

ZASTOSOWANIE NAPĘDÓW BEZPOŚREDNICH W URZĄDZENIACH MECHATRONICZNYCH

APPLICATION OF THE DIRECT DRIVES IN MECHATRONIC DEVICES

Piotr Mars

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Robotyki i Mechatroniki
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
e-mail: mars@agh.edu.pl

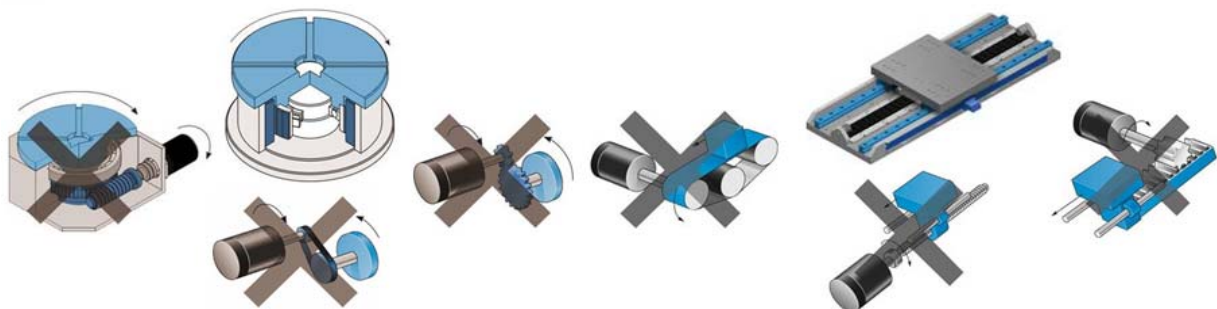
Abstract: The article provides a general introduction to the direct drive technology. It describes the basic divisions and types of the electric direct drives as well as their construction and properties. In addition, the article highlights the advantages and disadvantages of the direct drives. The paper also presents numerous applications of the direct drives including: wheeled vehicles, advanced numerically controlled machine tools, household appliances, generators, wind turbines, transportation devices, motion simulators as well as devices used in medicine and pharmacy. The summary contains development trends of the direct drive technology both in terms of the mechanical construction and the control system.

Keywords: direct drive, application of the direct drives.

Wprowadzenie

Napędy bezpośrednie (*ang. direct drive*) są to napędy, w których moc mechaniczna w postaci siły i prędkości uogólnionej przekazywana jest bezpośrednio do elementu napędzanego, bez konieczności stosowania dodatkowych układów pośredniczących takich jak: przekładnie,

sprzęgła, łańcuchy i pasy transmisyjne (rys. 1). Dzięki wyeliminowaniu przekładni mechanicznej znacznie wzrasta niezawodność, dokładność pozycjonowania, sztywność, dynamika i efektywność energetyczna napędu, co więcej napęd taki ma bardziej zwartą konstrukcję oraz charakteryzuje się cichszą pracą [1].



Rys. 1. Obrotowe i liniowe napędy bezpośrednie w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami [2].

W ujęciu ogólnym mogą to być napędy pneumatyczne, hydrauliczne, elektryczne, piezoelektryczne, jednakże najczęściej miano napędu bezpośredniego utożsamiane jest z bezszczotkowymi silnikami prądu stałego wymagającymi stosowania zewnętrznego elektronicznego układu komutatora. Dalsza część artykułu zostanie poświęcona w całości elektrycznym napędowi bezpośrednim.

Ze względu na to w jakiej postaci przekazywana jest moc mechaniczna rozróżniamy liniowe (*ang. DDL - Direct Drive Linear*) i obrotowe napędy bezpośrednie (*ang. DDR - Direct Drive Rotary*) popularnie nazywane silnikami momentowymi (*ang. torque motors*). W silnikach obrotowych moc mechaniczna przekazywana jest w postaci momentu obrotowego przeniesionego przez rotor i prędkości obrotowej rotora, natomiast w liniowych napędach moc mechaniczna przekazywana jest w postaci siły przenoszonej przez bieżnik oraz prędkości liniowej bieżnika. Obrotowe napędy bezpośrednie budowane są w oparciu o bezszczotkowe silniki prądu stałego z magnesami trwałymi, przez co posiadają wiele zalet przeważających nad innymi typami silników między innymi: niewielka wartość stałej elektrycznej objawiająca się wzrostem odpowiedzi dynamicznej silnika, wysoka sprawność dzięki zastosowaniu magnesów

trwałych oraz stosunkowo duża szczelina powietrzna między wirnikiem a stojanem (0,5-1,5 mm) ułatwiająca montaż.

Silniki momentowe charakteryzują się dużym stosunkiem wymiaru średnicy do długości osiowej silnika, przez co wyglądem przypominają pierścien (rys. 2). Taka konstrukcja zapewnia bardzo dużą sztywność skrętną wału silnika. Większa średnica ułatwia generowanie wysokich wartości momentu obrotowego. Jest to spowodowane wzrostem ramienia działania siły oraz zwiększeniem obwodu rotora, na którym można umieścić więcej magnesów.

Obrotowe napędy bezpośrednie najczęściej są projektowane jako silniki wysokomomentowe, niskoobrotowe (*ang. high-torque low-speed motor*). Wspomniana cecha jest jedną z wad tych napędów, ponieważ wraz ze wzrostem prędkości obrotowych maleje moment napędowy. Dlatego silniki momentowe są zwykle stosowane dla prędkości obrotowych nie przekraczających 1000 obr/min, co jest zwykle wystarczające dla większości aplikacji [3].

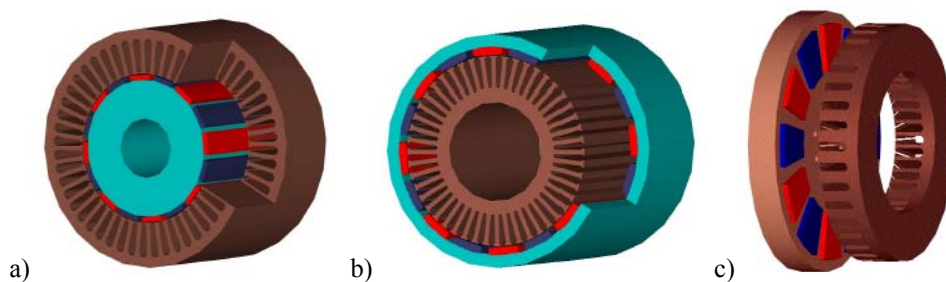
Silniki momentowe produkowane są w bardzo szerokim zakresie parametrów znamionowego szczytowego momentu napędowego (0,007-31 200 Nm), przy jednoczesnym zachowaniu niewielkich gabarytów (wymiar średnicy zewnętrznej 19,3–1290 mm) [4].



Rys. 2. Obrotowe napędy bezpośrednie firmy Etel [2].

Powstało bardzo dużo odmian konstrukcyjnych obrotowych napędów bezpośrednich. Główny podział klasyfikuje napędy ze względu na wzajemną orientację kierunku osi obrotu wirnika i kierunku strumienia magnetycznego (rys. 3). Rozróżniamy wówczas silniki o promieniowym strumieniu magnetycznym (*ang.*

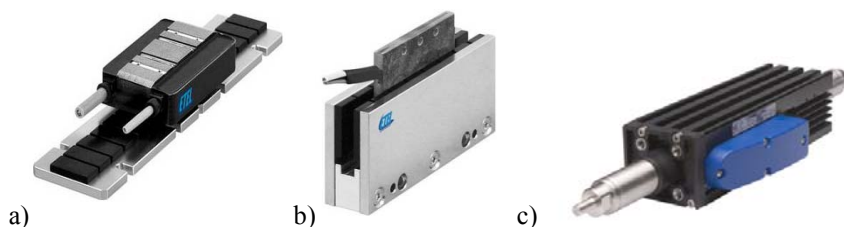
RF - Radial - Flux) oraz o osiowym strumieniu magnetycznym (*ang. AF- Axial - Flux*) zwane popularnie tarczowymi. Silniki o promieniowym strumieniu magnetycznym najczęściej występują w tradycyjnej konfiguracji z rotorem wewnętrznym (*ang. inner rotor*) lub z rotorem zewnętrznym (*ang. outer rotor*) [5].



Rys. 3. Obrotowe napędy bezpośrednie o promieniowym strumieniu magnetycznym: a) rotor wewnętrzny; b) rotor zewnętrzny; c) o osiowym strumieniu magnetycznym (tarczowe) [5].

Konstrukcja liniowych silników odzworowuje rozwinięcie na płaszczyznę obrotowego napędu bezpośredniego. Ze względu na budowę mechaniczną statora i biegnika wyróżniamy

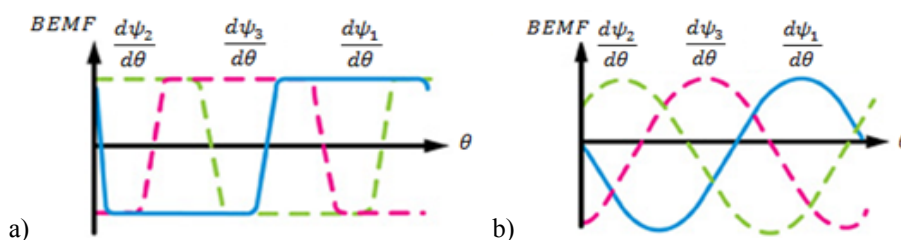
trzy rodzaje napędów liniowych (rys. 4): płaskie (*ang. flat-bed*), u-kanalowe (*ang. u-channel*) i rurowe (*ang. tubular, servotube*) [6].



Rys. 4. Liniowe napędy bezpośrednie: a) płaski; b) u-kanalowy [2]; c) rurowy [7].

Typowe wartości parametru ciągłej siły napędowej znajdują się w zakresie (50–5 kN). Charakterystyczną cechą elektrycznych liniowych napędów bezpośrednich jest możliwość precyzyjnego odwzorowania trajektorii ruchu z dużymi prędkościami (2-15 m/s) i przyspieszeniami (nawet do 100 m/s²). Dobra sterowność silników liniowych wynika z dużej sztywności napędu (brak luzów przekładniowych) oraz wysokiej częstotliwości rezonansowej, przez co możliwe jest zastosowanie dużych wartości współczynników wzmocnienia w sterowniku napędu [8].

Zarówno liniowe jak i obrotowe elektryczne napędy bezpośrednie można podzielić ze względu na kształt przebiegu indukowanej siły elektromotorycznej w uzwojeniach stojana. Wyróżniamy wówczas silniki BLDC (*ang. Brushless Direct Current Motor*) o trapezoidalnym przebiegu indukowanej siły elektromotorycznej (*ang. BEMF - Back Electromotive Force*) oraz silnik PMSM (*ang. Permanent Magnet Synchronous Motor*) o sinusoidalnym przebiegu indukowanej siły elektromotorycznej (rys. 5).

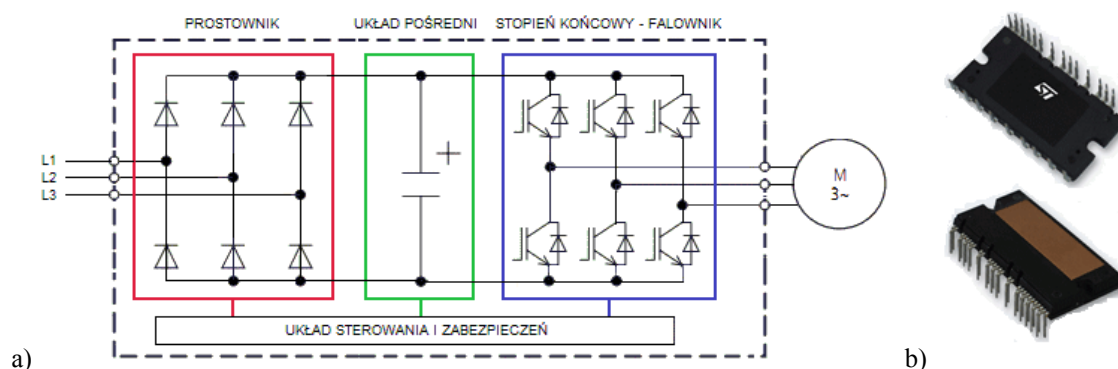


Ryc. 5. Przebiegi indukowanej siły elektromotorycznej BEMF w silnikach a) BLDC b) PMSM [9].

Niestety, napędy bezpośrednie nie są pozbawione wad. Należy pamiętać, iż o jakości napędu bezpośredniego decyduje jakość każdego z elementów systemu. Zarówno część mechaniczna, elektroniczna, jak i zastosowany algorytm sterowania muszą być wysokiej jakości. Sposób zabudowy napędu, wzajemnego usytuowania rotora względem stojana oraz dobór łożysk, wpływa na parametr dokładności pozycjonowania i sztywności napędu. Odpowiednio skonfigurowany układ chłodzenia cieczą lub innym płynem chłodzącym poprawia znacznie osiągi silnika momentowego zwiększając znamionowy moment obrotowy nawet 2- do 4-krotnie [4]. Aby w pełni wykorzystać właściwości napędu bezpośredniego niezbędny jest wysokiej jakości sterownik oraz sygnał sprzężenia zwrotnego o dużej rozdzielczości, który jest najczęściej generowany przez optyczny czujnik przemieszczenia [3]. Jedną z wad silników bezpośrednich jest układ elektronicznego komutatora, który wymaga

złożonego algorytmu sterowania oraz informacji o aktualnym położeniu rotora (biegnika), przez co wzrastają koszty sterownika.

Typowy sterownik napędu bezpośredniego zawiera w sobie falownik, w skład którego wchodzi: prostownik, układ pośredni, stopień końcowy mocy z kluczami tranzystorowymi IGBT lub MOSFET oraz układy sterowania i zabezpieczeń (rys. 6a). Stopień mocy oraz część układu zabezpieczeń i układów pomiarowych zawarte są zwykle w jednym module tzw. IPM (*ang. Intelligent Power Module*) (rys. 6b). Algorytm sterowania najczęściej zaimplementowany jest w układzie FPGA (*ang. Field Programmable Gate Array*) lub w procesorze sygnałowym (*ang. DSP - Digital Signal Processor*). W większości przypadków sterowniki są uniwersalne i mogą być stosowane zarówno do liniowych, jak i obrotowych napędów bezpośrednich.



Ryc. 6. Schemat budowy falownika (a) [10] i modułu IPM (b) [11].

Wybrane zastosowanie napędów bezpośrednich w urządzeniach mechatronicznych

Obrotowe napędy bezpośrednie dzięki swoim cechom takim jak: duża gęstość momentu napędowego i mocy, kompaktowa budowa, niezawodność oraz efektywność energetyczna sprawiają, że doskonale nadają się na tzw. napędy w kołach (*ang. in-wheel drive*), które są stosowane w elektrycznych pojazdach samochodowych, skuterach, motorach, rowerach, hulajnogach, segway-ach.

Firma Protean Electric produkuje na szeroką skalę napędy bezpośrednie dostosowane do

standardowych felg, dzięki czemu możliwe jest przerobienie samochodu spalinowego na hybrydowy lub elektryczny. Co więcej napęd ten posiada zintegrowane moduły falownika, dzięki czemu zmniejszono liczbę połączeń elektrycznych oraz zwiększono przestrzeń użyteczną pojazdu. Silnik osiąga duże wartości szczytowej mocy (75 kW) i momentu napędowego (1000 Nm), przy stosunkowo niewielkich wymiarach średnicy (420 mm) i długości osiowej (115 mm) oraz masie 34 kg (rys. 7a).

Kolejnym przykładem imponujących osiągnięć silników bezpośrednich w pojazdach kołowych jest elektryczny skuter 120S produkowany

przez firmę e-max, który jest napędzany silnikiem o wartości szczytowej mocy 4 kW. Silnik ten umożliwia poruszanie się skutera z pasażerem o łącznej masie 190 kg z maksymalną prędkością 70 km/h (rys.7b). Zastosowanie napędów bezpośrednich w kole samochodu upraszcza znacznie konstrukcję zawieszania (eliminacja przekładni i wałów napędowych). Możliwość sterowania momen-

tem napędowym w każdym kole z osobna (*ang. torque vectoring*) zapewnia płynniejszą, bardziej precyzyjną jazdę. Ułatwiona jest znacznie realizacja systemu ABS i systemów kontroli trakcji takich jak ESP, ponadto umożliwiające jest efektywne odzyskiwanie mocy dzięki tzw. hamowaniu regeneracyjnemu. Wadą tego rozwiązanie jest wzrost masy nieresorowanej pojazdu [12].



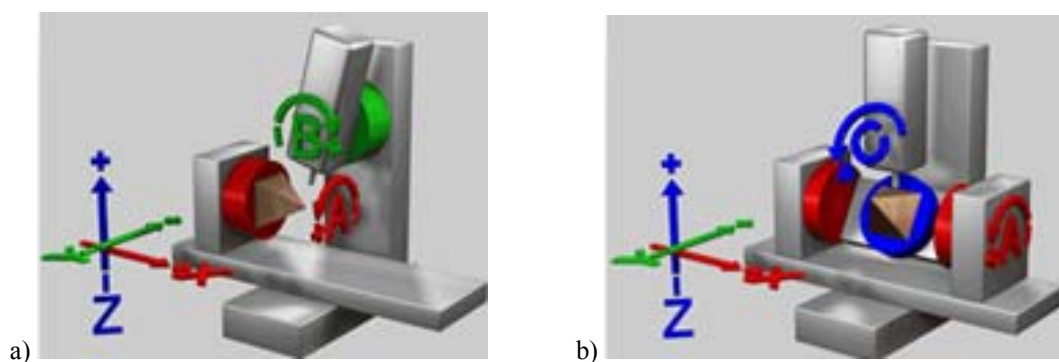
Rys. 7. Napęd w kole samochodu osobowego (a) [13] i skuter e-max 120S (b) [14].

Coraz częściej napędy bezpośrednie spotykane są w konstrukcjach nowoczesnych obrabiarek sterowanych numerycznie i centrów obróbczych (rys. 8). Silniki bezpośrednie wykorzystywane są jako precyzyjne napędy osi obrotowych A, B, C, czyli osi pochylenia i obrotu stołu oraz osi obrotu głowicy narzędziowej [15].

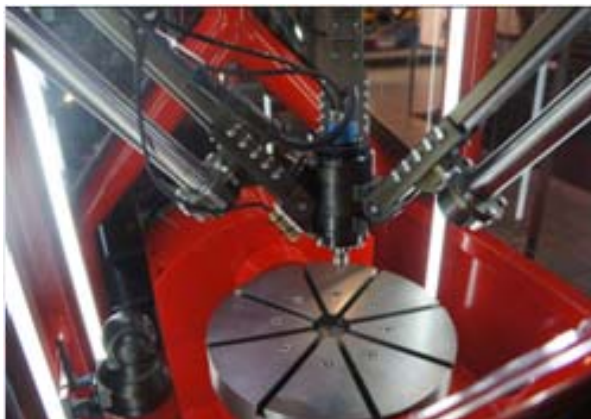
Firma Nikken oferuje w swoim asortymencie obrotowe stoły dla obrabiarek CNC [16],

natomiast firma CyTec oprócz oborowych stołów reklamuje w sprzedaży napędy do obrotu głowic narzędziowych [17].

Interesującym rozwiązaniem jest zastosowanie liniowych silników bezpośrednich do napędzania ramion w obrabiarence hybrydowej zaprojektowanej przez naukowców z Akademii Górniczo-Hutniczej (rys. 9).



Rys. 8. Napędy osi obrotowych [18]: a) osie obrotowe A i B; b) osie obrotowe A i C.



Rys. 9. Frezarka hybrydowa [19].

Ponad 20 lat temu w firmie Fischer&Paykel wyprodukowano pierwszą pralkę z inteligentnym sterownikiem oraz silnikiem elektrycznym bezpośrednio napędzającym bęben pralki. W wyniku tego powstał produkt o

znacznie cichszej pracy, mniejszych wibracjach i gabarytach, bardziej efektywny energetycznie oraz umożliwiający łatwą realizację złożonych cykli prania i wirowania z precyzyjną kontrolą prędkości (rys. 10).



Rys. 10. Pralka z system direct [20].

Obracanie wirnikiem napędu bezpośredniego spowoduje wyindukowanie się siły elektromotorycznej w uzwojeniach stojana. Jeśli obwód jest zamknięty, to w uzwojeniach stojana popłynie prąd elektryczny, dlatego silniki bezpośrednio często pełnią funkcję generatorów, prądnic, alternatorów. Zastosowanie techniki napędu bezpośredniego (niskoobrotowego generatora z magnesami trwałymi) w

turbinach wiatrowych eliminuje konieczność stosowania przekładni, co znacznie upraszcza strukturę całego układu. Powstaje system o znacznie mniejszej wadze i większej niezawodności oraz mniejszych kosztach utrzymania. Przykładowo 3-megawatowa turbina z napędem bezpośrednim jest lżejsza o 12 ton niż turbina o mocy 2,3 MW z przekładnią (rys. 11).



Rys. 11. Turbina wiatrowa [21].

Napędy bezpośrednie mają liczne zastosowania w urządzeniach transportowych. Szczególnie mocno wpłynęły na producentów systemów wind osobowych i towarowych. Kompaktywny zespół napędowy zamontowany bezpośrednio z kołem linowym (rys. 12) znacznie zmniejszył gabaryty całego układu oraz umożliwił elimi-

nacje niezbędnego wcześniej pomieszczenia technicznego, jakim była maszynownia [22]. Firma Aerotech stosuje napędy bezpośrednie w budowie symulatorów ruchów do pomiarów przemieszczeń, gdzie wymagane jest dokładne sterowanie pozycją, prędkością i siłą (rys. 13).



Rys. 12. Napęd bezpośredni windy [8].



Rys. 13. Symulator ruchu [23].

Dzięki swojej niezawodności, długowieczności oraz dokładności pozycjonowania silniki bezpośrednie rozpowszechniły się w urządzeniach stosowanych w medycynie i farmacji. Spotykane są w wieloosiowych systemach pozycjonujących oraz w urządzeniach do analiz substancji np. dyfraktometrze rentgenowskim [24].

Różnego rodzaju pompy medyczne oraz kompresory zasilające urządzenia medyczne wykorzystują silniki momentowe. Napędy

bezpośrednie mocno wpłynęły na konstrukcję robotów medycznych oraz usprawniły budowę urządzeń aparatury medycznej (rys. 14) takich jak: analizatory medyczne - złożone urządzenia służące do analizy płynów ustrojowych człowieka, krwi, moczu, limfy. Ze względu na wymóg cichej pracy i precyzyjnej kontroli ciśnienia wydmuchiwanego powietrza silniki bezpośrednie stosowane są do obracania wiatraków w respiratorach (PAP) dla osób z dolegliwością bezdechu sennego [25].



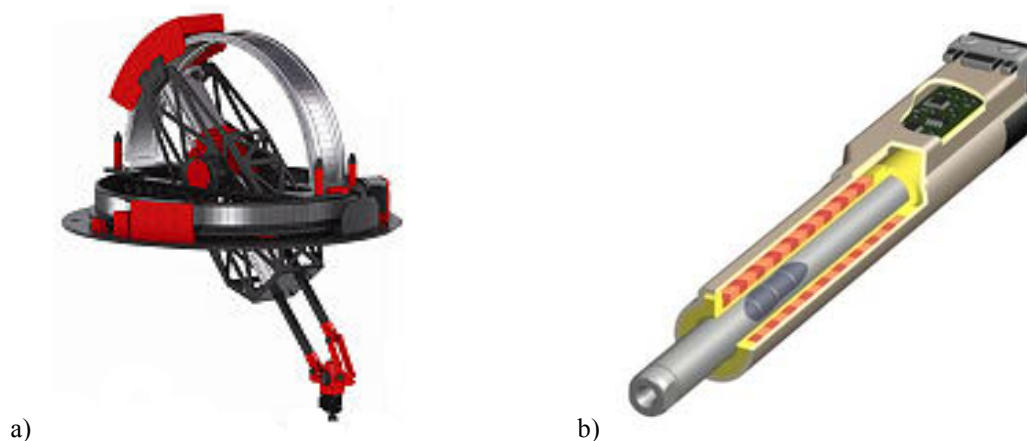
Rys. 14. Wybrana aparatura medyczna: a) dyfraktometr rentgenowski [26]; b) precyzyjne urządzenie pozycjonujące [24]; c) perystaltyczna pompa medyczna [27].

Podsumowanie

Technika napędów bezpośrednich jest dynamicznie rozwijana, aby zaspokoić wymagania nowoczesnych urządzeń mechatronicznych. Narzucona przez nowoczesne standardy i aspekty ekonomiczne tendencja do projektowania niezawodnych, energooszczędnych, przyjaznych dla środowiska oraz charakteryzujących się cichą pracą urządzeń mechatronicznych, może mocno wpłynąć na jeszcze bardziej dynamiczny rozwój napędów

bezpośrednich oraz wzrost liczby modernizowanych urządzeń wykorzystujących przestarzałe, nieefektywne energetycznie klasyczne rozwiązania [15].

Prowadzone są liczne badania nad rozwijaniem bezczujnikowych metod sterowania napędami bezpośrednimi, w których zamiast czujników wykorzystywany jest matematyczny obserwator położenia wirnika. Innym trendem w technice napędów bezpośrednich jest projektowanie sterownika dedykowanego do konkretnego napędu pod kątem określonej aplikacji.



Rys. 15. Robot sferyczny Galileo z łukowo zakrzywionymi liniowymi napędami bezpośrednimi (a) [28]; integracja sterownika we wnętrzu napędu (b) [29].

Coraz częściej spotykane są specjalne konstrukcje napędów, projektowane do danego zastosowania, jak np. liniowe napędy wygięte w łuk w konstrukcji robota sferycznego przedstawionego na rys. 15a. Zauważalna jest

również silna tendencja do integracji części elektronicznej i mechanicznej polegająca na umieszczeniu sterownika i stopnia mocy razem w obudowie silnika (rys. 15b).

Literatura

1. Suzuki, M., Drive Technology Trends, *Machinery & Equipment MRO*, 2010, June.
2. <http://www.etel.ch> (dostęp 10.01.2015).
3. Holzknicht, A., Torque motors do the trick, *Machine Design*, 2003, April.
4. Jones, D., Mubeen, M., Technologie silników bezpośrednich w układach napędowych, *Control Engineering*, 2013, Listopad.
5. Parviainen, A., Design of axial-flux permanent magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines. University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2005.
6. Karbowniczek, M., Pochwalski, K., W świecie silników liniowych. *Automatyka, podzespoły, aplikacje*, 2008, Marzec.
7. <http://www.dunkermotoren.com> (dostęp 6.01.2015).
8. Kiel, E., Drive Solutions Mechatronics for Productions and Logistics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
9. Torres, D., Comparing motor-control techniques, *ECNmag*, 2009, August.
10. 1109/ICEMS.2011.6073289.
11. <http://www.embeddedstar.com/weblog/2010/04/08/appliance-control/> (dostęp 6.01.2015).
12. Stachowski, R., Bochiński, M., Ziętek, Ł., Bielak, Ł., Filipek, P., Wielofazowy silnik bezszczotkowy do pojazdów elektrycznych, *Postępy Nauki i Techniki*, 2011, nr 7.
13. <http://www.proteanelectric.com> (dostęp 6.01.2015).
14. <http://www.greenelectricbikes.co.uk/E-Max-electric-scooter.htm> (dostęp 6.01.2015).
15. Suzuki, M., Direct drive technology and its impact on gearmotor business, *Power Transmission Engineering*, 2009, December.
16. <http://www.nikken-world.com/en/products/index> (dostęp 7.01.2015).
17. http://www.cytectechnologies.de/cytectechnologies/english/produkte/cytorque/torquemotor_main.htm (dostęp 7.01.2015).
18. <http://www.cnc-toolkit.com/support.html> (dostęp 7.01.2015).
19. http://www.4metal.pl/?a=4&uniqid=65c271c5b7a0b9eca265f9ead60fc394&artykul_id=22548 (dostęp 7.01.2015).
20. <http://www.fp.fisherpaykel.com> (dostęp 7.01.2015).
21. Jaroszewski, K., Bezpośredni napęd turbin wiatrowych, *Control Engineering*, 2011, Grudzień.
22. Jahns, T.M., The expanding Role of PM Machines in Direct-Drive Applications, *IEEE*, 2011,
23. <http://www.aerotech.com> (dostęp 7.01.2015).
24. http://www.ina.de/content.ina.de/en/branches/industry/medical_technology/med_tech_applications/idam_direct_drives/idam.jsp (dostęp 6.01.2015).
25. Bloom, M., Brushless DC Motors in Medical Applications, *Sinotech*, 2013, January.
26. http://www.tnx-rx.com/productDetails.php?product_id=1 (dostęp 6.01.2015).
27. <http://etmpower.com/industry-applications/pumps/> (dostęp 10.01.2015).
28. Shelley, T., Robot uses curved linear motors, *Eureka*, 2009, November.
10. <http://www.falowniki.edu.pl/nauka,1,5,1,budowa-falownika-informacje-ogolne.html> (dostęp 7.01.2015).
29. <http://www.linmot.com> (dostęp 7.01.2015).