

Zbigniew Pilch, Paweł Kowol, Paweł Kielan
Politechnika Śląska, Gliwice

WIELOTARCZOWE SPRZĘGŁO MAGNETOREOLOGICZNE O PŁYNNIE REGULOWANEJ WARTOŚCI PRZENOSZONEGO MOMENTU

MAGNETORHEOLOGICAL MULTIDISC CLUTH WITH CONTROL OF COUPLING TORQUE VALUE

Abstract: This goal of this paper is to show conception of the electronic controlled clutch with magnetorheological fluid (MR Fluid). The proposal of coupling construction, structure of control system is presented and results of calculations of the magnetic field distribution and clutching torque value as well calculation of the clutch shaft are shown. In the paper properties of magnetic fluids and fundamentals of magnetorheological electromechanical devices operation are described. On the base a results of field calculations a solution of magnetorheological clutch control system is proposed. The possible functions which multidiscs magnetorheological clutch can fulfil: dynamometrical function (for example in the screwdriver), safeties clutch, for half-active elimination of rotary vibrations, and for the system of the soft start-up. In the article a concept of test-bench for static and dynamic measurements was presented.

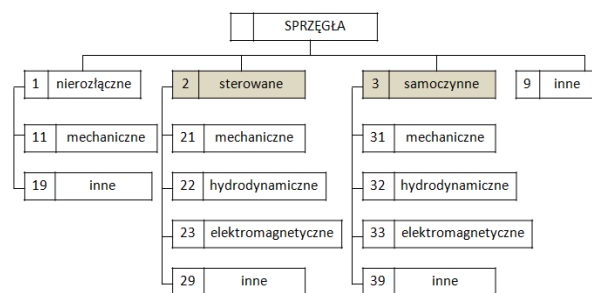
1. Wstęp

Zgodnie z definicją [4] sprzęgłem nazywamy zespół układu napędowego maszyny, przeznaczony do łączenia wałów i przekazywania momentu obrotowego bez zmiany jego wielkości i kierunku. Sprzęgło składa się z członu czynnego (napędzającego), i członu biernego (napędzanego) 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.

1.1. Klasyfikacja i podział sprzęgieł

Klasyfikację sprzęgieł według cech funkcjonalno-konstrukcyjnych opisuje norma PN-71/M-85250. W normie tej dokonuje się podziału sprzęgieł ze względu na funkcje jaką spełnia w sprzęgle łącznik. Wyróżnia się kolejno: klasy – różniące się działaniem łącznika, grupy – różniące się rodzajem zastosowanego łącznika, podgrupy – różniące się cechami użytkowymi sprzęgła i rodzaje – rozróżniające sposób połączenia członów lub rodzaj układu sterującego. [3]

Najczęściej podział sprzęgieł jest przedstawiany w sposób następujący: [3], [4].



Rys. 1. Klasyfikacja ogólna sprzęgieł [3]

Według klasyfikacji, jaką przedstawiono na rysunku 1, najbardziej ogólny podział sprzęgieł dotyczy klasyfikacji na sprzęgła nierozłączne, sterowane, samoczynne i inne. Podział ten dalej uszczegóławia się dzieląc np. sprzęgła nierozłączne, mechaniczne (podgrupa 11) na sprzęgła sztywne, samonastawne i podatne.

1.2. Ciecze magnetyczne i ich właściwości

Jednym z materiałów należących do grupy materiałów „smart” (tzw. materiałów inteligentnych – lub lepiej materiałów o specjalnych właściwościach) jest ciecz magnetoreologiczna (ciecz MR), której specjalne właściwości ujawniają się pod działaniem zewnętrznego pola magnetycznego - ciecz o konsystencji zbliżonej do oleju w polu magnetycznym zwiększając swoją lepkość staje się twardą masą. Efekt ten wynika ze zmiany struktury cieczy: ferroma-

gnetyczne drobinki zawieszane w cieczy nośnej, stanowiące pojedyncze domeny magnetyczne, pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego ulegają orientacji i koncentracji wzdłuż linii sił pola magnetycznego, tworząc skupiska cząsteczek w postaci łańcuchów.

Właściwości cieczy MR, znane od lat 40 XX wieku, zostały wykorzystane w aplikacjach technicznych dopiero w latach 90. Powodem tego były trudności technologiczne związane z produkcją cieczy. Dzisiaj produkowane są – z zastosowaniem cieczy MR – hamulce i amortyzatory o sterowalnych charakterystykach siły i momentu. Tematyka związana z wykorzystaniem cieczy magnetoreologicznych w konstrukcji nowych urządzeń technicznych jest ciągle aktualna i obserwuje się wiele prac poświęconych tej tematyce [1], [7] i inne.

Nowoczesne materiały typu SMART dają możliwości projektowania urządzeń, których funkcjonalność dzięki wykorzystaniu owych właściwości może stanowić nową jakość.

W artykule omówione będą zagadnienia związane z projektem sprzęgła, którego właściwości użytkowe związane są z własnościami cieczy magneto reologicznych.

2. Sprzęgło wielotarczowe

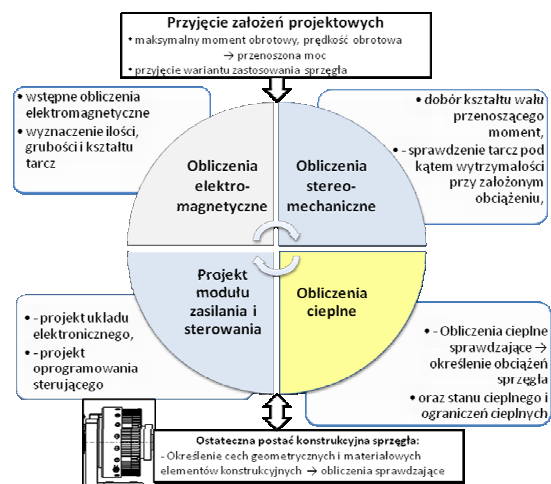
Pomysł, jaki podjęli autorzy dotyczył prototypu sprzęgła o konstrukcji wielotarczowej oraz z dwoma źródłami pola magnetycznego w obszarze roboczym sprzęgła. Takie rozwiązanie obwodu magnetycznego nazywane jest również hybrydowym. Przyjęcie budowy sprzęgła jako wielotarczowego ma swoje konsekwencje w postaci komplikacji części konstrukcyjnej, oraz obwodu magnetycznego.

Spodziewane właściwości użytkowe sprzęgła o hybrydowym obwodzie magnetycznym, łączniku w postaci cieczy MR i odpowiednim układzie zasilania i sterowania pozwalają na wskazanie czterech, możliwych zastosowań sprzęgła:

- sprzęgło w układzie dynamometrycznym,
- sprzęgło bezpieczeństwa (przeciążeniowe),
- sprzęgło spełniające funkcję aktywnego eliminatora drgań skrętnych w układzie napędowym,
- sprzęgło w układzie realizacji tzw. „miękkiego rozruchu”.

2.1. Koncepcja budowy sprzęgła

Pierwszym etapem realizacji założonego celu projektowego było opracowanie strategii, która może być przedstawiona w postaci schematu blokowego. Schemat ten przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Struktura procesu projektowego sprzęgła

We wstępnej fazie procesu projektowego przyjęto początkowe założenia projektowe w postaci:

- maksymalny moment przenoszony przez sprzęgło $T_{\text{smax}}=20\text{Nm}$,
- maksymalna prędkość obrotowa dla pracy sprzęgła $n_{\text{smax}}=1000\text{ obr/min}$,
- uniwersalna funkcjonalność sprzęgła – może spełniać dowolną z wymienionych wcześniej funkcji.

2.2. Obliczenia elektromagnetyczne

Obliczenia elektromagnetyczne zostały zrealizowane w dwóch etapach.

Etap 1 – obliczenia wstępne, których celem było wyznaczenie właściwej liczby tarcz, ich kształtu i wymiarów.

Przyjęto ograniczenia dla tych obliczeń polegające na tym, że tarcze zewnętrzne i wewnętrzne oraz ciecz, która znajduje się wewnątrz sprzęgła powinny mieścić się w walcu o średnicy około 75mm i wysokości około 30mm. Ponadto założono, (co jest podstawą pomysłu budowy sprzęgła), że źródłem pola magnetycznego w sprzęgle będzie magnes trwały oraz cewka, która będzie wytwarzała pole magnetyczne wzmacniające stałe pole od magnesu trwałego lub przeciwnie spowoduje osłabienie jego wartości.

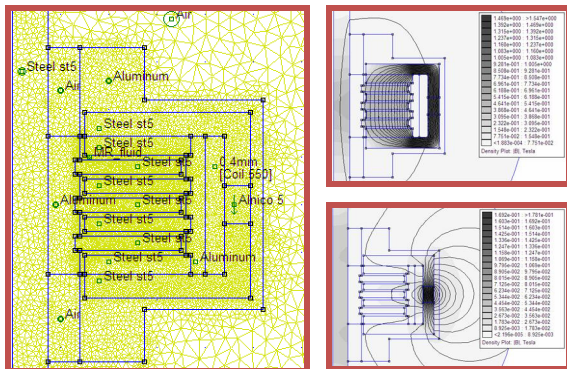
W celu wyznaczenia optymalnej ilości i grubości tarcz dokonano obliczeń wartości momentu sprężającego T_s w funkcji prądu cewki I dla różnej ilości tarcz, ich grubości i średnicy.

W celu oceny spełnienia kryteriów dotyczących zastosowania sprzęgła wyznaczono również wartości momentu sprężającego odniesione do objętości sprzęgła T_s/V i momentu bezwładności sprzęgła T_s/J .

W programie FEMM wykonano model połowy sprzęgła magnetoreologicznego, który uwzględnił charakterystyki magnesowania stali i cieczy magnetoreologicznej. Ze względu na symetrię osiową – zarówno geometryczną jak i magnetyczną – sprzęgła, jego model połowy jest modelem osiowosymetrycznym.

W programie Matlab stworzono skrypt, w którym dzięki użyciu języka LUA dokonywano zmian geometrii modelu w programie FEMM.

Wykorzystując model połowy sprzęgła dokonano obliczeń rozkładu pola magnetycznego w sprzęgle. Na rysunku 3 przedstawiono model połowy obwodu magnetycznego sprzęgła oraz wyniki obliczeń z nim związanych.



Rys. 3. Model MES obwodu magnetycznego sprzęgła oraz wyniki obliczeń

Na podstawie wyznaczonych rozkładów pola magnetycznego w sprzęgle obliczono wartości momentu sprężającego. Przy znajomości rozkładu pola magnetycznego (składowej normalnej indukcji B_n) na powierzchniach tarcz wirnika (w modelu osiowosymetrycznym na krawędziach tarcz wirnika), w oparciu o funkcję $\tau_0(H)$ – podaną przez producenta cieczy charakterystykę naprężeń stycznych w funkcji natężenia pola magnetycznego w cieczy – oraz charakterystykę $H=f(B)$ – podaną również przez producenta – obliczono wartości momentu sprężającego dla tarcz płaskich:

$$T_s = \sum_N \int_{R_1}^{R_2} \tau_0(H_n(r)) 2\pi r^2 dr \quad (1)$$

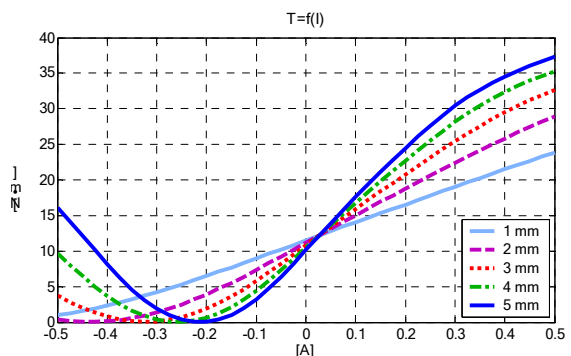
gdzie:

N – ilość powierzchni czynnych tarcz wirnika (2 x ilość tarcz wirnika),

R_1 – wewnętrzny promień tarczy wirnika,

R_2 – zewnętrzny promień tarczy wirnika.

Na podstawie serii przeprowadzonych symulacji uzyskano szereg charakterystyk przedstawiających zależności momentu sprężającego od prądu zasilania cewki $T_s=f(I)$, ilorazu momentu sprężającego do objętości od prądu zasilania cewki $T_s/V=f(I)$ oraz ilorazu momentu sprężającego do momentu bezwładności od prądu zasilania cewki $T_s/J=f(I)$. Charakterystyki te wykreślono dla zakresu zmian następujących parametrów: ilość tarcz: 2, 3, 4, 5 oraz grubość tarcz w zakresie od 1 do 5 mm. Na podstawie uzyskanych wyników wybrano ostatecznie wariant, w którym liczba tarcz osadzonych na wale wynosi 5 sztuk a ich grubość 2 mm. Dla tego wariantu charakterystyka przeniesionego momentu w funkcji prądu zasilania cewki sprzęgła dla różnych grubości tarcz przedstawiono na rysunku 4.

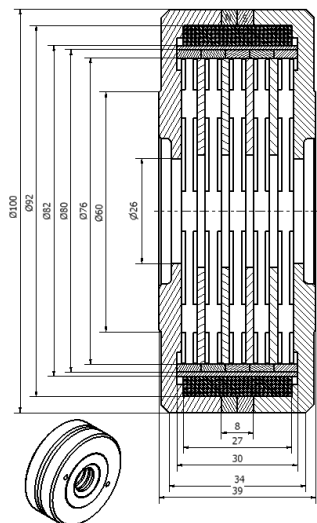


Rys. 4. Charakterystyki $T_s=f(I)$ dla różnych grubości tarcz

Etap 2 – obliczenia sprawdzające, których celem było wyznaczenie ostatecznych wymiarów elementów stanowiących obwód elektromagnetyczny.

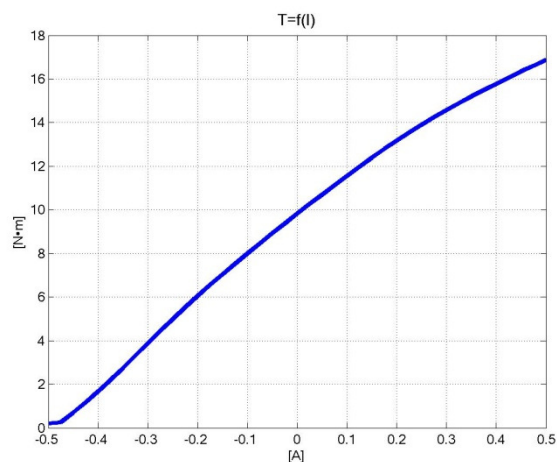
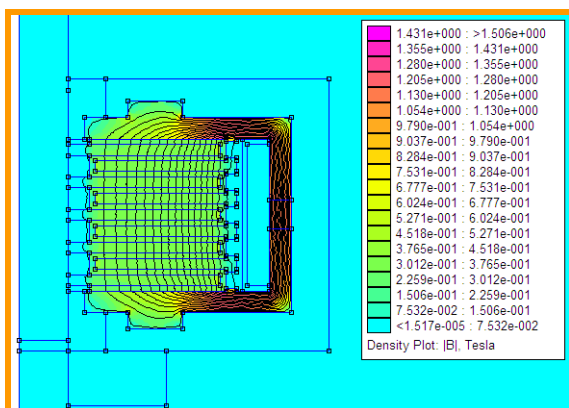
Etap 2 obliczeń elektromagnetycznych został przeprowadzony po obliczeniach wytrzymałościowych przeprowadzonych dla kluczowych elementów sprzęgła, odpowiedzialnych za przeniesienie momentu. Obliczenia te wykazały konieczność niewielkich korekt wymiarów przyjętych dla obliczeń elektromagnetycznych.

Ostateczny model obliczeniowy przedstawiono na rysunku 5. Dla tego modelu przeprowadzono ponowne, ostateczne obliczenia, których wyniki przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Model CAD ostatecznej wersji obwodu magnetycznego sprzęgła

Wyniki obliczeń dla ostatecznej geometrii obwodu elektromagnetycznego sprzęgła.

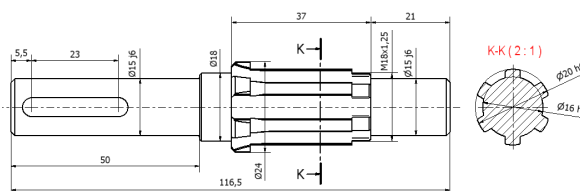


Rys. 6. Wyniki obliczeń elektromagnetycznych dla ostatecznej wersji obwodu magnetycznego

2.3. Obliczenia stereomechaniczne

Obliczenia wytrzymałościowe są koniecznym etapem procesu projektowego tak, aby zweryfikować stan naprężeń i odkształceń kluczowych elementów sprzęgła pod wpływem działania momentu obciążającego. Obliczenia zrealizowano z wykorzystaniem dostępnych narzędzi wspierających projektowanie elementów konstrukcyjnych zaimplementowanych w programie Autodesk Inventor 2010.

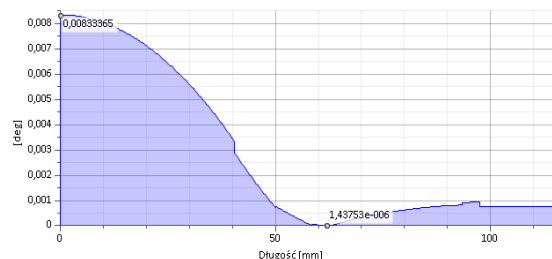
Etap 1: Obliczenia wału sprzęgła

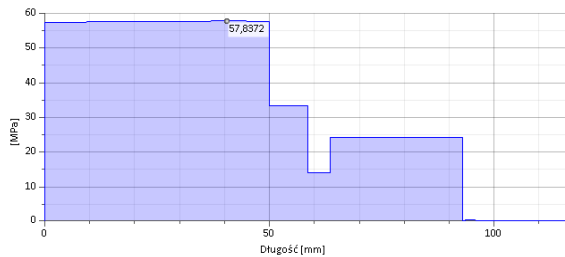


Rys. 7. Model CAD wału sprzęgła z podstawowymi wymiarami

Jako obciążenia wałka założono: moment skrajający działający na wałek o wartości 22Nm, oraz siłę poprzeczną (wynikającą np. z niewyosiowania sprzęgła z dalszą częścią układu napędowego) na poziomie 50N.

Generator wałów programu Inventor 2010 umożliwia wyznaczenie rozkładu wielkości odkształcenia i naprężeń na długości wału. Wielkości te dotyczą wykresów sił i momentów oraz naprężeń i odkształceń nimi wywołanych. Dodatkowo wyznaczane są wykresy wartości naprężeń zredukowanych oraz określany jest wykres średnicy idealnej. Wielkości te wyznaczane są w punktach równo rozłożonych na długości wału. Ilość tych punktów można ustalić w szerokim zakresie. Poniższe obliczenia zrealizowano przy podziale na 500 odcinków. Na rysunku 8 przedstawiono wykres wartości kąta ugięcia wału oraz poniżej wykres naprężeń zredukowanych.





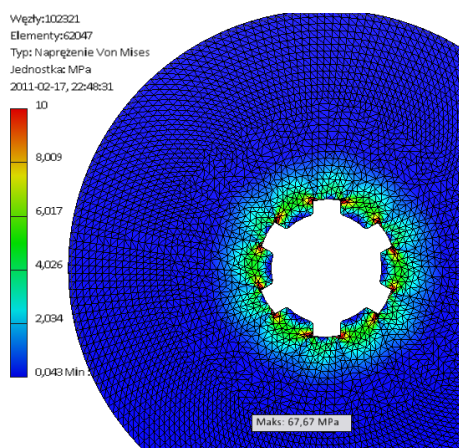
Rys. 8. Wyniki obliczeń sprawdzających dla wału sprzęgła

Materiał dla wykonania wału sprzęgła został określony, jako stal nierdzewna 0H18N10T, (1.4541) dla której minimalna granica plastyczności R_e określona jest na poziomie 216MPa [4]. A zatem można założyć, że przyjęta geometria wału dla założonego materiału konstrukcyjnego będzie wystarczająca dla przeniesienia założonych obciążeń. Ten rodzaj materiału przyjęto w zastępstwie za trudno dostępne stale niemagnetyczne klasy G18H3 lub H12N11G6 [2].

Etap 2: Obliczenia tarcz sprzęgła

Dla tarcz sprzęgła przeprowadzono również analizę wytrzymałościową, wykorzystując do tego celu „Moduł analizy naprężeń” programu Inventor 2010.

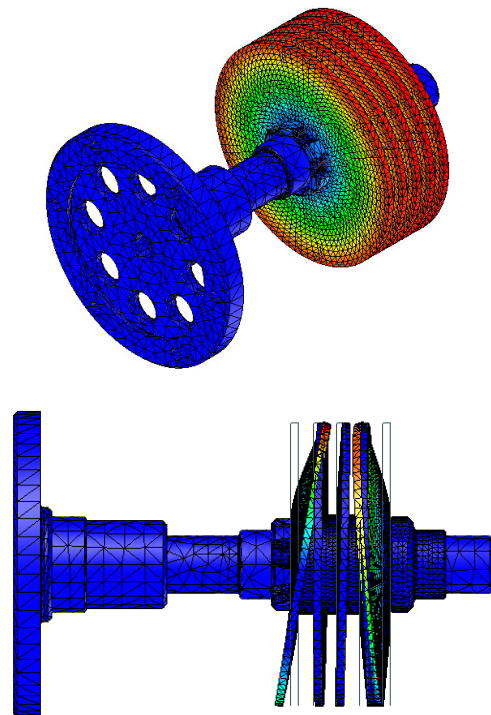
Na rysunku 9 przedstawiono rozkład naprężeń w tarczach sprzęgła przy obciążeniu momentem $T_s=22Nm$.



Rys. 9. Rozkład naprężeń w tarczy sprzęgła

Wyznaczono ponadto wartości częstotliwości drgań własnych zespołu tarcz oraz odpowiadające im postacie drgań.

Na rysunku 10 przedstawiono 1 i 2 postać drgań własnych dla częstotliwości odpowiednio: 1190Hz i 2550Hz.



Rys. 10. Postacie odpowiadające 1 i 2 częstotliwości drgań własnych tarcz sprzęgła

W zakresie obliczeń stereomechanicznych dokonano ponadto obliczeń tarcz zewnętrznych oraz połączeń śrubowych, odpowiedzialnych za przeniesienie momentu.

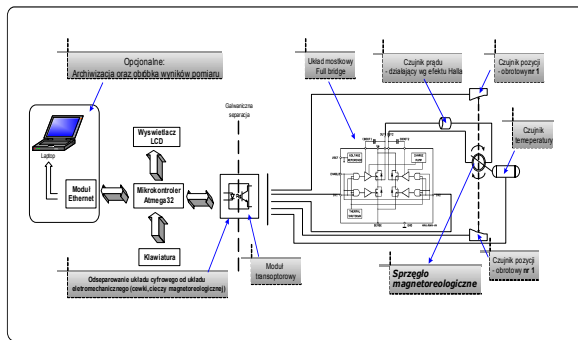
2.4. Obliczenia cieplne

W trakcie realizacji fazy projektowej nie przeprowadzono obliczeń cieplnych. Zagadnienie weryfikacji obciążeń cieplnych dla sprzęgła zostaną zrealizowane doświadczalnie na stanowisku badawczym. Badania te będą polegały na wprowadzaniu sprzęgła w poślizg o różnej wartości (dla sprzęgła o tej konstrukcji poślizg może wynosić od 0 do 1), a następnie na pomiarze z wykorzystaniem kamery termowizyjnej dla określenia rozkładu temperatury na korpusie sprzęgła w funkcji czasu pracy w poślizgu.

2.5. Projekt modułu zasilania i sterowania

O funkcjonalności sprzęgła oprócz jego konstrukcji i hybrydowego rozwiązania obwodu magnetycznego decyduje przede wszystkim sposób zasilania i sterowania sprzęgłem. Jeżeli ma ono być wykorzystane, jako element półaktywnego układu tłumienia drgań, to w układzie sterowania musi pojawić się informacja o drganiach skrętnych oraz o poślizgu, jaki pojawia się pomiędzy czynną i bierną częścią sprzęgła.

Strukturę układu zasilania i sterowania pracą sprzęgła przedstawiono schematycznie na rysunku 11.

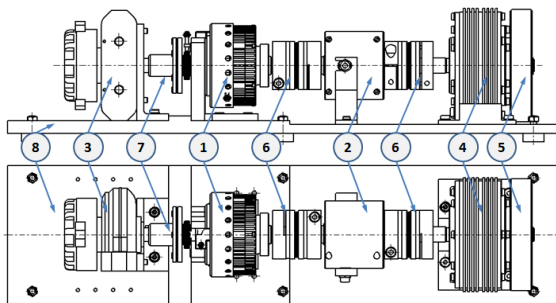


Rys. 11. Schemat układu sterowania sprzęgła

3. Projekt stanowiska pomiarowego

Dla realizacji badań pomiarowych zaprojektowano stanowisko badawcze, które przeznaczone jest do wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych zaprojektowanego sprzęgła.

Podstawą stanowiska jest uniwersalna płyta montażowa 8, która została tak wykonana, aby zapewnić możliwość zamontowania wszystkich komponentów układu pomiarowego niezależnie od rodzaju badań (badania statyczne i dynamiczne) oraz niezależnie od typu badanego sprzęgła. Postać stanowiska badawczego skonfigurowanego do wyznaczania charakterystyk statycznych przedstawiona została na rys. 12.



Rys. 12. Postać konstrukcyjna stanowiska pomiarowego

Podstawowe elementy stanowiska badawczego to: **1** – badane sprzęgło, **2** – momentomierz DATAFLEX 22/20, **3** - siłownik pneumatyczny obrotowy FESTO DSR-16-180-P dla wytworzenia momentu obciążenia dla sprzęgła (badania statyczne oraz pulsacje z niskimi częstotliwościami), **4** – hamulec proszkowy FUMO VER-30H-20-6 (wytworzenie momentu hamującego o regulowanej wartości), **5** – obciążenie w postaci tarczy bezwładnościowej (obciążenie bierne), **6** – sprzęgła podatne bezluzowe

RADEX-NC 25 EK, **7** – sprzęgło łączące siłownik z badanym sprzęgłem, **8** – płyta montażowa. W badaniach dynamicznych siłownik obrotowy zostanie zastąpiony zespołem napędowym SKh71X-4C/XC40-7 o mocy 0,55kW, produkcji BESEL S.A.

4. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule działania projektowe, których efektem końcowym jest wielotarczowe sprzęgło magneto-reologiczne o wzbudzeniu hybrydowym, stanowią o tym, że urządzenie to można nazwać mechatronicznym. Weryfikacja uzyskanych wyników obliczeń i symulacji zostanie zrealizowana na zaprezentowanym stanowisku pomiarowym.

5. Literatura

- [1]. Bajkowski J., Pyrz M., Zalewski R.: *Modelowe badania prototypu tłumika magneto-reologicznego*. Modelowanie Inżynierskie. Tom 9, nr 40, grudzień 2010, ISSN 1896-771X.
- [2]. Bajorek J., Kolasa J.: *Stale austenityczne w budowie maszyn elektrycznych – właściwości, badania*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, Nr 48, 2000r, str. 312-318.
- [3]. Dietrich M. i inni: *Podstawy konstrukcji maszyn, tom 3*, WNT, 2006, ISBN 83-204-3209X
- [4]. Dobrzański L. i inni: *Leksykon materiałoznawstwa. v.1.41*, Wydawnictwo Verlag Dashofer, październik 2010.
- [5]. Kielan P., Kowol P., Pilch Z.: *Conception of the electronic controlled magnetorheological clutch*, Przegląd Elektrotechniczny (przyjęty do druku).
- [6]. Skoć A., Spałek J., Markusik S.: *Podstawy konstrukcji maszyn. tom 2, trybologia, elementy podatne, wały i osie, łożyska, sprzęgła i hamulce.*, WNT, 2008, ISBN 978-83-204-3405-7.
- [7]. Spencer B. F. Jr., Dyke S. J., Sain M.K., Carlson J.D. *Phenomenological model of a magnetorheological damper*. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1996.

Autorzy

dr inż. Zbigniew PILCH, email: zbigniew.pilch@polsl.pl
 dr inż. Paweł KOWOL, email: pawel.kowol@polsl.pl
 mgr inż. Paweł KIELAN, email: pawel.kielan@polsl.pl
 Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice, tel. (032) 237 26 77,

„Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy N N510 355337”