

## WIELOBROTOWY NAPĘD MECHANICZNY Z AUTONOMICZNYM ZASILANIEM I MONITOROWANIEM

### MULTI-TURN MECHANICAL DRIVE WITH AUTONOMOUS POWER SUPPLY AND MONITORING

Łukasz Alfuth<sup>1\*</sup>, Adam Muc<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Morski w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, e-mail: l.aluth@we.am.gdynia.pl, ORCID 0000-0001-6627-247X

<sup>2</sup> Uniwersytet Morski w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki Okrętowej, ORCID 0000-0002-9495-087X

\* Adres do korespondencji/Corresponding author

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia konstrukcję wielobrotowego napędu mechanicznego, który umożliwia zasilanie i monitorowanie obiektu, będącego w ciągłym ruchu obrotowym. Proponowane rozwiązanie ułatwia zasilanie urządzeń umieszczonych na platformie obrotowej napięciem 230 V w sposób nieprzerwany i niezależny od kierunku obrotu. Dodatkowo umożliwia przeniesienie analogowego sygnału wychyłu miernika prędkości kątowej z platformy obrotowej na pulpit sterowniczy miernika wychyłu. Do oceny dokładności działania zaproponowanego napędu mechanicznego przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem miernika prędkości kątowej. Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej, z której wynika, że proponowana konstrukcja w zadowalającym stopniu realizuje przyjęte założenia projektowe.

**Słowa kluczowe:** wielobrotowy zespół napędowy, autonomiczne zasilanie, monitorowanie.

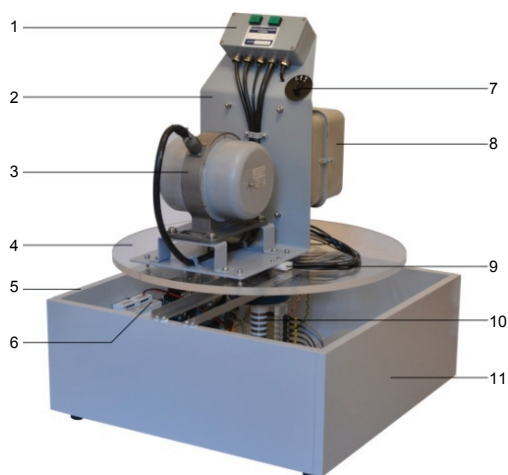
**Abstract:** In the paper the construction of multi-turn mechanical drive is presented. The mechanical drive enables power supply and monitoring of an object being in continuous rotary motion. The proposed solution enables the devices placed on the rotating platform to be powered with 230 V in an uninterrupted and independent way from the direction of rotation. Additionally, it enables transferring the analogue tilting signal of the angular speed meter from the rotating platform to the tilt meter control panel. To assess the operation of the mechanical drive, experimental tests were carried out using an angular velocity meter. The obtained results were subjected to statistical analysis, which shows that the proposed structure satisfies the assumed design assumptions to a satisfactory degree.

**Keywords:** multi-turn mechanical drive, autonomous power supply, monitoring.

## 1. WSTĘP

Zasilanie obiektu będącego w ciągłym ruchu obrotowym jest kłopotliwe ze względu na trudności z przeniesieniem wielkości elektrycznych na rotujące urządzenie zasilane. Do tego celu używa się elektrycznych złączy obrotowych, wykorzystujących złącza typu ślizgowe lub płynny metal. Złącza te (w zależności od: liczby styków, maksymalnej wartości prądu czy napięcia oraz prędkości obrotowej) są rozwiązaniami wykorzystywanymi powszechnie w przemyśle.

W artykule przedstawiono rozwiązanie zaprojektowane z myślą o zasilaniu urządzenia napięciem 230 V w sposób nieprzerwany i niezależny od obrotów platformy. Proponowane rozwiązanie pozwoliło również na przeniesienie analogowego sygnału wychyłu miernika prędkości kątowej z platformy obrotowej na pulpit sterowniczy z miernikiem wychyłu [Grzesiak, Ufnalski i Kaszewski 2016].



**Rys. 1.** Stanowisko laboratoryjne do badania prędkości kątowej; 1 – jednostka operacyjna, 2 – stelaż, 3 – miernik prędkości kątowej, 4 – platforma obrotowa, 5 – uchylna boczna ścianka, 6 – elementy sterujące napędem osi platformy (zasilacze, sterownik mocy, mikroindekser), 7 – wybór zakresu pomiaru, 8 – zasilacz zespołu żyroskopowego, 9 – złącze przewodów sygnałowych oraz zasilających, 10 – oś główna napędu ze szczotkami i pierścieniami elektrycznymi, 11 – obudowa

**Fig. 1.** Laboratory stand for testing angular speed; 1 – operating unit, 2 – frame, 3 – angular speed meter, 4 – rotating platform, 5 – tilting side wall, 6 – controls for axis drive (power supplies, power controller, microindex), 7 – range selection, 8 – power supply for the gyroscope group, 9 – signal and power supply connectors, 10 – main drive axis with brushes and electric rings, 11 – housing

W pracy zastosowano silnik krokowy, który poprzez koło zębate i pas zębaty napędza oś platformy. Wprowadzono również odpowiednie przełożenie napędu, co pozwoliło na dobranie silnika z mniejszym momentem trzymającym i tym samym

o mniejszych gabarytach. To rozwiązanie wpłynęło na uzyskanie bardzo dużej dokładności ustalenia kąta obrotu platformy z zespołem żyroskopowym. Zastosowanie mikroindeksera umożliwiło współpracę układu z komputerem poprzez łącze RS 232. Istnieje również możliwość napisania dowolnej sekwencji ruchu platformy i przesłania jej do pamięci mikroindeksera, który odpowiednimi impulsami steruje sterownik silnika krokowego [Ober 2009].

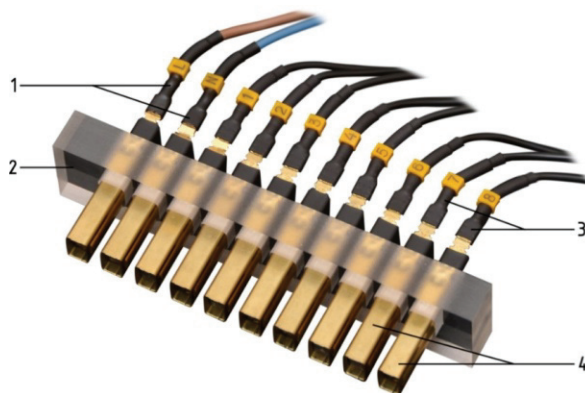
Przedstawione stanowisko będzie służyło do badania dokładności wskazań zespołu żyroskopowego Naviturn oraz będzie jednym z ćwiczeń wykonywanych przez studentów Wydziału Elektrycznego i Nawigacyjnego na zajęciach z przedmiotu Urządzenia elektronawigacyjne (rys. 1).

## 2. ZASILANIE I MONITOROWANIE PRACY WIELOBROTOWEJ PLATFORMY

W celu zapewnienia pracy wielobrotowej platformy, tzn. takiej, która umożliwi stałe zasilanie obiektu będącego na platformie obrotowej, należało zaprojektować układ elektromechaniczny, który pozwoli przenieść wielkości elektryczne (napięcia, wartości sygnałów wyjściowych) na zewnątrz obracającej się platformy.

Do tego celu użyto szczotek węglowych, umocowanych na płycie z pleksi-glasu, które w zestawieniu z pierścieniami tworzą moduł przenoszący wielkości elektryczne na i z platformy obrotowej.

Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcie pogładowe szczotek wraz ze szczotko-trzymaczem.

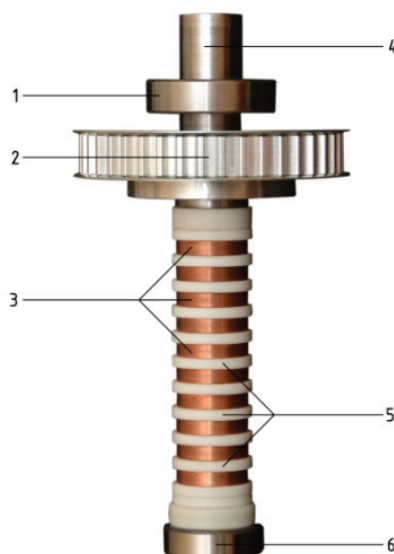


**Rys. 2.** Zespół szczotek elektrycznych wraz z opisem poszczególnych elementów;  
1 – przewody zasilające miernik prędkości kątowej, 2 – szczotkotrzymacz wykonany ze szkła krylowego, 3 – przewody sygnałowe, 4 – obudowy szczotek wykonane z mosiądzu

**Fig. 2.** Electric brush assembly with description of individual elements; 1 – power lines for angular speed meter, 2 – brushes made of krill glass, 3 – signal wires, 4 – brass brackets

Oś została zaprojektowana tak, aby można było za jej pośrednictwem przenieść siły powstające podczas obrotu platformą oraz aby analogowy sygnał wychyłu z zespołu żyroskopowego mógł (poprzez złącze obrotowe) być wyprowadzony na pulpit sterowniczy stanowiska [Mosoń 2001]. W celu zapewnienia ruchu wielobrotowego platformy zastosowano pierścienie miedziane, pierścienie izolujące oraz tuleję wykonaną z materiału PET–Poli (tereftalan etylenu), który posiada doskonałe właściwości dielektryczne i mechaniczne oraz jest łatwy w obróbce.

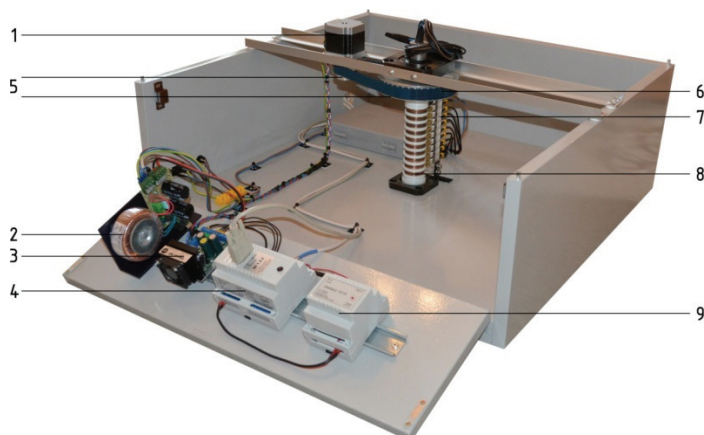
Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcie kompletnej osi układu wraz z zamocowanym kołem zębatym napędzanym.



**Rys. 3.** Zdjęcie osi układu napędowego wraz z opisem poszczególnych elementów;  
1 – łożysko podtrzymujące, 2 – koło zębate napędzane, 3 – pierścienie miedziane,  
4 – oś nośna wykonana ze stali, 5 – pierścienie izolujące z PET, 6 – łożysko ustalające

**Fig. 3.** Picture of the drive system axes with a description of the individual elements;  
1 – supporting bearing, 2 – driven gear, 3 – copper rings, 4 – supporting axis made of steel,  
5 – insulating rings made of PET, 6 – bearing bearing

Na rysunku 4 pokazano rozmieszczenie poszczególnych elementów stanowiska pomiarowego.



**Rys. 4.** Rozmieszczenie poszczególnych elementów stanowiska pomiarowego;  
1 – silnik krokowy FL57STH56–1006A, 2 – zasilacz sterownika mocy ZN-100L,  
3 – sterownik mocy silnika krokowego SMC62WP, 4 – mikroindekser MI 1.8.8,  
5 – koła zębate, 6 – pasek zębaty, 7 – szczotki elektryczne, 8 – oś główna napędu platformy,  
9 – zasilacz mikroindeksera oraz układu sygnalizacji

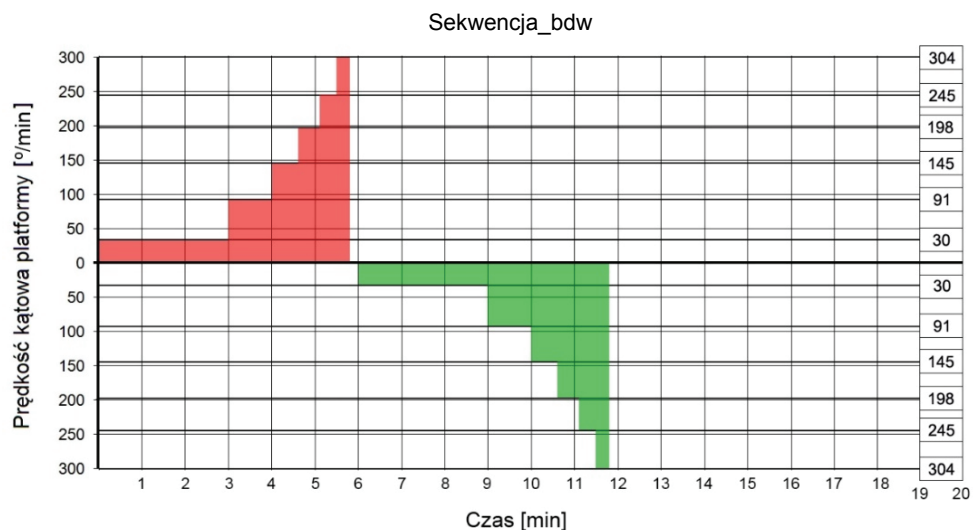
**Fig. 4.** Location of individual elements of the measurement station;  
1 – spot motor FL57STH56–1006A, 2 – power controller ZN-100L,  
3 – power controller stepper motor SMC62WP, 4 – micro-indexer MI 1.8.8, 5 – gear,  
6 – toothed belt, 7 – electric brushes, 8 – main drive axis of the platform,  
9 – power supply for micro-display and signaling system

### 3. PRACA ZESPOŁU NAPĘDOWEGO NA STANOWISKU

Do oceny dokładności działania zaproponowanego napędu mechanicznego z autonomicznym zasilaniem i monitorowaniem przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem miernika prędkości kątowej, wchodzącego w skład stanowiska pomiarowego [Żurawski 2014]. W tym celu zaprogramowano sterownik silnika tak, aby obracał platformą z różną prędkością, przedstawioną na rysunku 5. Platforma wykonuje ćwierć obrotu dla każdej prędkości. Wartościami rzeczywistymi prędkości obrotowej są obliczone na podstawie czasu jednego obrotu wielkości wyrażone w stopniach na minutę – °/min. Prędkości, przy których badano dokładność, są następujące:

- 30°/min – 720 s/obr;
- 90°/min – 240 s/obr;
- 145°/min – 149 s/obr;
- 198°/min – 109 s/obr;
- 245°/min – 88 s/obr;
- 300°/min – 72 s/obr.

Miernik prędkości kątowej *Naviturn* potrafi obsłużyć trzy wskaźniki prędkości kątowej (30°/min, 90°/min, 300°/min), natomiast stanowisko laboratoryjne zostało wyposażone w jeden wskaźnik prędkości kątowej o zakresie 300°/min, poniższe obliczenia dotyczą zatem właśnie tego zakresu. Przy badaniu dokładności uwzględniono również kierunek wychyłu – *portside*/lewa burta, *starboard*/prawa burta. Po zakończeniu badania wyniki zapisano w tabeli 1. W dalszej części artykułu wyniki te posłużą do obliczania błędów wskazania miernika prędkości kątowej.



**Rys. 5.** Wykres sekwencji do badania dokładności wskazań ruchu platformy  
**Fig. 5.** Sequence diagram for testing the accuracy of platform motion indications

**Tabela 1.** Pomiary dokładności wskazań miernika prędkości kątowej *Naviturn*  
**Table 1.** Measurements of the accuracy of *Naviturn* angle meter readings

Żądana prędkość kątowa [°/min]	<i>Portside</i> lewa burta		<i>Starboard</i> prawa burta	
	Prędkość rzeczywista	Prędkość wskazywana	Prędkość rzeczywista	Prędkość wskazywana
	$V_{rz}$ [°/min]	$V_w$ [°/min]	$V_{rz}$ [°/min]	$V_w$ [°/min]
30	30	32	30	30
90	91	91	91	95
150	145	148	145	150
200	198	205	198	210
250	245	250	245	256
300	304	300	304	296

Na podstawie powyższych danych można obliczyć błąd bezwzględny i względny pomiarów.

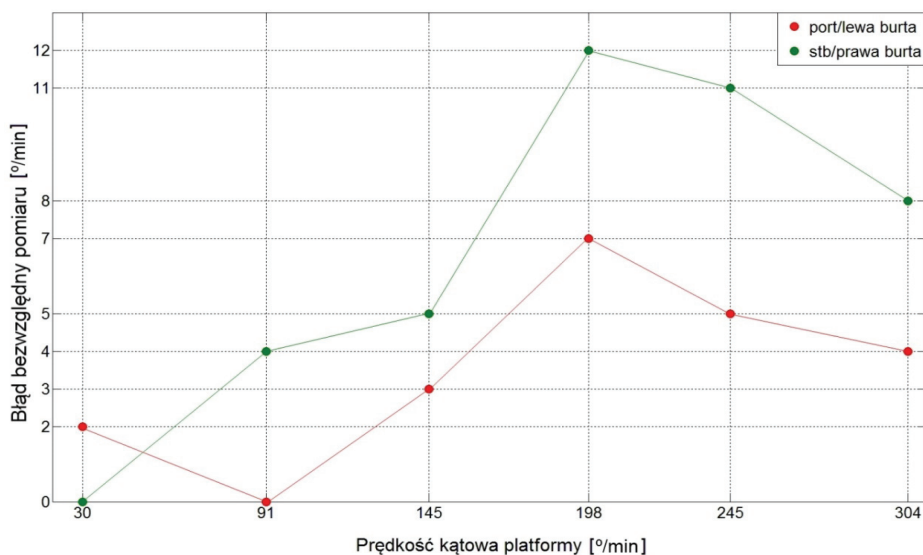
W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń błędów pomiaru [Kończak 2007].

**Tabela 2.** Błędy wskazania miernika prędkości kątovej Naviturn

**Table 2.** Errors in the Naviturn angle meter indication

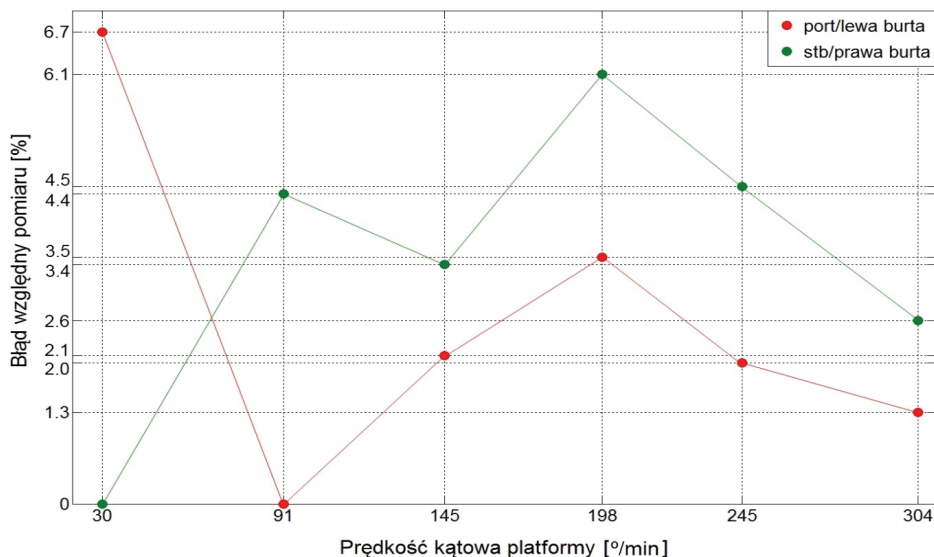
Rzeczywista prędkość kątovej [°/min]	Portside – lewa burta		Starboard – prawa burta	
	Błąd bezwzględny	Błąd względny	Błąd bezwzględny	Błąd względny
	$\Delta V$	$\delta V_{\%}$ [%]	$\Delta V$	$\delta V_{\%}$ [%]
30	2,0	6,7	~0	~0
91	~0	~0	4,0	4,4
145	3,0	2,1	5,0	3,4
198	7,0	3,5	12,0	6,1
245	5,0	2,0	11,0	4,5
304	4,0	1,3	8,0	2,6

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wykresy zależności błędu bezwzględnego oraz względnego w zależności od prędkości kątovej, z jaką poruszała się platforma, oraz od kierunku wychyłu – port/lewa burta, stb/prawa burta.



**Rys. 6.** Wykres zależności błędu bezwzględnego w zależności od prędkości kątovej

**Fig. 6.** Graph of absolute error dependence on angular speed



**Rys. 7.** Wykres zależności błędu względnego w zależności od prędkości kątowej

*Fig. 7. Graph of relative error dependence on angular speed*

Powyższe badanie dokładności zostało przeprowadzone na gotowym, zmodernizowanym stanowisku laboratoryjnym i obrazuje zachowanie się całego układu żyroskopowego wraz z elementami napędowymi imitującymi ruchy statku [Kończak 2007]. Trzeba podkreślić, że sprawdzenie dokładności odbyło się po czasie potrzebnym do całkowitego uruchomienia miernika, który producent określił na 20 minut.

Wskaźnik pomiarowy, zainstalowany na stanowisku laboratoryjnym, wskazuje prędkość, z jaką obraca się platforma; po wyłączeniu układu wskaźnik powinien powrócić do wartości początkowej, która w tym przypadku wynosi  $0^{\circ}/\text{min}$ , nie zawsze jednak ma to miejsce. Defekt ten z pewnością spowodowany jest długim czasem eksploatacji urządzenia. Tym niemniej, wskazania wartości prędkości obrotowej są poprawne.

Należy zwrócić uwagę, że przy innej konfiguracji sprzętowej napędu platformy dokładność miernika *Naviturn* może się zmienić. Mają na to wpływ czynniki takie jak:

- drgania platformy spowodowane pracą silnika krokowego;
- zmiana oporności szczotek elektrycznych w zależności od położenia kątownego platformy;
- możliwość rozstrojenia się ustawień poszczególnych zakresów miernika prędkości kątowej;
- silne pole magnetyczne generowane przez silnik krokowy.



Na wykresach przedstawionych na rysunkach 6 i 7 można zauważyć, że błąd pomiaru jest największy dla zakresu prędkości od 100 do 220°/min. Jako że błąd ten jest stały, można uwzględnić go przy dalszych pomiarach jako korektę wskazań miernika prędkości kątowej. Dla wychyłu na lewą burtę korekta błędu wskazania wynosi +5°/min, natomiast dla wychyłu na prawą burtę wynosi +9°/min. Znaczący wpływ na dokładność pomiaru ma również błąd paralaksy. Użytkownik stanowiska laboratoryjnego musi bezwzględnie odczytywać wartości wskazań z jak najmniejszym błędem paralaksy.

W trakcie opracowywania powyższych wyników zauważono, że wyższa prędkość obrotowa może spowodować niestabilną pracę układu napędowego. Przy obciążonej platformie maksymalna bezpieczna prędkość układu to 200 [kr/s], a minimalna to 31 [kr/s]. Układ może pracować przy wyższych lub niższych prędkościach, lecz może to spowodować „zgubienie kroku”, poślizg przy zatrzymywaniu na żądanej pozycji lub „kołysanie” platformą, uniemożliwiające poprawny odczyt prędkości kątowej.

Średni błąd ustalania pozycji platformy obrotowej wynosi 0,10%. Po uwzględnieniu błędów ustalania pozycji zawartych w tabeli 2 można zaprogramować układ tak, że jest w stanie zapewnić większą dokładność ustalania platformy.

#### **4. PODSUMOWANIE**

Zasilanie i monitorowanie obiektu będącego w ciągłym ruchu obrotowym jest trudne ze względu na problem przeniesienia wielkości elektrycznych na rotujące urządzenie zasilane. Aby zrealizować ten cel, użyto szczotek węglowych, które w zestawieniu z pierścieniami tworzą moduł, przenoszący wielkości elektryczne na i z platformy obrotowej.

Układ może pracować przy wyższych lub niższych prędkościach, lecz może spowodować „zgubienie kroku”, poślizg przy zatrzymywaniu na żądanej pozycji lub „kołysanie” platformą uniemożliwiające poprawny odczyt prędkości kątowej.

W celu wyeliminowania lub zmniejszenia błędów układu należałoby przeprojektować układ tak, by wyeliminować całkowicie pasek zębaty, a obrót platformy odbywałby się poprzez bezpośrednie sprzężenie silnika krokowego z platformą, która sama w sobie byłaby kołem zębatym. Pozwoliłoby to na jeszcze większe możliwości wysterowania prędkości obrotowej (dużo niższa minimalna prędkość obrotowa), wyeliminowanie „kołysania” platformy przy wyższych prędkościach, stabilizację mechaniczną stanowiska i wiele innych.

Proponowane rozwiązanie konstrukcyjne umożliwia zasilanie i monitorowanie stanu obiektu będącego na platformie, która jest w ciągłym ruchu obrotowym i dowolnym jego kierunku. Z przeprowadzonych badań walidacyjnych napędu wynika, że konstrukcję można jeszcze ulepszyć.

## LITERATURA

- Grzesiak, L.M., Ufnalski, B., Kaszewski, A., 2016, *Sterowanie napędów elektrycznych: analiza, modelowanie, projektowanie*, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Kończak, G., 2007, *Metody statystyczne w sterowaniu jakością produkcji*, Prace Naukowe Akademii Ekonomicznej w Katowicach, Katowice.
- Mosoń, I., 2001, *Sterowniki programowalne – strukturyzacja programów sterowania*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 17, Gdańsk, s. 145–152.
- Ober, W., 2009, *Pozycjonowanie urządzeń pomiarowych z napędem krokowym*, Napęd i Sterowanie, R. 11, nr 7/8, s. 42–45.
- Żurawski, Ł., 2014, *Ocena dokładności stolika liniowego i obrotowego z silnikiem krokowym*, Pomiary, Automatyka, Kontrola, R. 60, nr 10, s. 876–878.