

Dominik Adamczyk, Michał Michna
Politechnika Gdańska

PRZEGLĄD I ANALIZA UKŁADÓW NAPĘDOWYCH STOSOWANYCH W ROWERACH ELEKTRYCZNYCH

OVERVIEW AND ANALYSIS OF THE DRIVE SYSTEMS USED IN ELECTRICAL BIKES

Abstract: The purpose of his article is an overview and analysis of the drive system used in electrical bikes. Classical and modern drive system are described. The stress is putted on the electrical motors used in that applications. Structure, control and power supply of most recent design are presented. The analysis applies to hub motor type Clyte 408 used as a bike drive. Authors have decided to build a field-circuit model of the Clyte 408 motor - brushless dc motor with permanent magnet. To built the motor model Flux2D are used. Results of analysis using field-circuit model are compared with the results obtained from tests in laboratory. Finally this article presents purpose of using field-circuit model and disadvantages of that approach. Also two attitude of choosing motor do drive system in electrical bike are considered.

1. Wstęp

System komunikacyjny dzisiejszych polskich miast staje się coraz mniej wydajny – jest coraz więcej samochodów, natomiast dróg i miejsc parkingowych nie przybywa w odpowiednim tempie. Szuka się skutecznych alternatyw do sprawnego i ekologicznego poruszania się po mieście. Rower napędzany siłą mięśni może być alternatywą dla samochodu ale tylko na krótkich dystansach. Rower wspomagany silnikiem elektrycznym zyskuje nowe atuty takie jak większy zasięg, większą średnią prędkość, możliwość używania przez osoby starsze. Nie jest to jednak rozwiązanie idealne zwłaszcza z uwagi na klimat panujący w Polsce, słabo rozwiniętą siatkę ścieżek rowerowych oraz małą liczbę parkingów dla rowerów. Ważny jest aspekt ekologiczny tego rozwiązania. Ciągły wzrost cen paliw kopalnych oraz negatywne skutki ich spalania, sprzyja wdrażaniu nowych ekologicznych technologii.

Upowszechnienie się rowerów elektrycznych związane jest z ciągłym rozwojem techniki w zakresie energoelektroniki, budowy maszyn elektrycznych, materiałoznawstwa, oraz elektrochemicznych źródeł energii. Aktualne rozwiązania pozwalają na budowę małych i lekkich silników o dużym stosunku mocy do masy. Rozwój technologii zasobników energii pozwala budować lekkie i pojemne akumulatory, zwiększając zasięg pojazdów. Nowe rozwiązania techniczne sprawiają,

że napęd elektryczny staje się coraz efektywniejszy oraz konkurencyjny cenowo względem napędu spalinowego.

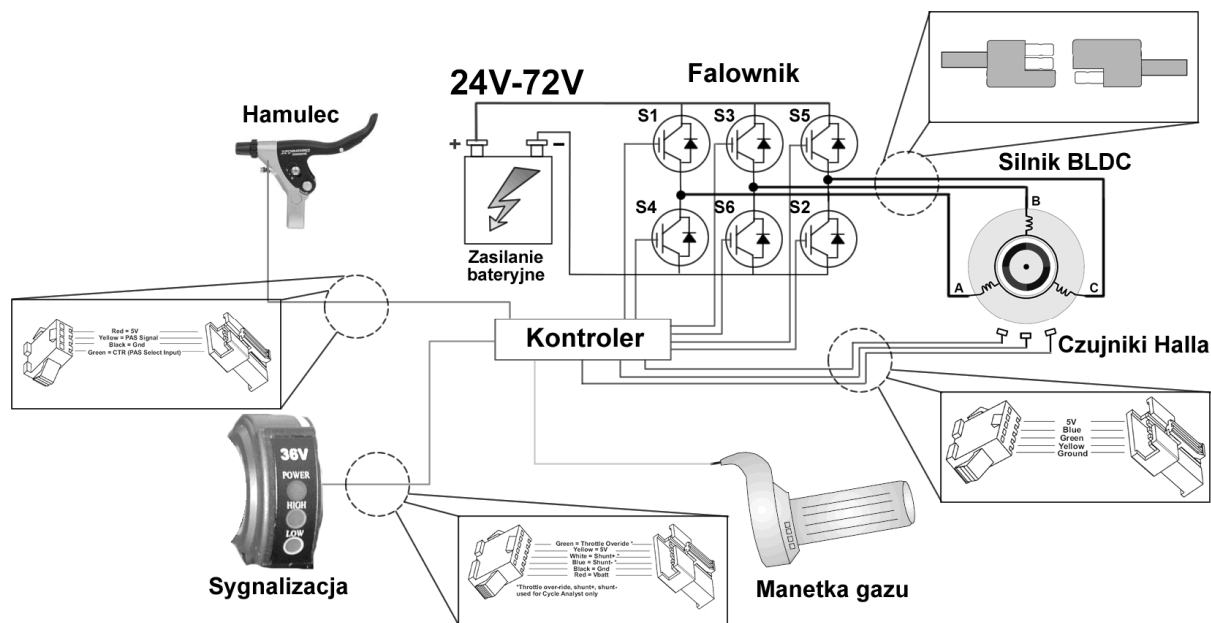
Budowa lub kupno roweru z napędem elektrycznym to wydatek od 1400 do 3500 zł. Można kupić fabrycznie złożony rower elektryczny lub zestaw do samodzielnego montażu. Najistotniejszym elementem kosztów obu rozwiązań jest cena baterii/akumulatora [7].

Wyposażenie roweru w napęd elektryczny podlega regulacjom prawnym. Zgodnie ze stanem prawa na 2008 rok dopuszcza się wyposażenie roweru w pomocniczy napęd elektryczny o znamionowej mocy ciągłej nie większej niż 250W, zasilany napięciem nie wyższym niż 48V, który jest automatycznie odłączany kiedy rower osiąga prędkość 25 km/godz [13].

W artykule przedstawiono przegląd i analizę układów napędowych stosowanych obecnie w rowerach elektrycznych. Główną uwagę poświęcono zagadnieniu doboru silnika elektrycznego. Przedmiotem analizy był układ napędowy z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego. Przedstawiono etapy opracowywania modelu polowo-obwodowego oraz wybrane wyniki symulacji.

2. Układ napędowy roweru elektrycznego

Układ napędowy roweru elektrycznego składa się z trzech głównych elementów – zasilania, sterownika oraz silnika (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowy schemat ideowy układ napędowego roweru elektrycznego z silnikiem BLDCM

2.1 Akumulatory

Akumulatory są najdroższym elementem całego układu napędowego. Jest to w zasadzie jedyny element napędu, który ulega zużyciu dlatego należy wliczać jego amortyzację w koszt przejazdu. W układach seryjnie sprzedawanych rowerów elektrycznych najczęściej stosowane są akumulatory kwasowo-ołowiowe (z elektrolitem w postaci żelu) o pojemności 10-12 Ah. Baterie łączone są szeregowo do napięcia 36 V. W droższych konstrukcjach stosuje się znacznie lepsze baterie litowo-jonowe, dzięki czemu zasięg roweru zwiększa się nawet o 30% przy tej samej pojemności baterii. Baterie litowo-jonowe wymagają jednak zastosowania układów elektronicznych zabezpieczających baterie przed przegrzaniem oraz skomplikowanego systemu ładowania. W profesjonalnych wykonaniach selekcjonuje się ogniwa aby posiadały podobną rezystancję wewnętrzną.

2.2 Przekształtnik i sterownik

W układzie napędowym sterownik jest zintegrowany z układem przekształtnikowym. W zależności od użytego typu silnika jest to falownik do silników bezszczotkowych prądu stałego (BLDC) lub przerywacz (ang. *chopper*) do komutatorowych silników prądu stałego. Sterownik charakteryzuje się znamionowym prądem ograniczanym, zazwyczaj od 20 A do

50 A oraz znamionowym napięciem od 36 V do 72 V. Moc i prędkość obrotowa silnika jest odpowiednio sterowana tak, by nie przekroczyć wartości przewidzianych przez przepisy prawne. Prędkość obrotową reguluje się na podstawie wychylenia manetki gazu. Obecnie produkowane sterowniki pozwalają na odzyskiwanie energii hamowania.

3 Silniki elektryczne

W rowerach elektrycznych stosowane są silniki prądu stałego wzbudzone magnesami trwałymi komutatorowe oraz bezszczotkowe.

Ze względu na sposób przeniesienia momentu wyróżniamy dwa rodzaje silników – bezpośrednie (ang. *direct driver*) i pośrednie (ang. *geared*). W silnikach pośrednich stosuje się zintegrowaną przekładnię mechaniczną, uzyskując mniejszą wagę całego układu, przy zachowaniu takiego samego momentu jak w silnikach bezpośrednich.



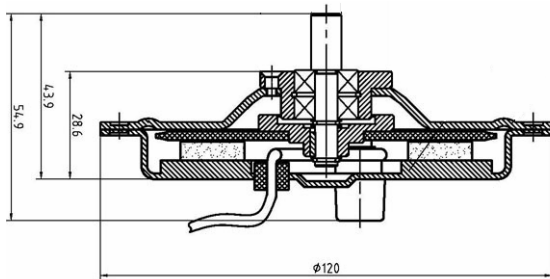
Rys. 2. Przykładowy silnik BLDC serii EV firmy Headline Electric[7,9]. Przeznaczony do napędu rowerów elektrycznych

W najstarszych rozwiązaniach silnik elektryczny mocowano w miejscu, które

wcześniej zajmował silnik spalinowy. Wymagało to zastosowanie skomplikowanych i ciężkich przekładni mechanicznych lub sprzęgieł. Na rysunku 2 przedstawiono silniki z zębatką do bezpośredniego napędu łańcucha. W nowszych rozwiązaniach silnik elektryczny jest zamocowany w piaście koła przedniego (lub rzadziej tylnego).

3.1. Układ napędowy roweru elektrycznego z silnikiem komutatorowym typu „pancake”

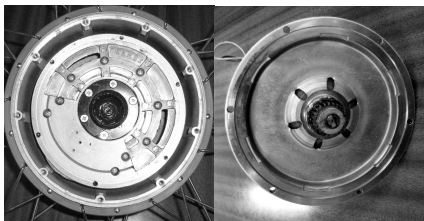
Najprostszym rozwiązaniem przeniesienia napędu w rowerze jest zamocowanie silnika elektrycznego w piaście koła przedniego. W najtańszych rozwiązaniach stosuje się silniki komutatorowe prądu stałego o strukturze tarczowej (typu „pancake”) (rys. 3).



Rys. 3. Budowa silnika „pancake” PM-36[11]

Silnik jest wzbudzany za pomocą magnesów trwałych osadzonych na obwodzie stojana. Uzwojenie twornika jest drukowane na wirniku. Silnik łączy się z przekładnią mechaniczną w szczelnej obudowie, która za pomocą szprych osadzona jest w kole roweru (rys. 4).

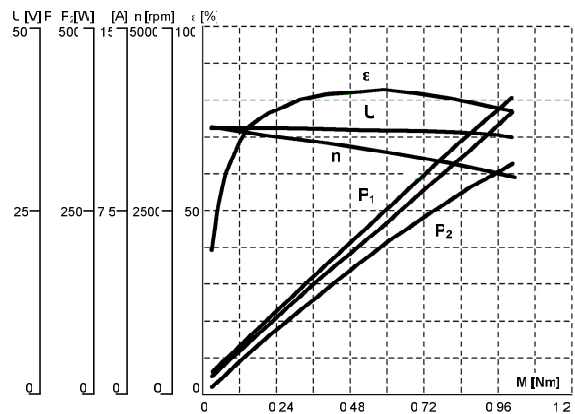
Podstawową zaletą zastosowania silników typu *pancake* jest jego niska cena, mała waga oraz duży moment rozruchowy. Silniki są zasilane poprzez proste, tanie i niezawodne przerywacze. Istotną wadą tego silnika jest stosunkowo niska moc oraz problemy eksploatacyjne związane z zastosowaniem komutatora i szczotek. Silnik tego typu występuje w czterech odmianach, przeznaczonych do zasilania napięciem 12, 24, 36 i 48 V [11] (tabela 2).



Rys. 4. Budowa silnika typu PM-36. Przekładnia zintegrowana z obudową i połączona z kołem

Tabela 2. Parametry silników serii PM firmy Golden Motor

Model	PM-12	PM-24	PM-36	PM-48
Napięcie, V	12V	24V	36V	48V
Moc, W	75	180	300	500
Prąd, A	10,2	10,8	11,2	15,4
Obroty, obr/min	1600	3300	3000	4600
Waga, kg	0,7	1,5	1,8	20
Sprawność	68%	76%	80%	82%

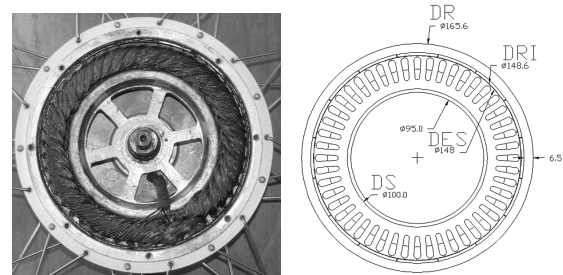


Rys. 5. Charakterystyka silnika PM-36[11].

F_1 – moc elektryczna, F_2 – moc mechaniczna.

3.2 Zrealizowany układ napędowy z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego

W najnowszych rozwiązaniach układów napędowych rowerów elektrycznych stosuje się silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC). Magnesy trwałe (neodymowe) mocowane są na zewnętrznym wirniku (rys. 6).



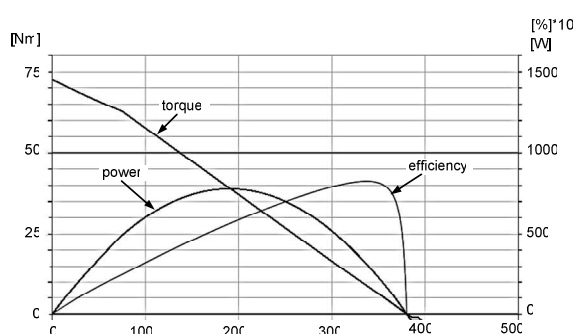
Rys. 6. Budowa oraz model geometryczny silnika Clyte 408

Wirnik osadzony jest na dwóch łożyskach a całość szczelnie zamknięta w metalowej obudowie. Stojan osadzony jest na nieruchomym wale, który jest jednocześnie osią mocującą koło do ramy roweru. Uzwojenie trójfazowe połączone jest w gwiazdę i umieszczone w żłobkach stojana. Zastosowano skos żłobków. Trzy czujniki Halla

umiejscowione są w specjalnie wykonanych żłobkach między zębami stojana. Silnik zintegrowany jest w jednej obudowie z kontrolerem. Wszystkie przewody (manetki gazu, baterii, hamulców) łączy się bezpośrednio z silnikiem [11]. Parametry i charakterystyki przykładowej serii silników BLDC przedstawiono w tabeli 3 i na rysunku 8.

Tabela 3. Parametry silników serii Clyte 40x, Clyte 53x firmy Crystalyte [11]

Seria	40x	53x
Średnica zewnętrzna, mm	194	254
Wysokość magnesów, mm	40	53
Maksymalny moment, Nm	62	98
Prędkość dla 48V, obr/min	800	>875
Waga, kg	6,5	11



Rys. 8. Charakterystyki silnika Clyte 408 [8] dla $U_n = 48\text{ V}$ oraz $I_{max} = 50\text{ A}$

4. Analiza silnika bezszczotkowego

Wykonano model oraz przeprowadzono symulacje układu napędowego roweru elektrycznego firmy Crystalyte model 408. Analizę układu przeprowadzono w programie polowym Flux2D [2]. Założono dwa etapy analizy:

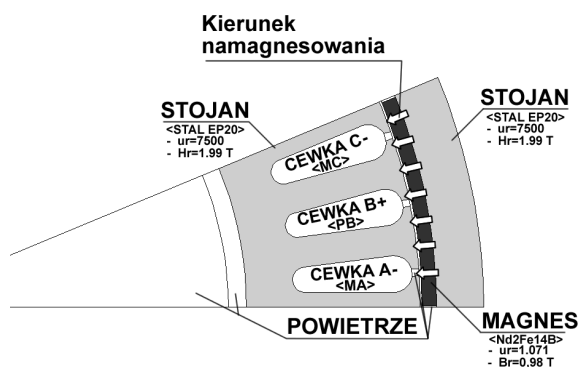
- budowa modelu geometrycznego i wyznaczenie parametrów do modelu obwodowego,
- budowa modelu polowo-obwodowego z wykorzystaniem narzędzi zintegrowanych w pakiecie Flux2D.

Symulacje wybranych stanów pracy można przeprowadzać w symulatorach obwodowych (PSPice, Saber, Matlab/Simulink) w oparciu o biblioteczne modele elementów układu. Wyznaczenie parametrów modelu obwodowego silnika można przeprowadzić w programie polowym. Zastosowanie symulatorów obwodowych umożliwia wykorzystanie dowolnego źródła zasilania, dowolnie skomplikowanego układu sterownika oraz dowolnego przebiegu i stopnia obciążenia.

Wyniki symulacji uzyskiwane są bardzo szybko zachowując wystarczającą dokładność obliczeń. Model polowo-obwodowy opracowano z wykorzystaniem narzędzi/modułów dostępnych w programie Flux. Moduł Circuit posiada jedynie podstawowe elementy elektryczne i nie pozwala na implementacje skomplikowanego sterowania. Budowa modelu numerycznego w programie polowym wymaga znajomości geometrii silnika, właściwości materiałów, budowy uzwojeń. Niektóre z tych danych są informacjami zastrzeżonymi, niechętnie udostępnianymi przez producentów.

4.1 Budowa modelu geometrycznego

Silnik Clyte 408 posiada 8 par biegunów, trójfazowe uzwojenia osadzone są w 48 skośnych żłobkach. Ze względu na symetrię silnika model geometryczny ograniczono do 1/16 oraz zdefiniowano odpowiednie warunki brzegowe (rys. 9).

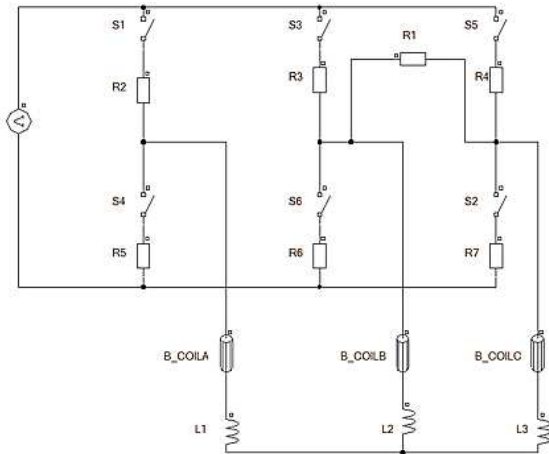


Rys. 9. Definicja fizyki oraz kierunku nawinięcia cewek dla 1/16 modelu silnika Clyte 408

4.2 Budowa modelu polowo-obwodowego.

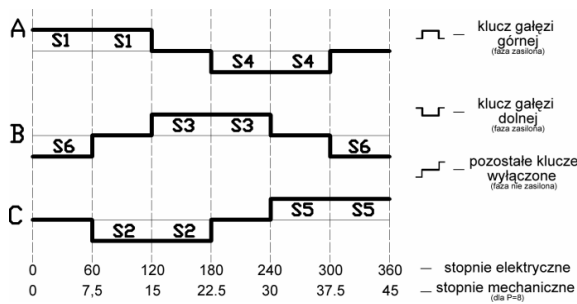
W programie Flux 2D przyporządkowuje się cewki obwodu elektrycznego (B_COILA, B_COILB, B_COILC) do odpowiadających im regionów w modelu polowym (MA, PB, MC). Do wyznaczenia charakterystyk oraz przebiegów wykorzystano trzy różne obwody.

Na rys. 10 przedstawiony jest przykładowy obwód do badania charakterystyk silnikowych. Idealne źródło napięcia V1 symuluje zasilanie. Rezystory R2-R7 modelują stałą rezystancję przejścia tranzystorów MOSFET najczęściej używanych w przekształtnikach niskiego napięcia. Indukcyjności L1-L3 modelują indukcyjność rozproszenia czoł uzwojeń.



Rys. 10. Obwód symulujący zasilanie silnika z przekształtnika energoelektronicznego

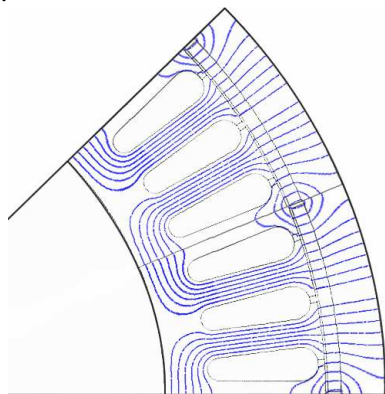
Idealne styczniki S1-S6 pełnią rolę komutatora elektronicznego i sterowane są za pomocą funkcji USER() [2] w zależności od kąta położenia (rys. 11).



Rys. 11. Schemat załączania kluczy tranzystorowych w zależności od położenia wirnika

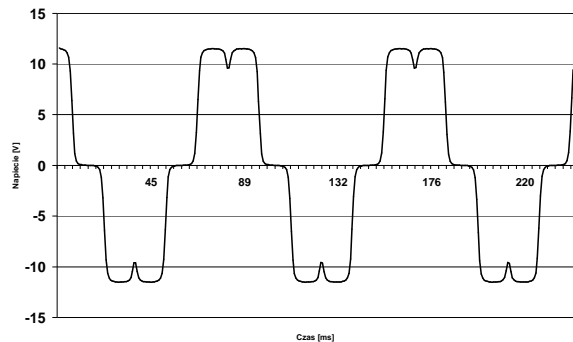
4.3 Wyniki analizy

Przeprowadzono symulację różnych stanów pracy silnika. Wyniki otrzymane z symulacji porównano z wynikami uzyskanymi podczas badań laboratoryjnych silnika Clyde 408. Wybrane wyniki symulacji przedstawiono poniżej.



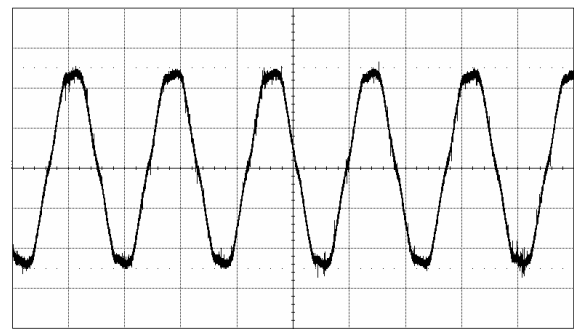
Rys. 12. Rozkład linii pola magnetycznego wzbudzonego magnesami trwałymi dla 1/8 modelu

Na podstawie rozkładu pola wzbudzenia (rys. 12) wyznaczono przebiegi napięcia indukowanego rotacji (rys. 13).



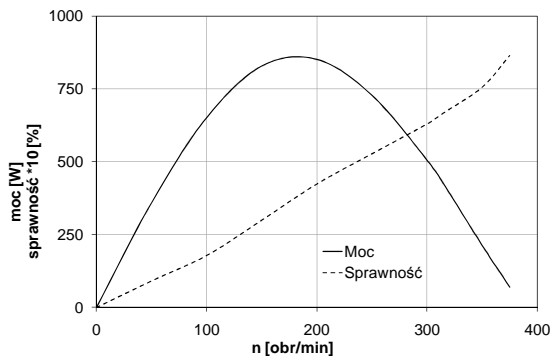
Rys. 13. Napięcie indukowane rotacji dla $n = 85,4 \text{ obr/min}$, $V_{RMS} = 8,94 \text{ V}$; $V_{MAX} = 11,51 \text{ V}$

Dla porównania przedstawiono kształt przebiegu międzyfazowego zarejestrowanego dla badanego silnika (rys. 14) [12]. Z uwagi na uproszczenia modelu polowego (2D) kształt napięć jest różny. Wartość skuteczna napięcia dla obu przebiegów jest zbliżona.

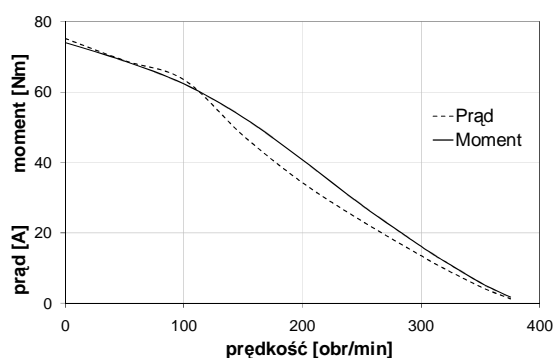


Rys. 14. Napięcie indukowane dla $n = 85,4 \text{ obr/min}$, $V_{RMS} = 8,74 \text{ V}$; $V_{MAX} = 12 \text{ V}$ [12]

Charakterystyka z rys. 15 i rys. 16 jest zbliżona do charakterystyk zmierzonych przez autorów strony [8] na rys. 7. Producent silnika nie publikuje aktualnych charakterystyk dla silnika Clyde 408 dlatego nie porównano ich z wynikami modelu.



Rys. 15. Charakterystyka silnika dla zasilania 50 V -model polowo-obwodowy



Rys. 16. Charakterystyka silnika dla zasilania 50 V -model polowo-obwodowy

4. Wnioski

Obecnie następuje upowszechnienie się układów napędowych rowerów z pomocniczym silnikiem elektrycznym bezszczotkowym lub komutatorowym. Popularność stosowania napędu elektrycznego wynika z coraz niższej ceny elementów układu (zwłaszcza akumulatorów). Dostępne w sprzedaży gotowe zestawy zintegrowanych układów napędowych ułatwiają ich samodzielny montaż w rowerze. Porównując wady i zalety silników elektrycznych stosowanych w tych układach należy zauważyć, że silniki komutatorowe są tańsze i wymagają prostszych układów zasilania i sterowania. Główną korzyść z zastosowania silników bezszczotkowych to możliwość realizacji układu bezpośredniego. Z praktyki użytkowania silników komutatorowych wynika, iż przy tak małych obciążeniach zużycie szczotek i komutatora nie stanowi obecnie dużego problemu. Biorąc pod uwagę te informacje należy rozważyć możliwość zakupu lepszych akumulatorów i tańszego silnika komutatorowego.

Badania symulacyjne polowo-obwodowe dostarczają cennych informacji potrzebnych w procesie projektowania i analizy układów napędowych rowerów elektrycznych. Niestety czas na przygotowanie modelu i czas symulacji jest bardzo długi. Dodatkowo obliczenia

utrudnia brak dokładnych parametrów materiałów oraz topologii uzwojeń – dostępnych jedynie dla producenta.

Układ napędowy będący przedmiotem badań został zrealizowany w ramach prac Naukowego Koła Studentów Elektryków przy Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej.

Literatura

- [1] Bobrowski W.: *Nowoczesne skutery elektryczne formy ELCAR*. Wiadomości elektrotechniczne, 2001, 6, s. 238-240
- [2] CEDRAT Tutorial - *Brushless DC motor*. Copyright © 2005 Magsoft Corporation.
- [3] Jastrzębska G. *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne - Jednośladowe pojazdy z napędem elektrycznym*. WNT, 2007.
- [4] Nowakowski M.: *Kariera wielocyfera*. Focus. 2004, 5, s. 80-86.
- [5] *Rower wspomagany napędem elektrycznym*: Wiadomości elektrotechniczne 2001, s 7-8, okładka.
- [6] Szumiejko H.: *Rower hybrydowy z napędem elektrycznym*. Biuletyn informacyjny Instytutu elektrotechniki. Z5. Wiadomości Elektrotechniczne 2000, 6, s. V.
- [7] www.bimoto.pl.
- [8] www.crystalyte.com
- [9] www.cyclone-usa.com
- [10] www.giant-bicycles.com
- [11] www.goldenmotor.com
- [12] www.pg.gda.pl/~jarguz/erower/erower.htm
- [13] Norma europejska EN 15194, rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r (Dz. U. z 2003 r. Nr 32, poz. 262 ze zm.).

Autorzy

mgr inż. Dominik Adamczyk, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. 58 347 19 39, dadamc@ely.pg.gda.pl.

dr inż. Michał Michna, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. 58 347 29 79, m.michna@ely.pg.gda.pl.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka