

WYBRANE PROBLEMY PROJEKTOWANIA WYSOKOOBROTOWYCH ELEKTROWRZECION FREZARSKICH O NIESTANDARDOWYM ŁOŻYSKOWANIU

Robert ZABIELSKI*, Roman TROCHIMCZUK*

*Katedra Automatyki i Robotyki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

r.zabielski@doktoranci.pb.edu.pl, politechnikaroman@interia.pl

Streszczenie: W pracy przeprowadzono analizę podstawowych problemów budowy i projektowania elektrowrzecion łożyskowanych magnetycznie. Starano się przy tym zwrócić szczególną uwagę na problemy związane z konstrukcją i doborem komponentów projektowanego systemu. Ponadto ogólnie omówiono budowę, zastosowanie łożysk magnetycznych oraz zdefiniowano wady i zalety ich stosowania w maszynach wirnikowych. Na tej podstawie zaproponowano koncepcyjne dwa rozwiązania elektrowrzeciona łożyskowanego magnetycznie. Pracę uzupełnia opis ogólnie przyjętej procedury projektowania złożonych systemów mechatronicznych, do których zaliczyć można nowoczesne wysokoobrotowe elektrowrzeciono łożyskowane magnetycznie. Oparto się przy tym o metodykę zaproponowaną przez Rolfa Isermanna.

1. WPROWADZENIE

Szybki rozwój technologii materiałowej był przyczynkiem do opracowywania coraz nowszych narzędzi skrawających, mogących pracować z wysokimi i ekstremalnie wysokimi prędkościami obrotowymi (*High Speed Cutting*). Pozwoliło to, m.in. na uzyskanie nowej, wyższej jakości wytwarzanych produktów, oraz na zwiększenie wydajności samego procesu obróbczego. Wykorzystanie systemów CAD/CAM w procesie projektowania technologii obróbki powierzchni oraz nadawania ostatecznego kształtu produktowi, oraz stosunkowo prosty sposób przeniesienia zaprogramowanych ruchów obróbczych na obrabiarkę, sprawił że koniecznym stał się również rozwój układów wrzecionowych mogących sprostać zadaniom przez technologa, coraz bardziej wygórowanym parametrom obróbki (Tarnowski, 1997).

Z obecnie dostępnych na rynku rozwiązań wysokoobrotowych elektrowrzecion frezarskich można dobrać takie, które będą spełniać założone, podstawowe wymagania dotyczące zapewnienia odpowiedniej mocy wrzeciona i jego prędkości obrotowej. Jednak cechą wspólną dużej większości z tych układów jest zmniejszona żywotność użytych w nich łożysk. Przyspieszone zużycie łożysk może wynikać między innymi z nieodpowiedniego zabezpieczenia elektrowrzecion od wpływu niekorzystnych czynników środowiska pracy, zużycia użytego w elektrowrzecionie narzędzia oraz drgań niewyrównoważonego wału napędu. Podwyższenie niezawodności układu w większości wypadków można nieznacznie zwiększyć stosując nowoczesne łożyska ceramiczne o podwyższonej niezawodności i trwałości. Pozwalają one na uzyskanie prędkości obrotowych przekraczających 25 tys. obr./min. Jednak i to rozwiązanie niewiele, w stosunku do rozwiązań klasycznych, zwiększa okres całkowitej eksploatacji urządzenia.

Alternatywę dla opisanych wyżej rozwiązań klasycznych może stanowić elektrowrzeciono z łożyskami magnetycznymi. Takie połączenie z klasycznym rozwiązaniem przyczyni się do znacznego wydłużenia okresu bezawaryjnego

użytkowania urządzenia, a co za tym idzie mniejszy koszt jego obsługi. Dodatkowo pozwoli na komputerowe diagnozowanie stanu wrzeciona, oraz stanu zużycia narzędzia, a także co jest bardzo istotne pozwoli na zwiększenie prędkości obrotowej do wartości przekraczających 60 tys. obr./min. Układ magnetyczny nie będzie potrzebować smarowania odpowiednimi olejami, wydłużającymi okres eksploatacji, co znacząco poprawi jakość środowiska pracy.

2. ANALIZA PROBLEMÓW BUDOWY I PROJEKTOWANIA ELEKTROWRZECION

Opracowując konstrukcję wysokoobrotowych elektrowrzecion frezarskich, należy odpowiedzieć m.in. na następujące pytania:

- W jaki sposób będziemy łożyskować wał napędu?
- Czy i ewentualnie w jaki sposób układ ma być smarowany?
- Jaką prędkość obrotową wrzeciona chcemy osiągnąć?
- W jaki sposób zdiagnozujemy stan komponentów systemu?
- Jaki ma być przekrój wirnika napędu?
- Z jaką siłą i w jaki sposób ma być mocowane narzędzie?
- W jaki sposób ma być układ chłodzony?
- W jaki sposób określane ma być położenie wału wrzeciona?
- W jaki sposób ograniczyć drgania wrzeciona?
- Jakie mają być gabaryty urządzenia?

Zdajemy sobie sprawę, że to tylko niewielka część z możliwych pytań. W pracy tej jednak ograniczymy się tylko do przedstawienia sposobu łożyskowania, napędzania i chłodzenia, nowo projektowanego w Katedrze Automatyki i Robotyki Politechniki Białostockiej, wysokoobrotowego elektrowrzeciona frezarskiego, pracującego z prędkościami wyższymi niż 60 tys. obr./min.

Aktualnymi sposobami łożyskowania są przeważnie łożyska toczne (stożkowe i kulkowe skośne przenoszące obciążenia wzdłużne i poprzeczne) oraz ślizgowe (olejowe hydrostatyczne i hydrodynamiczne). Układy takie posiadają jednak poważne ograniczenia wynikające z ich budowy, a także ze sposobu dostarczania czynnika smarującego.

Pierwsze ograniczenie w stosowaniu w elektrowrzecionach wynika z okresu ich trwałości.

Trwałością łożyska określa się czas pracy łożyska wyrażony w milionach obrotów lub godzinach pracy, przy danej prędkości obrotowej, obliczany do chwili wystąpienia pierwszych oznak zmęczenia materiału. Analizując literaturę z zakresu konstrukcji układów łożyskowych (Krzemiński-Freda, 1989; Osiński i in., 1986; Mazanek, 2005), można stwierdzić na podstawie opisanych licznych doświadczeń autorów, że zjawisko zmęczenia powierzchniowego przebiega nieregularnie i dla pozornie identycznych łożysk pracujących w tych samych warunkach może się zmieniać w szerokich granicach.

Dlatego też przyjęto za trwałość umowną łożyska taką liczbę obrotów, jaką osiągnie ono bez objawów zmęczenia w określonych warunkach, w 90% badanych przypadków. Oznacza to, że pozostałe 10% łożysk może wykazać mniejszą trwałość, co mieści się jednak w dopuszczalnych granicach. W maszynach i urządzeniach pracujących przy stałej liczbie obrotów na minutę, trwałość łożysk określa się często w godzinach pracy łożyska L_h ze wzoru (<http://pcws.ia.polsl.pl/bearings/index.php?action=teoria08>):

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{n \cdot 60} = \frac{16666}{n} \left(\frac{C}{P} \right)^p, \quad (1)$$

gdzie: L_h – trwałość wyrażona w godzinach pracy łożyska, L – trwałość [w mln obrotów], C – nośność ruchowa [N], P – obciążenie zastępcze [N], p – wykładnik potęgowy, wynoszący dla łożysk kulkowych $p=3$, a dla łożysk wałeczkowych $p=10/3$, n – szybkość obrotowa łożyska [obr./min].

Jeżeli wymagane osiągi są bliskie granicom możliwości łożyska wykonanego ze stali, lub jeśli potrzebna jest wyższa ich sztywność lub trwałość, alternatywnie można zastosować łożyska hybrydowe. Niestety łożyska hybrydowe też mają swoje ograniczenia. Wśród nich najważniejszymi są: duże zapotrzebowanie na materiały smarujące, zwiększone opory (tarcie) podczas ich pracy.

Tab. 1. Zastosowanie łożysk oraz określenie stosunku ich kosztów do otrzymywanych osiągnięć

Materiał łożyska	Osiągi	Koszt	Typowe zastosowanie
Łożyska całkowicie wykonane ze stali	■	■	Obrabiarki, sprzęt precyzyjny, walcarki szybkoobrotowe, szybkoobrotowe silniki elektryczne itd.
Łożyska hybrydowe	■■■	■	Obrabiarki, sprzęt precyzyjny, turbosprężarki doładowujące, szybkoobrotowe silniki elektryczne itd.
Łożyska całkowicie wykonane z materiału ceramicznego	■■■■■	■■■■■	Przemysł lotniczy i kosmonautyczny, sprzęt do pracy w ekstremalnych warunkach, wysokie temperatury, zagrożenie korozją itd.

Alternatywnym rozwiązaniem do omówionych są łożyska magnetyczne, których ograniczenia są znacznie mniejsze, niż w przypadku wspomnianego łożyskowania klasycznego.

Jak przedstawiono w tabeli 1 (<http://pcws.ia.polsl.pl/bearings/index.php?action=teoria08>) wyższe osiągi łożysk, znacznie zwiększają koszt łożyskowania. W kosztach tych należy ująć również koszty smarowania i obsługi układu.

Kolejnym problemem jest prędkość obrotowa elektrowrzeciona, która ściśle wiąże się z sztywnością wirnika (z przyjętym jego przekrojem).

O ile dobór profilu wirnika jest bardzo istotnym problemem, to należy wcześniej się zastanowić w jakim przedziale prędkości obrotowych ma pracować konstruowane elektrowrzeciono. Należy przy tym określić jakiego typu ma to być silnik (jednofazowy, czy trójfazowy), oraz w jaki sposób ma być on zasilany? Przykładowe, możliwe do zastosowania rozwiązanie przedstawiono na Rys. 1 (<http://www.eunda.ch>).

Sama prędkość obrotowa jest niewystarczającym do przyjęcia parametrem. Należy określić również konieczną moc napędu. Wymienione dwa parametry mają znaczący wpływ na ostateczną konstrukcję i gabaryty projektowanego do wrzeciona wirnika.



Rys. 1. Widok przykładowego silnika do zabudowy w elektrowrzecionie – typ ENCA firmy „E+A” (EUNDA)

Mając już dobrany silnik, możemy zacząć projektować wirnik elektrowrzeciona. W tym miejscu pojawia się kolejny duży problem. Jak ma być zbudowany wirnik, aby jego pierwsza częstość własna występowała jak najpóźniej (Gosiewski, Muszyńska, 1992; Gosiewski 1989). Jednym ze sposobów obejścia tego problemu jest zastosowanie podatnych podpór wirnika. W tym celu stosujemy łożyska magnetyczne. Łożyska te w przeciwieństwie do łożysk tocnych, które są podporami sztywnymi, umożliwiają łożyskowanie bezkontaktowe.

W łożyskach magnetycznych pierwsze dwie postacie częstości własnych są postaciami przemieszczeniowymi. Dopiero trzecia postać drgań jest postacią giętną. Inaczej jest w przypadku łożysk tocnych. Tutaj pierwsza postać drgań jest już postacią giętną. Przykład ilustrujący omawiane zagadnienie zamieszczono na Rys. 2 (Gosiewski, Muszyńska, 1992).

Wynika z tego następujący wniosek: przy takiej samej średnicy łożyskowanego wirnika korzystniejsze jest stosowanie łożyskowania magnetycznego, niż toczonego, ponieważ mamy pierwsze dwie postacie drgań przemieszczeniowe, przy zbliżonych częstościach własnych wirnika.

Kolejną decyzją, którą musimy podjąć rozpoczynając projektowanie, jest wybór sposobu mocowania narzędzia. Najprostszym sposobem mocowania narzędzia jest mocowanie ręczne, z wykorzystaniem stożka ER i pierścienia zaciskowego. Dla dużych prędkości obrotowych wrzeciona zaleca się stosowanie oprawki typu HSK.

W konstrukcji przewidzieć można również system automatycznej zmiany narzędzia obróbczego. System taki jest o wiele bardziej skomplikowany od mocowania ręcznego narzędzia.



Rys. 2. Postacie drgań wirnika sztywno i podatnie zawieszony

Elementy składowe takiego mocowania mogą wprowadzać niewyrównoważenie wirnika i w efekcie prowadzić do dużych niestabilności podczas pracy z dużymi prędkościami.

Po uporaniu się z powyższymi problemami należy zająć się następnie rozważaniem problemów nadmiernego grzania się wrzeciona. W tym miejscu musimy zdecydować w jaki sposób zapewnimy chłodzenie układu. I tu koniecznie należy rozpatrzyć dwie możliwości:

- 1) występujący wzrost temperatury można pominąć, ponieważ równoważony będzie przez odpowiednie warunki panujące w środowisku pracy,
- 2) występujący w układzie wzrost temperatury wymaga zastosowania dodatkowego systemu chłodzenia.

O ile pierwsza możliwość wyklucza powyższe rozważanie, to druga powoduje dalsze komplikacje projektowe. Nie wdając się w szczegóły można założyć wiele rodzajów chłodzenia, począwszy od chłodzenia powietrznego, poprzez układy z cieczą chłodzącą, aż do chłodzenia łączącego wskazane możliwości.

Z ogólnie zaprezentowanych powyżej problemów konstrukcyjnych wynika, że konstruktor podejmując decyzję o zaprojektowaniu wysokoobrotowego elektrowrzeciona łożyskowanego magnetycznie napotyka na wiele różnych i skomplikowanych problemów technicznych. Niejednokrotnie duża część z nich zazębia się o różne dziedziny nauki. Rozwiązanie omawianych zagadnień jest możliwe tylko w zespole składającym się z inżynierów różnych specjalności, mogących się porozumieć na jednej płaszczyźnie w sprawach opracowania konstrukcji od strony mechanicznej, elektrycznej i informatycznej (sterowanie i diagnozowanie).

3. ZASTOSOWANIE ŁOŻYSK MAGNETYCZNYCH W MASZYNACH WIRNIKOWYCH

Początek rozwoju łożysk magnetycznych należy kojarzyć z pierwszym patentem Jesse Beams'a z University of Virginia w czasach drugiej wojny światowej (<http://www.phys.virginia.edu/History/Beams>). W latach 70 XX wieku opracowano pierwsze komercyjne konstrukcje łożysk magnetycznych. Jednym z pierwszych urządzeń z wirnikiem

łożyskowanym magnetycznie był turbokompresor firmy NOVA Gas Transmission.

Obecnie maszyny wirnikowe z łożyskami magnetycznymi są coraz częściej stosowane w różnych aplikacjach. Znanymi konstrukcjami wykorzystującymi układy magnetyczne są: silniki elektryczne (*Bearingless Magnetic Drives*), zasobniki energii kinetycznej (*Flywheels*), pompy, turbogeneratory, kompresory, turbiny (prędkości obrotowe do 120 tys. obr./min), satelity okołoziemskie, statki kosmiczne, pociągi magnetyczne (*Maglev train*), itd.

Zastosowanie łożyskowania magnetycznego daje wiele korzyści w stosunku do tradycyjnych metod łożyskowania (tocznego, czy ślizgowego). Do głównych zalet łożyskowania magnetycznego można zaliczyć (Gosiewski, Muszyńska, 1992; Gosiewski, Falkowski, 2003; Gosiewski i in., 2007):

- bezstykowe łożyskowanie sprawia, że brak jest mechanicznego zużycia elementów składowych,
- duża niezawodność rozwiązania,
- układ łożyskowany stale jest pod kontrolą komputera – pozwala to monitorować wał i ostrzegać przed możliwymi pęknięciami,
- układ wolny jest od smarowania olejami - rozwiązanie przyjazne dla środowiska,
- niski poziom emitowanych drgań w układzie oraz aktywne tłumienie drgań i zmiana sztywności układu przez odpowiednio dobrane sterowanie,
- sterowanie położeniem wirnika (wykorzystanie ruchu obrotowego i translacyjnego w obróbce precyzyjnej),
- praca dzięki redukcji sił niewyrównoważenia z bardzo dużymi prędkościami obrotowymi maszyn wirujących (do 120 tys. obr./min),
- samo pomiar sił, prędkości obrotowej wirnika oraz poziomu drgań i wibracji,
- możliwa diagnostyka i identyfikacja maszyny wirnikowej,
- łożyska magnetyczne mogą jednocześnie być traktowane jako aktuatory i sensory.

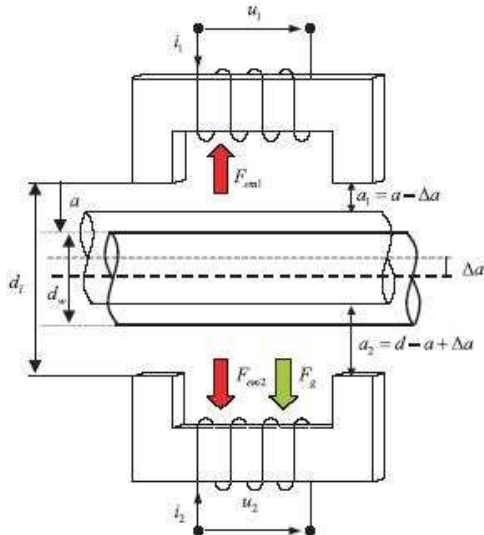
Do wad zastosowania magnetycznego sposobu łożyskowania zaliczyć można (Gosiewski, Muszyńska, 1992; Gosiewski, Falkowski, 2003; Gosiewski i in., 2007):

- duży koszt wykonania aplikacji w stosunku do tradycyjnych metod łożyskowania,
- wymagany jest układ sterowania w co najmniej jednej osi (często wymagane jest stosowanie wielokanałowych układów regulacji),
- konieczność stosowania wydajnych układów chłodzenia w szybkoobrotowych urządzeniach łożyskowanych magnetycznie,
- konieczność stosowania układów pomiarowych mierzących położenie wirnika w szczelinie powietrznej (nie dotyczy łożysk samopomiarowych z obserwatorem).

Analizując obecnie rozwijane konstrukcje łożysk magnetycznych w maszynach wirnikowych można uszeregować je w trzech grupach:

- łożyska osiowe (siły magnetyczne działają równolegle do osi wirnika);
- łożyska promieniowe (siły magnetyczne działają prostopadle do osi wirnika);
- łożyska skośne (pole magnetyczne działa pod kątem do osi wirnika).

Niezależnie od klasyfikacji łożyska wał pełni rolę zwory obwodu magnetycznego. Cewki elektromagnesów są wykorzystywane do generowania elektromagnetycznej siły punktu pracy i siły sterującej położeniem wirnika w szczelinie powietrznej (Rys. 3 – Piłat, 2002).



Rys. 3. Łożysko magnetyczne z klasycznym siłownikiem elektromechanicznym (Piłat, 2002)

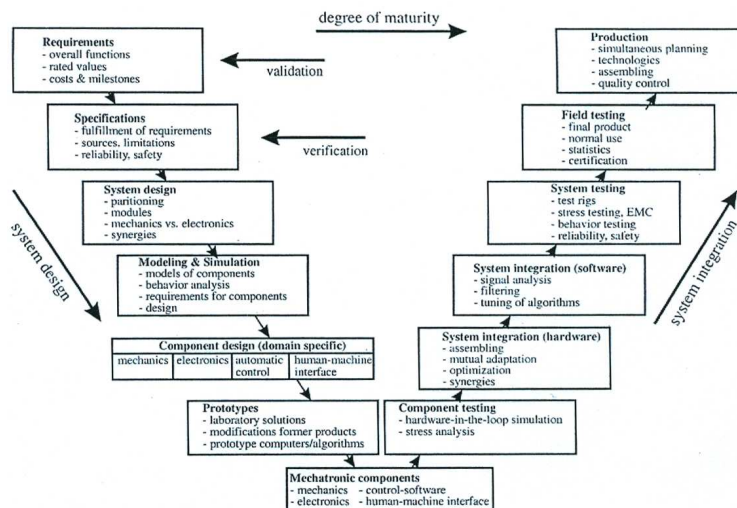
Przez cewki elektromagnesów przepływa prąd, który jest sumą algebraiczną prądu punktu pracy i prądu sterującego. Stąd cewki elektromagnesów, zasilane są prądem wypadkowym, który generuje wypadkowy strumień magnetyczny. Proces sumowania prądu punktu pracy i prądu sterowania realizowany jest przez układ sterowania łożyskiem magnetycznym.

4. ETAPY PROJEKTOWANIA MECHATRONICZNEGO WG R. ISERMANNA

Patrząc na nowoczesne elektrowrzeciono szybkoobrotowe można określić je mianem przykładowego urządzenia mechatronicznego. Do utworzenia takiej konstrukcji, konieczne jest przestrzeganie ogólnie przyjętej procedury projektowania systemów mechatronicznych. Pamiętać przy tym należy przede wszystkim, że istota projektowania mechatronicznego różni się od klasycznego projektowania maszyn. Zasadnicza różnica polega na tym, że projektowanie mechanicznego systemu wykonawczego oraz elektronicznego systemu informacyjnego, oraz pozostałych podsystemów musi przebiegać równolegle. Konieczne jest również zapewnienie przy tym płaszczyzn, które będą integrować projektowanie i modelowanie całego systemu. W tym celu korzystniej jest przewidzenie w zespole projektowym, poza specjalistami z dziedzin takich jak: mechanika, elektronika i elektrotechnika, automatyka, termodynamika, informatyka, itd. dobrze wykształconych inżynierów mechatroników. Ich zadaniem będzie tworzenie wspomnianej płaszczyzny porozumienia pomiędzy specjalistami z różnych, często odległych dziedzin.

Metodyka projektowania urządzeń i systemów mechatronicznych w najbardziej ogólnej, a przez to i uniwersalnej (użytecznej) formie została zaproponowana przez Rolf'a Isermanna w pracy (Isermann, 2009). W dalszej części pracy zostaną pokrótce przedstawione ogólne założenia metody „...harmonijnie integrującej różne techniki” (Gawrysiak, 2002).

W celu zapoznania się z istotą zaproponowanej metodyki, należy rozpatrzyć, tzw. V-model obrazujący istotę problemową, jakie należy rozwiązać, aby można byłoby wytworzyć konkurencyjny produkt mechatroniczny (Rys. 4 – Isermann, 2009).



Rys. 4. V – model prezentujący procedurę projektowania systemów mechatronicznych, wg R. Isermanna

Pierwszym etapem jest utworzenie specyfikacji, w której określone zostaną wymagania systemu. W przypadku wysokoobrotowych elektrowrzecion głównym celem jest utworzenie urządzenia, które ograniczyłoby koszty eksploatacji wynikające ze skróconej żywotności stosowanych w nich układów łożyskowania, przy jednoczesnym podniesieniu prędkości obrotowej, a tym samym wydajności systemu

obróbczego. Etap ten bezpośrednio związany jest z utworzeniem stosownej specyfikacji ze wstępnym zdefiniowaniem komponentów poszczególnych podsystemów, z pierwszym podziałem na moduły wykonawcze, z ograniczeniami charakterystyk roboczych, oraz zasadami bezpiecznego użytkowania. Etap ten zwieńczy utworzenie stosownej dokumentacji.

Kolejnym istotnym etapem jest projekt systemu mechatronicznego. W trakcie jego szczegółowo powinno się opracować moduły realizujące funkcje: mechaniczne, elektroenergetyczne, elektroniczne i informacyjne. Dokonany powinien być tu podział zadań pomiędzy wspomniane moduły elektroniczne, elektryczne, mechaniczne i informatyczne. Tu powinien też powstać projekt:

- układu zasilania poszczególnych komponentów i modułów,
- dodatkowych układów sensorycznych, wykonawczych, oraz magistral informacyjnych,
- architektury układów elektronicznych z określeniem mikroprocesorów, systemów okablowania i zabezpieczeń,
- architektury oprogramowania sterującego (wybór struktury, języka i kompilatora).

Te działania mają na celu otrzymanie efektu synergii poprzez integrację projektowanych systemów. Etap zwieńcza, podobnie jak wcześniej, opracowanie stosownej dokumentacji projektowej.

Po zakończeniu etapu konstruowania należy przeprowadzić czynności związane z modelowaniem i symulacją konstrukcji. W tym celu należy opracować modele matematyczne systemu mechatronicznego elektrowrzciona, używając nowoczesnych narzędzi inżynierskich do modelowania (np. MATLAB i Simulink, COMSOL Multiphysics, Solidworks/Inventor, Catia, ANSYS, VHDL itd.). Wykonanie wskazanych w tym etapie czynności zmierzać będzie do przeprowadzenia dalszej analizy, poprzez symulację komponentów i podsystemów. A tym etapie uwzględnienia się właściwości materiałowe, energetyczne (zasilanie) i informacyjne (charakterystyki układu sterowania).

Etap poprzedni przynieść powinien odpowiedź na wytyczne do opracowaniu projektu konstrukcji poszczególnych komponentów systemu mechatronicznego. Powstać powinien wtedy ogólny projekt uwzględniający założenia integracji komponentów i podsystemów: 1) w części mechanicznej z wykorzystaniem narzędzi CAD/CAE i FEM; 2) w części elektronicznej i elektrycznej z wykorzystaniem narzędzi VHDL, P-Spice; 3) w części związanej z opracowaniem układu sterowania z wykorzystaniem pakietu MATLAB. Na tym etapie konieczne jest również opracowanie projektu interfejsu człowiek maszyna, oraz projektu systemu zabezpieczeń.

Po zakończeniu omówionego wcześniej etapu można przejść do budowania prototypu urządzenia oraz wykonania badań laboratoryjnych. Etap ten pozwoli na wytworzenie prototypowych komponentów systemu mechatronicznego, tj.: mechanicznych, elektronicznych, sterowania i interfejsu człowiek-maszyna (HMI).

Po realizacji omówionych zdań można przejść do testowania komponentów, np. z wykorzystaniem metod szybkiego prototypowania układów sterowania (np. *hardware in the loop*), czy też analizy termicznej, wytrzymałościowej itd.

Po tym nastąpić musi integracja opracowanych podsystemów mechanicznego i elektronicznego, poprzez integrację sensorów, aktorów oraz magistral danych i zasilania, a także integracja podsystemu informatycznego wraz ze sterowaniem. Integracja dotyczyć ma zarówno części sprzętowej, jak i programowej.

Omówiony etap zwieńczony powinien być przeprowadzeniem różnego rodzaju kompleksowych, wielopłaszczyznowych testowań. Tu też powinna nastąpić walidacja otrzymanych

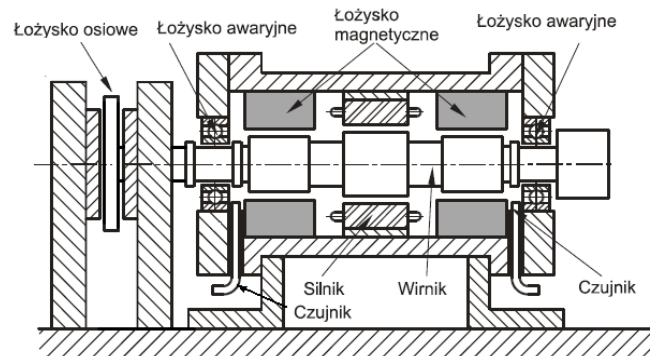
rezultatów z założeniami przyjętymi w specyfikacji projektu. W razie niespełnienia założonych wymagań nastąpić musi przeprojektowanie i iteracyjne powtórzenie procedur, aż do czasu spełnienia wstępnych założeń projektu.

W momencie kiedy uda się zrealizować opisane wyżej etapy, można ostatecznie opracować i wdrożyć do produkcji jednolite urządzenie mechatroniczne, jakim w naszym przypadku byłoby wysokoobrotowe elektrowrzciono frezarskie.

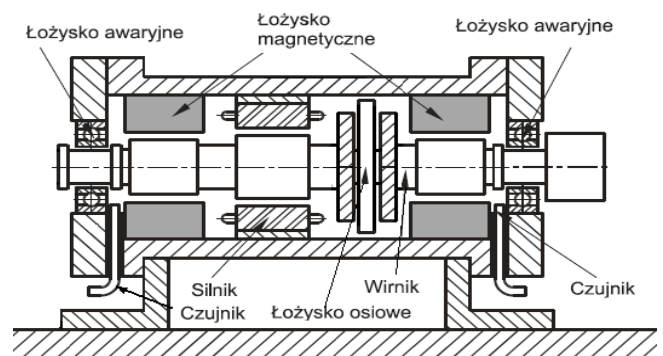
Analizując konieczne do realizacji działania w scharakteryzowanych wyżej etapach, proces projektowania mechatronicznego można podzielić na dwa główne nurty. Pierwszym z nich jest konstruowanie podsystemów. Drugim jest natomiast ich integracja.

5. KONCEPCJA ELEKTROWRZECIONA ŁOŻYSKOWANEGO MAGNETYCZNIE

Projektując elektrowrzciono szybkoobrotowe można wzorować się na istniejących rozwiązaniach z klasycznym łożyskowaniem. Zasadnicza różnica polega na tym, że we wrzecionie łożyskowanym magnetycznie pojawia się dodatkowe łożysko, które nie występuje w konstrukcji z łożyskami tocznymi, czy ślizgowymi. Mowa tutaj jest o łożysku magnetycznym osiowym, niezbędnym do zapewnienia odpowiedniej sztywności układu obróbczego.



Rys. 5. Koncepcja elektrowrzciona z zewnętrznym łożyskiem magnetycznym osiowym



Rys. 6. Koncepcja elektrowrzciona z wewnętrznym łożyskiem magnetycznym osiowym

Układ łożysk i elementów im towarzyszących, zasadniczo zmienia konstrukcję, jej gabaryty oraz strukturę wewnętrznego układu chłodzenia takiego elektrowrzciona.

W danej chwili można sprowadzić konstrukcję elektrowrzcion łożyskowanych magnetycznie do dwóch typów.

Pierwszym z nich jest typ z zewnątrznie umieszczonym łożyskiem magnetycznym (Rys. 5).

Drugim jest układ z wewnętrznym łożyskiem magnetycznym (Rys. 6). Drugi z opisywanych typów charakteryzuje się łatwiejszą formą konstrukcyjną. W nim tarcza do łożyska osiowego umieszczona jest w centralnej części wirnika. Przez to wirnik może być rozpatrywany jako model Jefcotta (Gosiewski, Muszyńska, 1992). W tym przypadku punkt ciężkości wirnika znajduje się blisko środka wału.

Inną widoczną różnicą jest obecność łożysk tocznych. Są one traktowane jako łożyska awaryjne. Ich znaczącą rolą jest zabezpieczenie stojana silnika i stojanów łożysk przed uderzeniem wirnika, w momencie kiedy wypadnie on z pola magnetycznego łożysk promieniowych. Łożyska te spełniają również funkcję „leżaka spoczynkowego” wału podczas przerw w pracy wrzeciona.

W konstrukcji elektrowrzeciona konieczne jest przewidywanie różnego rodzaju czujników położenia wału w łożyskach magnetycznych. Oczywistym staje się wybór czujników wiropędowych (lub podobnych), których działanie oparte jest na zjawisku indukcji magnetycznej. Konieczne staje się także odpowiednie dobranie bieźni dla takiego sensora. Musi ona być zrealizowana w taki sposób, aby mógł on bezpiecznie i z bardzo wysoką dokładnością pracować przy ekstremalnie szybkich prędkościach obrotowych układu (wielkość koniecznej szczeliny powietrznej wynosi 0.3-0.7 mm).

Wspomniana geometria wirnika elektrowrzeciona musi spełniać warunki zdefiniowane w rozdziale drugim pracy. Mówimy tutaj przede wszystkim o częstościach własnych. O ile możemy zaakceptować dwie częstości przemieszczeniowe, to pierwsza postać giętna musi się znajdować znacznie powyżej granicy założonej prędkości obrotowej. Na szczęście możemy to jeszcze regulować poprzez odpowiednio dobrany algorytm sterowania.

Dobraną napęd elektrowrzeciona, odpowiednio wyliczony wirnik i łożyska magnetyczne, muszą być sprzężone ze sobą komputerowym układem sterowania. W nim zaimplementowane zostaną odpowiednie prawa sterowania i regulacji, w taki sposób, aby można było spełnić założone wymagania procesowe.

6. PODSUMOWANIE

Wykorzystanie technologii High Speed Cutting stawia dużą przyszłość przed rozwiązaniami opartymi na elektrowrzecionach łożyskowanych magnetycznie. Szybsza obróbka, dokładniejsze wykończenie obrabianej powierzchni, sprawiają, że zwiększa się konkurencyjność przedstawianych rozwiązań, w stosunku do elektrowrzecion łożyskowanych klasycznie. Stąd też powstała potrzeba zajęcia się proponowaną tematyką i rozwiązania trudnych, ale też i bardzo istotnych problemów konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i wdrożeniowych.

Omówione w pracy zagadnienia mogą stanowić swego rodzaju studium problemów, z jakimi mogą się spotkać konstruktorzy wysokoobrotowych elektrowrzecion o niestandardowym łożyskowaniu.

LITERATURA

1. **Gawrysiak M.** (2002), *Etapy projektowania mechatronicznego według R. Isermanna*, materiały Warsztatów Projektowania Mechatronicznego, AGH, Kraków 7-8.05.2002, s.3-10, Kraków.
2. **Gosiewski Z.** (1989) *Aktywne sterowanie drganiami wirników*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Koszalin.
3. **Gosiewski Z.**, (2008) Control-oriented modelling and control of rotor vibration, *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 2 no. 2 21-38, Białystok.
4. **Gosiewski Z., Falkowski K.** (2003), *Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne*, Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa.
5. **Gosiewski Z., Muszyńska A.** (1992), *Dynamika maszyn wirnikowych*, Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie, Koszalin.
6. **Gosiewski Z., Sawicki J.T., Zabielski R.**, (2007) Sygnały pobudzające drgania maszyn wirnikowych na potrzeby diagnostyki pękania wałów, *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 2 no. 1 27-32, Białystok.
7. **Isermann R.** (2009), *Mechatronics System. Fundamentals*, SPRINGER.
8. **Krzemiński-Freda H.** (1989), *Łożyska toczne*, PWN, Warszawa
9. **Mazanek E.** (2005), *Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn - łożyska, sprzęgła i hamulce, przekładnie mechaniczne*, WNT, Warszawa.
10. **Osiński Z., Bajon W., Szucki T.** (1986), *Podstawy konstrukcji maszyn*, PWN, Warszawa.
11. **Piłat A.K.** (2002), *Sterowanie układami magnetycznej lewitacji* – rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza
12. **Tarnowski W.** (1997), *Podstawy projektowania technicznego*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
13. <http://pcws.ia.polsl.pl/bearings/index.php?action=teoria08> – ostatni dostęp 10.04.2010r.
14. <http://www.eunda.ch> - materiały katalogowe firmy Eunda – ostatni dostęp 10.04.2010r.
15. <http://www.phys.virginia.edu/History/Beams> – ostatni dostęp 10.04.2010r.

CHOSEN PROBLEMS OF DESIGN PROCEDURES OF HIGH SPEED MILLING ELECTROSPINDLE WITH NON -STANDARD BEARINGS

Abstract: The analysis of basic problems considering structure and design of milling electrospindles with magnetic bearings was performed in the paper. The attention was especially paid to problems related to construction and proper selection of components of the system being designed. Moreover, general structure and applications of magnetic bearings was discussed, and advantages as well as disadvantages of using magnetic bearings in rotary machinery were defined. On this basis, two conceptions of electrospindle with magnetic bearings were proposed. Additionally, the paper describes general design procedure of complex mechatronic systems, as which the modern high speed electrospindles with magnetic bearings can be classified, proposed by R. Isermann.

Pracę wykonano w ramach realizacji badań pracy statutowej nr S/WM/1/2008 Katedry Automatyki i Robotyki Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej.