwałych. Metodę obliczeń silników do instalowania w kole pojazdu przedstawiono szczegółowo w opracowaniu [4]. Dotyczy ona silników o strukturze walcowej z łupinowymi magnesami w wirniku oraz z dwuwarstwowym uzwojeniem trójfazowym, skojarzonym w gwiazdę, umieszczonym w żłobkach twornika. Jako magnesy trwałe zastosowano trójskładnikowy materiał żelazo-neodym-bor o dużej gęstości energii magnetycznej.

Algorytm obliczeniowy rozbudowano tak, aby można było wariantowo zaprojektować zoptymalizowane silniki o założonej strukturze. W zależności od wybranej struktury, różne są sposoby obliczania wymiarów obwodu magnetycznego silników i związanych z nimi parametrów. Dotyczy to przede wszystkim wysokości jarzm stojana i wirnika, podziałek żłobkowych, współczynników do obliczania napięć magnetycznych w jarzmach oraz wymiarów żłobków.

W programie obliczeniowym zastosowano niedeterministyczną procedurę optymalizacyjną według strategii ewolucyjnej $(\mu + \lambda)$ -ES. Jako kryterium optymalizacji przyjęto minimalizację kosztów materiałów czynnych elektromagnetycznie, użytych podczas wytworzenia silników. Należy wspomnieć, iż oprócz przyjętego kryterium są również inne, jak [6]:

- a) minimum kosztów wyprodukowania i użytkowania silnika,
- b) minimum masy materiałów czynnych elektromagnetycznie,
- c) maksimum momentu przypadającego na jednostkę masy,
- d) minimum kosztów materiałów czynnych elektromagnetycznie przypadających na jednostkę,
- e) maksimum sprawności.

Z punktu widzenia interesów producenta, ważne są oprócz przyjętego kryterium, również kryteria b) i d).

Przy wyborze kryterium wzięto pod uwagę następujące okoliczności:

- stosunkowo duże koszty wytworzenia silników magnetoelektrycznych w porównaniu z innymi maszynami elektrycznymi. Wynika to z wysokich kosztów magnesów trwałych gatunku HdFeB oraz wysokich kosztów blachy elektrotechnicznej o małej stratności przy dużych częstotliwościach przemagnesowywania;
- drugorzędne znaczenie kosztów energii traconej podczas eksploatacji silników tego typu. Silniki magnetoelektryczne o komutacji elektronicznej przeważnie nie są stosowane w napędach do pracy ciągłej.

W wyniku działania procedury optymalizacyjnej otrzymano wektor rozwiązania optymalnego oraz pełny zbiór wyników obliczeń silników. Zbiór ten może być wydrukowany lub zapisany na dysku w formie pliku tekstowego.

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI OBLICZEŃ

Zbiór wyników zestawiony w tablicy obliczeń zawiera ponad osiemdziesiąt parametrów dla jednego silnika. Poniżej przedstawiono niektóre obliczone najważniejsze parametry elektryczne oraz mechaniczne dla silnika o mocy znamionowej $P_N = 240$ W.

TABELA 2

Zestawienie wybranych parametrów dla silnika o mocy znamionowej $P_N = 240$ W

Symbol	Opis	Wartość	
M_N	Znamionowy moment obrotowy	9,96	Nm
I_N	Prąd znamionowy	13,3	A
D	Średnica wewnętrzna twornika	155,0	mm
L	Długość rdzenia twornika	30,0	mm
Q_S	Liczba żłobków twornika	27	-
SQ_N	Pole powierzchni przekroju żłobka netto	143,69	mm ²
k_C	Współczynnik Cartera	1,0384	-
k_z	Współczynnik zapelnienia żłobka	0,57	-
m_{Fe}	Masa rdzenia	3,17	kg
m_{mg}	Masa magnesów	0,49	kg
m_{Cu}	Masa miedzi	1,21	kg
B_g	Indukcja w szczelinie	0,738	T

6. KOSZTY UNIFIKACJI SILNIKÓW

Unifikacja, czyli ujednostajnienie, polega na stosowaniu do różnych konstrukcji takich samych elementów. Typowym przykładem unifikacji jest konstruowanie „rodziny” silników, umożliwiające uzyskanie jednostek o różnych mocach znamionowych. Elementami wspólnymi są np. tarcze łożyskowe i gniazda łożyskowe, łożyska itd. Skonstruowane w ten sposób silniki mają wspólne (zunifikowane) wszystkie elementy z wyjątkiem tych, w których zmienia się długość, jak np. kadłub, wałek itp. Tego rodzaju unifikacja zapewnia bardzo duże korzyści gospodarcze.

Unifikacja konstrukcji powoduje mniejszą ilość prac przy projektowaniu i pozwala wykonać je lepiej. Wykorzystuje się przy tym doświadczenia uzyskane przy realizacji konstrukcji wykonanych poprzednio. Unifikacja konstrukcji zmniejsza ilość narzędzi. Oprócz tego pozwala zmniejszyć różnorodność wyrobów, a zatem zwiększyć serię. Duże korzyści daje również unifikacja maszyn użytych do wykonania i obróbki elementów z punktu widzenia ich użytkowania i napraw.

Jeszcze większe korzyści gospodarcze niż unifikacja zapewnia normalizacja. Większości elementów nie można znormalizować, a jedynie można je zunifikować. Jednakże w dziedzinie silników przedmiotem normalizacji są powszechnie stosowane

elementy maszyn, jak np. śruby, nakrętki, podkładki, wpusty. Zastosowanie elementów lub części unifikowanych i znormalizowanych musi być uwzględnione podczas projektowania danego silnika.

Materiały konstrukcyjne użyte do produkcji muszą zapewniać dostateczną wytrzymałość i odporność na zużycie oraz mały ciężar właściwy. Jednocześnie muszą być przy tym uwzględnione warunki technologiczne, jak np. odpowiednie własności plastyczne, odlewnicze oraz dostateczna obrabialność. Również muszą być uwzględnione warunki ekonomiczne – niski koszt.

Uproszczenie cyklu wyprodukowania silników obniży koszty ich wykonania. Aby móc ustalić całkowitą rentowność produktów – w tym przypadku silników, konieczne jest podejście kompleksowe. W tym celu wykonuje się obliczenie wszystkich kosztów ponoszonych przez cały „cykl życia” silników [5]. Określa się to mianem kosztów cyklu życia, po angielsku *Life Cycle Costs* (LCC). Za pomocą prostego wzoru można obliczyć LCC. Jest on sumą poszczególnych kosztów:

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d$$

gdzie:

- C_{ic} – koszt zakupu
- C_{in} – koszt instalacji/uruchomienia
- C_e – koszt energii
- C_o – koszt obsługi
- C_m – koszt utrzymania sprawności technicznej i napraw
- C_s – koszt przestoju produkcji
- C_{env} – koszt ochrony środowiska
- C_d – koszt wyłączenia z eksploatacji

Szacowanie LCC ma na celu dostarczenie ważnych danych wejściowych do podejmowania decyzji dotyczących projektowania, rozwoju i użytkowania wyrobu. Analiza LCC jest najefektywniejsza w fazie projektowania. Jej przydatność potwierdza się również w kolejnych etapach „cyklu życia” przy podejmowaniu innych decyzji inżynierskich i ułatwieniu efektywnej alokacji środków finansowych. Z punktu widzenia producenta, dostawcy, wiąże się to z możliwością optymalizacji projektów poprzez ocenę różnych wariantów rozwiązań i poszukiwanie kompromisów między nimi.

7. ZASTOSOWANIE W POJAZDACH

Zaprojektowane silniki mogą stanowić napęd:

- lekkich pojazdów jedno- lub kilkuosobowych,
- lekkich pojazdów transportowych,
- rowerów,
- skuterów,
- pojazdów inwalidzkich itp.

W pojazdach dwuśladowych napęd może być przekazywany na dwa koła tylne lub jedno, co znacznie ułatwi sterowanie oraz obniży koszty wykonania. Dobór parametrów elektrycznych zapewni osiągi drogowe nie mniejsze od dotychczasowych dla tego typu pojazdów posiadających napęd klasyczny pośredni.

8. PODSUMOWANIE

Silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi posiadają zalety, dzięki którym mogą być zastosowane m.in. jako napęd w różnego rodzaju pojazdach elektrycznych z napędem bezpośrednim. Głównie jest to duży stosunek momentu do prędkości obrotowej oraz mniejsza masa w stosunku do silników innego typu o podobnych parametrach. Napęd działa z dużą dynamiką również dzięki stosunkowo małemu momentowi bezwładności i dużej przeciążalności.

Do obliczeń zunifikowanego typoszeregu silników użyto oprogramowania opracowanego w Zakładzie Maszyn Elektrycznych. Oprogramowanie to zostało stworzone w oparciu o opracowaną metodę obliczeń bezszczotkowych silników prądu stałego o magnesach trwałych.

Uruchomienie produkcji nowego wyrobu powinno być poprzedzone jego optymalizacją. Optymalizację silników wykonuje się według jednego z sześciu kryteriów. Jako kryterium optymalizacji przyjęto minimalizację kosztów materiałów czynnych elektromagnetycznie użytych podczas wytworzenia silników. W procedurę obliczeń optymalizacyjnych maszyn o magnesach trwałych należy również dołączyć obliczenia cieplne z uwzględnieniem wpływu temperatury na zmiany parametrów magnesów i odporność na odmagnesowanie. Konieczne jest spełnienie wielu ograniczeń. Po wyznaczeniu ekstremum globalnego zadanej funkcji celu i wyznaczeniu wymiarów optymalnych, zwykle zachodzi konieczność odstępstwa od niektórych z nich. Wynika to ze względów normalizacyjnych, technologicznych lub unifikacyjnych.

Aby móc ustalić całkowitą rentowność produktów, wykonuje się obliczenie wszystkich kosztów ponoszonych przez cały „cykl życia produktu”. Cykl życia to przedział czasu od powstania wyrobu do jego likwidacji. Można wyróżnić siedem faz „życia produktu”. Łączne koszty ponoszone w poszczególnych fazach można podzielić na koszty nabycia i koszty posiadania. Koszty nabycia to koszty inwestycyjne, jak zakup i instalacja, natomiast koszty posiadania to koszty energii, obsługi, utrzymania sprawności technicznej i napraw, przestoju produkcji, ochrony środowiska oraz wyłączenia z eksploatacji.

W Zakładzie Maszyn Elektrycznych od kilku lat są projektowane, konstruowane i wykonywane wersje silników o strumieniu promieniowym i osiowym o momentach znamionowych od 35 Nm do 180 Nm i prędkościach znamionowych od 100 min⁻¹ do 320 min⁻¹. Pojazdy wyposażone w tego typu napęd wykazały pełną ich przydatność w różnych warunkach drogowych. Zaprojektowane silniki w ramach zunifikowanego typoszeregu przydatne będą do napędu lekkich pojazdów osobowych, dostawczych, skuterów czy pojazdów inwalidzkich. Napęd może być zrealizowany na dwa koła lub na jedno. Zmniejszy to koszty produkcji.

LITERATURA

1. Dąbała K., Dudziński J.: Konceptyjny pojazd elektryczny z napędem bezpośrednim – opracowanie i wykonanie konstrukcji mechanicznej. Dok. IEL 21/2010.
2. Dąbała K., Dudziński J., Rudeński A. i in.: Opracowanie pojazdu z napędem elektrycznym, osobowo-towarowego o masie całkowitej do 1 tony. Projekt rozwojowy N R01 0005 10.
3. Rudeński A.: Rozwinięcie metody i programu obliczeń silników magnetoelektrycznych o komutacji elektronicznej oraz zaprojektowanie i wykonanie prototypu silnika z zewnętrznym wirnikiem. Dok. IEL 24/2009.
4. Dąbała K., Dudziński J., Rudeński A.: Silniki do napędu bezpośredniego pojazdów elektrycznych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, BOBRME „Komet”, Katowice, czerwiec 2013, Nr 100/3/2013, s. 147-150.
5. Herborner-Pumpen, katalog wyrobów P-hF02PL 2011, str 14. Wydawca: Suddescher Verlag onpact GmbH, ISBN 978-3-863236-040-6.
6. Dudzikowski I.: Zagadnienie optymalizacji silników. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały Nr 25, 2005.

Rękopis dostarczono dnia 31.01.2014 r.

RANGE OF MOTORS FOR THE DIRECT DRIVE OF SMALL ELECTRIC VEHICLES

Jacek DUDZIŃSKI

ABSTRACT *The article describes the motors' range destined to direct drive of small electric vehicles, including electric wheelchairs scooters, which was designed by the Department of Electrical Machines at the Electrotechnical Institute. The constructional features of designing motors were presented.*

Keywords: *electric vehicle, direct drive, calculation algorithm, type series, life cycle motors*

Mgr inż. Jacek DUDZIŃSKI ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w roku 1981. W tym samym roku rozpoczął pracę w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Jest współautorem i autorem kilku patentów.

W swojej pracy zawodowej zajmował się m.in. pomiarami parametrów elektrycznych i mechanicznych maszyn elektrycznych, pomiarami tensometrycznymi, konstrukcją przetworników mechanicznych, pomiarami hałasu i drgań maszyn elektrycznych, metodami przetwarzania i utylizacji sprzętu elektrycznego i elektronicznego, zagadnieniami dotyczącymi energii odnawialnej. Jest współautorem prac dotyczących konstrukcji pojazdów elektrycznych oraz silników elektrycznych przeznaczonych do napędu bezpośredniego.



