

WPŁYW BRAKU WSPÓŁOSIOWOŚCI CZĘŚCI CZYNNEJ I BIERNEJ SPRZĘGŁA MAGNETYCZNEGO NA OBCIĄŻENIA WAŁU I ŁOŻYSKOWANIA

Zbigniew Pilch*, Paweł Kowol*, Krzysztof Bizoń**,
Piotr Sochacki*

* *zbigniew.pilch@polsl.pl, Katedra Mechatroniki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska*

* *pawel.kowol@polsl.pl, Katedra Mechatroniki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska*

** *krzysztof.bizon@polsl.pl, Katedra Transportu Szynowego, Wydział Transportu, Politechnika Śląska*

Streszczenie

Sprzęgła stanowią jeden z istotnych elementów układów przeniesienia napędu. W najprostszych rozwiązaniach spełniają tylko funkcję łączenia elementów układów napędowych. Osiągnięcia inżynierii sprawiły, że na przestrzeni dziesięcioleci opracowano wiele rozwiązań sprzęgieł o bardziej złożonych konstrukcjach i bardziej rozbudowanych cechach funkcjonalnych. Aktualnie niektóre rozwiązania sprzęgieł są nie mniej złożone niż łączone przez nie elementy systemu przeniesienia momentu i źródeł tegoż momentu.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych dla układu przeniesienia napędu ze sprzęgłem magnetycznym (sprzęgłem z magnesami trwałymi). Charakterystyki kątowe momentu oraz sił promieniowych, będących efektem niewyosiowania części czynnej i biernej sprzęgła wyznaczono na drodze obliczeń polowych i częściowo zweryfikowano poprzez pomiary na stanowisku badawczym.

Słowa kluczowe: sprzęgła magnetyczne, moment sprzęgający, szczelina powietrzna, przesunięcie osi, siły promieniowe

THE INFLUENCE OF MISALIGNMENT OF DRIVING AND DRIVEN MEMBER OF THE MAGNETIC CLUTCH ON LOADS OF THE SHAFT AND THE BEARING SYSTEM

Summary

In the paper the magnetic clutch with permanent magnets is described. The magnetic field model of the clutch and the calculations made using the model are presented. The calculations take into account the misalignment of driving and driven members of the clutch. The results of the calculations are the characteristics of clutching torque and radial force vs. angle of rotation. The results of calculations are compared with measurement results. At the end of the paper the analysis of influence of described radial force on the shaft and bearing system is carried out.

Keywords: magnetic clutch, torque coupling, air gap, offset axis, radial forces

1. WPROWADZENIE

Zgodnie z definicją [1] sprzęgłem nazywamy zespół układu napędowego maszyny, przeznaczony do łączenia wałów i przekazywania momentu obrotowego bez zmia-

ny jego wielkości i kierunku. Sprzęgło składa się z członu czynnego (napędzającego) i członu biernego (napędzane-go) oraz z łącznika. Kluczowym elementem sprzęgła jest

łącznik, który rozumiany jest jako część (kilka części) lub czynnik, który przekazuje moment obrotowy z członu czynnego na człon bierny sprzęgła i określa sposób przekazania momentu, jak również charakteryzuje sprzęgło [1].

Sprzęgła magnetyczne wykonane na bazie magnesów trwałych należą do grupy sprzęgieł rozłącznych, zazwyczaj niesterowalnych (samoczynnych).

Spośród sprzęgieł wykorzystujących w swym działaniu pole magnetyczne magnesów trwałych można wyodrębnić podstawowe rodzaje [5]:

- sprzęgła synchroniczne: tarczowe, pierścieniowe,
- sprzęgła asynchroniczne: histerezyowe, wiroprowadowe

Sprzęgła synchroniczne, a zatem takie, w których średnie prędkości części czynnej i biernej sprzęgła są równe (brak poślizgu), charakteryzują się brakiem strat mocy w układzie przeniesienia napędu. Działanie tych sprzęgieł opiera się na działaniu sił wzajemnego oddziaływania magnesów trwałych, które odpowiednio rozmieszczone w członie czynnym i członie biernym sprzęgła wytwarzają moment sprzęgający. Sprzęgła magnetyczne tarczowe charakteryzują się lustrzanym rozmieszczeniem magnesów, natomiast sprzęgła magnetyczne pierścieniowe charakteryzują się układem rotosymetrycznym [3,5].

W przypadku, kiedy na oba człony sprzęgła nie oddziałują żadne siły zewnętrzne, magnesy o zgodnych kierunkach polaryzacji ustawione są naprzeciw siebie, dążąc do stanu minimum energii. Występuje wówczas w sprzęgle symetryczne pole magnetyczne. Jeśli wymusi się ruch członu napędowego, a człon napędzany zostanie obciążony dowolnym momentem obrotowym, wówczas nastąpi kątowne przemieszczenie obu członów sprzęgła o wartość, która wytworzy taką zmianę linii sił pola magnetycznego w przestrzeni między członami sprzęgła, która zrównoważy moment obciążenia [3,5]. Warto podkreślić, że ze względu na wzajemne sprzężenie części czynnej i biernej nie ma znaczenia, który człon jest czynny, a który bierny.

W celu zapewnienia jak najlepszych parametrów sprzęgła synchronicznego dąży się do uzyskania przenikalności magnetycznej możliwie bliskiej jedności oraz jak największej gęstości strumienia magnetycznego. Stosuje się w tym celu silne magnesy trwałe, najczęściej samarowo-kobaltowe (SmCo) oraz neodymowe (NdFeB) [5].

Poza sprzęgłami synchronicznymi budowane są także sprzęgła poślizgowe (asynchroniczne) wykorzystujące magnesy trwałe. Wyróżnia się dwa typy sprzęgieł poślizgowych: sprzęgła wiroprowadowe oraz sprzęgła histerezyowe. Konstrukcyjnie są do siebie bardzo zbliżone. Obie wersje jako człon napędowy wykorzystują tarczę wyposażoną w magnesy, identyczną z tą zastosowaną w sprzęgłach synchronicznych. Różnice tkwią w części napędzanej sprzęgła.

Sprzęgła magnetyczne posiadają kilka istotnych zalet [5]:

- są niezawodne i przede wszystkim bezobsługowe;
- brak kontaktu mechanicznego pomiędzy elementami sprzęgła likwiduje możliwość zużycia mechanicznego;
- charakteryzują się niskim współczynnikiem tarcia, ewentualnego ułożyskowania sprzęgła;
- pozwalają na fizyczną separację części napędzanej i napędowej,
- sprzęgła synchroniczne odznaczają się bezstratnym przekazaniem energii;
- sprzęgła synchroniczne mogą spełniać funkcję sprzęgła bezpieczeństwa.

Sprzęgło magnetyczne będące obiektem rozważań (sprzęgło KTR MINEX SB 60/8) ze względu na swoją zasadę działania (samoczynne odsprężanie części czynnej i biernej) przynależy do sprzęgieł samoczynnych oraz ze względu na budowę (magnesy trwałe) przynależy do grupy sprzęgieł elektromagnetycznych, indukcyjnych, synchronicznych.

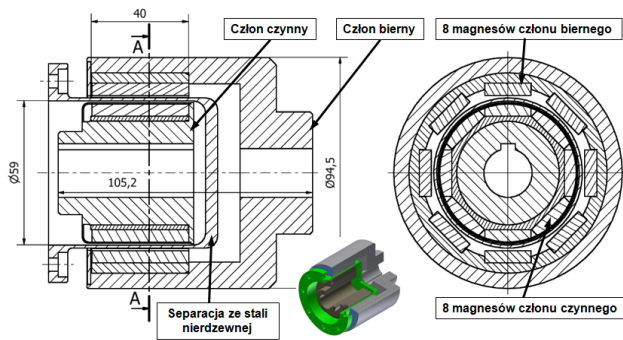
2. MODEL MES SPRZĘGŁA MAGNETYCZNEGO

Do budowy modelu symulacyjnego układu napędowego ze sprzęgłem magnetycznym konieczna jest znajomość parametrów go opisujących. Podstawową charakterystyką tego sprzęgła jest zależność momentu sprzęgającego w funkcji kąta wzajemnego położenia członu czynnego względem członu biernego.

Producenci sprzęgieł podają, jako parametr użytkowy, wartość maksymalnego momentu przenoszonego przez sprzęgło, natomiast nie załączają charakterystyki kątowej [4]. Dla modelu symulacyjnego pracy sprzęgła w stanach dynamicznych konieczna jest informacja o wartości momentu sprzęgającego dowolnego kątowego przemieszczenia elementów sprzęgła.

Charakterystykę momentu w funkcji kąta skręcenia można wyznaczyć na dwa sposoby: poprzez przeprowadzenie pomiarów na stanowisku laboratoryjnym lub poprzez przeprowadzenie symulacji dla modelu polowego z uwzględnieniem różnych, wzajemnych położań części czynnej i biernej sprzęgła.

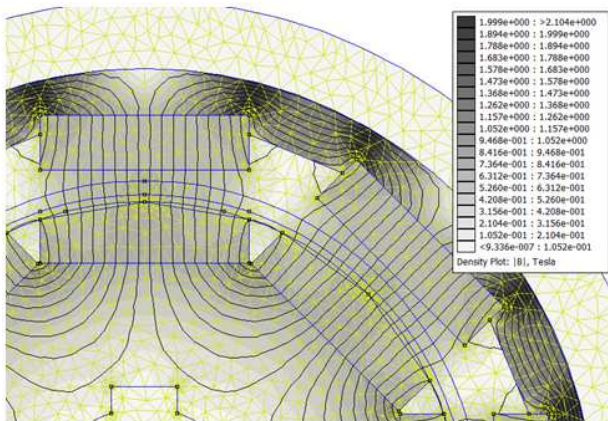
Na rys. 1. przedstawiono model 3D sprzęgła oraz jego przekrój płaszczyzną poprowadzoną przez oś wzdłużną sprzęgła oraz przekrój poprzeczny przez zespół magnesów członu czynnego i biernego.



Rys. 1. Model sprzęgła oraz jego budowa

W celu wyznaczenia charakterystyki kątowej badanego sprzęgła MINEX -S SB 60/8 firmy KTR zbudowano model połowy sprzęgła w programie FEMM (Finite Element Method Magnetics). Program ten przeznaczony jest do obliczeń 2D, a zatem, aby obliczyć charakterystykę kątową, należy wykonać model będący przekrojem poprzecznym przez sprzęgło (odpowiada to przekrojowi A-A na rys. 1). Zdefiniowano model, przypisując obszarom odpowiednie właściwości materiałowe oraz wygenerowano siatkę elementów skończonych.

Na rys. 2. przedstawiono siatkę w obrębie dwóch par magnesów, izolinie pola magnetycznego oraz wartość momentu przypadającą na 1/8 obwodu (podziałka kątowa dla sprzęgła wynosi $\pi/4$ rad) dla położenia, w którym kąt wzajemnego przemieszczenia części czynnej i biernej wynosi 0 rad.



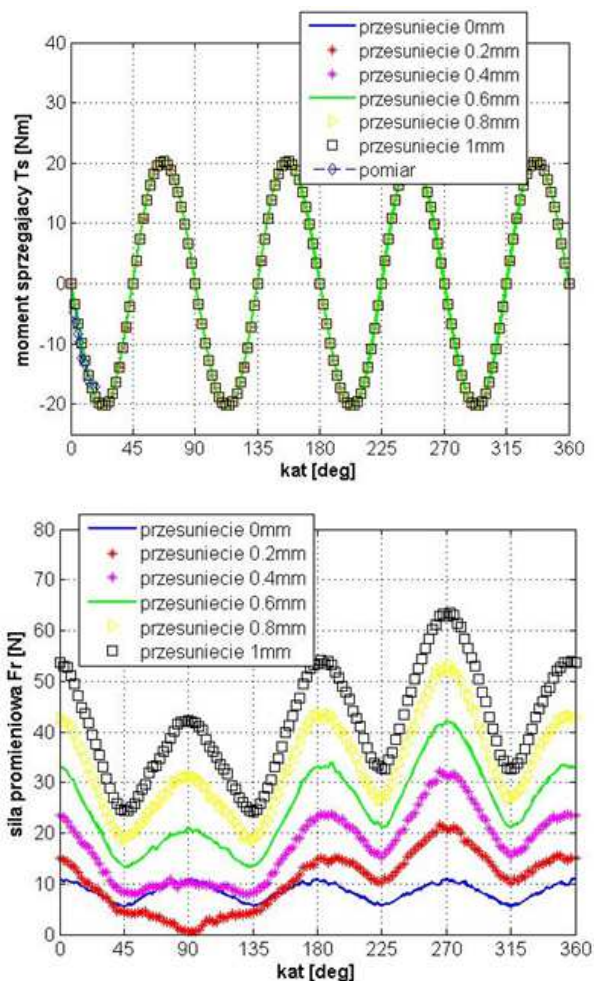
Rys. 2. Rozkład pola magnetycznego oraz wartość momentu sprężającego dla podziałki kątowej dla kąta $\alpha=0$

Obliczona wartość momentu dla podziałki kątowej wynosi $-0,0013\text{Nm}$. Dla pełnego obwodu wartość momentu sprężającego ma wartość $-0,0104\text{Nm}$. W analogiczny sposób przeprowadzono obliczenia wobec kolejnych, względnych położenia członu biernego względem czynnego. Przyjęto przyrost kąta równy $2,5^\circ$ przy zakresie kątowym od 0 do 360° .

Obliczona wartość momentu dotycząca względnego kąta skręcenia części czynnej i biernej równego $22,5^\circ$ dla podziałki kątowej wynosi $-2,5664\text{Nm}$. Dla pełnego obwodu wartość momentu sprężającego ma wartość $-20,53\text{Nm}$.

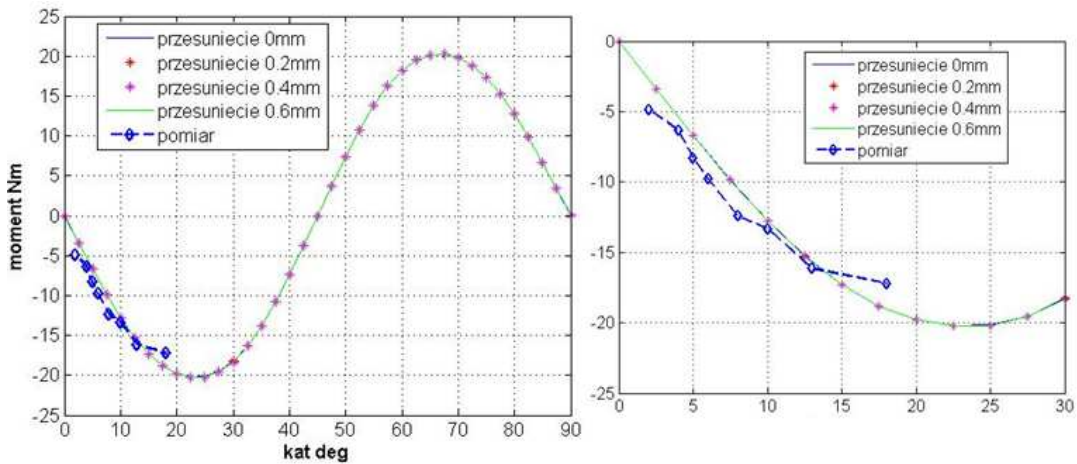
W dalszej kolejności przeprowadzono obliczenia charakterystyk momentu sprężającego dla sprzęgła z osłoną (separacją) ze stali nierdzewnej oraz bez tej osłony. Znając charakterystykę momentu sprężającego w funkcji położenia kątowego, określono wartości sztywności sprzęgła, dzieląc wartość momentu sprężającego przez względny kąt przemieszczenia części czynnej i biernej.

Na rys. 3. przedstawiono charakterystyki kątove momentu sprężającego oraz charakterystyki siły promieniowej oddziaływania pomiędzy członem czynnym a biernym sprzęgła przy zakresie kątowym od 0 do 360° . Charakterystyki te uwzględniają różne wartości przemieszczenia osiowego części biernej względem części czynnej (w zakresie od 0 do 1mm).



Rys. 3. Charakterystyka kątowa momentu sprężającego oraz siły promieniowej oddziaływania części czynnej i biernej sprzęgła przy zakresie kątowym od 0 do 360°

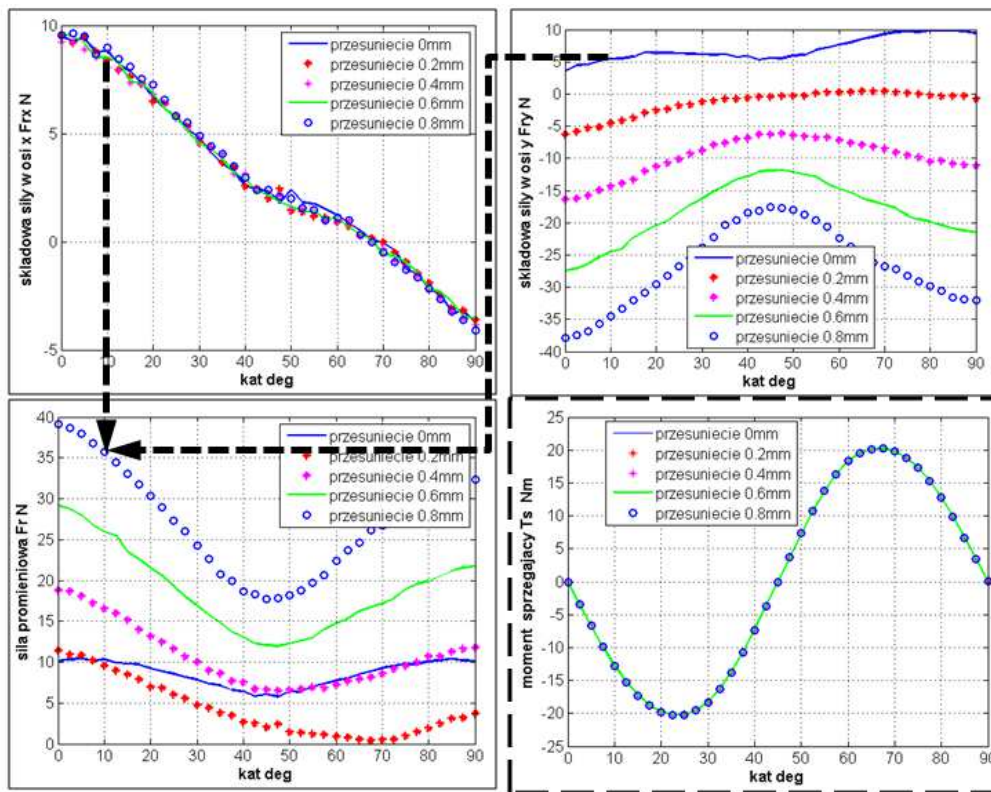
Charakterystykę momentu zweryfikowano pomiarami na stanowisku badawczym. Wymuszenie momentu stanowił siłownik pneumatyczny obrotowy. Na rys. 4. przedstawiono uzyskane wartości zmierzonego momentu w funkcji przemieszczenia kątowego, naniesione na charakterystyki będące wynikiem symulacji.



Rys. 4. Pomiarowa charakterystyka kątowna momentu sprężającego w funkcji wzajemnego przemieszczenia kąowego w odniesieniu do wyników symulacji

W dalszej kolejności zbadano wpływ przemieszczenia osiowego na charakterystyki momentu sprężającego oraz sił promieniowych. Ze względów konstrukcyjnych maksymalny luz promieniowy pomiędzy osłoną sprzęgła a wirnikiem zewnętrznym wynosi 1mm. W związku z tym przeprowadzono obliczenia dla czterech wartości

przesunięcia osi Δr : 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 i 1mm. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach na rys. 5. Kolejne charakterystyki przedstawiają składowe F_{rx} , F_{ry} , F_r oraz charakterystykę momentu. Wyniki dotyczą sprzęgła bez osłony.



Rys. 5. Charakterystyki kątowne sił oraz momentu oddziaływania części czynnej i biernej sprzęgła dla zakresu kąowego od 0 do 90° dla różnych wartości przesunięcia osi

Siły składowe F_{rx} i F_{ry} stanowią składowe siły promieniowej F_r . Wartość wypadkową siły promieniowej obliczono z zależności:

$$F_r = \sqrt{F_{rx}^2 + F_{ry}^2} \quad (1)$$

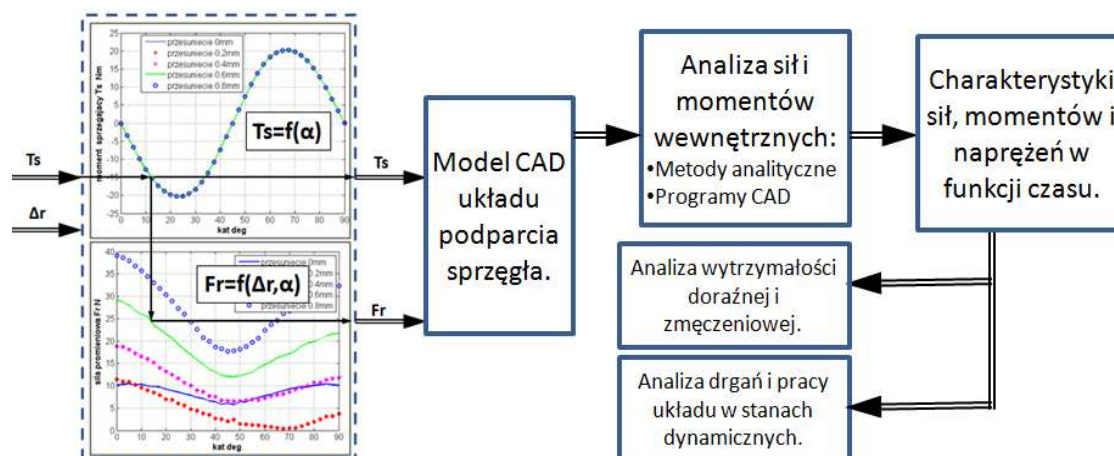
Z zestawionych wyników symulacji na rys. 5. można określić następujące wnioski:

- zastosowanie osłony wykonanej ze stali nierdzewnej nie ma wpływu na wartości siły promieniowej oraz momentu sprężającego,
- wartości sił promieniowych zależne są od wzajemnego, kąowego przemieszczenia części czynnej i biernej sprzęgła,
- wartości momentu sprężającego nie zależą od wzajemnego, promieniowego przemieszczenia.

3. ANALIZA OBCIĄŻEŃ WAŁU I ŁOŻYSKOWANIA

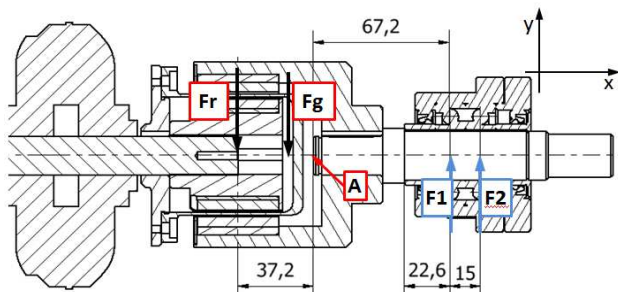
Analiza obciążeń wału i łożyskowania układu, w którym do przeniesienia momentu napędowego stosowane są sprzęgła magnetyczne, wymaga określenia kilku czynników:

- wartości i miejsce przyłożenia sił i momentów obciążających wał,
- wielkości geometryczne wału (wymiary średnicowe, długości poszczególnych stopni wału),
- własności wytrzymałościowe materiału konstrukcyjnego, z którego wykonany jest wał.



Rys. 6. Schemat analizy obciążeń wału z silami wynikającymi z zastosowania sprzęgła magnetycznego

Obliczenia przeprowadzono, zakładając, że sprzęgło przenosi moment $T_s = 15 \text{ Nm}$, a część czynna i bierna przemieszczone są promieniowo o $0,6 \text{ mm}$. Z przedstawionych na rys.8. charakterystyk odczytać można kąt przemieszczenia części czynnej i biernej $\alpha = 12,1^\circ$ oraz wartość siły promieniowej $F_r = 29,1 \text{ N}$. Założono, że siła F_r działa w połowie długości pakietu magnesów, a siła F_g (siła ciężkości części biernej sprzęgła) działa w jej środku ciężkości. Na bazie przedstawionego schematu na rys. 6. dokonano przykładowych obliczeń dla wałka w układzie jak na rys. 7.



Rys. 7. Schemat obciążeń wału z osadzoną na nim częścią bierną sprzęgła magnetycznego

Siły F_r i F_g zostały przeliczone do punktu A tak, aby moment zginający dla wału względem podpory miał taką samą wartość. Obliczenia przeprowadzono w generatorze wałów programu Autodesk Inventor 2011 wobec

Przeprowadzona analiza sił promieniowych oraz momentu sprzęgającego daje podstawy do określenia tych sił zewnętrznych oddziaływania na wał, które w dalszej kolejności pozwalają na wyznaczenie sił i momentów wewnętrznych (momenty gnące i skręcające, siły gnące, tnące oraz osiowe – ściskające lub rozciągające). Na rys. 6. przedstawiono w schematyczny sposób procedurę określenia obciążeń czynnych wału, na którym osadzone jest sprzęgło magnetyczne. Jako wielkości wejściowe do wyznaczenia tychże wartości są wartość momentu wymuszenia T_s oraz wartość promieniowego przesunięcia osi sprzęgła Δr .

dwóch przypadków: gdy zwrot siły F_r jest zgodny ze zwrotem siły ciężkości oraz dla przypadku, gdy siła F_r ma zwrot przeciwny do siły F_g .

W tabelicy 1 zestawiono wyniki obliczeń wielkości sił, momentów i naprężeń dla rozpatrywanych dwóch, skrajnych przypadków:

Tab. 1 Wyniki obliczeń dla wałka części biernej sprzęgła

	$F_1 \downarrow$ $F_r \downarrow$	$F_1 \uparrow$ $F_r \uparrow$	
Siła ciężkości części biernej sprzęgła magnetycznego F_g	-26 N	-26 N	
Siła ciężkości części biernej sprzęgła magnetycznego F_g przeliczona do punktu A	-30,92 N	-30,92 N	
Siła promieniowa oddziaływania magnesów F_r	-38,0 N	38,0 N	
Siła promieniowa oddziaływania magnesów F_r przeliczona do punktu A	-58,9 N	58,9 N	
Siła reakcji w podporze 1 F_1	465,6 N	-142,0 N	
Siła reakcji w podporze 2 F_2	-370,0 N	118,98 N	
max. siła ścinająca	465,9 N	118,98 N	
max. moment zginający	6,04 Nm	1,79 Nm	
max. napężenia zginający	3,93 MPa	1,17 MPa	
max. napężenia ścinające	0,76 MPa	0,24 MPa	
max. napężenia skręcające	9,55 MPa	9,55 MPa	
Napężenia zredukowane	16,98 MPa	16,58 MPa	

4. WNIOSKI KOŃCOWE I PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki analizy obciążeń wału, na którym osadzona jest część bierna sprzęgła magnetycznego. Obciążenia te są efektem wzajemnego oddziaływania obu części sprzęgła i skutkują pojawieniem się sił promieniowych i momentów skręcających. Uzyskane wyniki pozwalają sformułować wnioski końcowe:

- sprzęgła magnetyczne posiadają wiele zalet związanych z niezawodnością i separacją części czynnej i biernej sprzęgła;

- sprzęgła magnetyczne w niektórych rozwiązaniach pozwalają kompensować błędy osiowania układu;
- wadą sprzęgieł jest powstawanie sił promieniowych stanowiących dodatkowe obciążenie wałów i ich układów łożyskowania, przy czym siły te zależne są zarówno od wartości przenieszonego przez sprzęgło momentu jak i od wartości wzajemnego przesunięcia osi części czynnej i biernej sprzęgła;
- w przeprowadzonych obliczeniach uwzględniono równoległe przesunięcie osi względem siebie, natomiast nie uwzględniono kąтового przekoszenia osi na skutek błędów montażowych oraz wynikających z ugięcia łączonych wałów.

Literatura

1. Dietrich M. i in.: Podstawy konstrukcji maszyn. T. 3. Warszawa: WNT, 2006.
2. Skoć A., Spałek J., Markusik S.: Podstawy konstrukcji maszyn. T. 2: Trybologia, elementy podatne, wały i osie, łożyska, sprzęgła i hamulce. Warszawa: WNT, 2008.
3. Sochacki P.: Badania porównawcze wybranych typów sprzęgieł wzbudzanych elektromagnetycznie. Praca dyplomowa magisterska. Gliwice: Pol. Śl., 2011. Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki.
4. http://www.sprzegla.pl/data/_uploaded/file/ktrpl2011/ktr_172_pl.pdf
5. <http://www.tridelta.pl/download/sprzegla.pdf>;