

NOWE URZĄDZENIE DO PRZEMYSŁOWEGO POMIARU MOMENTU TARCIA ŁOŻYSK TOCZNYCH

S. Adamczak, R. Domagalski, M. Wrzochal, G. Piotrowicz, S. Wnuk

Abstrakt: Moment oporowy, obok drgań i trwałości należy do najistotniejszych parametrów określających jakość łożysk i ich przydatność do założonych aplikacji i pozwala na uzyskanie wielu informacji o łożysku, zarówno w zakresie jego konstrukcji, jak i jakości wykonania elementów współpracujących, czystości, czy określonych właściwości środka smarującego. Biorąc pod uwagę powszechność stosowania łożysk w motoryzacji, przemyśle maszynowym czy urządzeniach gospodarstwa domowego, bardzo istotna jest potrzeba zmniejszania tarcia w łożyskach tocznych, co jest kluczowym działaniem w walce o podniesienie efektywności, zmniejszenie zużycia energii i ochronę środowiska naturalnego. Artykuł przedstawia nowe przemysłowe urządzenie służące do kontroli momentu oporowego produkowanych łożysk tocznych, cechujące się przede wszystkim innowacyjną konstrukcją pozwalającą na badanie szerokiego zakresu wymiarowego łożysk, zadawania znacznych obciążeń osiowych, dodatkowy pomiar szerokości montażowej łożysk, a co najważniejsze posiada możliwość badania łożysk stożkowych. W niniejszym artykule zostały przedstawione ogólne założenia oraz konstrukcja mechaniczna nowego urządzenia do pomiaru momentu oporowego łożysk tocznych, a także weryfikacja wskazań tego urządzenia na podstawie procedury pomiarowej wykonanej w warunkach przemysłowych.

1. Moment oporowy jako ważny parametr oceny łożysk tocznego.

Pomimo tego, że straty tarcia w łożyskach tocznych są nieporównywalnie mniejsze niż w łożyskach ślizgowych, to mają one duży wpływ na sprawność maszyn i urządzeń mechanicznych. Straty tarcia w łożyskach tocznych są spowodowane między innymi odkształceniami na styku element toczny – bieżnia, tarcie wewnętrzny środek smarnego, poślizgiem i mikroślizgiem, tarcie koszyka i tarcie w uszczelnieniach [1,2].

Moment oporowy identyfikowany jest z przeciwstawianiem się łożyska podczas próby obrotu jednego pierścienia względem drugiego i jest uzależniony w mniejszym lub większym stopniu od następujących czynników:

- rodzaju, odmiany oraz wymiarów łożyska,
- wartości obciążenia i jego kierunku,
- prędkości obrotowej,
- rodzaju i właściwości środka smarującego oraz sposobu smarowania.

Istnieje możliwość teoretycznego oszacowania momentu oporowego, który jest sumą dwóch członów [3]:

$$M = M_0 + M_1 \quad (1)$$

- M_0 – człon równania niezależny od obciążenia, Nmm:

$$M_0 = f_0 \cdot 10^{-7} \cdot (v \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot d_m^3 \quad \text{dla} \quad v \cdot n \geq 2000$$

$$M_0 = f_0 \cdot 10^{-7} \cdot 160 \cdot d_m^3 \quad \text{dla} \quad v \cdot n \geq 2000 \quad (2)$$

gdzie: f_0 – współczynnik zależny od rodzaju łożyska i warunków smarowania, dobierany na podstawie tabel; v – lepkość kinematyczna oleju, $\text{mm}^{\frac{2}{s-1}}$; n – prędkość obrotowa, min^{-1} ; d_m – średnica podziałowa łożyska, mm.

- M_1 – człon równania zależny od obciążenia, Nmm:

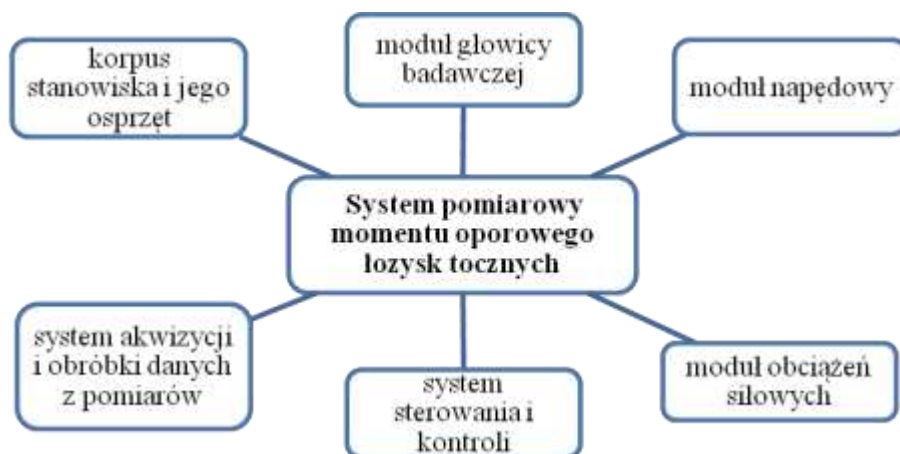
$$M_1 = f_1 \cdot P \cdot d_m \quad (3)$$

gdzie: P – obciążenie zastępcze, N ; f_1 – współczynnik zależny od rodzaju i wielkości łożyska oraz współczynnika dopuszczalnego obciążenia statycznego.

Badania nad momentem oporowym są szczególnie ważne dla węzłów, w których istotne są straty mocy. Tego typu prace podejmowane są w wielu ośrodkach naukowych, a także przez czołowych producentów łożysk. Koncentrują się one na wyodrębnianiu czynników powodujących wzrost oporów tarcia w łożysku i dążeniu do minimalizacji ich oddziaływania. Stwarza to jednocześnie potrzebę budowy urządzeń, które pozwalają precyzyjnie mierzyć moment tarcia w łożysku i jego subtelne zmiany w zależności od fluktuacji czynników wpływających na jego wzrost [4,5]. Przewodzą w tym producenci łożysk tocznych na których presja konkurencji wymusza dążenie do minimalizacji momentów oporowych w łożyskach. Wywiera to korzystny wpływ na obniżenie zapotrzebowania na energię niezbędną do napędu ułożyskowanych elementów obrotowych w różnego rodzaju maszynach, urządzeniach i pojazdach [6,7]. Często zachodzi konieczność zastosowania łożysk o małym lub kontrolowanym momencie tarcia, w urządzeniach produkowanych na niewielką skalę. Wówczas angażowanie ogromnego potencjału badawczego do prac nad zmniejszeniem tego momentu jest nieuzasadnione i zbyt kosztowne. Bardziej celowy jest wtedy dobór odpowiedniego łożyska z istniejących konstrukcji, w oparciu o pomiary momentu tarcia wykonane na dokładnym i wiarygodnym stanowisku pomiarowym [8,9]. Możliwość precyzyjnego pomiaru momentów oporowych występujących w łożyskach tocznych, a także znajomość zależności ich wartości od warunków w jakich pracują łożyska, w tym od takich czynników jak obroty i obciążenie, umożliwia projektantom maszyn i urządzeń optymalny dobór łożysk w określonych węzłach konstrukcyjnych, zaś producentom łożysk pozwala na ocenę ich jakości i wybór trafnych kierunków udoskonalania ich konstrukcji [10].

W dostępnych źródłach można znaleźć zarówno opisy stanowisk mierzących moment oporowy łożysk o przeznaczeniu typowo badawczym jak i oferty handlowe firm produkujących profesjonalny sprzęt pomiarowy [11,12,13,14,15,16,17,18,19]. Pomiarowe urządzenia przemysłowe jakimi dysponują firmy produkujące łożyska toczne są jednak rzadkim przedmiotem naukowo badawczych analiz.

Stanowiska badawcze służące do pomiarów momentów oporowych, w zależności od przeznaczenia badanych na nich obiektów przystosowane są do prowadzenia testów przy obciążeniach osiowych lub poprzecznych. Z uwagi na techniczne trudności w budowie urządzeń pozwalających na pomiar momentu przy równoczesnym zastosowaniu obydwu rodzajów obciążeń, urządzenia do tego rodzaju testów należąco rzadkości. Wszystkie urządzenia stosowane do pomiarów momentów oporowych w łożyskach tocznych posiadają cechy konstrukcyjne odpowiedzialne za realizację niezbędnych dla prowadzenia procesu badawczego funkcji stanowiska. Należą do nich moduły: głowicy badawczej, napędowy, obciążeń siłowych, system sterowania i kontroli, system akwizycji i obróbki danych z pomiarów, a także korpus stanowiska i jego osprzęt.



Rys.1. Cechy konstrukcyjne systemu pomiarowego służącego do badania momentu oporowego łożysk tocznych.

Głowica badawcza musi zapewnić badanemu łożysku powtarzalne warunki pracy. Jest to kryterium, bez spełnienia którego porównywanie wyników będzie niemiarodajne. Najbardziej niebezpieczne dla węzła z badanym łożyskiem jest wprowadzanie oddziaływań, wykraczających poza mierzalne wartości obciążeń w kierunkach kontrolowanych przez system nadzorujący proces badawczy, a szczególnie sił mogących oddziaływać w sposób powodujący przekaszanie pierścieni łożyskowych względem siebie. W swoich rozwiązaniach producenci sprzętu starają się zapewnić możliwie idealną współosiowość i/lub prostopadłość współpracujących podzespołów, a tam gdzie to możliwe, wprowadzić margines elastyczności połączeń, pozwalający zapobiec przeszywnieniu układu. Kluczowym elementem konstrukcji zespołu głowicy, jest sposób pomiaru wielkości momentu oporowego generowanego przez badane łożysko. Szczególnie że wymagane jest aby pomiaru dokonywać przy różnych obciążeniach. Zespół przekazujący wartość momentu do systemu pomiarowego musi to robić bezstratnie, lub przynajmniej z kontrolowaną stratą, uwzględnianą w uzyskanym wyniku.

Napęd wrzeciona momentomierza powinien dokładnie odtwarzać zadane przez system sterowania obroty i utrzymywać je stabilnie podczas pomiaru. Producenci urządzeń do pomiarów momentu obrotowego przeważnie stosują jeden z dwóch systemów przekazania napędu na wrzeciono i głowicę badawczą. Część rozwiązań preferuje umieszczenie silnika w linii z wrzecionem, a pozostałe przekazują napęd przez przekładnię pasową. Każde z rozwiązań ma swoje wady i zalety. Zaletą umieszczenia silnika w osi wrzeciona jest możliwość bezpośredniego odczytu obrotów badanego łożyska. Szczególnie jeśli jako jednostkę napędową zastosowano serwonapęd. Wprowadzenie przekładni pasowej, szczególnie w aplikacjach wymagających niedużych obrotów i przeznaczonych do pomiarów momentów o dużych wartościach, pozwala uzyskać wymagany moment obrotowy przy mniejszych mocach silnika i zmniejsza znacząco wpływ jego drgań własnych na wrzeciono, a w konsekwencji na głowicę pomiarową. Dobór silnika pozostaje w zależności od zakładanego systemu sterowania obrotami wrzeciona.

Obciążenie badawcze łożyska podczas testu, realizowane są w zależności od jego wielkości przez system grawitacyjny, pneumatyczny lub hydrauliczny. Konstrukcja zespołu obciążeń ma zapewnić przekazanie na badane łożysko siły osiowej (lub promieniowej) o wartości zadanej przez system sterowania procesem badawczym. Stosowane są różne konstrukcje systemów obciążeń, a ich wybór uzależniony jest głównie od wielkości używanych sił. W przypadku stosowania w procesie badawczym dużych obciążeń osiowych, siła jest na ogół przekazywana na testowane łożysko za pośrednictwem wrzeciona. W przypadku stosowania obciążeń poprzecznych, obciążenie przekazywane jest na łożysko przez jego obudowę związaną z pierścieniem zewnętrznym. Systemy grawitacyjne można stosować dla ograniczonego zakresu

obciążeń. Ich zaletą jest prosta konstrukcja i duża powtarzalność realizacji zadanych parametrów. Wadą natomiast kłopotliwa zmiana wartości obciążeń i stosunkowo ograniczony ich zakres. Systemy oparte na siłownikach pneumatycznych są znacznie wygodniejsze w sterowaniu, ale wymagają bardziej skomplikowanego wyposażenia i odpowiedniej infrastruktury. Rzadziej stosowane systemy hydrauliczne, wymagają stacji zasilającej i są wybierane w przypadku stosowania bardzo dużych obciążeń.

Zespół sterowania, kontroli i monitoringu ma zapewnić bezpieczną pracę urządzenia, nadzorując przebieg wszystkich procesów przez nie realizowanych. Z punktu widzenia prowadzonego przez projektowane stanowisko procesu badawczego, szczególnie istotne jest utrzymanie i rejestracja parametrów określających warunki w jakich realizowane są pomiary. Należą do nich obroty łożyska, wielkość zastosowanego obciążenia. Zespół sterowania odpowiedzialny za realizację procesu badawczego, musi efektywnie współpracować z oprogramowaniem, wymieniając z nim informacje z monitoringu, czujników pomiarowych i z oprogramowaniem sterowników. Musi on również prawidłowo reagować na polecenia wynikające z wysyłanych do wykonania procedur. Zespół ten jest częściowo rozmieszczony bezpośrednio na stanowisku (czujniki i wzmacniacze), a częściowo w szafie sterującej wyposażonej w panel do jej obsługi, razem z elementami zasilania urządzenia.

Oprogramowanie badawcze ma realizować dwie podstawowe funkcje. Jedną z nich jest przekazywanie do wykonania systemowi sterowania, kontroli i monitoringu procedur niezbędnych do realizacji programu badawczego, jego nadzorowanie i reagowanie na nieprawidłowości poprzez ich korektę lub zatrzymanie stanowiska. Drugą zaś, kolekcjonowanie informacji z prowadzonych pomiarów, ich analizowanie, opracowywanie i wizualizację wyników oraz przygotowywanie raportów z badań.

Jak wszystkie urządzenia pomiarowe, momentomierz powinien być wyposażony w stabilny korpus, wyposażony w stopki antywibracyjne. W korpusie rozmieszczone są elementy osprzętu, takie jak systemy kondycjonowania mediów, elementy zasilania, sterowania i systemów pomiarowych.

2. Konstrukcja nowego urządzenia do pomiaru momentu oporowego łożysk

Urządzenie będące przedmiotem niniejszego artykułu jest jednym z ośmiu systemów badawczych zbudowanych w Fabryce Łożysk Toczyńskich - Kraśnik S.A. w ramach projektu pod tytułem "Utworzenie Centrum B+R w FŁT-Kraśnik S.A.". Wdrożone nowe praktyki pomiarowe pozwalają na znaczne polepszenie jakości produkowanych łożysk oraz produkowanie łożysk o niestandardowej budowie, zwiększając możliwości konstrukcyjne maszyn i urządzeń mechanicznych. Nowe urządzenie pozwala kontrolować moment oporowy - parametr który nie był badany w Fabryce Łożysk Toczyńskich w Kraśniku, gdyż do tej pory nie był przedmiotem warunków odbiorczych łożysk toczyńskich. Nowe urządzenie pozwala kontrolować moment oporowy łożysk w dowolnej konfiguracji obciążenia osiowego i prędkości obrotowej spełniając tym samym wymogi klientów Fabryki. Urządzenie bada dodatkowo zależność wysokości montażowej łożysk stożkowych w funkcji obciążenia, co jest koncepcją innowacyjną dla tego typu klasy przemysłowych urządzeń. Wykonane prace projektowe pozwoliły na wyłonienie 5 oryginalnych rozwiązań konstrukcyjnych. Rozwiązania te dotyczą zarówno całego stanowiska badawczego jak i pojedynczych jego mechanizmów mających charakter uniwersalny, które mogą być zastosowane w innych urządzeniach o podobnej budowie. Innowacją prezentowanego stanowiska badawczego jest unikalna konstrukcja (niespotykana w urządzeniach tego typu), która przede wszystkim pozwala na:

- test łożysk stożkowych (podobne urządzenia są stosowane głównie do łożysk kulkowych),
- zwiększenie liczby i zakresu parametrów testowych,
- uzyskanie wyższej dokładności pomiaru.

Należy również nadmienić iż prace nad momentem oporowym łożysk są istotne w kwestii ochrony środowiska, gdyż dążenie do minimalizacji oporów tarcia zwiększa ogólną sprawność urządzeń, zmniejszając tym samym emisję CO₂ do atmosfery.

Nowe urządzenie służące do pomiaru momentów oporowych łożysk stożkowych opiera się na kilku płytach, montowanych na czterech kolumnach. Niektóre z tych płyt są mocowane za pomocą bloków zaciskowych, podczas gdy inne poruszają się na łożyskach liniowych. Siłownik pneumatyczny umieszczony na stałej płycie górnej porusza modułem, w którym znajduje się wrzeciono i napęd. Możliwość tego ruchu zapewnia sprzężenie i rozłączenie napędu z oprzyrządowaniem testowym. Pod ruchomą płytą ze stołem pneumatycznym znajduje się siłomierz mierzący obciążenie łożyska. Centralną częścią tego urządzenia jest stół obrotowy łożyskowany powietrznie. Takie rozwiązanie zapewnia obrót blatu ze stratami zniwelowanymi do minimum. Do blatu stołu przymocowany jest stolik pomiarowy. Mechanizm umieszczony obok stołu pneumatycznego zawiera dwa przeciwstawne czujniki siły. Pomiedzy nimi porusza się listwa dociskowa, która jest sztywno połączona ze stołem pomiarowym. Badane łożysko montuje się w specjalnym oprzyrządowaniu badawczym przeznaczonym dla danego typu łożyska. Pierścień wewnętrzny osadzony jest w dolnej części oprzyrządowania, która jest połączona ze stołem pomiarowym, natomiast pierścień zewnętrzny osadzony jest w górnej części oprzyrządowania, która podczas próby jest sprzęgnięta z wrzecionem.



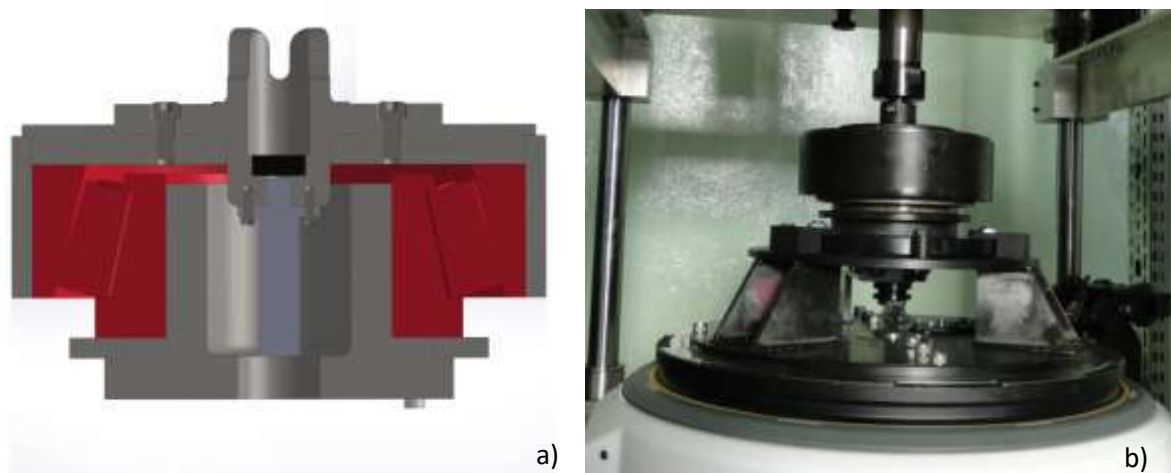
*Rys. 2. Nowe stanowisko do pomiaru momentu oporowego łożysk tocznych.
a) model wirtualny, b) prototyp wdrażany w Fabryce Łożysk Toczących w Kraśniku.*

Obrót pierścienia zewnętrznego (napędzanego z zewnątrz) powoduje, że elementy toczne toczą się po bieżniach, a tarcie wewnątrz łożyska powoduje, że pierścień wewnętrzny obraca się swobodnie próbując wprawić w ruch obrotowy cały stół pomiarowy. Listwa naciskowa dociska czujnik z siłą proporcjonalną do oporu tarcia wywołanego pracą łożyska. Większy opór badanego łożyska (np. słaba jakość wykonania lub wada fabryczna) powoduje, że większa siła jest rejestrowana na czujnikach siły. Krytyczny poziom

momentów tarcia generowanych przez dany typ łożyska jest określony przez wewnętrzne normy firmy lub narzucony przez klienta.

2.1 Zespół stołu pomiarowego

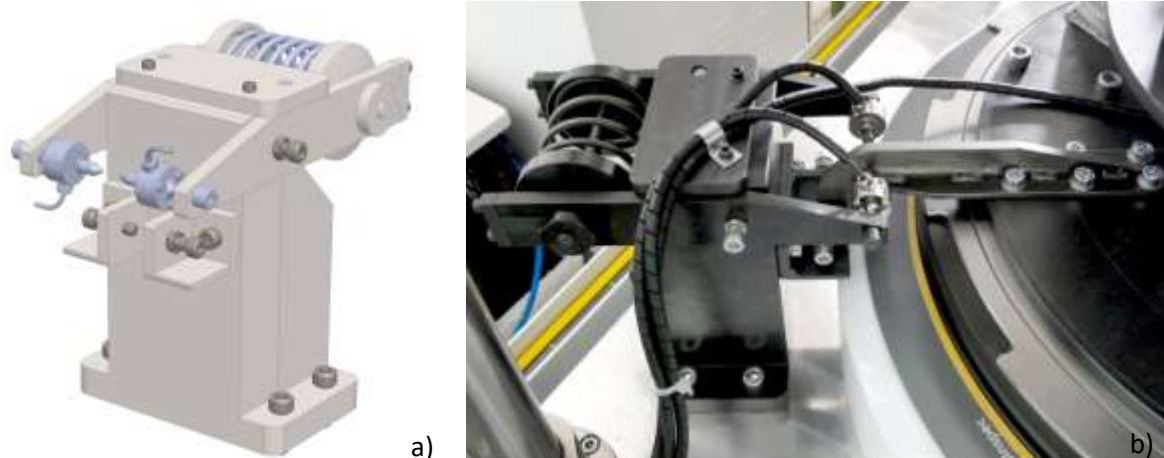
Zespół stołu pomiarowego jest centralną częścią urządzenia, w której odbywa się właściwy pomiar badanego obiektu. Płyta na której umieszczony jest zespół stołu pomiarowego, należy do grupy ruchomych i jest osadzona na kolumnach za pośrednictwem kulkowych łożysk liniowych, zapewniających jej możliwość swobodnego przemieszczania się w kierunku pionowym. Możliwość taka jest nieodzownym warunkiem funkcjonowania urządzenia, ponieważ wywierany przez nią nacisk pozwala na pomiar siły oddziaływującej na badane łożysko. Stół pneumatyczny, na którym mocowany jest zespół stołu pomiarowego z badanym łożyskiem i niezbędnym oprzyrządowaniem, ma za zadanie nie stawiania oporu związanemu z nim podczas testu pierścieniowi wewnętrznemu badanego łożyska, pozwalając tym samym na bezstratny pomiar momentu oporowego, generowanego przez obciążane dużą siłą osiową łożysko, na którym za pośrednictwem pierścienia zewnętrznego wymuszany jest obrót z wymaganą prędkością obrotową. Na stole pneumatycznym zamontowany jest stelaż pozwalający na wyosiowanie i wypoziomowanie zespołu stołu pomiarowego w stosunku do systemu obciążeniowo – napędowego. Ze stelażem połączona jest za pomocą stalowego kołka dolna część oprzyrządowania badawczego mająca bezpośredni kontakt z pierścieniem wewnętrznym badanego łożyska. Pierścień zewnętrzny łożyska umieszczony jest w górnej części oprzyrządowania, które podczas pomiaru jest sprzężone z napędem. Dzięki takiej budowie obrót pierścienia zewnętrznego poprzez opór powstały w łożysku, powoduje samoistny ruch obrotowy stołu pneumatycznego. Stół przystosowano do pracy ze znacznym zakresem możliwych do testowania łożysk. Zespół stołu pomiarowego wraz z modelem oprzyrządowania badawczego znajduje się na rysunku 3.



Rys. 3. a)przekrój złożenia oprzyrządowania pomiarowego, b) zespół stołu pomiarowego.

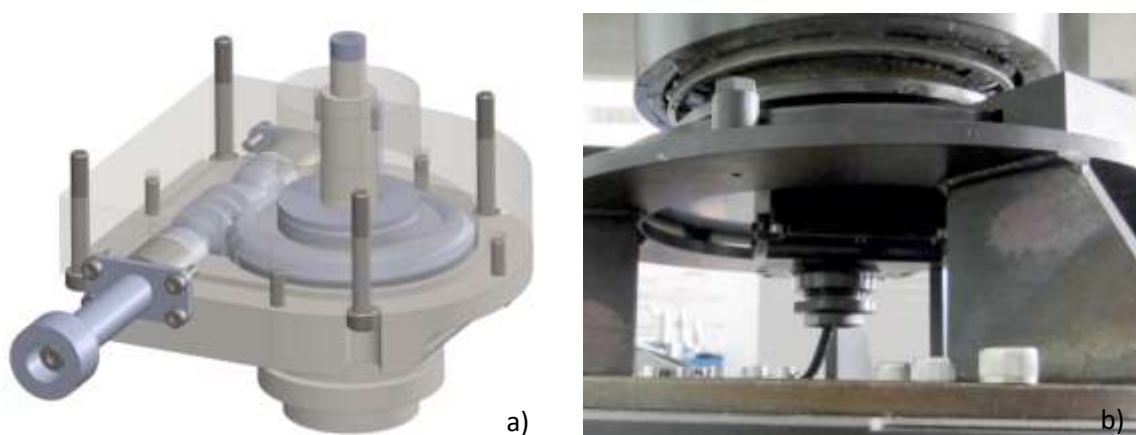
Poza zespołem stołu pomiarowego na tej samej płycie zainstalowany jest podzespół pomiaru momentu oporowego, pozwalający na realizację najistotniejszego dla tego urządzenia zadania. Podzespół ten przedstawiono na rysunku 4. Pomiar momentu oporowego dokonywany jest za pomocą dwóch przeciwsośnie zainstalowanych siłomierzy, ponieważ umożliwia to dokonywanie pomiarów przy obydwu kierunkach obrotów badanego łożyska. Nacisku na siłomierze dokonuje zamocowana do podstawy stołu pomiarowego listwa naciskowa. Wywołuje ona nacisk na jeden z siłomierzy (zależnie od kierunku obrotów łożyska) z siłą proporcjonalną do oporu stawianego przez testowane łożysko. Wartość tej siły, pomnożona przez długość ramienia, którą stanowi odległość od punktu styku siłomierza z listwą pomiarową do osi obrotu stołu pneumatycznego, jest wielkością określającą moment oporowy badanego łożyska. Konstrukcja podzespołu zabezpiecza siłomierze przed przeciążeniem, które mogłyby je uszkodzić w przypadku

osiągnięcia przez obiekt badany większego niż maksymalnie zakładany momentu oporowego (na przykład w wyniku zatarcia łożyska). Chroni przed tym system uchylnych ramion na których zamontowane są siłomierze oraz nastawne odbojnice, ograniczające możliwy do wykonania ruch listwy naciskowej. Wielkość maksymalnego docisku, a tym samym obciążenia siłomierzy, reguluje ustawienie sprężyny chroniącej przed przeciążeniem.



Rys. 4. a) model zespołu pomiarowego momentu, b) pomiar momentu oporowego

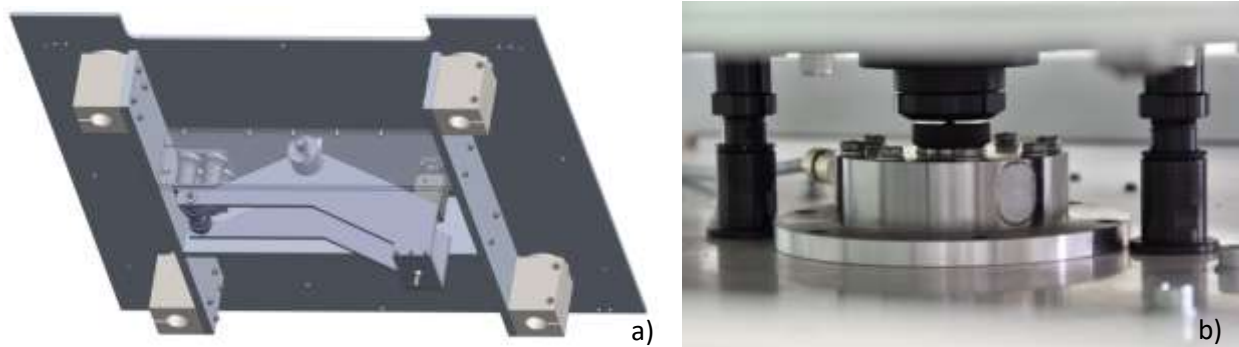
Dodatkową funkcją urządzenia jest możliwość pomiaru zmiany szerokości łożyska stożkowego wywołanej przyłożonym obciążeniem (przesunięcie między pierścieniami łożyska w kierunku osiowym). Podzespołowi pozycjonowania czujnika przemieszczenia zainstalowany w strefie badawczej pozwala obserwować zmiany wysokości łożyska w funkcji obciążenia osiowego w trakcie testu. Podzespół ten jest montowany do płyty stelaża i ma konstrukcyjnie zapewnione utrzymanie się w jej osi. Jego walcowa część pasowana jest w otworze osiującym i stanowi bazę do mocowania oprzyrządowania badawczego z łożyskiem. Podzespół przedstawiono na rysunku 5. Konstrukcja podzespołu oparta jest na czujniku wiroprowadowym i pozwala na dokonywanie pomiarów z dokładnością do $1\ \mu\text{m}$. Za precyzyjne ustawienie czujnika, odpowiada przekładnia ślimakowa, napędzająca śrubę nośną czujnika. W głowce śruby nośnej oprawiony jest czujnik. Luzy osiowe ślimacznicy oraz luzy na gwincie śruby kasowane są przy pomocy sprężyn. Na jeden pełny obrót pokrętki ślimaka, czujnik przemieszcza się w pionie około $0,2\ \text{mm}$. Przełożenie takie pozwala na precyzyjne zerowanie położenia czujnika względem pierścienia zewnętrznego łożyska, przed rozpoczęciem testu. Zespół związany jest sztywno z dolną częścią oprzyrządowania badawczego natomiast wykrywa przemieszczenie wału związanego z górną częścią oprzyrządowania badawczego. Wał pomiarowy którego formalnie przemieszczenie jest mierzone widoczny jest na przekroju na rysunku 3a.



Rys.5. a) model zespołu pomiaru wysokości montażowej. b) usytuowanie zespołu pomiaru wysokości montażowej.

2.2 Zespół dźwigni odciążającej siłomierz

Płyta znajdująca się pod płytą z układem pomiarowym jest mocowana na stałe na kolumnach momentomierza za pomocą kostek zaciskowych, do których mocowana jest za pośrednictwem tulei z kołnierzem. Tuleje muszą zapewnić współosiowość otworu i średnicy zewnętrznej, aby nie wprowadzać błędów w rozstawie otworów wszystkich płyt w konstrukcji urządzenia. Na tej płycie zainstalowany jest precyzyjny siłomierz, którego zadaniem jest pomiar obciążenia badawczego realizowanego podczas testu. Na siłomierz naciska kula zamknięta w tulei mającej otwór stożkowy. Tuleja ta jest przykręcona pod spodem ruchomej płyty z całym układem pomiarowym.

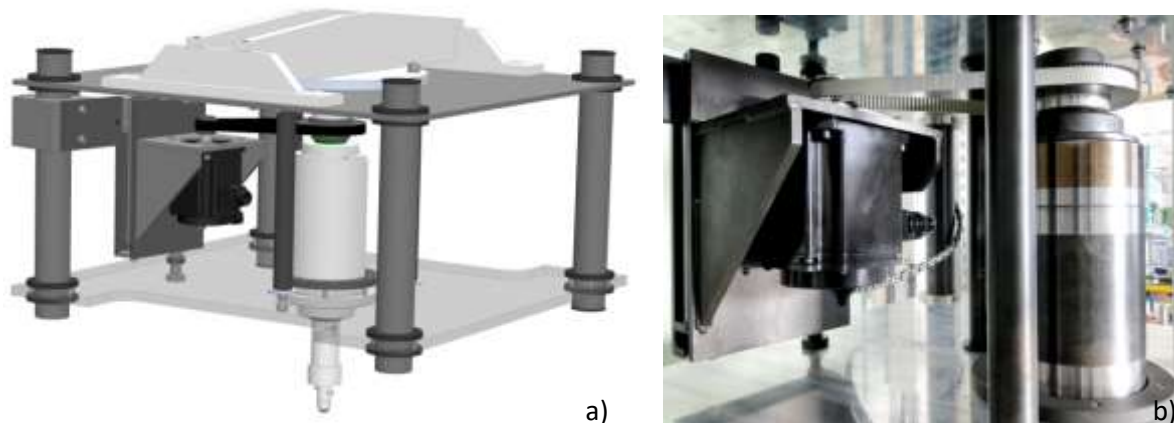


Rys.6. a) model dźwigni odciążającej siłomierz. b) pomiar siły osiowej

Pod płytą znajduje się mechanizm dźwigniowy który ma za zadanie odciążać siłomierz podczas przerw między testami oraz gdy urządzenie nie jest w ogóle zasilane. Podzespół ten skonstruowano w sposób, umożliwiający uniesienie stołu z nad siłomierza przy pomocy pakietu sprężyn, które za pośrednictwem mimośrodów i dwóch trzpieni wywierają na niego nacisk z odpowiednią siłą. W okresach pracy urządzenia, siłownik pneumatyczny przeciwdziała naciskowi sprężyn i opuszcza trzpień, uwalniając stół pomiarowy i pozwalając na realizację pomiaru nacisku. Dzięki dużemu przełożeniu, pakiet sprężyn i siłownik działają w zakresie sił dziesięciokrotnie mniejszych niż masa stołu z oprzyrządowaniem badawczym. Zastosowanie takiego mechanizmu zwiększa trwałość i sprawność techniczną siłomierza.

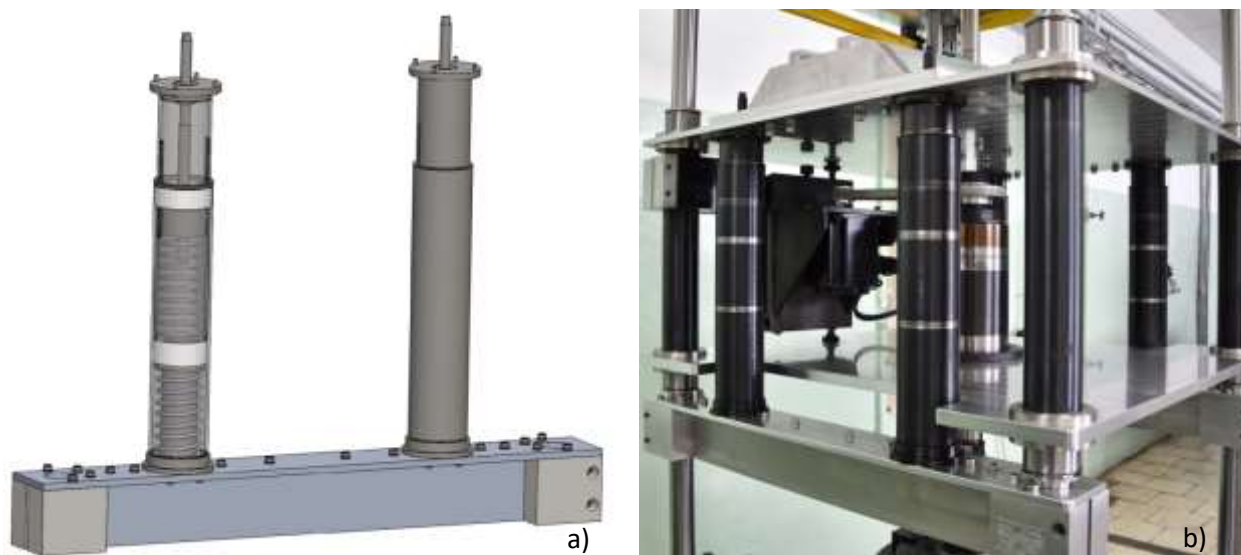
2.3 Zespół przenoszenia napędu i obciążenia

Zespół przenoszenia napędu i obciążenia pełni funkcję zarówno kompletnego zestawu napędowego, jak również pośredniego przenoszenia obciążenia generowanego przez siłownik pneumatyczny. Zespół ten zbudowany w formie klatki, zawiera napęd składający się z wrzeciona wyposażonego w silnik i przekładnię pasową, stanowiąc jednocześnie element pośredni przenoszący na badane łożysko obciążenie wywierane przez siłownik pneumatyczny. Po kolumnach zespół prowadzą cztery rury. Łączą one wspólnie z trzema słupkami przenoszenia obciążenia dwie płyty nośne, stanowiąc jeden zwarty podzespół. Rury łożyskowane są na czterech parach łożysk kulkowych liniowych. Bardzo istotnymi parametrami decydującymi o poprawności funkcjonowania tego zespołu są równa długość słupków i dystansów zapewnianych przez rury łożyskowane oraz jak w przypadku wszystkich sześciu płyt nośnych, rozstaw otworów prowadzących na kolumny.



Rys.7. a) model zespołu przenoszenia napędu i obciążenia. b) napęd wraz z wrzecionem

Zespół napędowy w całości montowany jest w zespole przenoszenia napędu i obciążenia. Wrzeciono, zamontowane w centrum dolnej płyty zestawu, wprowadzane jest od dołu i przykręcane za pośrednictwem nakładanego od góry pierścienia. Serwomotor zawieszony jest na osadzonym obrotowo wsporniku, posiadającym szeroki zakres możliwości dopasowania jego położenia w stosunku do wrzeciona. Napinacz zamontowany jest na rurze łożyskowej, za pomocą kostki zaciskowej. Na rysunku nr 7 przedstawiono model klatki oraz wrzeciono wraz napędem.



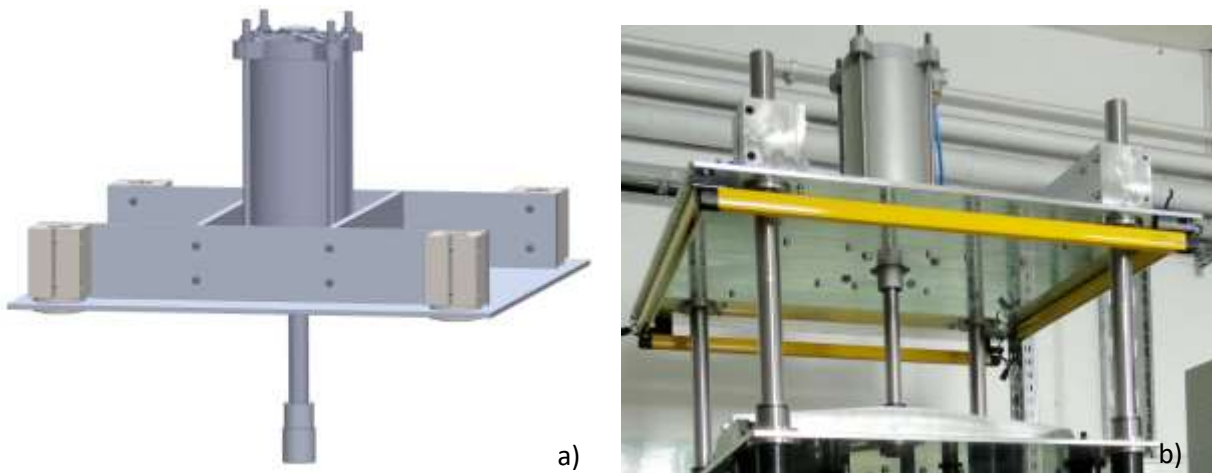
Rys.8. Model amortyzatorów. Zawieszenie zespołu przenoszenia napędu i obciążenia na amortyzatorach.

Dla zapewnienia bezpieczeństwa, klatka tworząca zespół przenoszenia napędu i obciążenia zawieszona jest na zespole odciążającym, który podnosi go w górę i utrzymuje w bezpiecznym położeniu, w każdej sytuacji awaryjnej (brak energii, ciśnienia, przeciążenia systemu pomiarowego czy wyłączenia awaryjnego przez obsługę). Ogólny widok zespołu przedstawiono na rysunku nr 8. Zespół odciążający, składa się z pakietu czterech amortyzatorów sprężynowych, specjalnej konstrukcji. Jest on równocześnie podwieszony do zespołu obciążenia, który ma za zadanie realizować zadawane przez program badawczy obciążenia badanego łożyska. Zespół odciążający oprócz zapewnienie bezpieczeństwa pracy ma za zadanie utrzymywać wrzeciono na poziomie pozwalającym prowadzić montaż i demontaż próbek łożysk z oprzyrządowaniem do prowadzenia badań oraz wysprzęgłać pakiet osprzętu z próbką po zakończeniu testu lub w przypadkach awaryjnych.

2.4 Zespół obciążenia

Ostatnia, górna płyta nośna jest podobnie jak dwie pierwsze, dolne płyty nośne, na stałe połączona z kolumnami za pomocą kostek zaciskowych. Zamyka ona od góry całą konstrukcję urządzenia, stanowiąc równocześnie platformę do montażu siłownika pneumatycznego i tworząc z nim zespół obciążeń osiowych. Zespół ten sprzężony jest z konstrukcją systemu przenoszenia napędu w sposób zapewniający nacisk dokładnie w osi urządzenia. Na rysunku 9 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne zespołu. Aby sprzężyć wrzeczono z układem pomiarowym i zadać wymaganą siłę, siłownik znajdujący się na górnej płycie musi na pierw pokonać opór sprężyn amortyzatorów.

Na rysunku 9b można dodatkowo zauważyć łańcuch paneli kurtyn świetlnych których odpowiednie pary są przymocowane do głównej płyty zespołu dźwigni odciążającej siłomierz. Przerwanie wiązki niewidzialnego światła przepływającego pomiędzy parami paneli skutkuje automatycznym zatrzymaniem pracy górnego siłownika i uniesieniem się zespołu przenoszenia napędu i obciążenia w sposób mechaniczny.



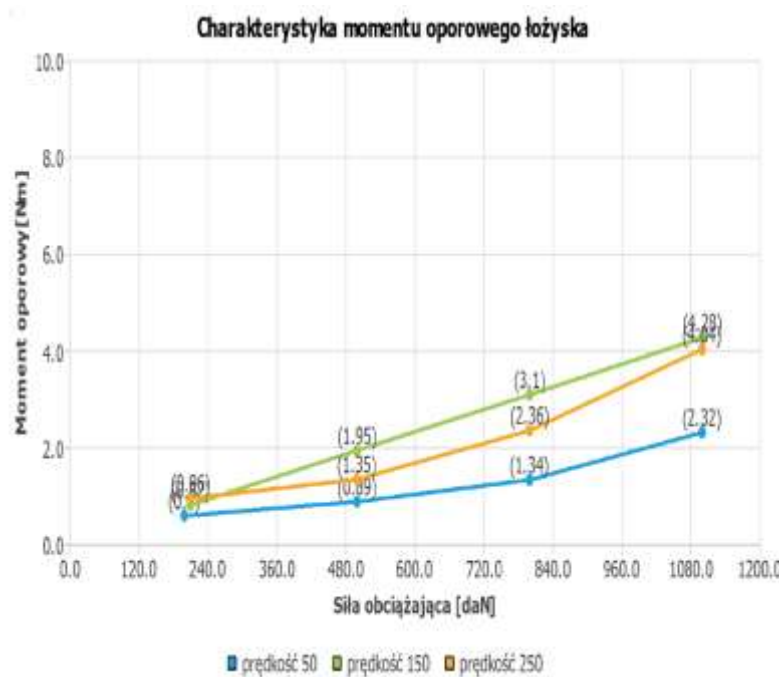
Rys.9. Model zespołu obciążenia. Usytuowanie płyty górnej wraz z kurtynami świetlnymi

3. Testy wstępne oraz przygotowanie programu badań

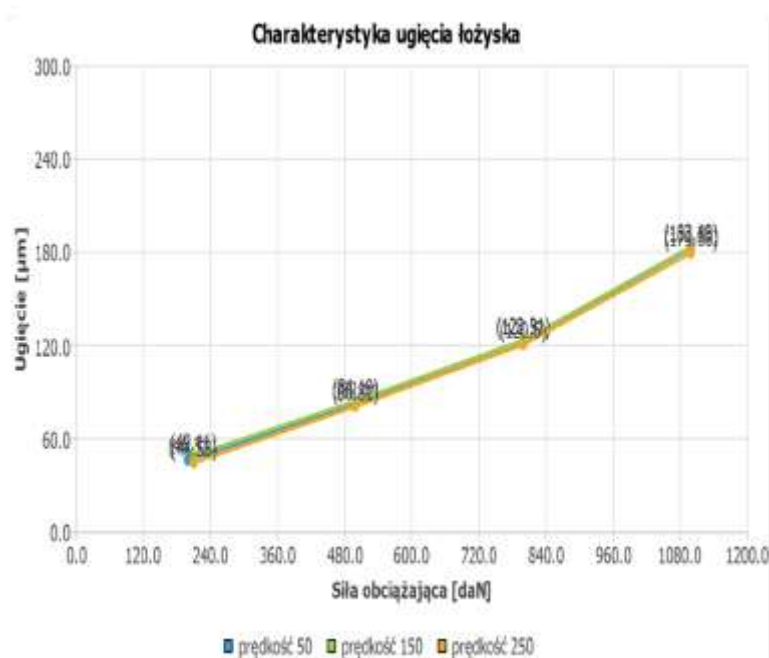
Po pierwszym uruchomieniu stanowiska wykonano testy wstępne w ramach których przeprowadzono następujące czynności:

- Dokonano kalibracji czujników masy, siły i przemieszczenia.
- Dokonano korekt ustawienia wysokości kostek blokujących płyty w celu zapewnienia jak największej przestrzeni na wymianę oprzyrządowania badawczego przy jednoczesnym wykorzystaniu jak największego przemieszczenia pracy górnego siłownika.
- Sprawdzone stopień równoległości nieruchomych płyt oraz stopień koncentryczności otworów centralnych (w płytach, stole pomiarowym, wale wrzeczona itd.) stosując współrzędnościową technikę pomiarową (mobilne ramię pomiarowe).
- Sprawdzone poprawność funkcjonowania zespołów mechanicznych urządzenia.
- Przetestowano reakcję zespołów i podzespołów wykonawczych na polecenia układów sterowania wysyłane przez software oraz zadawane bezpośrednio z panelu sterowania.
- Sprawdzone poprawność reakcji systemów bezpieczeństwa na symulowane zagrożenia.
- Sprawdzone reakcję wskazań czujników pomiarowych na zadawane obciążenia.

Wykonane wyżej czynności wykazały, że zbudowane stanowisko do pomiaru momentów oporowych łożysk tocznych spełnia założenia początkowe oraz stawiane mu ogólne wymagania dla tego typu klasy urządzeń. A co najbardziej istotne, nowe urządzenie jest w stanie mierzyć nowe konstrukcje łożysk, do których dotychczas stosowane urządzenia były nieprzystosowane. Ponadto wykonano szereg badań łożysk stożkowych mających na celu ogólną ocenę właściwości metrologicznych zbudowanego stanowiska a także powtarzalność uzyskiwanych rezultatów. Sposób przedstawienia wyników pokazanych na rysunkach 10 i 11 jest zasadny do ich prezentacji w raporcie z przeprowadzonego testu, ale niewiele wnosi do ich analizy w aspekcie oceny powtarzalności rezultatów uzyskiwanych na określonym urządzeniu. Przedstawia bowiem wyłącznie zachowanie się konkretnego łożyska w reakcji na zmieniające się oddziaływania zewnętrzne. Aby zbadać powtarzalność procesu badawczego, wyniki zestawiono w taki sposób, aby widoczny był trend w ich zachowaniu, w funkcji kolejnych pomiarów.



Rys. 10. Wykres zmian momentu oporowego w funkcji obciążenia dla różnych prędkości obrotowych



Rys. 11 Wykres zmian wysokości łożyska w funkcji obciążenia dla różnych prędkości obrotowych

Wykresy przedstawiające kolejne wyniki pomiarów momentów oporowych uzyskiwane dla tych samych parametrów znajdują się na rysunkach o numerach 12 – 14. Wykresy przedstawiające kolejne wyniki pomiarów wysokości montażowej uzyskiwane dla tych samych parametrów, znajdują się na rysunkach o numerach 15 – 17.

Zadaniem programu badań było ustalenie prognozy poziomu wartości wyników uzyskiwanych w testach. Dlatego program przygotowano dla łożyska średniej wielkości, które może być testowane w warunkach maksymalnych obciążeń możliwych do realizacji na stanowisku. Weryfikację poprawności otrzymywanych rezultatów przeprowadzono na podstawie analizy serii pomiarów momentu oporowego łożysk stożkowych typu 33213. Program badań przedstawiono poniżej:

- Do badań wytypowano 5 łożysk oznaczonych jako: 10, 20, 3A, 4A, 5AT. Cyfry 1, 2, 3, 4 i 5 oznaczają kolejny numer łożyska, natomiast pozostałe oznaczenia typ konserwantu: O - Optigear, A – Anticorit, AT – Anticorit, przy czym łożysko AT było już wcześniej rozkręcane.
- Badania trwały tydzień, a podczas jednego dnia wykonywano dwa pomiary jednego łożyska w odstępie kilku godzin. Dzięki temu, badane łożysko przed kolejnym badaniem miało szansę wrócić do stanu sprzed testu, co powinno pomóc zapewnić możliwie największą powtarzalność warunków pomiaru.
- Każdy pomiar składał się z trzech etapów. Każdy z nich cechowała inna prędkość obrotowa, która wynosiła kolejno 50, 150 i 250 rpm. Dla każdej z tych prędkości siła osiowa obciążająca łożysko była zmieniana 4-krotnie: 200 daN, 500 daN, 800 daN, 1100 daN.
- Każdy program pomiarowy przebiegał więc w sposób następujący: po zamontowaniu łożyska w oprawie i umieszczeniu go na urządzeniu, obciążano łożysko siłą wstępną wynoszącą 50 daN. Następnie wrzeczono rozpędzało oprawę pierścienia zewnętrznego łożyska do prędkości 50 rpm. Po osiągnięciu zadanych obrotów obciążano łożysko siłą 200 daN i po ustabilizowaniu się momentu, dokonywano pomiaru. Następnym krokiem było zwiększenie obciążenia do 500 daN i ponownie dokonywano pomiaru. Podobnie postępowano w przypadku obciążeń 800 daN i 1100 daN. Analogiczną sekwencję pomiarów przy różnych siłach osiowych realizowano po zwiększeniu obrotów do 150 rpm, a potem do 250 rpm. Po zakończeniu testu łożysko było wyjmowane z oprawy, a na jego miejsce zakładano nowe.
- Dzięki takiej metodyce otrzymano dla każdego łożyska serię 10 pomiarów momentu oporowego przy 12 różnych kombinacjach prędkości obrotowej i obciążenia. Zaprezentowane na rysunkach 10 i 11 przykłady uzyskanych wyników odnoszą się do pomiarów łożyska 3A.
- Analizując dalsze wykresy można zauważyć że w kilku przypadkach (dwa dla łożyska 3A i jeden dla łożyska 4A) pojawiają się wyniki o wartościach ujemnych. Jest to najprawdopodobniej spowodowane niewłaściwym przeprowadzeniem procedury zerowania czujnika siły (zerowanie mogło być wykonane przy kontakcie siłomierza z listwą pomiarową związaną ze stołem). Uzyskana informacja pokazuje że nieprzestrzeżenie unikania kontaktu listwy pomiarowej z zespołem pomiarowym momentu oporowego podczas procedury zerowania czujników siły, które powinno być wykonywane przed każdym pomiarem, może być źródłem znacznych błędów systematycznych.
- W przypadku wyników pomiarów wysokości montażowej, błąd zerowania czujnika również może wpłynąć na wynik. Na wykresach 15-17 możemy zauważyć, że brakuje jednego wyniku pomiaru. Nie był on uwzględniany na wykresach, gdyż był on uznany jako znaczny błąd systematyczny, powodując przesunięcie jednej serii pomiarów wszystkich łożysk aż o 35 μ m. Niedokładne wyzerowanie czujnika dobrze obrazuje za to przypadek szóstego pomiaru wysokości montażowej łożyska 4A. Wówczas wszystkie wyniki są wyraźnie przesunięte o ok. 18 μ m. Drugi opisany przypadek nie został usunięty, aby móc zobrazować problem.

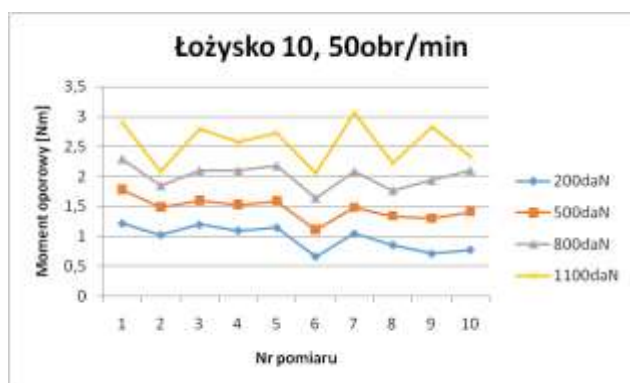
Analizując wyniki warto poznać hipotetyczną wartość momentu oporowego, która jest obliczana na podstawie wzorów (1) – (3). Podstawiając zarówno dane dotyczące geometrii łożyska 33213, lepkości zastosowanych smarów, dobranych współczynników charakterystycznych dla łożysk stożkowych, a także parametrów badawczych w postaci prędkości obrotowej i obciążenia osiowego, otrzymano wartości teoretyczne momentu oporowego zamieszczone w tabeli 1. Obliczone wartości mają charakter orientacyjny gdyż moment oporowy jest bardzo trudnym do jednoznacznego teoretycznego określenia. Wynika to głównie z faktu, że współczynniki f_0 i f_1 są określane w sposób empiryczny i nie jest to wartość jednoznaczna, a tylko pewien przedział należący do bardzo ogólnych trzech grup środków smarnych. Po drugie model opisany wzorami (1) - (3) jest podstawowym i zarazem jednym z kilku funkcjonujących w obliczeniach modeli. Własne wzory opracowały firmy SKF, FAG czy Timken, a otrzymana za ich pomocą przewidywana teoretyczna wartość momentu oporowego może nawet z sposób znaczny różnić się od siebie. Bardzo dobrze jest to zobrazowane w [3].

Tabela 1. Teoretyczny moment oporowy obliczony dla różnych parametrów pomiaru łożyska 33213 wyrażony w Nm.

Prędkość obrotowa obr/min	Obciążenie osiowe daN	Typ środka smarnego	
		Optigear	Anticorit
50	200	0,36	0,38
50	500	0,77	0,80
50	800	1,19	1,22
50	1100	1,60	1,63
150	200	0,44	0,50
150	500	0,86	0,92
150	800	1,27	1,33
150	1100	1,69	1,75
250	200	0,51	0,59
250	500	0,92	1,01
250	800	1,34	1,42
250	1100	1,76	1,84

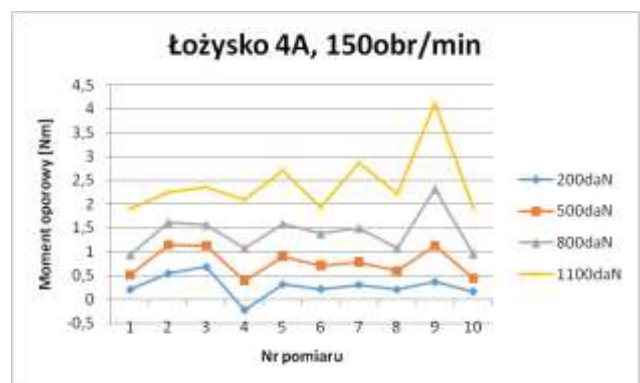
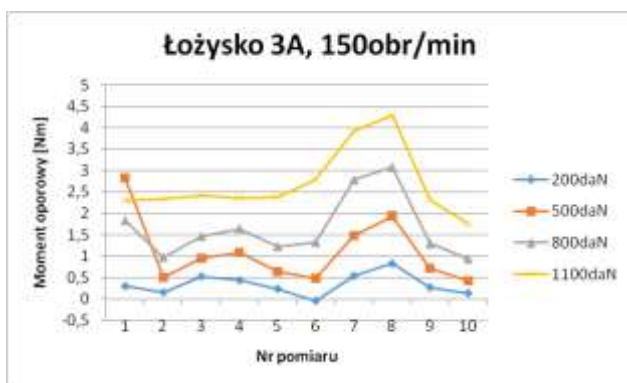
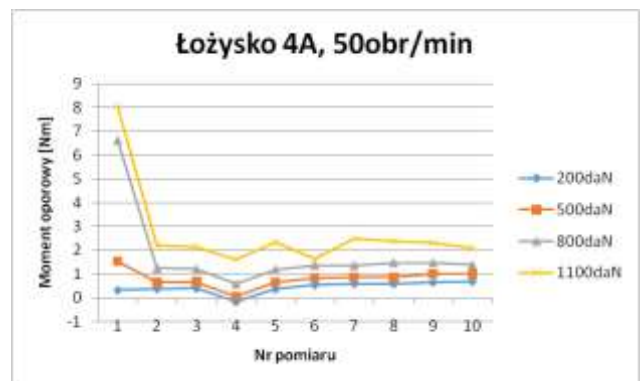
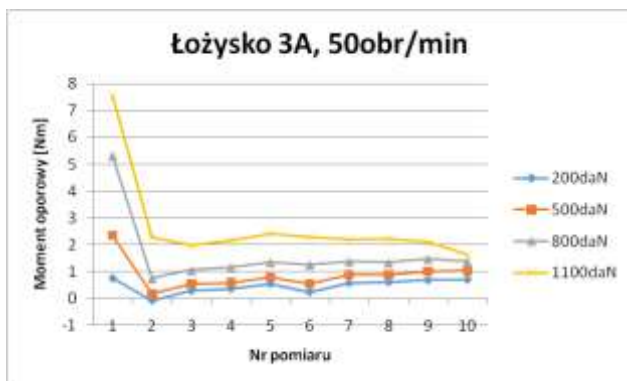
4. Wyniki badania momentu oporowego

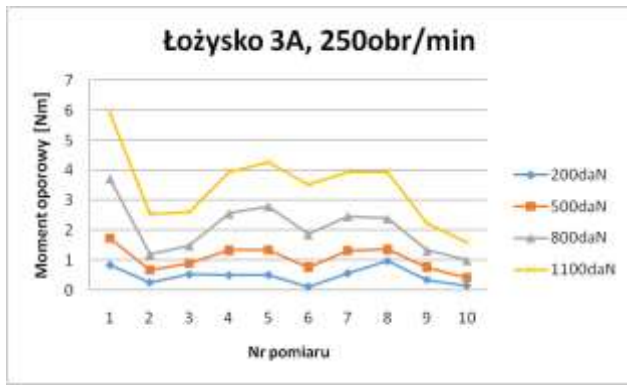
Na wykresach poniżej przedstawiono wyniki wszystkich przeprowadzonych testów momentu oporowego, rozmieszczone w sposób pozwalający na wizualną ocenę zarówno w aspekcie zmian wynikających z różnic w zadawanych parametrach badawczych, jak również zmian w używanych do smarowania środkach konserwujących. Pozwalają one również zaobserwować istotność procesu montażu łożysk do badań jak również precyzji zerowania czujników pomiarowych przed uruchomieniem testu.



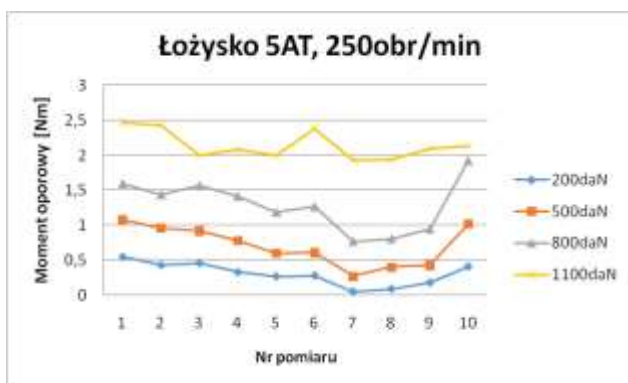
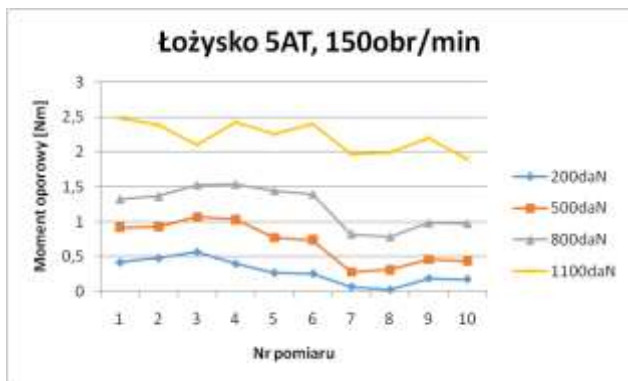
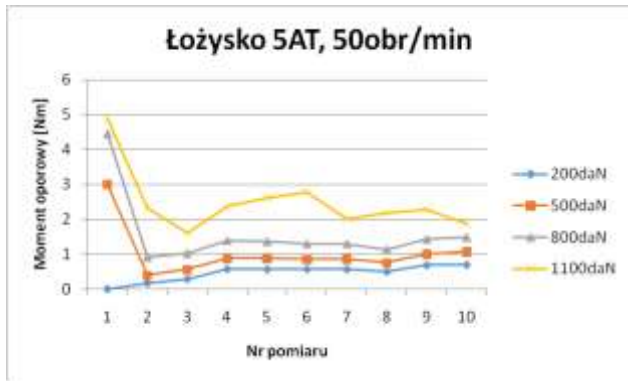


Rys.12. a) seria pomiarów łożyska nr 10, b) seria pomiarów łożyska nr 20.





Rys.13. a) seria pomiarów łożyska nr 3A, b) seria pomiarów łożyska nr 4A



Rys. 14. Seria pomiarów łożyska nr 5AT

Analiza uzyskanych danych dotyczących badanego momentu oporowego pozwala na wyprowadzenie następujących wniosków:

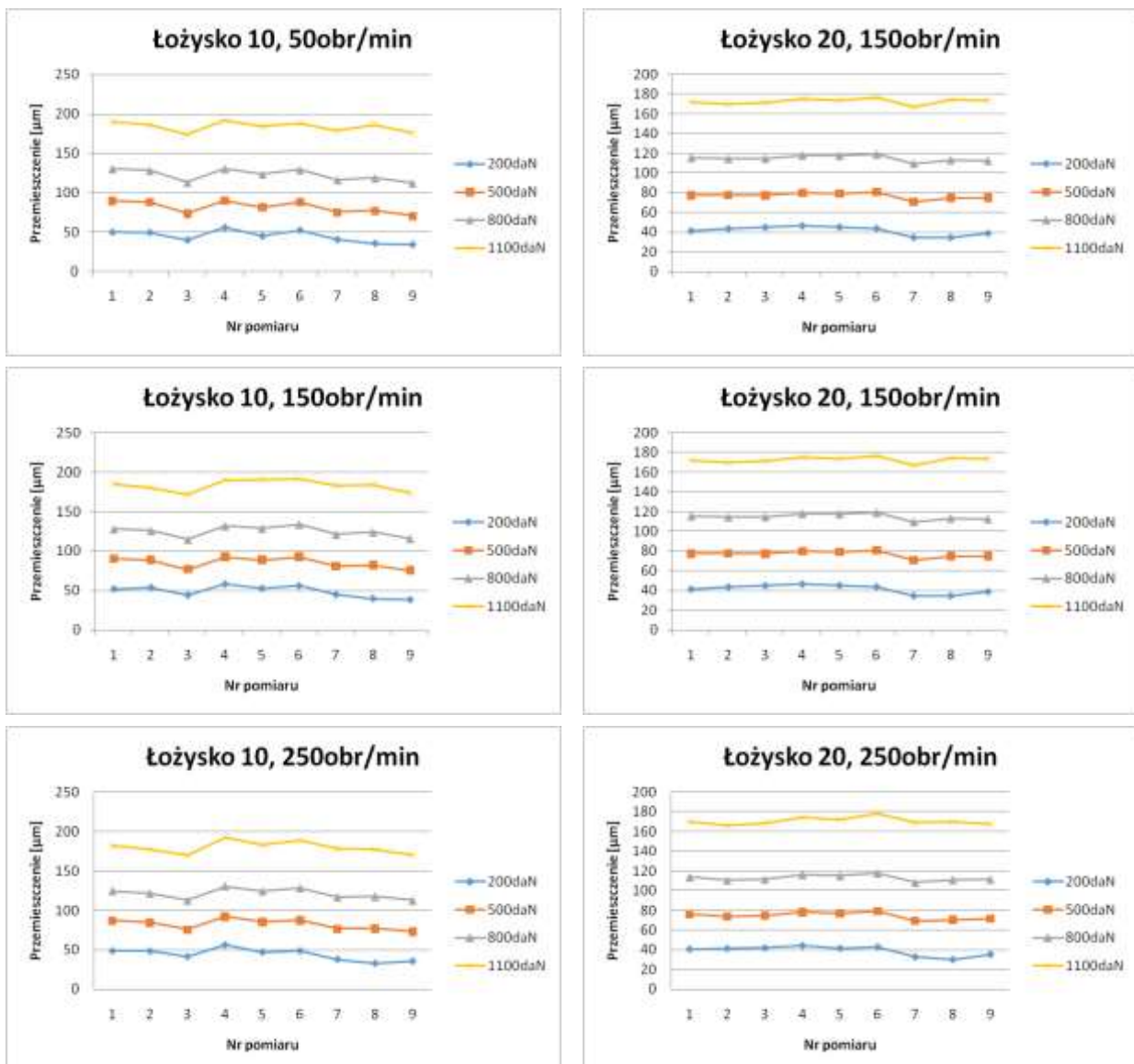
- Zmienność wyniku pomiaru momentu oporowego łożysk tocznych w znacznej części uzyskanych danych kształtuje się w sposób racjonalny. W części przypadków pierwszy pomiar jest na poziomie kilku kolejnych (np. łożyska nr 10 i 20). Taka sytuacja ma miejsce, gdy łożyska są już wcześniej rozkręcone. Gdy łożyska są jeszcze niedotarte mamy do czynienia z osiąganiem podczas pierwszego pomiaru wartości zawyżonych (przypadek łożyska nr 3A oraz nr 4A i 5AT dla początkowej prędkości 50obr/min). Wartości uzyskane z kolejnych pomiarów utrzymują się na podobnym poziomie lub systematycznie maleją (taki efekt uzyskiwany jest przy zastosowaniu prędkości 50 rpm). Niekiedy obserwowany jest wzrost momentu oporowego dla kilku ostatnich prób (w większości przypadków dla najwyższej prędkości obrotowej 250 rpm). Funkcje dla określonej prędkości są sobie odpowiadające (skorelowane). Różni się jedynie wartość momentu, która zawsze konsekwentnie rośnie wraz ze wzrostem obciążenia. Wyjątkiem jest funkcja dla siły 1100 daN, która niekiedy nie powiela trendu ustalonego przez poprzednie obciążenia.

Prawdopodobnie dla takiego obciążenia łożysko ma nieodpowiednie warunki pracy przy smarowaniu konserwantem o stosunkowo niskiej lepkości. Powoduje to niestabilne zachowanie się momentu oporowego. Jest to szczególnie widoczne w przypadku pomiarów łożyska 10.

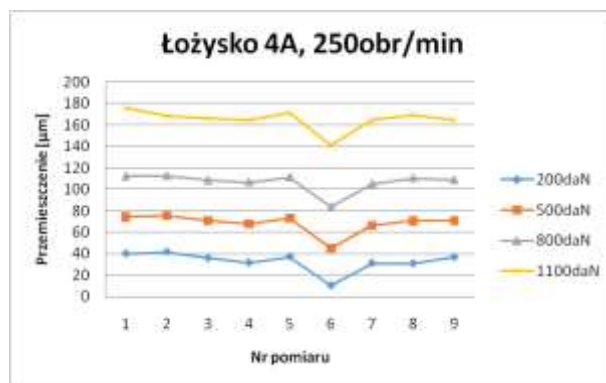
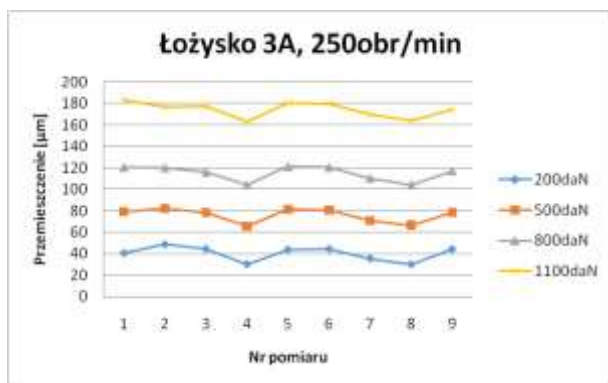
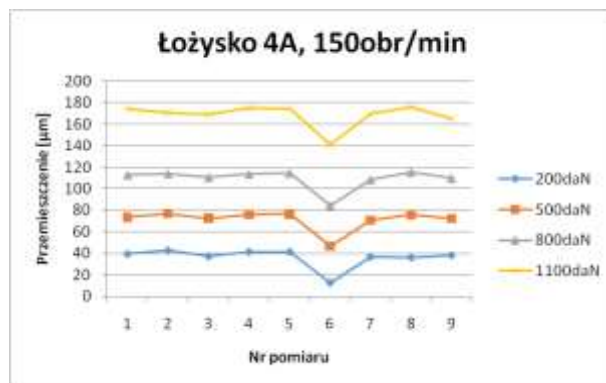
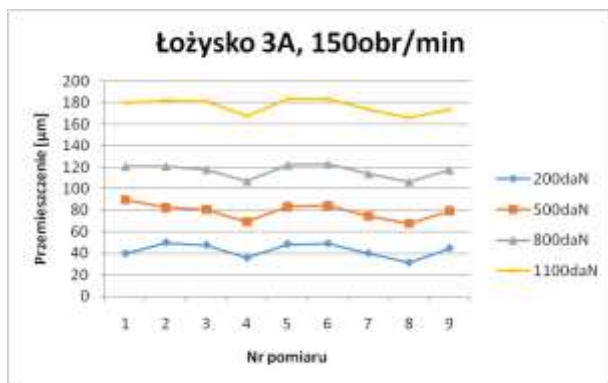
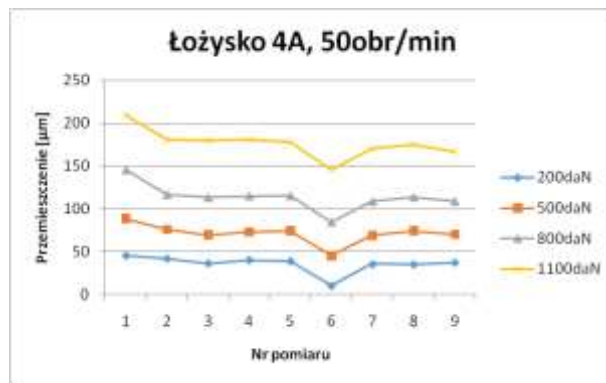
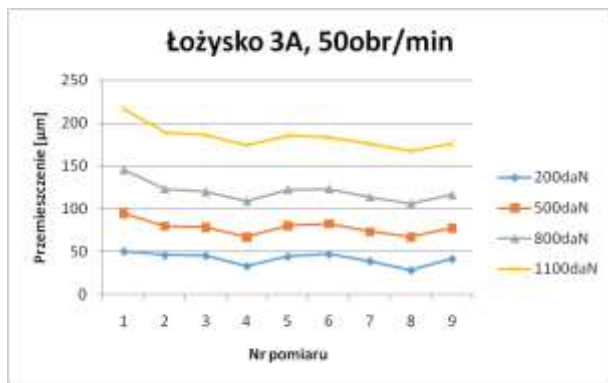
- Zjawisko konsekwentnego powielania się kształtu funkcji przy zastosowaniu jednakowej prędkości obrotowej może również świadczyć o wpływie, jaki wywierają montaż łożyska w oprzyrządowaniu, precyzyjne wyzerowanie czujników, czy zmiany na powierzchniach współpracujących łożysk łożyska powstałych we wcześniejszych testach (szczególnie jeśli smarowanie nie do końca spełniało swoją funkcję.
- Zmienność wyników rośnie wraz ze zwiększaniem się prędkości obrotowej. Najniższa jest przy prędkości obrotowej 50 rpm. Niepewność pomiaru zależy tu głównie od stabilności pracy badanego łożyska, a nie od samego urządzenia. Potwierdza to wzrost rozrzutu wyników wraz z rosnącymi parametrami badawczymi, stwarzającymi coraz trudniejsze warunki do utrzymania filmu elastohydrodynamicznego. Z wykresów uzyskanych podczas testów wynika, że łożysko najstabilniej pracuje przy prędkości 50 rpm, można więc w przybliżeniu przyjąć, że rozrzuty uzyskiwane dla tej prędkości są rozrzutami najbardziej zbliżonymi do powodowanych przez samo urządzenie.

5. Wyniki badania zmian wysokości montażowej

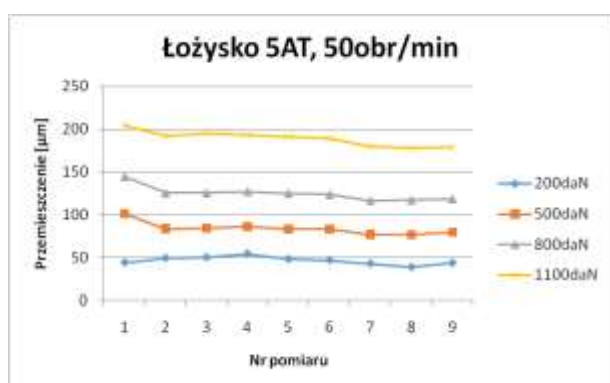
Na wykresach poniżej przedstawiono wyniki wszystkich przeprowadzonych testów zmian wysokości montażowej łożysk, rozmieszczone w sposób podobny, jak w przypadku pomiarów momentu oporowego. Wykazują one dużą stabilność, co pozwala pozytywnie ocenić wybrany sposób pomiaru tego parametru.



Rys.15. a) wysokość montażowa łożyska 10 b) wysokość montażowa łożyska 20

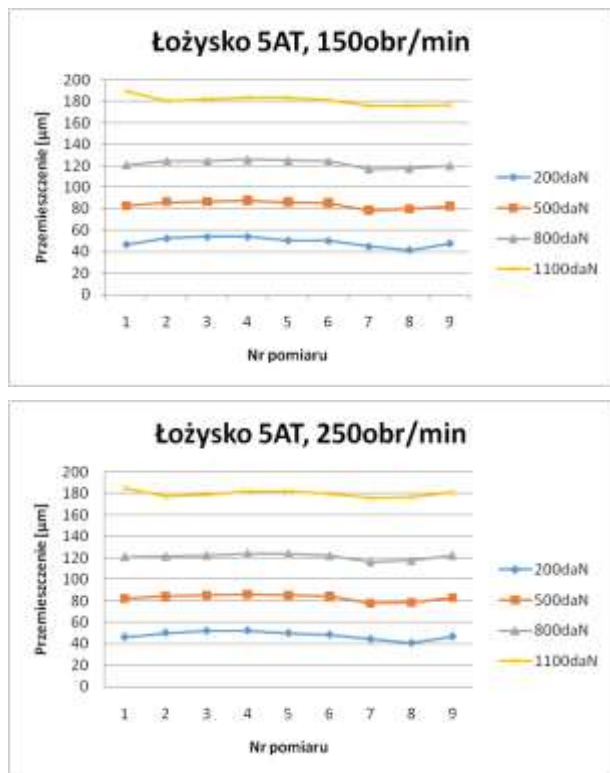


Rys.16. a) wysokość montażowa łożyska 3A b) wysokość montażowa łożyska 4A



Analiza uzyskanych danych dotyczących pomiaru wysokości montażowej pozwala na wyprowadzenie następujących wniosków:

- Wyniki pomiarów wysokości montażowej są bardzo powtarzalne. Widać to zarówno na raportach z bezpośredniego pomiaru jak i w zestawieniu ogólnym.
- Wartości otrzymywanych wyników układają się w sposób racjonalny. Wzrost przemieszczenia jednego pierścienia względem drugiego jest proporcjonalny do wzrostu siły. Pewnym odstępstwem jest zmiana wymiaru przy obciążeniu 1100 daN, powodująca znacząco większy skok przemieszczenia niż w poprzednich trzech przypadkach. Konsekwencja ta jest zachowana dla każdego pomiaru, co sugeruje że jest to naturalne zjawisko dla tego typu łożysk tocznych.



Rys.17 Wysokość montażowa łożyska 5AT

6. Wnioski i zalecenia

Urządzenie jest gotowe do wykonywania zadań, dla których zostało zaprojektowane. Parametry badawcze które powinno ono realizować są osiągalne. Przeprowadzone testy wykazały, że uzyskiwana dokładność realizowanych pomiarów spełnia wymagania założeń przyjętych do projektowania. Stanowisko jest przygotowane do eksploatacji. Przed jej podjęciem, należy przeprowadzić szereg przedsięwzięć pozwalających zredukować do minimum możliwość popełniania błędów w technice prowadzenia testów oraz analizy uzyskanych wyników i ich oceny. Do przedsięwzięć tych należą:

- dodatkowa kalibracja czujników pomiarowych,
- przeprowadzenie cyklu testów zmierzających do optymalizacji metodyki zerowania czujników przed rozpoczęciem procesu pomiarowego,
- przeprowadzenie testów z różnymi środkami smarnymi w celu optymalizacji ich doboru dla przewidywanych w teście warunków pracy łożyska,
- sprawdzenie czy funkcja dla określonych prędkości obrotowych jest przy różnych obciążeniach konsekwentnie odwzorowywana, jeśli przeprowadzimy cykl testów bez demontażu łożyska z oprawy,
- Przeprowadzenie testów na zróżnicowanych gabarytowo seriach łożysk i na większej liczbie próbek,
- Sprawdzenie możliwości pomiaru momentu na łożysku z suwliwie oprawionym pierścieniem zewnętrznym.

Warto na końcu zwrócić uwagę na poziom wartości otrzymywanych z testu wyników. Wartości momentu uzyskane w sposób empiryczny są konsekwentnie większe, od tych uzyskanych na drodze obliczeniowej. Jest to w sposób oczywisty spowodowane nieuwzględnieniem wszystkich czynników wpływających na moment oporowy łożyska jak np. tarcie kosza, struktura geometryczna powierzchni współpracujących, dokładność wymiarowo - kształtowa elementów łożyska czy chociażby czystość smaru.

Niewielka zmienność wyniku, którą najlepiej widać na przykładzie pomiarów łożyska nr 20, ma charakter przypadkowy, i jest naturalnym zjawiskiem w przyrządach pomiarowych.

Można przyjąć, że rozrzut uzyskiwany dla łożyska 20 jest charakterystyczny dla zbudowanego układu pomiarowego wysokości montażowej badanego urządzenia.

- Uzyskiwanie wyższych wyników rozrzutów dla pozostałych łożysk można wiązać z niedokładnością zerowania czujnika. Świadczy o tym konsekwentne zawyżanie lub zaniżanie wszystkich wyników uzyskanych dla jednego numeru pomiaru (dla wszystkich 12 kombinacji siły z prędkością obrotową).

Warto zatem aby zarówno jednostki naukowe jak i przemysłowe oprócz samego pomiaru momentu oporowego, prowadziły szeroko zakrojone prace doświadczalne, mające na celu ustalenia jak największej liczby czynników wpływających na wynik pomiaru momentu oporowego. Mając jednocześnie świadomość że niektóre z tych czynników będą pochodziły od samego urządzenia pomiarowego, co bardzo często jest pomijane.

7. Literatura

- [1] Zhang Ch., Gu L., Mao Y., Wang L.: *Modeling the frictional torque of a dry-lubricated tapered roller bearing considering the roller skewing*. Friction 7(6) pp. 551–563 (2019).
- [2] Vale J.L, Silva C.H.: Kinetic friction coefficient modeling and uncertainty measurement evaluation for a journal bearing test apparatus. Measurement 154 (2020)
- [3] Adamczak S., Domagalski R. Sender E.: Friction torque in rolling bearings – methods and test facilities. Tribology 6/2011 pp.19-28. 2011
- [4] Geonea I.Dumitru N. Dumitru I Experimental and theoretical study of friction torque from radial ball bearings Materials Science and Engineering 252 (2017)
- [5] Bălan M.R, Houpert L. Tufescu A. Olaru D.M.: Rolling Friction Torque in Ball-Race Contacts Operating in Mixed Lubrication Conditions. Lubricants 3, 222-243 2015
- [6] Cousseau T. et al. *Experimental measuring procedure for the friction torque in rolling bearings*. Lubrication Science 22 pp. 133-147 (2010)
- [7] Cousseau T., Graça B., Campos A., Seabra J: *Friction torque in grease lubricated thrust ball bearings*. Tribology International 44 (5) pp. 523-531 (2011)
- [8] Han C.F et al. , Uses of empirical mode decomposition and multi-entropy techniques to establish the correlations among vibrations, friction coefficients and component wear of ball-bearing-like specimens, Measurement 150 (2020)
- [9] Summer F, Grün F, Offenbecher M, Taylor S, Challenges of friction reduction of engine plain bearings – Tackling the problem with novel bearing materials, Tribology International 131, 238-250 2019,]
- [10] Kwak W, Lee J, Lee Y.B, Theoretical and experimental approach to ball bearing frictional characteristics compared with cryogenic friction model and dry friction model, Mechanical Systems and Signal Processing 124, Pages 424-438, 2019,
- [11] Qiu C. et al. An Approximate Estimation Approach of Fault Size for Spalled Ball Bearing in Induction Motor by Tracking Multiple Vibration Frequencies in Current Sensors 20(6) 2020
- [12] Li S., Li Y., Choi S. W. Sarlioglu B.: High Speed Electric Machines – Challenges and Design Considerations. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2(1), pp. 2-13, (2016)
- [13] Rabreau C. et al.. Influence of bearing kinematics hypotheses on ball bearing heat generation, Procedia CIRP 77, ,pp. 622-625 2018
- [14] Dykas B.: Factors influencing the performance of foil gas thrust bearings for oil-free turbomachinery applications. Doctoral thesis 2006
- [15] Marques P., Martins R. Seabra J.: Experimental measurement of rolling bearing torque loss in a modified Four-Ball machine: An improved setup. Lubrication Science 32 (5) Pp. 245-259 2020
- [16] Paleu V., Cretu S., Drăgan B., Bălan R.: Test Rig For Friction Torque Measurement in Rolling Bearings. The Durham University journal. University of Durham VIII(1) pp. 85-91
- [17] Fiedler S., Kieckbusch T., Sauer B. nvestigation of inner contact and friction conditions of a spherical roller bearing using multi-body simulation. Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering 55(2) pp.79-84 2011
- [18] Li X. et al.: A Novel Bearing Fault Diagnosis Method Based on LMD and Wavelet Packet Energy Entropy. International Journal of Emerging Electric Power Systems 18(5) pp1-16 (2017)
- [19] Dindar A., Akkök M., Caliskan M.: Experimental determination and analytical model of friction torque of a double row roller slewing bearing Journal of Tribology 139(2) (2016)