

Krzysztof FILIPOWICZ, Aleksander KOWAL
Politechnika Śląska, Gliwice

STANOWISKA BADAWCZE DO WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK METALOWEGO SPRZĘGŁA PODATNEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis stanowisk badawczych i metodykę wyznaczania charakterystyk statycznych, quasi-dynamicznych i dynamicznych oraz reakcji sprzęgła na wymuszenie chwilowym momentem obciążającym oraz przebiegu momentu obrotowego przy rozruchu metalowego sprzęgła o dużej podatności skrętnej.

TEST STANDS FOR DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF FLEXIBLE METAL COUPLING

Summary. In the paper there is presented description of some test stands and a methodology of marking static, quasi-dynamic, dynamic characteristics and the coupling reaction on extortion the temporary moment burdening and the course of the rotatory moment near starting of metal coupling with significant torsional flexibility.

1. Wstęp

Obciążenie napędów maszyn górniczych, determinuje stosowanie w układach napędowych sprzęgieł o dużej podatności skrętnej, odpornych na oddziaływanie określonych warunków obciążeń. Odpowiednią konstrukcją może się okazać metalowe sprzęgło podatne skrętnie [2, 3, 4].

Sprzęgło podatne charakteryzuje się zarówno określonymi cechami sprężystymi, jak i tłumiącymi, które mają podstawowy wpływ na pracę układu napędowego poprzez zmianę przebiegu oraz stabilizację drgań skrętnych i momentu obrotowego. Przy zastosowaniu sprzęgieł podatnych o nieodpowiednich charakterystykach można doprowadzić do stanu niepoprawnej pracy całego układu napędowego. Wobec tego, koniecznością staje się

określenie charakterystyk statycznych, quasi-dynamicznych oraz dynamicznych sprzęgieł podatnych. Konieczne jest także określenie zmienionego przez sprzęgło przebiegu momentu obrotowego, działającego na metalowe sprzęgło podatne skrzętnie, jako reakcji układu na wymuszenie w chwili rozruchu oraz przy zadawanym obciążeniu impulsowym. Taka znajomość zapewni prawidłową pracę napędu maszyny roboczej.

Analiza konstrukcyjna sprzęgieł podatnych, których większość posiada złożoną konstrukcję oraz zawiera łączniki podatne o trudno definiowalnych cechach fizykochemicznych, prowadzi do wniosku, że najbardziej odpowiednim i korzystnym sposobem wyznaczenia charakterystyk sprzęgieł podatnych jest przeprowadzenie badań doświadczalnych na odpowiednich stanowiskach badawczych. W tym celu opracowano program badawczy dla nowego metalowego sprzęgła podatnego skrzętnie, którego celem było wyznaczenie wymienionych wcześniej charakterystyk.

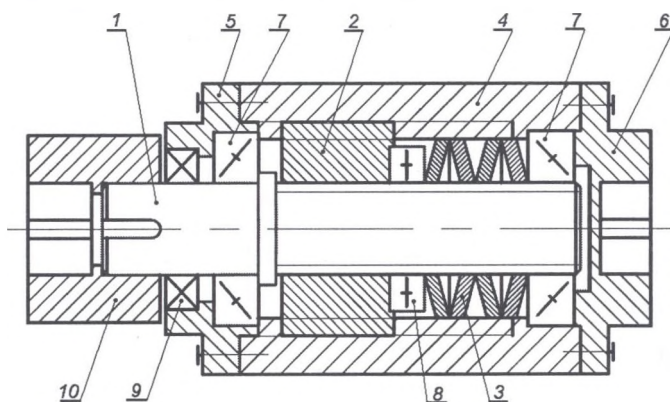
2. Budowa i zasada działania metalowego sprzęgła podatnego skrzętnie

Badaniom zostało poddane nowe metalowe sprzęgło podatne skrzętnie (rys. 1), którego istota działania polega na tym, że moment obrotowy przenoszony jest od strony czynnej do biernej za pomocą elementu przesuwnego z dwoma mechanizmami gwintowymi. Połączenia gwintowe wykonuje się między zewnętrznie nagwintowanym wałem wejściowym (1) i elementem przesuwным (2), który posiada także gwint na zewnętrznej powierzchni walcowej. Ten zewnętrzny gwint współpracuje z gwintem wewnętrznym wykonanym w obudowie (4). Obydwa mechanizmy gwintowe różnią się kierunkami oraz skokami linii śrubowej. Skoki gwintów wielozwojowych są na tyle duże, że kąt wzniosu linii śrubowej jest większy od ich kąta tarcia.

Wał wejściowy łożyskowany jest na dwóch łożyskach stożkowych (7). Obudowa zamknięta jest pokrywą (5) z umieszczonym w niej pierścieniem uszczelniającym (9) oraz pokrywą (6). Napięcie odpowiednio dobranego zestawu sprężyn talerzowych (3), wywołane ruchem obrotowym wału wejściowego (1) i tulei połączeniowej (10), powoduje wzrost składowej siły w kierunku obwodowym na gwincie elementu przesuwnego. Wzrost tej siły powoduje zwiększanie się momentu obrotowego, a gdy osiągnie on wartość momentu obciążającego maszyny, rozpoczyna się jej ruch obrotowy będący jednocześnie ruchem roboczym.

Chwilowe przeciążenie napędu powoduje dodatkowe ściskanie elementów sprężystych, a zmniejszenie obciążenia – ich odprężanie. Po wyłączeniu układu napędowego element przesuwny (2) i łożysko wzdłużne (8) naciskane przez sprężyny wracają do położenia wstępnego na wale wejściowym. Przy odpowiednio dużym wstępnym ściśnięciu sprężyny i po wyłączeniu układu element przesuwny powinien powrócić do położenia początkowego.

Względny obrót członów sprzęgła, pod wpływem nominalnego obciążenia między wejściem i wyjściem, może być bardzo duży i wynosić np. pełny obrót wału wejściowego (czynnego), zanim wał wyjściowy (bierny) rozpocznie ruch obrotowy. Konstrukcję sprzęgła metalowego podatnego skrętnie szczegółowo opisano w pracy [4].



Rys. 1. Przykład budowy jednokierunkowego sprzęgła podatnego skrętnie z dwoma mechanizmami gwintowymi
Fig. 1. The example of one-way torsionally flexible clutch with two screws mechanisms

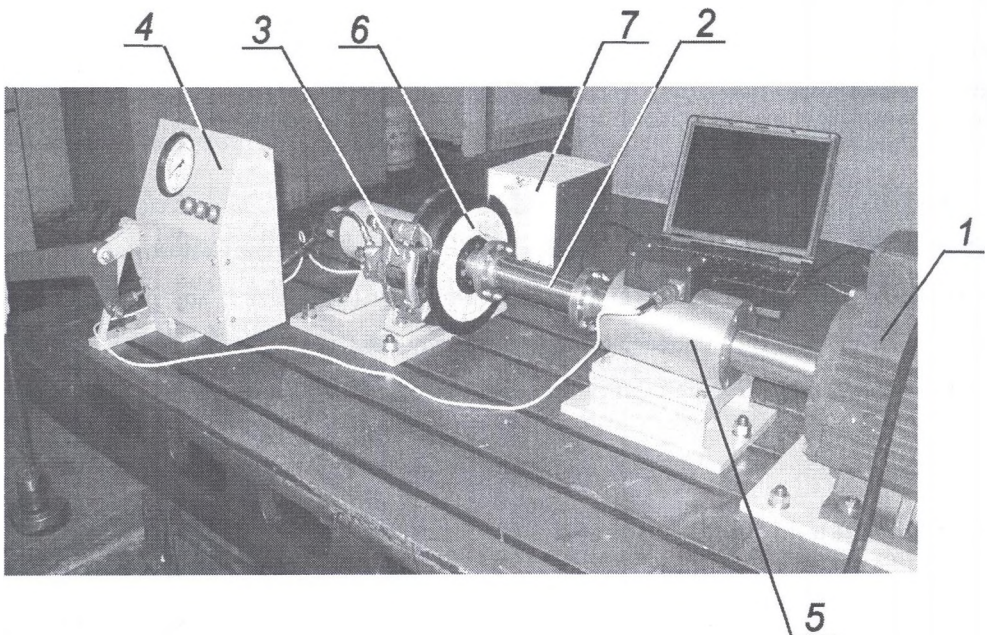
Badania przeprowadzono na sprzęgle z umieszczonym w nim zestawem sprężyn talerzowych, składającym się z 14 pakietów po 4 sprężyny w pakiecie. Zastosowano sprężyny o wymiarach 40 x 20,4 x 2 mm (DIN 2093). Zestaw był tak dobrany, aby przy założonym maksymalnym momencie skręcającym, wynoszącym $M_{max} = 100$ Nm, sprężyny pracowały poniżej dopuszczalnego zakresu pracy, tzn. 75% ugięcia maksymalnego.

3. Stanowisko do badania sprzęgieł mechanicznych

W Instytucie Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej zbudowano stanowisko badawcze przeznaczone do badania sprzęgieł mechanicznych (rys. 2). Stanowisko to pozwala na prowadzenie następujących badań:

- wyznaczanie charakterystyki statycznej sprzęgła,
- wyznaczanie przebiegu zmienionego przez sprzęgło momentu obrotowego, działającego na metalowe sprzęgło podatne skrętnie, jako reakcji układu na wymuszenie wywołane rozruchem silnika, tzn. praca sprzęgła podczas rozruchu układu napędowego,
- wyznaczanie przebiegu zmienionego przez sprzęgło momentu obrotowego jako reakcji układu na wymuszenie w postaci zadawanego obciążenia impulsowego, tzn. praca sprzęgła przy obciążeniu impulsowym układu napędowego.

Silnik elektryczny (1) zasilany poprzez falownik stanowiący przetwornicę częstotliwości, który pozwala na płynną regulację prędkości obrotowej od 0 do 1700 min^{-1} , połączony jest mechanicznie z momentomierzem tensometrycznym (5), służącym do pomiaru momentu obrotowego $M_{obr} = M_{stat}$. Wartość zmierzonego momentu obrotowego jest mierzona i rejestrowana za pomocą komputerowej aparatury pomiarowej (7) typu SCXI firmy National Instruments. Do wyjściowego wału momentomierza bezpośrednio połączony jest jeden z członów badanego metalowego sprzęgła podatnego (2), będący jego obudową. Drugi człon sprzęgła, stanowiący wał wyjściowy, dołączony jest do tarczowego hamulca hydraulicznego (3) z układem sterowania (4). Tarcza z kątową podziałką (6) służy do odczytu kąta względnego obrotu członów sprzęgła przy wyznaczaniu charakterystyki statycznej sprzęgieł.



Rys. 2. Stanowisko do badania sprzęgieł mechanicznych
 Fig. 2. The test stand for investigation of mechanical couplings

4. Stanowisko badawcze do wyznaczania charakterystyk quasi-dynamicznych i dynamicznych sprzęgła

Wyznaczanie charakterystyk dynamicznych sprzęgła przeprowadzono na zmodernizowanym stanowisku badawczym w Katedrze Logistyki i Transportu Przemysłowego Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej w Katowicach (rys. 3) [6, 7].

Na stanowisku tym przeprowadzono badania, które pozwoliły na wyznaczenie:

- charakterystyki quasi-dynamicznej metalowego sprzęgła podatnego skądnie,
- charakterystyki dynamicznej sprzęgła.

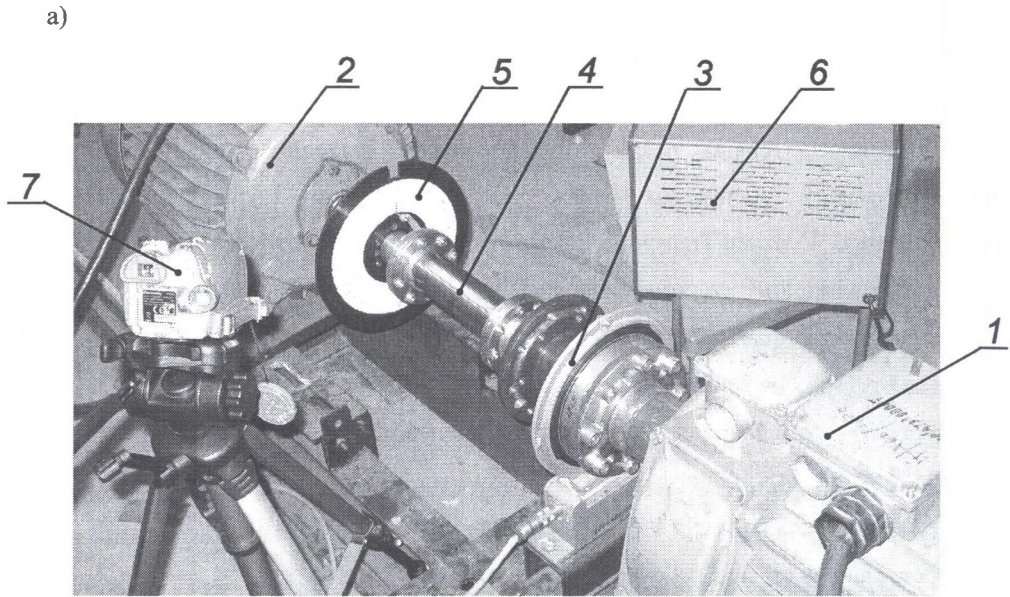
Stanowisko to umożliwia także badania i pomiar innych wielkości charakteryzujących sprzęgła. Pozwala na:

- zadawanie w sposób ciągły stałej składowej momentu obrotowego,
- generowanie w czasie składowej zmiennej momentu obrotowego,
- pomiar wypadkowego momentu obrotowego,
- pomiar względnego kąta skądzenia między członami sprzęgła.

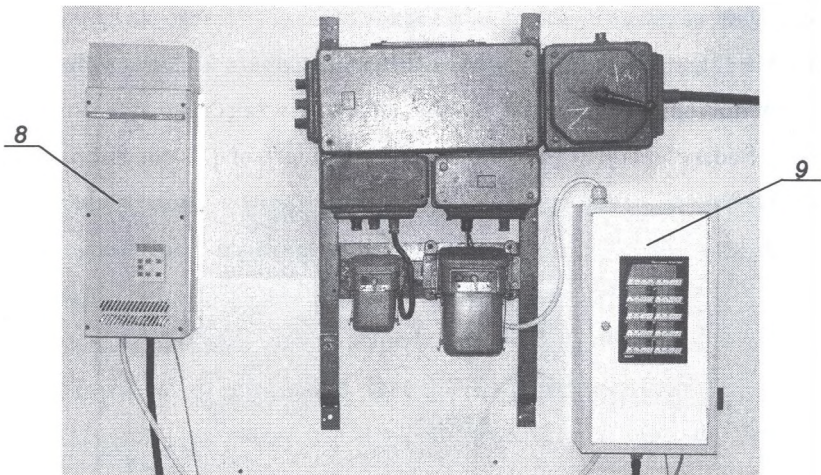
Zasadniczymi elementami stanowiska badawczego, pokazanego na rysunku 3, są: silnik indukcyjny M1 (1), silnik indukcyjny M2 (2), momentomierz tensometryczny (3), falownik (8), sterownik mikroprocesorowy (9), układ pomiarowy względnego kąta skądzenia członów sprzęgła (5). Badane sprzęgło (4) wraz z momentomierzem (3) umieszczone jest między silnikami (1) i (2).

Zasada działania stanowiska badawczego polega na zmianie obciążenia mechanicznego między dwoma współpracującymi silnikami M1 i M2. Obciążenie wywoływane jest przez zmianę prędkości obrotowej silnika M2 w wyniku zmiany jego częstotliwości zasilającej w stosunku do prędkości obrotowej silnika M1. Umożliwia to w sposób kontrolowany wygenerowanie momentu skądającego. Silnik M1 jest podłączony bezpośrednio do układu zasilającego 380 V, 50 Hz i wiruje ze stałą prędkości obrotową (np. $n_{obr} = 1470 \text{ min}^{-1}$). Silnik M2 zasilany jest za pośrednictwem falownika. Poprzez zmianę częstotliwości zasilania silnika następuje zmiana jego charakterystyki, która powoduje zmianę prędkości obrotowej. Zmiana prędkości obrotowej silnika M2 w stosunku do silnika M1 pozwala na wytworzenie zmiennego lub stałego momentu skądającego, który powstaje w wyniku przesunięcia punktu pracy na charakterystyce mechanicznej silnika M1 w stosunku do punktu pracy silnika M2.

Moment skądający M_{qdyn} mierzony jest momentomierzem tensometrycznym T10F firmy Hottinger. W układzie zasilającym wykorzystano przemiennik częstotliwości typu SIMOWERT 6SE2122-2AA01.



b)



Rys. 3. Widok ogólny stanowiska do wyznaczania charakterystyki quasi-dynamicznej i dynamicznej sprzęgła, gdzie: a) układ wykonawczy stanowiska, b) układ sterowania

Fig. 3. The test stand view for quasi-dynamic and dynamic characteristic determination of coupling, where: a) the stand execution system, b) a control set

Układ sterowania wyposażono w sterownik mikroprocesorowy typu DLM-080. Sterownik ten umożliwia pomiar i wyświetlanie wartości momentu skręcającego i zadanie w określonych cyklach czasowych stałego, jak i zmiennego obciążenia sprzęgła podatnego.

Poziom momentu skręcającego sprzęgło, na jaki pozwala program sterownika, wynosi od 30 Nm do 130 Nm z okresem zmian tego momentu w zakresie od 0,1 s do 25,5 s.

Do pomiaru kąta wzajemnego skręcenia członów sprzęgła wykorzystano układ tarczy z podziałką kątową, przymocowaną do jednego członu sprzęgła, względem której przesuwa się wskazówka umocowana do drugiego członu sprzęgła. Odczytu wirującego układu tarcza – wskazówka dokonywano przy użyciu lampy stroboskopowej (6), co umożliwiła pozorne zatrzymanie obrazu i bezpośredni odczyt kąta. Dokładność odczytu wynosiła $\pm 1^\circ$. W celu zwiększenia poprawności odczytu i wyeliminowania ewentualnych błędów dokonywano rejestracji cyklu pomiarowego kąta kamerą cyfrową (7).

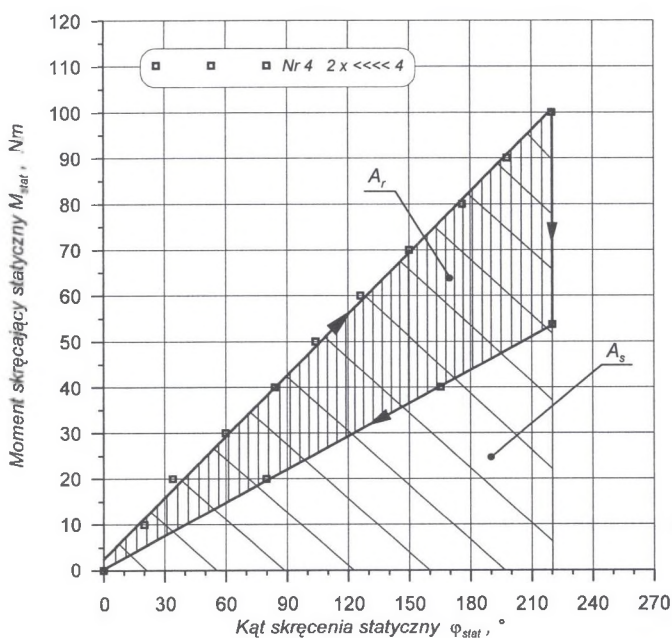
5. Metodyki wyznaczania charakterystyk metalowego sprzęgła podatnego skrętnie

5.1. Metodyka wyznaczania charakterystyki statycznej

W przypadku wyznaczania charakterystyki statycznej na stanowisku badawczym, przedstawionym na rysunku 2, do wału wyjściowego sprzęgła przymocowano obrotową tarczę z podziałką kątową $0^\circ + 360^\circ$ (6). Do odczytu kąta względnego obrotu członów $\varphi = \varphi_{stat}$ użyto umocowanej do obudowy sprzęgła wskazówki. Po zamontowaniu sprzęgła na stanowisku badawczym zahamowano hamulec hydrauliczny, co oznacza, że zablokowano możliwość obrotu jednego z członów sprzęgła podatnego. Poprzez falownik uruchomiony jest silnik elektryczny i stopniowo zwiększany jest moment obrotowy M_{stat} . Stopniowanie tego momentu M_{stat} ustalono z krokiem 10 Nm do wartości maksymalnej $M_{max} = 100$ Nm. Dla każdej wartości momentu dokonywano odczytu kąta względnego obrotu członów sprzęgła φ_{stat} na podziałce kątowej tarczy za pomocą wskazówki. Dokładność dokonywanego odczytu wynosiła $\pm 1^\circ$. Odczytów zależności momentu obrotowego M_{stat} od kąta względnego obrotu φ_{stat} dokonywano zarówno przy obciążaniu, jak i odciążaniu sprzęgła. Celem tak przyjętej procedury było określenie pętli histerezy, przedstawiającej przebieg tłumienia energii mechanicznej w układzie [1, 5, 8, 9].

Przykład charakterystyki statycznej tak badanego metalowego sprzęgła podatnego przedstawia rysunek 4. Na rysunku zaznaczono pola wielkości charakteryzujących przebieg tłumienia energii mechanicznej, tzn.: A_r – praca tłumienia podczas jednego cyklu pracy oraz A_s – praca odkształcenia sprężystego na jeden cykl pracy.

Charakterystyka statyczna sprzęgła podatnego jest zależnością momentu obrotowego M_{obr} , skręcającego sprzęgło o określony kąt obrotu φ między członem czynnym i biernym sprzęgła.

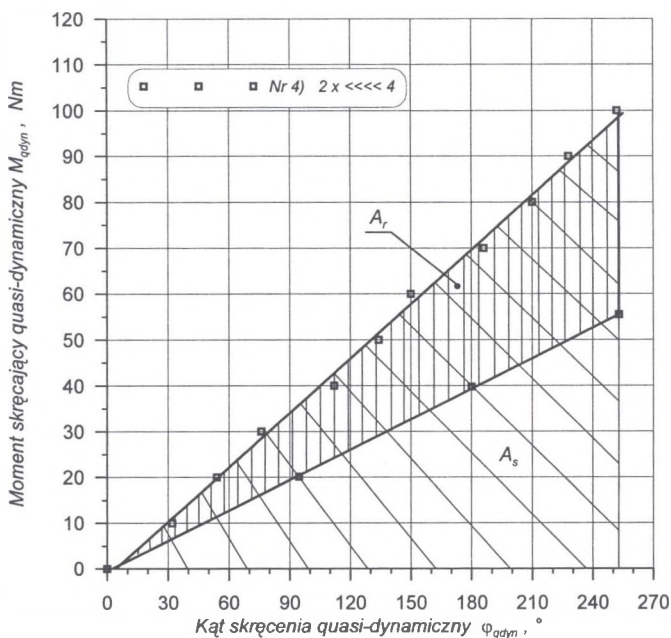


Rys. 4. Graficzna ilustracja charakterystyki statycznej metalowego sprzęgła podatnego skrotnie
Fig. 4. The illustration of static characteristic of torsionally flexible metal coupling

5.2. Metodyka wyznaczania charakterystyki quasi-dynamicznej sprzęgła

Po uruchomieniu stanowiska badawczego, przedstawionego na rysunku 3, silniki wraz ze sprzęgłem wirują ze stałą prędkością obrotową $n_{obr} = 1470 \text{ min}^{-1}$. Podczas pracy stanowiska zmieniany jest moment obrotowy M_{qdyn} , obciążający układ napędowy ze sprzęgłem z krokiem 10 Nm, aż do wartości maksymalnej $M_{max} = 100 \text{ Nm}$. Jednocześnie odczytywany jest kąt względnego obrotu członów sprzęgła φ_{qdyn} .

Charakterystyka quasi-dynamiczna, której przykład przedstawia rysunek 5, wyraża zależność między momentem obrotowym M_{qdyn} obciążającym sprzęgło a kątem wzajemnego obrotu członów sprzęgła φ_{qdyn} , przy założeniu że kolejne rosnące wartości momentu obrotowego zadawane są stosunkowo wolno przy jednoczesnym odczycie odpowiadających im wartości kąta φ_{qdyn} , podczas wirowania całego układu napędowego wraz ze sprzęgłem.



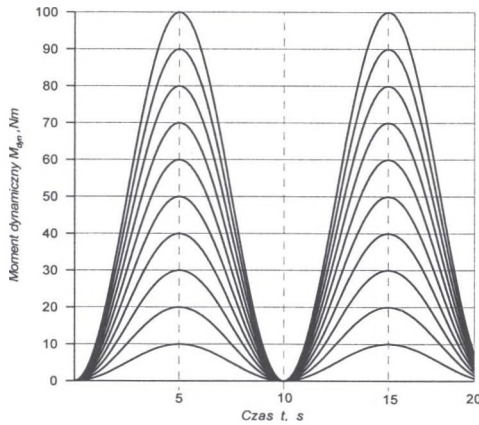
Rys. 5. Graficzna ilustracja charakterystyki quasi-dynamicznej metalowego sprzęgła podatnego skrętnie
 Fig. 5. The illustration of quasi-dynamic characteristic of torsionally flexible metal coupling

5.3. Metodyka wyznaczania charakterystyki dynamicznej sprzęgła

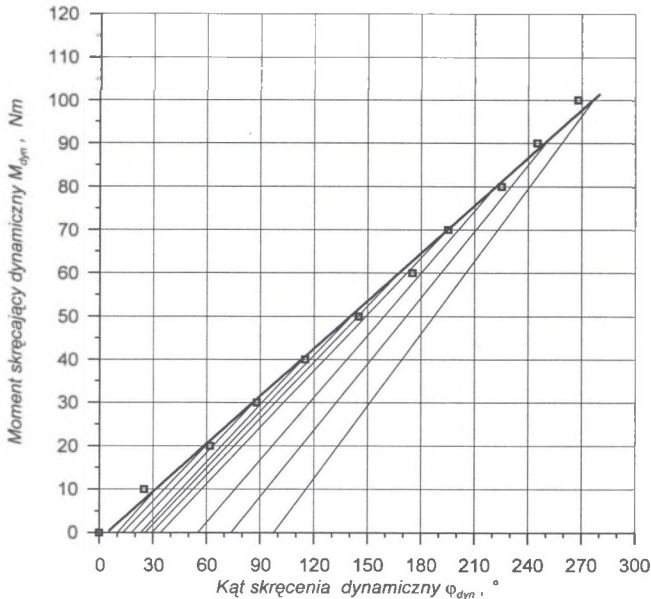
Wyznaczanie charakterystyk dynamicznych sprzęgła prowadzono na stanowisku badawczym z rysunku 3. Uruchomione silniki wraz ze sprzęgłem wirują ze stałą prędkością obrotową $n_{obr} = 1470 \text{ min}^{-1}$. Podczas pracy stanowiska moment obrotowy M_{dyn} , obciążający układ napędowy wraz ze sprzęgłem, zmieniany jest okresowo co 5 s od wartości $M_{dynmin} = 0 \text{ Nm}$ do chwilowej wartości maksymalnej momentu M_{dynmax} . Wartość chwilowa maksymalnego momentu zmieniana jest z krokiem 10 Nm, do wartości 100 Nm. Przebieg tych zmian ilustruje rysunek 6.

Zasada odczytu zmieniającego się cyklicznie momentu obrotowego oraz odczytu i rejestracji odpowiadającego mu względnego obrotu członów sprzęgła φ_{qdy} następuje tak jak przy wyznaczaniu charakterystyki quasi-dynamicznej.

Przykład uzyskanej na podstawie badań charakterystyki dynamicznej metalowego sprzęgła podatnego przedstawia rysunek 7.



Rys. 6. Przebieg zmian momentu obrotowego M_{dyn} , obciążającego układ napędowy ze sprzęgłem
 Fig. 6. The course of the changes of the rotatory moment M_{dyn} , burdening the driving system with the coupling



Rys. 7. Graficzna ilustracja charakterystyki dynamicznej metalowego sprzęgła podatnego skrętnie
 Fig. 7. The illustration of dynamic characteristic of torsionally flexible metal coupling

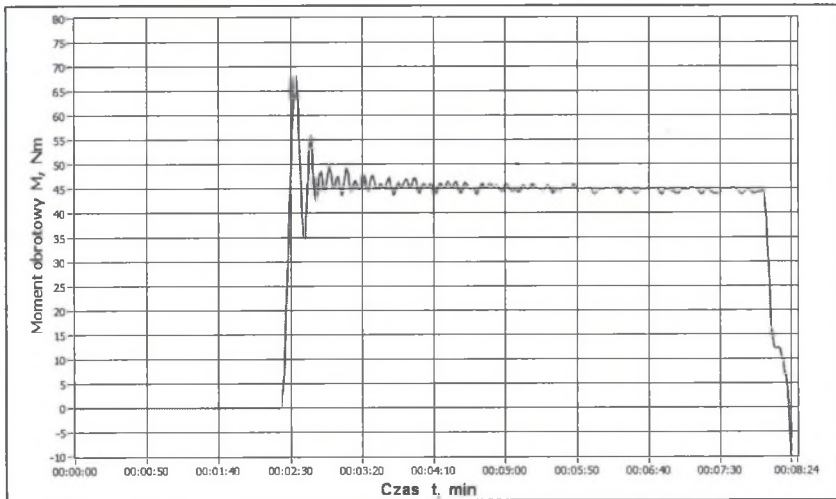
5.4. Praca sprzęgła podczas rozruchu układu napędowego

Badania metalowego sprzęgła podatnego skrętnie miały na celu wyznaczenie przebiegu zmian momentu obrotowego obciążającego sprzęgło, jako reakcji układu na wymuszenie powstałe podczas rozruchu silnika elektrycznego, napędzającego stanowisko badawcze, które zostało przedstawione na rysunku 2.

Podczas rozruchu układu napędowego istnieje nadwyżka momentu obrotowego obciążającego sprzęgło, która wywołana jest bezwładnością napędzanych elementów. Szerzej zagadnienia te, wraz z analizą przebiegu zmian momentu, wywołanych umieszczeniem sprzęgła podatnego w układzie napędowym, opisane są w pracach [1, 5, 8]. W układzie napędowym stanowiska badawczego są to elementy hamulca tarczowego oraz samego sprzęgła.

W trakcie danego cyklu badań rozruch silnika elektrycznego następował przez bezpośrednie podanie pełnego napięcia zasilającego na jego uzwojenia przy połączeniu w trójkąt, z pominięciem falownika. Powoduje to dynamiczny start całego układu napędowego. Dodatkowo, podczas rozruchu sprzęgło obciążone jest roboczym momentem obrotowym M_h , wytworzonym przez hamulec stanowiska badawczego. Cały przebieg rozruchu mierzony jest w czasie rzeczywistym za pomocą momentomierza tensometrycznego i rejestrowany przez aparaturę pomiarową. Zarejestrowany przebieg zmian momentu obrotowego umożliwia przeprowadzenie jego analizy, która uwzględni wpływ sprzęgła podatnego na rozruch układu napędowego.

Przykład zarejestrowanego przebiegu zmian momentu obrotowego, przenoszonego przez układ z metalowym sprzęgłem podatnym przy rozruchu ze stałym momentem hamowania M_h , przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Przebieg zmian momentu obrotowego, przenoszonego przez układ ze sprzęgłem podatnym przy rozruchu
Fig. 8. The course of the changes of the rotatory moment, transferred by the system with the flexible coupling during the starting

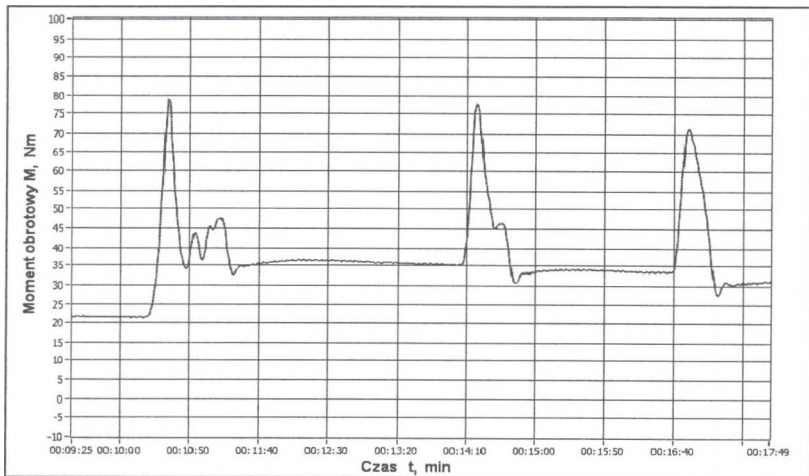
5.5. Praca sprzęgła przy obciążeniu impulsowym układu napędowego

Metodyka badań sprzęgła w tym przypadku polegała na uruchomieniu napędu stanowiska badawczego z ustalonym momentem obrotowym hamulca M_h i doprowadzeniu układu napędowego do osiągnięcia ustalonej prędkości obrotowej. Następnie układ obciążany jest dodatkowym impulsowym momentem obrotowym M_{imp} . W takim przypadku przez sprzęgło podane na element pomiarowy, jakim jest momentomierz, przenosi się moment o zmniejszonej wartości amplitudy („moment złagodzony”). Przebieg zmian złagodzonego momentu obrotowego ma charakter drgań gasnących. Tak jak poprzednie badania, zagadnienia te szerzej opisane są w pracach [1, 5, 8].

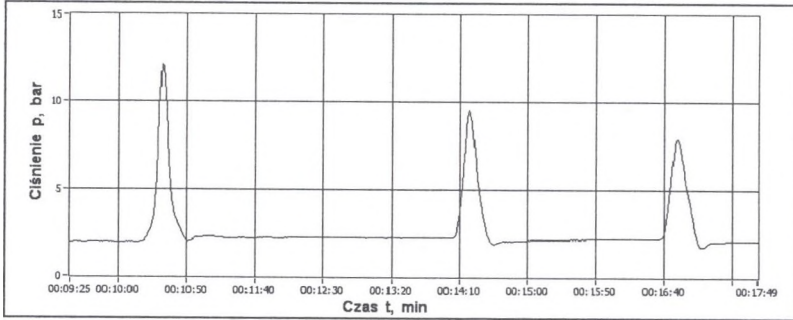
Zarówno obciążający moment obrotowy hamulca M_h , jak i dodatkowy moment impulsowy M_{imp} generowane są przez hydrauliczny układ hamulca tarczowego. Przebieg i wartość momentu impulsowego wyznaczone są pośrednio poprzez pomiar ciśnienia medium w układzie hydraulicznym, które jest proporcjonalne do wytworzonego momentu obrotowego. Przebiegi złagodzonego momentu obrotowego i ciśnienia medium są rejestrowane w czasie rzeczywistym i poddawane analizie.

Przykład zarejestrowanego przebiegu zmian momentu obrotowego, jako reakcji na dodatkowy impulsowy moment obrotowy oraz odpowiadające im przebiegi zmian ciśnienia w układzie hydraulicznym hamulca, przedstawia rysunek 9.

a)



b)



Rys. 9. Praca sprzęgła przy obciążeniu impulsowym momentem obrotowym, gdzie: a) przebieg zmian momentu obrotowego, b) przebieg zmian ciśnienia medium w układzie hydraulicznym hamulca

Fig. 9. The work of the coupling during the impulse load of rotatory moment, were: a) the course of the changes of the rotatory moment, b) the course of the changes of the pressure of medium in the hydraulic system of the brake

6. Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania na dwóch, różniących się sposobem obciążania stanowiskach badawczych, obejmujące wyznaczenie charakterystyk metalowego sprzęgła podatnego skrętnie, pozwalają na wysunięcie następujących wniosków:

- zaprojektowane oraz zmodernizowane i wykonane stanowiska badawcze, a także przyjęta metodyka badań charakterystyk sprzęgła pozwalają na proste i poprawne ich wyznaczenie z odpowiednio dużą dokładnością i powtarzalnością uzyskiwanych wyników pomiarów,
- obydwa stanowiska badawcze są uniwersalne; można na nich prowadzić inne badania,
- na stanowiskach tych mogą być prowadzone badania różnych sprzęgieł w oparciu o różne metodyki badawcze,
- uzyskane w trakcie badań charakterystyki statyczne, quasi-dynamiczne i dynamiczne pozwalają na wyznaczanie wartości współczynników sztywności skrętnej k i tłumienia ψ sprzęgła,
- przyjęte metodyki badań, mające na celu ocenę pracy badanego sprzęgła przy rozruchu i podczas wymuszenia momentem impulsowym, wynikają ze stosowanych standardowych metod badań sprzęgieł podatnych.

LITERATURA

1. Dietrich M. (red.), Markusik S.: Podstawy konstrukcji maszyn. Tom III, wyd. 3. WNT, Warszawa 1999.
2. Kowal A.: Sprzęgło mechaniczne. Patent RP: PL 190945 B1 i PL-191092 B1 z lutego 2006.
3. Kowal A.: Konstrukcja metalowego sprzęgła podatnego skrętnie. Biblioteka TEMAG. Trwałość Elementów i Węzłów Konstrukcyjnych Maszyn Górniczych, Gliwice-Ustroń, 2005, s.107-116.
4. Kowal A., Filipowicz K.: Metalowe sprzęgła podatne skrętnie. Górnictwo i Geologia. T.1, Z.2, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
5. Markusik S.: Sprzęgła mechaniczne. WNT, Warszawa 1979.
6. Opasiak T.: Metody wyznaczania charakterystyk statycznych i dynamicznych sprzęgieł podatnych. Maszyny Dźwigowo-Transportowe. Nr 2/2000, s.5-15.
7. Opasiak T.: Badania charakterystyk statycznych i dynamicznych sprzęgieł nierozłącznych podatnych oponowych. Praca doktorska, Katowice 2004.
8. Osiński Z.: Sprzęgła i hamulce. PWN, Warszawa 1985.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Informatyzacji.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Senatorski