

OGRANICZENIA TECHNOLOGICZNE CHIRURGII ROBOTOWEJ NA PRZYKŁADZIE ROBOTA ROCH-1

TECHNOLOGICAL LIMITATIONS OF SURGICAL ROBOTICS ON THE EXAMPLE OF A ROBOT ROCH-1

Lucyna Leniowska^{1*}, Ryszard Leniowski²

¹ Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy,
Katedra Mechatroniki i Automatyki, 35-310 Rzeszów, ul. Pigoń 1

¹ Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki,
Katedra Informatyki i Automatyki, 35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 12

*e-mail: lleniow@ur.edu.pl

STRESZCZENIE

ROCH-1 to manipulator przeznaczony do wspomagania chirurgii małoinwazyjnej. Prototyp zbudowany jest z 6 modułów, o zróżnicowanych długościach i o średnicach ok. 10 mm, połączonych przegubami. Poszczególne człony wyposażone są w mechaniczny interfejs, zapewniający modułowość konstrukcji oraz posiadają własny napęd. Artykuł prezentuje istotne ograniczenia technologiczne, konstrukcyjne i w zakresie sterowania, jakie występują obecnie w obszarze chirurgii robotowej. Jest to zbiór wniosków, jakie zebrał zespół konstruktorów robota ROCH-1 w ciągu 3 lat pracy. Jak się wydaje, przynajmniej połowa z wymienionych ograniczeń będzie wymagała rozwiązania w ciągu najbliższych kilku lat. Dodatkowym problemem dla konstruktorów może być także stałe dążenie do minimalizacji średnicy manipulatora (docelowo ok. 6–7 mm), ponieważ rany pooperacyjne powinny być jak najmniejsze. Miniaturyzacja stwarza poważne ograniczenia, których rozwiązanie może być bardzo kosztowne i w konsekwencji spowolni rozwój chirurgii robotowej.

Słowa kluczowe: chirurgia robotowa, manipulator chirurgiczny, ograniczenia robotów chirurgicznych, modułowa konstrukcja

ABSTRACT

ROCH-1 is a manipulator designed to assist in minimally invasive surgery. The prototype is composed of six modules of varying lengths and diameters approx. 10 mm, connected by joints. The individual units have a mechanical interface providing the modular design and have their own drive. The article presents significant technological limitations in terms of technology, control and construction, which currently exist in the field of surgical robotics. It is a collection of conclusions, which were assembled by a team of ROCH-1 designers within three years of their work. It seems that at least half of these limitations will need to be resolved within the next few years. An additional problem for the constructors may also be continuous efforts to minimize the diameter of the manipulator (target: approx. 6–7 mm), because the surgical wounds should be as small as possible. Miniaturization creates serious limitations, the solution of which can be very expensive and consequently slow down the development of surgical robotics.

Keywords: robotic surgery, surgical manipulator, limitations of surgical robots, modular design

1. Wstęp

Układ manipulacyjny współczesnego robota chirurgicznego składa się z dwóch zasadniczych części: ramion naprowadzających oraz ramion wnikających do wnętrza ciała pacjenta. Część naprowadzająca ma wygląd i sposób działania zbliżony do nowoczesnych robotów przemysłowych o niskim udźwigu, natomiast część wnikająca to rodzaj lancy, na końcu której znajdują narzędzia chirurgiczne (np. skalpel, klips, igła, itp.) lub kamera ze źródłem światła.

Ramiona naprowadzające mają zazwyczaj wymiary zbliżone do ludzkiej ręki, co oznacza, że ich konstruowanie jest nieporównywalnie mniej skomplikowane od miniaturowych ramion wnikających do ciała pacjenta przez trokar, które z założenia muszą mieć średnicę co najwyżej 11 mm (starszy standard) lub 7 mm (nowy standard). Wyraźne dążenia do minimalizacji ran i urazów pooperacyjnych pacjenta powodują, że w niedalekiej przyszłości planuje się dalsze zmniejszanie wymiarów narzędzi operujących, nawet do 5 mm. Tak surowe wymagania co do wymiarów średnicy powodują, że nie jest możliwe przeniesienie znanych metod projektowania robotów poprzez mechanizm skalowania detali. W tej sytuacji najczęściej proponowane są oryginalne rozwiązania wykorzystujące nowatorskie pomysły.

2. Charakterystyka konstrukcji robota ROCH-1

Założono, że projektowany robot chirurgiczny będzie miał konstrukcję dwuczłonową typu *master-slave*, a mianowicie:

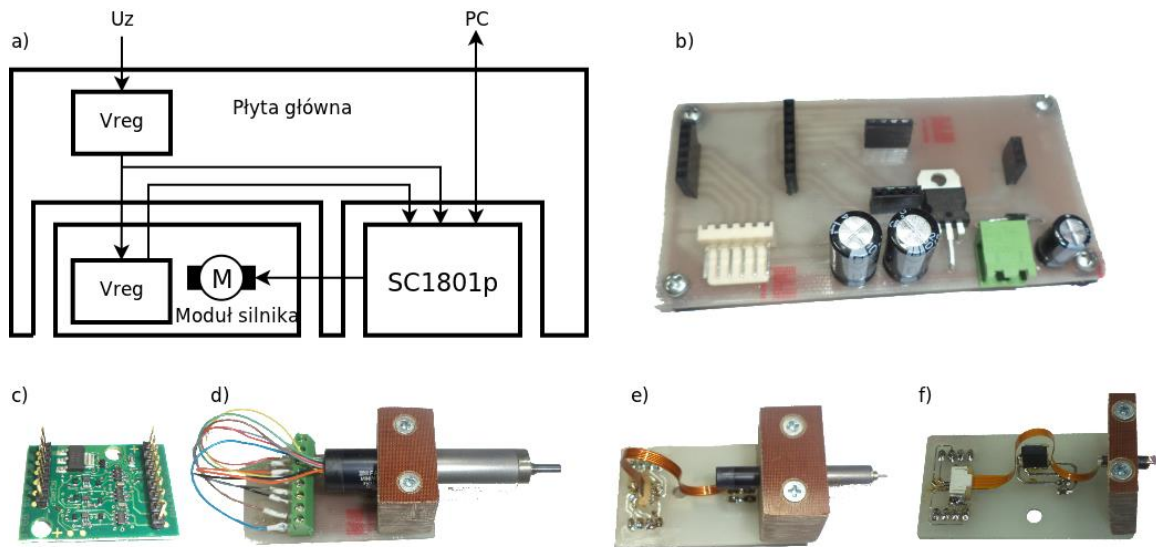
- robot naprowadzający (w tym charakterze robot przemysłowy, np. KUKA-LBR IIWA lub Motoman SDA-10 z podwójnym układem ramion o 2×7 stopniach swobody)
- manipulator penetrujący, który wnika do wnętrza ciała pacjenta, czyli zaprojektowany ROCH-1 (master) [1, 2].

Zaprojektowany robot ROCH-1 jest układem o 6 stopniach swobody, zbudowanym z trzech członów połączonych przegubami uniwersalnymi oraz jednym członem (2DOF) o unikalnej konstrukcji, pokazanej na rysunku 1. W ten sposób robot ROCH-1 umożliwia skuteczne przemieszczanie się po zaplanowanej trajektorii do pola operacyjnego.



Rys. 1. Robot ROCH-1

Napęd robota stanowią 4 silniki BLDC firmy Faulhaber oraz para silników Piezo-Linear-LEGS firmy PiezoMotors wraz z sensorami ruchu, pokazane na rysunku 2 [3]. Silniki są sterowane regulatorami cyfrowymi z procesorami ARM Cortex-M3 tworząc zespoły serwomechanizmów [4, 5].

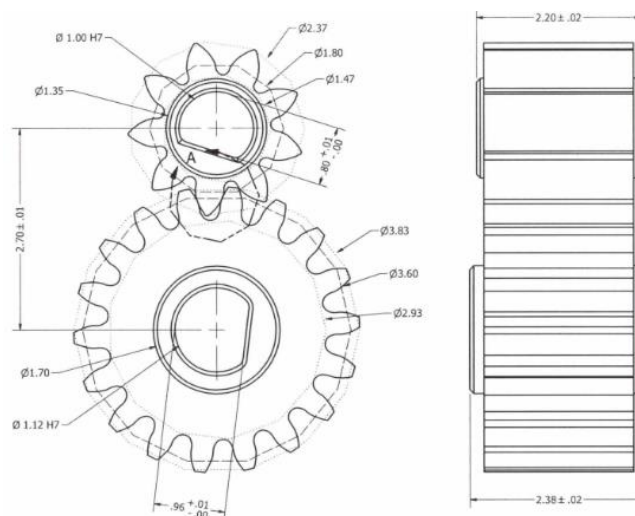


Rys. 2. Silniki napędowe robota – stanowiska mikro-hamowni

Synchronizację ruchów robota zapewnia kontroler nadrzędny (przystosowany komputer PC) sterujący lokalnymi serwomechanizmami. Komunikacja sprzętowa realizowana jest poprzez porty USB [6].

3. Ograniczenia technologii materiałowej

W proponowanej konstrukcji robota ROCH-1 wykorzystuje się szereg miniaturowych przekładni zębatych przenoszących napęd z mikrosilników elektrycznych na osie ramion robota. Ich projektowanie było konsultowane z doświadczonym zespołem technologów przemysłu lotniczego, firmy WSK - Pratt & Whitney. Zaprojektowane przekładnie oraz ich realizacje pokazują rysunki 3 oraz 4.

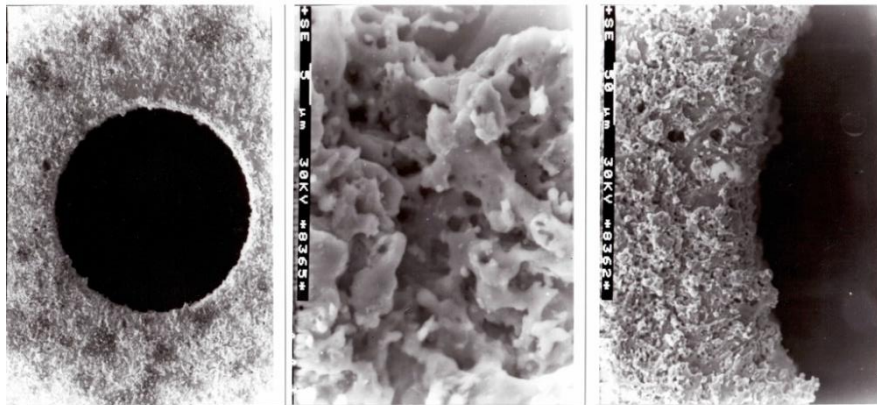


Rys. 3. Przekładnia walcowa, projekt

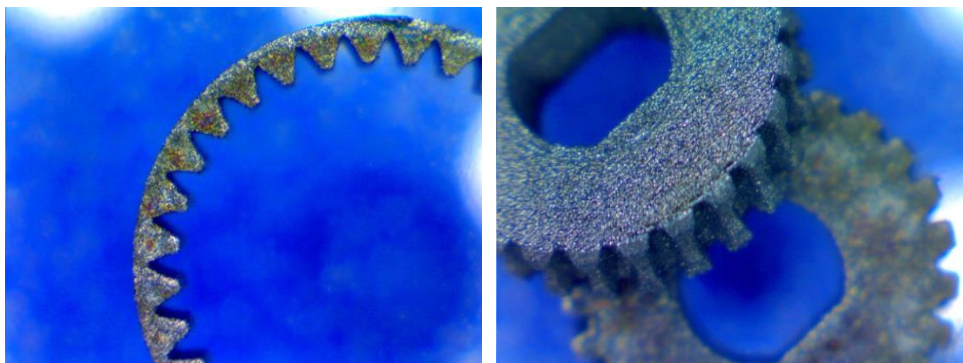


Rys. 4. Przekładnia walcowa, koła zębate

Wymiary przekładni podano na rysunku 3. Średnica małego koła zębatego wynosi 2,3 mm zaś koła dużego 3,8 mm. Średnica wewnętrzna otworu ze ścięciem to około 1 mm. Wymiary te uświadamiają jak niewielkie są to komponenty. Proces technologiczny wykonania przekładni był niezwykle skomplikowany i wymagał zaprojektowania kilku ich wersji i testowania różnych technologii materiałowych. Okazało się jednak, że nawet zastosowanie najlepszych gatunkowo stali narzędziowych nie gwarantuje osiągnięcia zadowalających parametrów powierzchni pod względem ścieralności. Próbowano wykorzystać technologię selektywnego spiekania laserowego SLS (ang. *Selective Laser Sintering*), stosując proszki tytanu. Niestety, otrzymany wynik nie był zadowalający. Otrzymywana struktura materiału była niejednorodna i krucha (rysunek 5 i 6). Koło zębate wytrzymało tylko kilka godzin pracy.



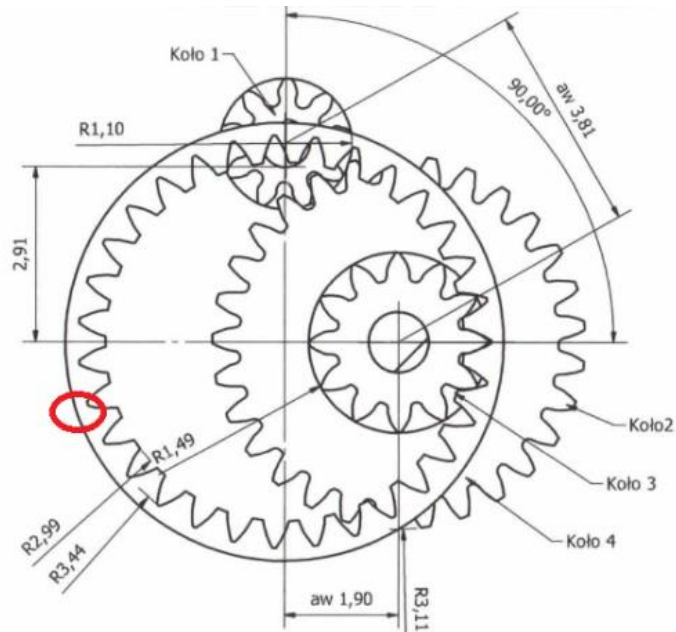
Rys. 5. Struktura materiału wokół otworu koła zębatego w 3 powiększeniach – technologia SLS



Rys. 6. Detale wykonane w technologii SLS.

Nie rozwiązano problemu technologicznego pęknięcia koła zębatego przekładni walcowej dwustopniowej, z jednym stopniem w postaci przekładni wewnętrznej, pokazanej na rysunku 7. Z uwagi na mały moduł zębniaka, równy 0,2 mm oraz specyficzny kształt zęba o podstawie 0,06 mm, nie udało się

dopracować technologii jego wykonania. Opracowano 4 wirtualne prototypy takiej przekładni optymalizując parametry. Założono, że przy ustalonych odległościach osi, celem jest uzyskanie jak największego modułu i zwiększenie zarówno długości podstawy zęba jak i jego grubości. Wykonywano próby z zastosowaniem technologii wypalania drutowego, z drutem 0,1 mm (po wprowadzeniu zmian zarysu uzębienia) oraz próbę z technologią elektrodrążenia z wprowadzeniem korekty zarysu zęba oraz z uwzględnieniem przestrzeni na rozpalenie elektrody.



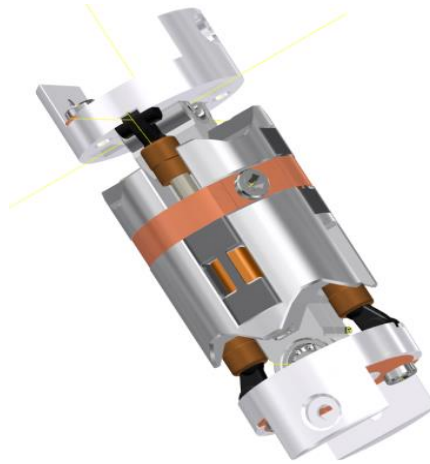
Rys.7. Przekładnia walcowa dwustopniowa z zaznaczonym miejscem pęknięć.

Podjęto także próbę zamówienia problematycznych detali w niemieckiej firmie EOS GmbH – Betriebsstatte Chemnitz, ale wynik z zastosowaniem materiału metalicznego o najmniejszej z możliwych granulacji był również niezadowalający, co pokazuje rysunek 8 [7].



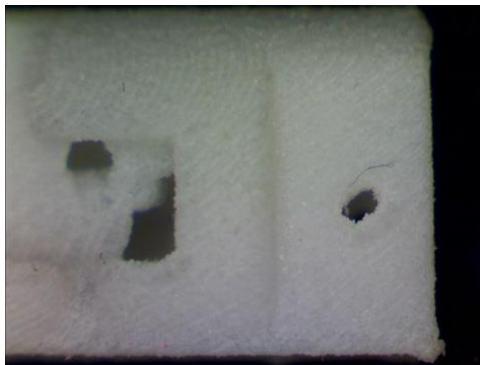
Rys. 8. Zbiór 5 detali robota wytworzonych przez firmę EOS GmbH GmbH – Betriebsstatte Chemnitz, Niemcy

Trzeci poważny problem wystąpił przy konstruowaniu nadgarstka robota chirurgicznego, pokazanego na rysunku 9.



Rys. 9. Wirtualny model nadgarstka o 2 stopniach swobody

Próby wykonania członu metodami klasycznymi nie powiodły się. Detal ten został przeprojektowany kilka razy, tak aby możliwe było jego wykonanie metodą laserowego spiekania tlenków tytanu. Obudowa nadgarstka stanowi samonośną, cienkościenną powłokę o skomplikowanym kształcie, którą wypełniają 4 siłowniki piezoelektryczne, 2 sterowniki ruchu dla tych siłowników o wymiarze 2×2 mm, czujniki położenia oraz okablowanie. Jednak wyniki uzyskiwane technologią spiekania laserowego SLS były dalekie od założeń, co pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Cienkościenny korpus, jedna z realizacji technologią SLS

Okazało się, że obecnie na obszarze Polski nie istnieje firma dysponująca technologią wykonania skomplikowanych, miniaturowych części tego członu.

Należy ponadto dodać, że zaprojektowana miniaturowa konstrukcja robota chirurgicznego wymagała opracowania specjalistycznych narzędzi, które zastosowano do wykonania podzespołów. Chodzi tu np. o drążenie skomplikowanych kanałów za pomocą diamentowych mikrofrezów w tytanowych elementach korpusów poszczególnych modułów. Konieczne było również „ręczne” zaprojektowanie przekładni ślimakowych o 3 mm średnicy, ponieważ żadne dedykowane do tego celu oprogramowanie będące w posiadaniu firm „Doliny Lotniczej” (między innymi WSK – Pratt & Whitney) nie posiadało takich możliwości.

4. Niepewne perspektywy technologii *metallic glass*

Wymienione problemy technologii materiałowej starano się pokonać poszukując najnowszych metod gwarantujących wydłużenie pracy urządzenia. Wydawało się, że znaleziono taką technologię, która potencjalnie nadaje się do wytworzenia miniaturowych detali robota ROCH-1. Według informacji naukowych jest to technologia *metallic glass* opracowana w jednym z ośrodków badawczych Tohoku University (Japonia). Główna idea metody polega na wytworzeniu metalu o strukturze szkła poprzez ultraszybkie (rzędu mikrosekund) schłodzenie do stanu stałego bez fazy krystalizacji. Detale, np.

miniaturowe przekładnie, wytwarzane przy zastosowaniu tej technologii powinny cechować się 1000-krotnie większą odpornością na ścieranie od przekładni wykonanych ze stali narzędziowych. Rozpoczęto rozmowy mające na celu wytworzenie newralgicznych podzespołów robota chirurgicznego w opisywanej technologii. Niestety okazało się, że technologia *metallic glass* jest we wstępnej fazie badań i jeszcze nie osiągnięto technologicznie założonych własności, nie może więc być w najbliższej przyszłości zastosowana w praktyce inżynierskiej.

5. Problemy z układem napędowym i układem sterowania

W konstrukcji robota zastosowano miniaturowe, obecnie najmniejsze na świecie, wytwarzane seryjnie silniki elektryczne, oferowane przez jedynego producenta, firmę Faulhaber z Niemiec. Są to wysokoobrotowe silniki typu BLDC (ang. *BrushLess Direct-Current motor*), pracujące z prędkością dochodzącą do 100 000 obrotów/min. Napędzają one przeguby robota poprzez trójstopniowe przekładnie planetarne o przełożeniu rzędu 1/1000, które wnoszą do układu złożone zakłócenia momentu spowodowane tarciami (rozpraszane jest ponad 45% dostarczanej energii) [8]. Z uwagi na miniaturowe wymiary, najmniejsze z tych silników nie posiadają zamontowanych sensorów ruchu. W związku z tym odtwarzano stan silnika na podstawie jego modelu matematycznego oraz pomiarów prądów fazowych i napięcia zasilania [9]. Dla dużych i średnich prędkości sprawdza się w takim przypadku filtr Kalmana w wersji EKF. Dla bardzo niskich prędkości praktycznie nie udaje się jej oszacować tą metodą. Pewne szanse dają metody oparte na ilorazowych formach zapisu modeli obiektu [10]. Metody te będą testowane w dalszych badaniach. Należy przy tym zauważyć, że do sterowania tak małych napędów potrzeba zastosować sterowniki ruchu wyposażone w bardzo wydajne procesory zawierające sprzętowe wsparcie dla np. generatorów PWM i filtrów pomiarowych. W pracach stosowano własne rozwiązania bazujące na podzespołach firmy Texas Instruments (kontrolery z serii Hercules - DSP+ARM, 200 MHz).

Widoczny na rysunku 9 nadgarstek robota ROCH-1 jest napędzany dwoma liniowymi, miniaturowymi siłownikami typu SQL-RV-1.8 firmy Newscale Technologies (USA). Cechą tych napędów jest to, że wysunięcie trzpienia połączone jest z jego ruchem obrotowym. W przypadku konstrukcji nadgarstka ruch ten musi być kasowany. Służą do tego miniaturowe panewki współpracujące z popychaczami, tworząc kuliste mikroprzeguby. Niestety ograniczenia technologiczne spowodowały poważne trudności w ich wytworzeniu.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono ograniczenia technologiczne, konstrukcyjne i problemy sterowania miniaturowym napędem robota chirurgicznego ROCH-1. Napęd obejmuje silniki BLDC zintegrowane z wielostopniowymi przekładniami planetarnymi. Układ ten, z powodu występowania tarcia i deformacji sprężystych części składowych oraz z powodu ogólnie niskiej sprawności, jest obiektem trudnym do sterowania.

Inną trudnością, którą należy pokonać, jest zaprojektowanie i wykonanie konstrukcji mechanicznej urządzenia. Obudowy członów to samonośne, cienkościenne powłoki o skomplikowanym kształcie, które wypełniają różne elementy. Dostępne technologie, takie jak wydruk SLS (ang. *Selective Laser Sintering*), czy PolyJet (ang. *Polymer Jetting*), nie zapewniają jednak należytej dokładności wykonania wspomnianych podzespołów. Krawędzie nie posiadają linii ostrej, a otwory mają zmienioną średnicę, co wyklucza zastosowanie tej technologii do wykonania prototypu. W konstrukcji robota ROCH-1 wykorzystuje się szereg miniaturowych przekładni zębatych przenoszących napęd z mikrosilników elektrycznych na osie ramion. Niestandardowe podzespoły zastosowane w przegubach (przekładnie ślimakowe i walcowe) wymagają bardzo wysokich umiejętności projektowania i precyzyjnej realizacji. Niepowodzenia w zakresie tradycyjnych technologii spowodowały lukę technologiczną w możliwościach wytworzenia opisywanych detali, charakteryzujących się bardzo wysokim stopniem miniaturyzacji, ale rozwój technologii SLS i prace nad technologią *metallic glass* pozwalają przypuszczać, że opatentowana konstrukcja ROCH-1 [2] zostanie z powodzeniem zbudowana w niedalekiej przyszłości.

LITERATURA

- [1] R. Leniowski, R. Pajda, L. Leniowska, J. Cieřlik: *Projekt wielozłonowego manipulatora chirurgicznego nowej generacji*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika, z.175, t. 1, 2010, s. 63–78.
- [2] Patent P-391263 „Manipulator chirurgiczny”, Autorzy: R. Leniowski, L. Leniowska, J. Cieřlik, R. Pajda, udzielony przez PUP 2014 r.
- [3] Faulhaber, Brushless DC- Motors, catalogue EN_0308B, 2010.
- [4] Texas Instruments. Digital Motor Control Software Library, catalogue SPRU485A, 2003.
- [5] Luminary Micro, Stellaris BLDC Motor Control Reference Design Kit with Ethernet and CAN, katalog RDK-BLDC-UM-04, 2010.
- [6] R. Leniowski, L. Leniowska, R. Pajda: *Sterownik osi robota chirurgicznego nowej generacji dla silników o bardzo wysokich prędkościach obrotowych* [w:] L.Trybus, S.Samolej (red.): *Projektowanie, analiza i implementacja systemów czasu rzeczywistego*, WKŁ 2011, s.423–434
- [7] A Peek into the EOS Lab: Micro Laser Sintering. EOS GmbH – Betriebsstatte, <https://www.eos.info>
- [8] R. Leniowski, L. Leniowska: *Active Mathematical model of a multi-link surgical manipulator joint with an antiseptic coating*, JAMRIS - Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, vol. 5(3), 2011, s. 21–26.
- [9] M. Malinowski: *Sensorless Control Strategies for Three - Phase PWM Rectifiers*, Politechnika Warszawska, 2001.
- [10] N. Celanovic: *Space Vector Modulation and Control of Multilevel Converters*, Virginia Polytechnic Institute, 2000.

otrzymano / submitted: 24.11.2016

zaakceptowano / accepted: 28.11.2016