

doi:10.15199/48.2024.12.20

Identyfikacja i kompensacja błędów pomiaru pozycji przegubowej w modułach napędowych ARIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki wyznaczania oraz sposób określania przyczyn powstawania błędów pomiaru położenia kątownego w przegubach robotycznych ARIA. Oszacowano składowe tego błędów wynikające zarówno z budowy i montażu enkodera absolutnego jak również specyfiki budowy mechanicznej modułu napędowego przegubu. Dokonano analizy możliwości kompensacji niedokładności czujnika w celu minimalizacji błędów pomiaru do wartości wymaganej dla celów zastosowania modułu w manipulatorze wspomagającym badania biopsyjne.

Abstract. The article presents the results of determining and identifying the causes of angular position measurement error in ARIA robotic joints. The components of this error stemming from both the construction and assembly of the absolute encoder itself as well as the specific mechanical construction of the joint drive module were estimated. An analysis was made of sensor error compensation possibilities to minimize the measurement error to the level required for applying the module in a biopsy guiding arm. (**Identification and compensation of joint position measurement errors in ARIA drive modules**).

Słowa kluczowe: moduł napędowy, enkoder absolutny, błąd pomiaru kąta obrotu, kompensacja błędów.

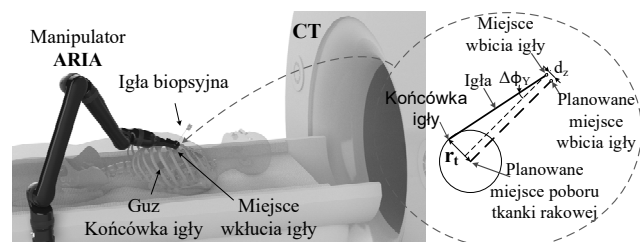
Keywords: drive module, absolute encoder, angle measurement error, error compensation.

Wstęp

Głównym elementem składowym układów pozycjonowania, stosowanych do pomiaru położenia kątownego w obrotowych modułach napędowych manipulatorów, są enkodery. Bardzo często, w modułach tych, podobnie jak to ma miejsce w modułach napędowych manipulatorów ARIA (Assistive Robotic Arm) [1], wykorzystywane są łącznie dwa typy enkoderów: inkrementalny - mierzący przemieszczenie kątowne wału silnika i absolutny – mierzący przemieszczenie części wyjściowej względem wejściowej modułu. Szczególnie te drugie odgrywają kluczową rolę w funkcjonowaniu modułów napędowych robotów, wpływając znacząco na ich ogólną dokładność pozycjonowania i efektywność pracy. Jednakże, enkodery absolutne są podatne na różnorodnego rodzaju błędy pomiaru, które mogą ograniczać funkcjonalność modułów, szczególnie, tam gdzie wymagana jest duża precyzja. W odpowiedzi na to wyzwanie, prowadzone są intensywne badania koncentrujące się na: analizie źródeł błędów, ich wpływu na dokładność wykonywanych pomiarów oraz opracowywaniu skutecznych technik kompensacji eliminujących lub ograniczających ten wpływ.

W pracach badawczych [2, 3, 4] jako główne czynniki niedokładności pomiarów wskazywane są, m.in.: niedoskonałości mechaniczne wykonania samego modułu jak również wykonania i montażu czujnika wraz z jego tarczą, wpływy zewnętrznego pola magnetycznego, efektów termicznych, czy też zmiennego obciążenia wyjścia modułu. Sam błąd popełniany przez enkoder, zgodnie z [4], może być wyrażony w postaci szeregu Fouriera, gdzie jego składowa stała jest wynikiem przesunięcia (offsetu) montażowego czujnika względem pozycji odniesienia przegubu, a na wielkość amplitud jego poszczególnych harmonicznych, mają wpływ wskazane wyżej czynniki. W celu ograniczenia lub eliminacji tych wpływów, stosowane są różnego rodzaju metody kompensacji błędów, które w literaturze można podzielić na dwie grupy. Pierwszą z nich stanowią metody nazywane kalibracją krzyżową [4, 5, 6], polegającą na porównaniu testowanego czujnika z czujnikiem wzorcowym. Drugą grupę stanowią metody określane mianem samokalibracji [7], które w większości przypadków wykorzystują odpowiedni układ geometryczny kilku głowic czytających, rozmieszczonych na obwodzie tarczy.

Opracowane przez firmę Accrea modułowe ramie robotyczne ARIA, które montowane na elektrycznym wózku inwalidzkim, umożliwia osobom niepełnosprawnym samodzielną realizację podstawowych czynności życiowych (jedzenie, picie, itp.) [1], postanowiono zastosować w nowym projekcie realizującym manipulator wspomagający badanie biopsyjne (patrz rys.1).



Rys. 1. Manipulator ARIA w zastosowaniu wspomagającym biopsję

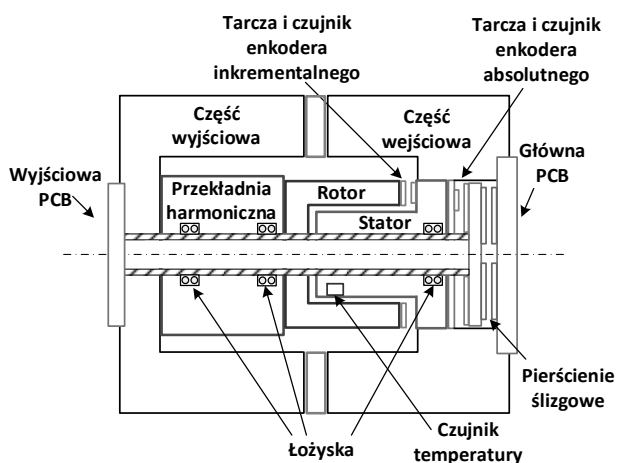
Niestety w tym nowym zastosowaniu wymagana jest stosunkowo duża precyzja pozycjonowania końcówki manipulatora. Wynika to z faktu, iż końcówka ta musi ustawić się dokładnie w miejscu i kierunku zaplanowanym przez lekarza, na podstawie obrazów z tomografii komputerowej, po to aby finalnie wprowadzana przez nią igła biopsyjna celnie trafiła w guz. Na dokładność pozycjonowania oprócz elastyczności i dokładności wykonania łączników ramienia, znaczący wpływ ma również dokładność pozycjonowania jego modułów napędowych. O ile wymienione czynniki dokładnościowe w przypadku wersji wózkowej ramienia, gdzie realizowane jest sterowanie nadeżne za ruchem zadajnika w postaci joysticka, nie stanowią znaczącego problemu, o tyle w tym nowym zastosowaniu pozycjonowanie końcówki musi być na tyle dokładne, aby każdorazowo wprowadzana igła biopsyjna pobrała komórki rakowe z guza o minimalnej pojemności wynoszącej, zgodnie z [8]: 5 ml. Oznacza to, iż przy założeniu symetrii guza, końcówka igły musi trafić w kulę o promieniu $r_t \approx 5$ mm. Ze względu na to, że łączniki ramienia można zbudować odpowiednio sztywne a ich niedokładność wykonania można skorygować programowo, przeprowadzając kalibrację kinematyczną, podstawowym problemem pozostaje dokładność pozycjonowania modułów napędowych, na co z kolei decydujący wpływ ma

dokładność pomiaru położenia kąowego przegubu. Dokładność ta, uwzględniając kinematykę ramienia i uwarunkowania przedstawionego na rys. 1, nie powinna być gorsza niż $0,05^\circ$ dla każdego z przegubów.

Biorąc pod uwagę powyższe, postanowiono przeprowadzić badania w celu określenia wielkości oraz analizy przyczyn i możliwości kompensacji błędu pomiaru położenia kąowego w modułach ARIA do wymaganych wartości. Wyniki tych badań przedstawiono w kolejnych rozdziałach.

Moduł napędowy ARIA

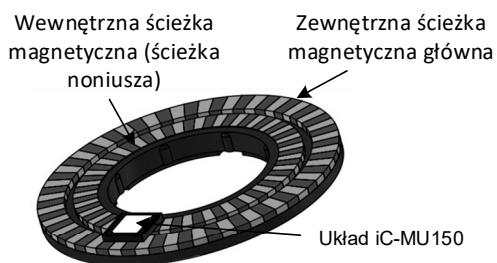
Moduł napędowy ARIA jest modulem wieloobrotowym. Jego uproszczony przekrój poprzeczny prezentuje rys. 2.



Rys. 2. Budowa modułu napędowego ARIA

Konstrukcja modułu opiera się na dwóch cylindrycznych obudowach nośnych, mechanicznie połączonych z układem napędowym, który składa się z bezszczotkowego silnika prądu stałego i przekładni harmonicznej o przełożeniu 1/160 dla wersji M lub 1/100 dla wersji S.

Układ sterowania pozycją kąową modułu wykorzystuje dwa czujniki położenia kąowego. Pierwszym z nich jest enkoder inkrementalny o rozdzielczości 1448 imp./obrót, mierzący przemieszczenie kąowe pomiędzy wirnikiem a stojanem silnika. Drugim zaś jest osiowy enkoder absolutny iC-Haus iC-MU150, którego tarcza magnetyczna montowana jest na wale centralnym a sam czujnik na korpusie części wejściowej modułu, umożliwiając tym samym bezpośredni pomiar położenia części wyjściowej względem części wejściowej (nieruchomej) modułu z rozdzielczością $2^{19} = 524288$ pozycji/obrót ($0,000687^\circ$). Wygląd czujnika, demonstrujący zasadę jego pracy prezentuje rys. 3.



Rys. 3. Enkoder iC-Haus iC-MU150 z tarczą magnetyczną

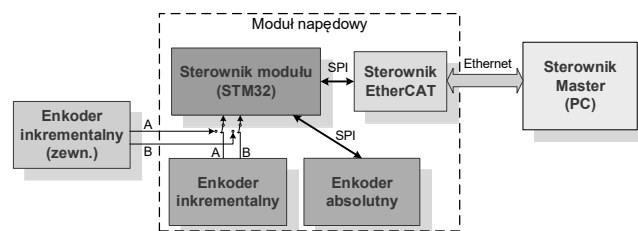
Układ iC-MU150, który integruje czujniki Halla, kondycjoner sygnału i interpolator, umieszczony nad tarczą, skanuje jej dwie ścieżki magnetyczne. Pierwszą z nich jest ścieżka zewnętrzna, zwana główną, która składa się z 32 naprzemiennie namagnesowanych biegunów. Druga wewnętrzna, zawiera o jedną parę biegunów mniej

i nazywana jest ścieżką noniusza. Różnica kątów pomiędzy podziałką obydwu ścieżek stanowi mierzoną pozycję absolutną.

Sygnały pomiarowe z enkoderów, podobnie jak z innych czujników (np. temperatury modułu, itp.) są przekazywane do mikrokontrolera znajdującego się na płytce głównej PCB. Mikrokontroler poza akwizycją danych pomiarowych realizuje sterowanie całym modulem oraz, za pośrednictwem sterownika EtherCAT, wymienia sygnały pomiarowe – sterujące z urządzeniem nadrzędnym, z częstotliwością 1kHz. Bardziej szczegółowy opis budowy modułu oraz algorytmu sterowania implementowanego na mikrokontrolerze zostały przedstawiony w pracy [1].

Wyznaczanie błędu pomiaru i jego składowych

W celu oszacowania wielkości błędu pomiaru położenia kąowego modułu ARIA i identyfikacji jego źródeł, przeprowadzono szereg eksperymentów badawczych w układzie przedstawionym na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy układu pomiarowego

Do akwizycji danych pomiarowych z enkodera badanego (enkodera absolutnego modułu ARIA) oraz wzorcowego (enkodera inkrementalnego), wykorzystano sterownik nadrzędny (Master) manipulatora, zrealizowany na komputerze PC z systemem czasu rzeczywistego.

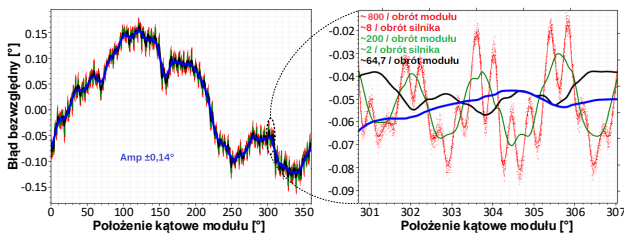
Eksperymentom pomiarowym poddano 10 modułów, które posiadały identyczną budowę (o strukturze przedstawionej na rys. 2). Różnicę stanowiła wersja modułu (przebadano 5 w wersji M i 5 w wersji S) na co wskazywała wartość przełożenia oraz źródło pochodzenia (producent) przekładni harmonicznej. Pomiary przeprowadzono dla standardowej temperatury pracy modułu, wynoszącej ok. 45°C i przy braku jego jakiegokolwiek zewnętrznego obciążenia siłą lub momentem.

W pierwszym etapie jako źródło sygnału odniesienia wykorzystano pomiary pochodzące z wewnętrznego enkodera inkrementalnego modułu ARIA. Rozdzielczość tego pomiaru, po uwzględnieniu przekładni i przeliczeniu na stronę wyjściową, wynosiła odpowiednio $0,001554^\circ$ dla modułu w wersji M i $0,002486^\circ$ w wersji S. W drugim zaś etapie jako czujnik wzorcowy użyto zewnętrzny enkoder inkrementalny o rozdzielczości $0,0025^\circ$. Elektrycznie został on podłączony do modułu ARIA w miejsce wewnętrznego enkodera inkrementalnego, natomiast mechanicznie połączono go z modulem poprzez opracowane adaptory w sposób umożliwiający bezpośredni pomiar przemieszczenia kąowego obu połówek modułu. To drugie rozwiązanie zastosowano w celu detekcji czynników, które potencjalnie powodują różnice wskazań enkoderów podczas badań wykonywanych w pierwszej serii a nie stanowią błędów pomiarowych badanego enkodera.

Podczas obu etapów dane pomiarowe zbierano wykonując 10 pełnych obrotów każdego z badanych modułów, obracając moduł co $0,009^\circ$. Następnie wyniki pomiarów sprowadzono do zakresu jednego pełnego obrotu modułu, poprzez uśrednienie 10 par próbek zebranych dla tej samej pozycji kąowej. W kolejnym kroku obliczono wartości błędów bezwzględnych pomiaru dla każdej pary próbek. Utworzono tym samym krzywą błędów w funkcji

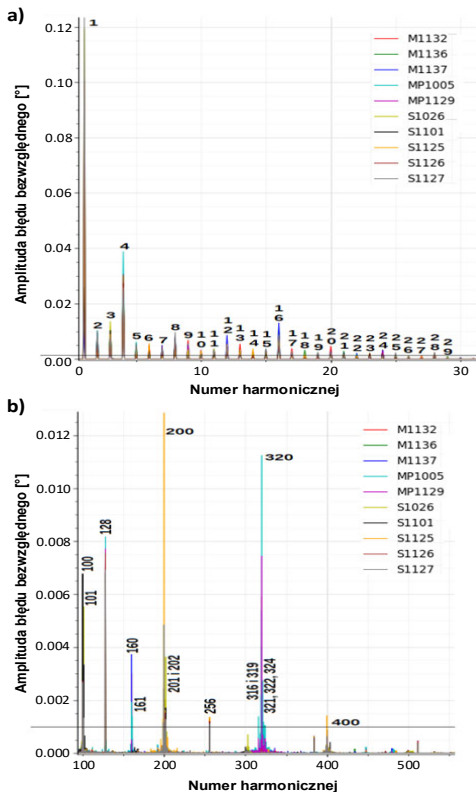
położenia kąтового modułu. Przykład takiej krzywej dla modułu w wersji S prezentuje rys. 5. Każdy przebadany egzemplarz modułu charakteryzował się niemalże niepowtarzalnym przebiegiem krzywej błędu.

Dane reprezentujące krzywą błędu poddano następnie szybkiej transformacji Fouriera (FFT), co pozwoliło na przedstawienie jej w postaci kolejnych harmonicznych o różnej amplitudzie i przesunięciu fazowym (patrz rys. 5). Numery harmonicznych reprezentują tutaj krotność wystąpienia na jeden obrót modułu, a ich amplitudy składają się (uwzględniając przesunięcia fazowe) na błąd czujnika. Składowa stała, która w rzeczywistości reprezentuje przesunięcie (offset) montażowy czujnika względem pozycji kątowej odniesienia (tj. „zera” kinematycznego) przegubu, w praktyce jest eliminowana przeprowadzeniem, wspomnianej we wstępie, procedury kalibracji kinematycznej manipulatora.



Rys. 5. Krzywa błędu poddana szybkiej transformacji Fouriera

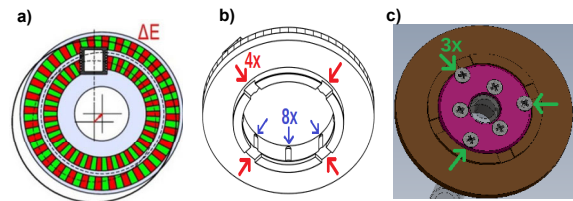
Poddane FFT dane dla wszystkich 10 badanych modułów, dla przypadku z wewnętrznym enkoderem wzorcowym, zaprezentowano na rys. 6, gdzie jego część a) prezentuje amplitudy błędów niższych harmonicznych a część b) w powiększonej skali, wyższych harmonicznych.



Rys. 6. FFT błędów sprowadzonych do pełnego obrotu enkodera a) niższe harmoniczne, b) wyższe harmoniczne

Na wartość błędu każdego z modułów dominujący wpływ, tj. około 60% jego całkowitej wartości, ma amplituda

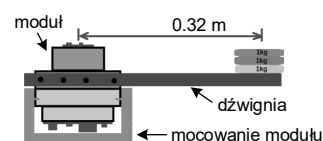
harmonicznej nr 1, osiągająca max. wartość $\pm 0,12^\circ$. Powodem jej obecności jest niewspółosiowość (mimośrodowość) ΔE tarczy enkodera (patrz rys. 7a), spowodowana jej nieidealnym zamocowaniem i wykonaniem oraz „biciem” promieniowym wału, na którym zamontowana jest tarcza. Przeprowadzono pomiary, które wykazały bicie wału w zakresie od 0,0024 do 0,033 mm.



Rys. 7. Ilustracja przyczyn błędów reprezentowanych przez harmoniczne a) nr 1, b) nr 4 i 8, c) nr 3.

Drugą co do wielkości jest amplituda harmonicznej nr 4, stanowiąca ok. 30% całkowitego błędu i osiągająca wartość $\pm 0,04^\circ$. Główną przyczyną jej obecności, podobnie jak harmonicznej nr 8, jest zniekształcenie tarczy (tj. jej ścieżki magnetycznej) powodowane przez wskazane na rys. 7b elementy centrująco-mocujące. Amplituda harmonicznej nr 3 osiąga wartości max. $\pm 0,014^\circ$ a przyczyną są naprężenia wywołane przez docisk śrub, służących do mocowania tarczy (patrz rys. 7 c). Harmoniczne nr 200 i 320 występują dwa razy na obrót silnika (pierwsza dla przełożenia 1/100 a druga 1/160), osiągając wartości amplitudy $\pm 0,013^\circ$. Są one obecne na skutek nie osiowego zamocowania generatora fali przekładni harmonicznej, który przyjmuje tą samą pozycję dwa razy na obrót silnika. Powoduje to właśnie dwa razy na obrót, głębsze zazębianie się przekładni i drastyczny wzrost tarcia. To z kolei, ze względu na elastyczność części wyjściowej przekładni, powoduje różnice we wskazaniach obydwu enkoderów. Podobnie rzecz się ma z harmonicznymi nr 100 i 160, które występują z kolei jeden raz na obrót silnika, osiągając max. $\pm 0,007^\circ$. Powstają one na skutek „bicia” promieniowego osi rotora silnika. Także obecność harmonicznych 200, 320, 100 i 160 nie jest wynikiem błędów popełnianych przez enkoder absolutny. Potwierdzeniem tego były badania przeprowadzone w drugiej serii, z użyciem zewnętrznego enkodera wzorcowego. Wyniki tych badań różniły się od aktualnie prezentowanych praktycznie jedynie brakiem amplitud harmonicznych 200, 100 dla modułu w wersji S oraz 320 i 160 dla modułu typu M. Amplituda 16-tej harmonicznej osiąga wartość $\pm 0,013^\circ$, a jej prawdopodobną przyczyną jest 16-to punktowa kalibracja ścieżki noniusza tarczy enkodera, dokonywana oprogramowaniem producenta. Przyczyną obecności harmonicznych 128 i 256, o max amplitudzie $\pm 0,008^\circ$, jest niedokładność namagnesowania podziałki tarczy enkodera. Inne harmoniczne mają pomijalne znaczenie dla wartości błędów.

W kolejnych etapach, przyjmując powyższą metodologię, dokonano pomiaru wpływu: temperatury wewnętrznej (moduł umieszczony w komorze termicznej) oraz obciążeń osiowych i promieniowych modułu (wywierając zewnętrzny stały nacisk - patrz rys. 8), na poszczególne składowe błędu pomiaru położenia kąowego.



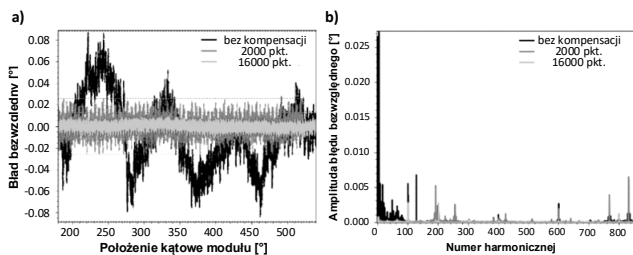
Rys. 8. Badanie modułu przy zewnętrznym obciążeniu.

Kompensacja błędu pomiaru

W celu zmniejszenia wartości błędu pomiaru pozycji kątowej modułu, który dla kilku modułów nawet trzykrotnie przekraczał założony maksymalny błąd, zastosowano kompensację metodą mapowania krzywej błędu. Jest to podstawowa metoda kompensacji, która polega na:

- zarejestrowaniu w sposób opisany w rozdziale poprzednim, z użyciem enkodera wzorcowego, błędów bezwzględnych, odniesionych do wartości pozycji zmierzonych przez enkoder absolutny,
- przekształceniu krzywej błędów w tablicę punktów kompensacyjnych,
- zaimplementowaniu, w oprogramowaniu sterującym modułu, ww. tablicy, gdzie, z użyciem interpolacji liniowej, koryguje ona w czasie rzeczywistym wartości pomiarowe enkodera absolutnego.

Na rys. 9 przedstawiono wyniki kompensacji błędu, metodą mapowania, dla jednego z modułów typu S, przeprowadzone w warunkach nominalnych, w układzie z zewnętrznym enkoderem inkrementalnym o rozdzielczości 36000 ppr ($0,0025^\circ$). Przy kompensacji tablicą 2 tys. punktową uzyskano zmniejszenie błędu maksymalnego do $\pm 0,025^\circ$ a dla tablicy składającej się z 16 tys. punktów kompensacyjnych do $\pm 0,012^\circ$. Przy czym jak pokazano na rys. 9b główną tego zasługą jest tutaj redukcja amplitud niższych harmonicznych, a przede wszystkim 1-szej.



Rys. 9. Wyniki kompensacji błędu a) krzywa błędu b) FFT krzywej błędów

Powyższe wyniki uzyskano z użyciem enkodera, którego rozdzielczość jest dość mała w stosunku do możliwości badanego/kompensowanego enkodera. Lepsze wyniki uzyskane zostaną z użyciem docelowo opracowanego układu opartego o system dwuczujnikowego enkodera inkrementalnego Renishaw VIONiC REXM20, z dwoma głowicami V2CKQ10D20B i tarczą REXM20USA104. Taki układ czujnika wzorcowego zapewnia pomiar z dokładnością $\pm 0,00028^\circ$ tj. 10-krotnie lepszą niż rozdzielczość czujnika użytego w eksperymencie.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki prac badawczo-rozwojowych, których głównym celem była ocena wielkości błędu popełnianego przez enkoder absolutny, a także określenie przyczyn oraz możliwości redukcji poszczególnych składowych tego błędu.

Badania wykazały, że maksymalny błąd popełniany przez poszczególne moduły wynosił od $\pm 0,082^\circ$ do $\pm 0,171^\circ$. Większą część tego błędu stanowią składowe wynikające z niewspółosiowości tarczy enkodera oraz zniekształcenia tarczy, a ich źródłem są błędy produkcyjne modułu oraz tarczy enkodera. Testy dowiodły, że składowe te mogą być z powodzeniem skompensowane, nawet ponad 10 krotnie, metodą mapowania krzywej błędu. Jest to jednak możliwe tylko pod warunkiem zachowania ich powtarzalności.

Niestety, gdy błąd ma charakter nieprzewidywalny, co ma miejsce podczas losowej zmiany położenia środka

geometrycznego tarczy enkodera spowodowanego np. luzami i niedoskonałościami łożysk oraz obecność zmiennego obciążenia, należy go kompensować na bieżąco. Może to być zrealizowane na drodze uśredniania pomiarów z kilku (2, 4) głowic czujników, przeciwnie i równomiernie rozmieszczonych na obwodzie tarczy enkodera. Niestety zastosowanie tej metody kompensacji ma pewne ograniczenia, ujawniające się w szczególności, gdy występuje zmienne nachylenie tarczy enkodera względem czujników. Z takim zmiennym nachyleniem tarczy mamy do czynienia również w modułach ARIA. Jest ono efektem zmiennego, znacznego, zewnętrznego obciążenia modułu, powodującego odkształcenie osi wału centralnego modułu, co potwierdziły testy wykonywane z obciążeniem przykładowym w sposób pokazany na rys. 8. Jednakże w przypadku ramienia wspomagającego biopsję takie znaczne obciążenie pojawiać się będzie praktycznie tylko w momencie wywoływania nacisku z zewnątrz, przede wszystkim podczas wprowadzania igły przez lekarza. Wpływ na dokładność pomiaru może zostać w tej sytuacji wyeliminowany poprzez użycie hamulców blokujących moduł na czas pobierania tkanek przez diagnostę. Dodatkową niedogodnością zastosowania układu z wieloma czujnikami jest niestety konieczność przeprojektowania modułów ARIA.

Przedstawione w artykule prace były wykonywane w ramach projektu "Konfigurowalne ramię do stabilizacji trajektorii igły biopsyjnej", realizowanego w ramach Poddziałania 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (umowa o dofinansowanie Nr: POIR.01.01.01-00-0830/20-00).

Autorzy: dr inż. Adam Kurnicki, Katedra Automatyki i Metrologii, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin, E-mail: a.kurnicki@pollub.pl, dr inż. Bartłomiej Stańczyk, ACCREA Medical Robotics sp. z o.o., ul. Hiacyntowa 20, 20-143 Lublin, E-mail: a.stanczyk@accreea.com, mgr inż. Bartosz Kania, Katedra Automatyki i Metrologii, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin, E-mail: b.kania@pollub.pl.

LITERATURA

- [1] Kurnicki A., Stańczyk B., Development of a Modular Light-Weight Manipulator for Human-Robot Interaction in Medical Applications, *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, vol. 10, nr 4, 2020, 33-37
- [2] Hua-Kun J., Lian-Dong Y., Huining Z., Yi-Zhou J., A New Method of Angle Measurement Error Analysis of Rotary Encoders, *Applied Sciences*, 9, 2019
- [3] Lee K. -M., Gu T., Bang Y. -B., Analysis of Accuracy and Measuring Range of Dual Absolute Encoder System, *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 6, 2020, 2997-3004
- [4] Hu, Y., Zhan, Y., Han, L., Hu, P., Ye, B., Yu, Y., An Angle Error Compensation Method Based on Harmonic Analysis for Integrated Joint Modules, *Sensors* 20(6), 2020
- [5] Hsieh T-H, Watanabe T, Hsu P-E., Calibration of Rotary Encoders Using a Shift-Angle Method, *Applied Sciences*, 12(10):5008, 2022
- [6] Ueyama, Y., Furutani, R., Watanabe, T., A super-high-accuracy angular index table, *Measurement Science and Technology*, 31, 2020
- [7] Jiao, Y., et al., Optimal-arrangement-based four-scanning-heads error separation technique for self-calibration of angle encoders, *Measurement Science and Technology*, 29, 2018
- [8] Seifabadi R., Cho NBJ., et al., Accuracy study of a robotic system for MRI-guided prostate needle placement, *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg.*, vol. 9, no. 3, 2013, 305-316.