

Propozycja wykorzystania momentomierza do analizy układu napędowego lokomotywy typu LDS-100K-EMA

Streszczenie

Identyfikacja i rejestracja parametrów pracy układu przeniesienia napędu, umożliwią wykorzystanie ich w procesie diagnostyki, np. wyznaczania trendu awarii w zależności od obciążenia układu napędowego. Bezpośredni pomiar momentu obrotowego w układach napędowych maszyn roboczych nie jest spotykany. Związane to jest z potencjalnymi problemami podczas zabudowy urządzenia pomiarowego w łańcuchu kinematycznym oraz z podwyższoną ceną maszyny. Naprzeciw ekonomicznych konsekwencji rozbudowy układu pomiarowego pojazdu warto jednak postawić korzyści, wynikające ze znajomości przebiegu podstawowego parametru trakcyjnego, od którego wprost zależy wartość siły pociągowej. W artykule omówiono budowę typowego układu przeniesienia napędu w górniczym pojeździe szynowym, zaproponowano zastosowanie dodatkowego urządzenia pomiarowego w układzie przeniesienia napędu, a także przedstawiono sposób wykorzystania otrzymanych danych pomiarowych z użyciem dostępnych narzędzi programistycznych.

Słowa kluczowe: lokomotywa górnicza spalinowa, układ napędowy lokomotywy, system sterowania lokomotywy, moment obrotowy, system rejestracji parametrów pracy

Keywords: mine diesel locomotive, drive system of locomotive, control system of locomotive, torque, system for recording the operational parameters

Summary

Identification and recording of operational parameters of drive transmission system enable their use in diagnostics process, e.g. in determination of failure trend depending on load to drive system. Direct measurement of torque in drive systems of machines is not used. It is associated with potential problems during installation of measuring device in kinematic chain and with increased price of the machine. However, it is worth to compare cost of extending the measuring system and benefits resulting from the knowledge of time process of basic traction parameter, which directly affects the value of pulling force. The design of typical drive transmission system in mine rail vehicle is discussed, use of additional measuring device in drive transmission system is suggested and method for taking advantage of the obtained measuring data with use of available programming tools is presented.

1. Wstęp

Projektowanie układów napędowych wymaga informacji dotyczących charakteru pracy maszyny. Istotne są przede wszystkim cykle obciążeń, jakim może być poddawany pojazd w trakcie eksploatacji, w tym informacje dotyczące realizowanych zadań transportowych i zapotrzebowania na moc silnika. Określenie obciążenia silników napędów elektrycznych nie stanowi większego problemu technicznego. Wymagana jest znajomość napięcia oraz natężenia prądu zasilającego silnik. Współczesne układy sterujące - zasilające napędów elektrycznych dają możliwość określenia tych parametrów w funkcji czasu pracy maszyny i pozwalają na określenie rzeczywistego obciążenia układu napędowego. W przypadku napędów spalinowych określenie rzeczywistego obciążenia silnika napotyka na trudności z uwagi na znajomość jedynie prędkości obrotowej silnika. Należy dodać, że silniki spalinowe ZS ze sterowaniem elektronicznym, wyposażone w system zasilania *common rail*, są dopiero stopniowo wprowadzane do

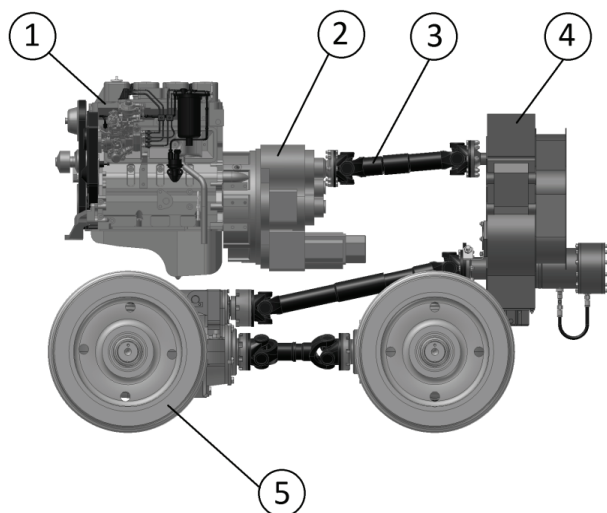
nowych konstrukcji. Na ogół stosowane są silniki wyposażone w układ UPS (ang. *unit pump system*) tłumaczone jako zespół pompa-przewód-wtryskiwacz [1]. Przyczyny tego należy upatrywać w trudnościach, wynikających z konieczności zapewnienia iskrobezpieczeństwa oryginalnym układom elektronicznym, sterującym pracą silnika eksploatowanego w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

W przypadku elektronicznego sterowania pracą pompy paliwowej istnieje możliwość określenia dawki paliwa i obliczenia wartości momentu obrotowego rozwijanego przez silnik. W artykule przedstawiono propozycję wyposażenia układu napędowego w momentomierz, pozwalający na identyfikację stanu obciążenia układu napędowego. Uzyskane dane pomiarowe, dotyczące momentów sił, mogą mieć również walor diagnostyczny – w przypadku uszkodzenia układu przeniesienia napędu można będzie potwierdzić lub wykluczyć przeciążenie lub określić charakter obciążeń.

2. Układ napędowy lokomotywy typu Lds-100K-EMA

Z uwagi na to, że omówione wcześniej problemy z identyfikacją stanu obciążenia układu napędowego dotyczą rozwiązań technicznych, bazujących na silniku spalinowym, rozważany problem został przedstawiony na przykładzie powszechnie stosowanej lokomotywy typu Lds-100K-EMA, przeznaczonej do pracy w strefach zagrożonych wybuchem.

W lokomotywie typu Lds-100K-EMA stosowany jest układ napędowy przedstawiony na rysunku 1.



Rys.1. Schemat układu napędowego lokomotywy Lds-100K-EMA [2]; 1 – silnik spalinowy, 2 – przekładnia hydrokinetyczna, 3 – wał przegubowy, 4 – przekładnia rewersyjna, 5 – zestawy kołowe

Przedstawiony układ napędowy jest powszechnie stosowany w lokomotywach zarówno w podziemiach, jak i na powierzchni zakładów górniczych. Silnik osiąga moc rzędu 80÷100 kW (w zależności od wymagań odbiorcy). Napęd przekazywany jest na jezdnię za pośrednictwem przekładni hydrokinetycznej, przekładni rewersyjnej oraz przekładni kątowych, współpracujących z zestawami kołowymi. Poszczególne zespoły układu napędowego połączone są ze sobą za pomocą wałów przegubowych. Należy wspomnieć, że przekładnie zestawów kołowych nie posiadają mechanizmów różnicowych, zatem układ jest sztywny – wszystkie jego elementy posiadają jednakową, proporcjonalną do przełożeń prędkość obrotową. Maksymalną wartość momentu obrotowego, transmitowanego przez poszczególne zespoły wyznaczono na podstawie obliczeń analitycznych. Doświadczenie projektowo-konstrukcyjne wykazuje, że istnieje konieczność określania rzeczywistych wartości obciążeń panujących w układzie napędowym, zwłaszcza w stanach nieustalonych pracy maszyny, pomocnych w określeniu newralgicznych punktów łańcucha kinematycznego w aspekcie jego uszkodzeń. Informacja o rzeczywistych wartościach obciążeń w układzie napędowym może być źródłem dodatkowych danych, niezbędnych

w pracach o charakterze optymalizacyjnym, dotyczących postaci konstrukcyjnej układu napędowego z uwagi na jego trwałość i niezawodność. Współczesne systemy sterowania i monitorowania maszyny roboczej (lokomotywy) pozwalają określać następujące parametry pracy silnika: temperaturę czynnika chłodzącego, temperaturę i ciśnienie oleju silnikowego oraz prędkość obrotową silnika i układu napędowego. Z punktu widzenia oceny parametrów trakcyjnych, znaczenie mają jedynie informacje dotyczące prędkości obrotowej. Chcąc określić pracę zespołu silnik spalinowy-przekładnia hydrokinetyczna, wymagane są dane dotyczące prędkości obrotowej na wejściu i wyjściu przekładni hydrokinetycznej oraz o wartości momentu obrotowego rozwijanego przez silnik spalinowy, a także momentu obrotowego transmitowanego przez układ napędowy za przekładnią hydrokinetyczną. Takie podejście, oprócz możliwości określenia parametrów pracy układu napędowego, pozwala również na analizę współpracy silnika z przekładnią hydrokinetyczną. Z uwagi na brak możliwości określenia momentu obrotowego rozwijanego przez silnik, który jest stosowany w obecnych konstrukcjach układów napędowych, w pracach badawczych skoncentrowano się na części układu napędowego za przekładnią hydrokinetyczną.

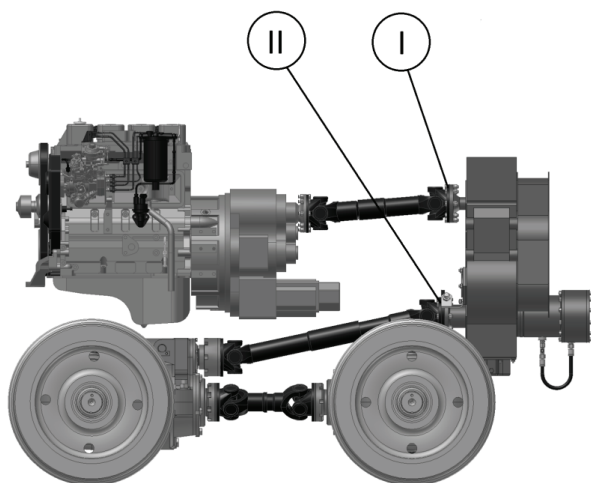
3. Momentomierz w układzie napędowym lokomotywy – zabudowa oraz propozycja wykorzystania danych pomiarowych

System sterowania i kontroli lokomotywy dołowej spalinowej, uzupełniony o możliwość rejestracji obciążenia jej układu napędowego, może dostarczyć szereg cennych informacji, przydatnych podczas procesów jej projektowania, konstruowania, diagnostyki i serwisowania. Identyfikacja obciążeń układu napędowego maszyny podczas cykli roboczych umożliwiłaby prowadzenie analiz:

- stopnia wykorzystania zainstalowanej mocy maszyny,
- ilości szkodliwych substancji emitowanych w spalinach,
- przeciążenia układu napędowego,
- trakcyjnych stanów niepożądanych – np. poślizgu w fazie ruszania.

Opracowanie skutecznego pomiaru obciążenia układu napędowego, pomogłoby w opracowaniu systemu, który byłby wyposażony w aktywne mechanizmy, dostosowujące parametry pracy silnika spalinowego do bieżącego zapotrzebowania na moc. Korzyści wynikające z chwilowego ograniczenia mocy silnika, skutkowałyby zmniejszeniem zużycia paliwa, a tym samym zmniejszeniem masy spalin emitowanych do środowiska pracy maszyny, jak również zwiększenia żywotności układu napędowego w efekcie ograniczenia przeciążeń.

W celu identyfikacji wartości momentu obrotowego w układzie napędowym, konieczne jest zamontowanie momentomierza o odpowiednim zakresie pomiarowym. Dostępne są momentomierze różnych producentów, m.in.: [5, 6]. Maksymalny obliczeniowy moment obrotowy w układzie napędowym można wyznaczyć z iloczynu momentu obrotowego rozwijanego przez silnik spalinowy, maksymalnej wartości przełożenia dynamicznego i_k przekładni hydrokinetycznej oraz przełożeń pozostałych przekładni. Należy jednak zwrócić uwagę na możliwość występowania większych wartości momentu obrotowego transmitowanego przez układ napędowy na skutek zjawisk trakcyjnych o charakterze dynamicznym, takich jak poślizg lub hamowanie ze ślizganiem. Zainstalowanie momentomierza w układzie napędowym pojazdu jest ograniczone wymiarami gabarytowymi urządzenia pomiarowego. Po analizie zaproponowano przestrzeń oznaczoną rzymską cyfrą I lub II na rysunku 2.



Rys.2. Proponowane miejsca zabudowy momentomierza w układzie napędowym lokomotywy

Zmiany konstrukcyjne układu napędowego pociągają za sobą modyfikacje istniejącego układu sterowania lokomotywy. Konieczne jest połączenie nowego elementu z wolnym kanałem pomiarowym, kompatybilnym z zastosowanym przetwornikiem w odniesieniu do wartości sygnałów pomiarowo-zasilających.

Po rozszerzeniu układu sterującego lokomotywy o momentomierz, dostępne będą następujące dane:

- prędkość obrotowa silnika spalinowego n_s ,
- prędkość obrotowa w układzie napędowym, za przekładnią hydrokinetyczną n_u ,
- moment obrotowy w układzie napędowym, za przekładnią hydrokinetyczną M_u .

Rejestracja tych danych w funkcji czasu pozwoli sporządzić graficzny obraz obciążeń, jakim poddawany jest układ napędowy i umożliwi identyfikację stopnia wykorzystania mocy maszyny w określonym przedziale czasu. Dodatkową korzyścią jest możliwość oceny

pracy przekładni hydrokinetycznej, a tym samym porównania danych pomiarowych z wynikami obliczeń.

Dokonując podziału układu napędowego pomiędzy wirnikiem pompy a wirnikiem turbiny przekładni hydrokinetycznej, co schematycznie pokazano na rysunku 3, jak również uwzględniając równowagę mocy w obu częściach układu i znając zależność opisującą przebieg sprawności w funkcji przełożenia kinematycznego przy pominięciu strat, a także uwzględniając informacje zawarte w [3, 4], można określić następujące zależności:

$$N_s = N_u \quad [kW] \quad (1)$$

$$N_s = \frac{M_s \cdot n_s}{9549,3} \quad [kW] \quad (2)$$

$$N_u = \frac{M_u \cdot n_u}{9549,3} \quad [kW] \quad (3)$$

gdzie:

N_s – moc rozwijana przez silnik spalinowy [kW],

N_u – moc w układzie napędowym [kW],

M_s – moment obrotowy rozwijany przez silnik spalinowy [Nm],

M_u – moment obrotowy w układzie napędowym [Nm],

n_s – prędkość obrotowa silnika spalinowego [min^{-1}],

n_u – prędkość obrotowa układu napędowego za przekładnią hydrokinetyczną [min^{-1}].

Podstawiając (2) i (3) do równania (1) otrzymuje się:

$$\frac{M_s \cdot n_s}{9549,3} = \frac{M_u \cdot n_u}{9549,3} \quad (4)$$

Przekształcając równanie (4) otrzymuje się:

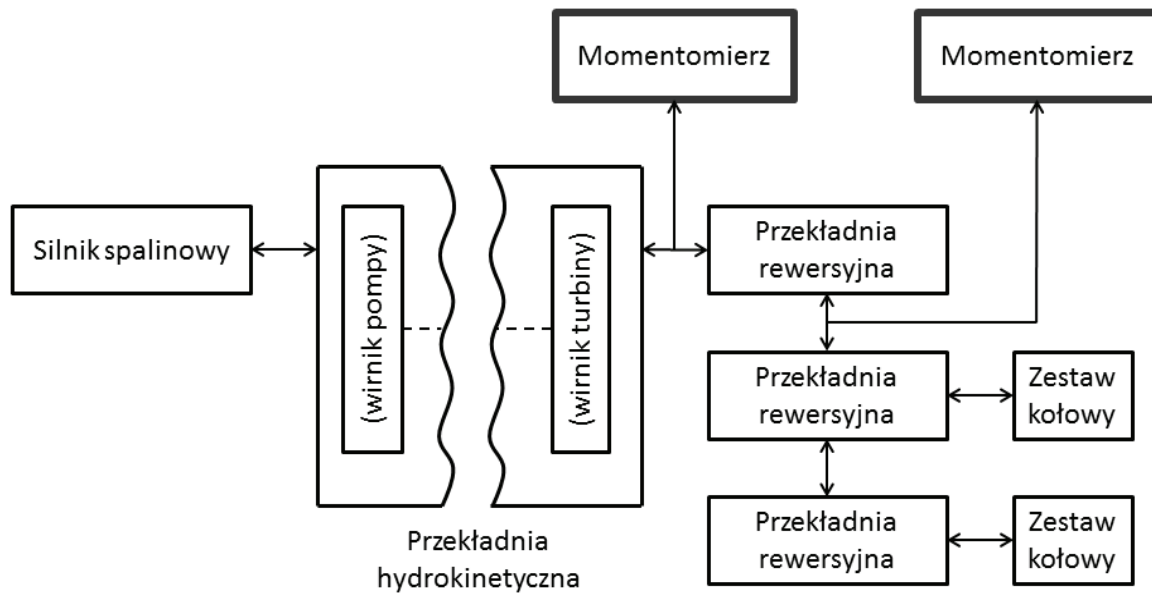
$$M_s = \frac{M_u \cdot n_u}{n_s} \quad (5)$$

Zależność (5) pozwala określić wartość momentu obrotowego rozwijanego przez silnik przy założeniu, że są dostępne dodatkowe dane dotyczące przełożenia dynamicznego i_d przekładni hydrokinetycznej w odniesieniu do wartości przełożenia kinematycznego i_k .

Przełożenie kinematyczne można określić na podstawie zależności (6):

$$i_k = \frac{n_u}{n_s} \quad (6)$$

natomiast przełożenie dynamiczne $i_d(i_k)$ jest możliwe do wyznaczenia na podstawie charakterystyki przekładni hydrokinetycznej, przedstawionej na rysunku 4.

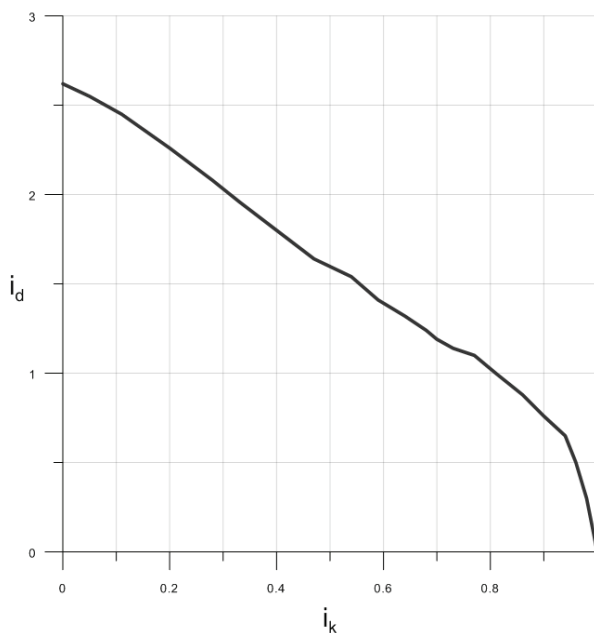


N_s, M_s, n_s

i_k, i_d

N_u, M_u, n_u

Rys.3. Podział układu napędowego lokomotywy Lds-100K-EMA



Rys.4. Charakterystyka $i_d=f(i_k)$ przekładni hydrokinetycznej [2]

Uwzględniając wyznaczoną z zależności (6) wartość i_k , odczytując z charakterystyki przedstawionej na rysunku 4 wartość i_d w odniesieniu do wcześniej wyznaczonego przełożenia kinematycznego i_k oraz wykorzystując przekształconą ze względu na M_s zależność (7):

$$M_u = M_s \cdot i_d \rightarrow M_s = \frac{M_u}{i_d} \quad (7)$$

można ostatecznie przyjąć, że:

$$M_s = \frac{M_u}{i_d(i_k)} \quad (8)$$

Znając wartość momentu obrotowego w układzie napędowym oraz dysponując charakterystyką przekładni hydrokinetycznej można przeprowadzić analizę stopnia wykorzystania mocy silnika spalinowego oraz dokonać oceny dopasowania przekładni do silnika. Dotychczas nie było takiej możliwości ze względu na brak odpowiedniego urządzenia pomiarowego w układzie napędowym.

4. Wykorzystanie narzędzi programistycznych do analizy zgromadzonych danych pomiarowych

W celu przeprowadzenia analizy pracy maszyny dane pomiarowe, dotyczące momentu obrotowego i prędkości obrotowej, muszą być zarejestrowane w funkcji czasu. Istotne jest również, by podstawa czasu była dla wszystkich mierzonych i rejestrowanych wielkości taka sama.

Przebieg procesu, związanego z akwizycją, pozyskaniem oraz obróbką danych pomiarowych, a także przewidywanych rodzajów opracowania wyników przedstawiono na rysunku 5.

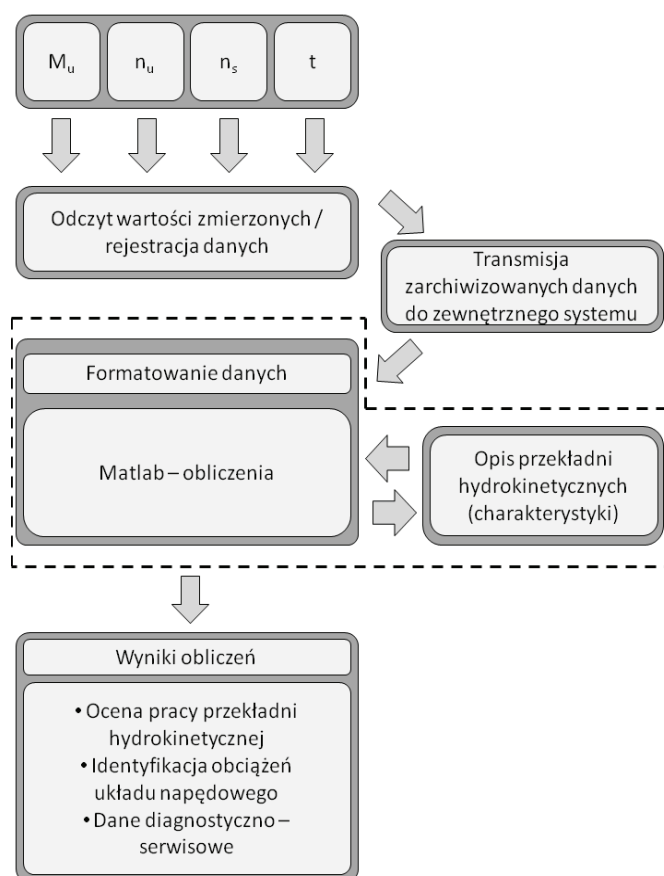
Transmisja zarejestrowanych danych do zewnętrznego systemu, polegać będzie na transmisji pliku z danymi. Środowisko programistyczne, np. Matlab, ułatwia procedurę importu, odczytu i organizacji danych w postaci zmiennych, jak również zaprogramowania zależności, według których zostaną przeprowadzone obliczenia. Ostatnim krokiem będzie obróbka wyników w postaci wykresów obrazujących otrzymane zależności. Import danych do komputerowego środowiska służącego prowadzeniu obliczeń stwarza szereg możliwości ich analizy, wykraczających poza zakres niniejszego artykułu. Opis pracy przekładni hydrokine-

tycznej, w postaci charakterystyki $i_d = f(i_k)$, sporządzony na podstawie danych producenta, nie jest ograniczony do wybranych wartości i_k . Łatwo można znaleźć aproksymację posiadanych danych w postaci np. wielomianu lub za pomocą funkcji skleianej (ang. *spline*). Można wówczas uzyskać dostęp do kompletnego zestawu wartości przełożenia dynamicznego, w całym zakresie zmienności przełożenia kinematycznego.

Poza oceną pracy przekładni hydrokinetycznej, kluczowe będą informacje dotyczące stanu obciążenia układu przeniesienia napędu lokomotywy.

5. Podsumowanie

Tworzenie nowych konstrukcji maszyn roboczych powiązane jest z wykorzystaniem technik kontroli i sterowania. Tradycyjne wskaźniki wypierane są przez dotykowe panele, które łączą w sobie funkcję urządzeń, które zarówno informują o stanie pojazdu, jak również pozwalają na sterowanie pracą maszyny. Rozbudowane możliwości sterowania i komunikacji, a także rejestracji wybranych parametrów pracy stwarzają warunki do zwiększania elastyczności i funkcjonalności układów odpowiedzialnych za nadzór i sterowanie maszyną. Połączenie tych dwóch aspektów w jeden kompletny system wpływa korzystnie nie tylko



Rys.5. Propozycja przebiegu procesu obróbki zarejestrowanych danych pomiarowych i przykładowe efekty analizy danych

na pracę samej maszyny, ale oddziałuje również na poszczególne etapy życia produktu, tj. projektowanie, budowę, diagnostykę i serwis. Znajomość stanów obciążenia maszyny dostarcza również informacji o znaczeniu logistyczno-organizacyjnym, umożliwiając optymalizację całego procesu transportu ze względu na zastosowane urządzenia oraz ich parametry trakcyjne, charakterystyczne dla ich środowiska pracy. Dotychczasowe doświadczenia związane z potrzebą określania cykli obciążenia środków transportowych wskazują na brak tego typu danych. Wprowadzenie zaprezentowanej w niniejszym artykule koncepcji do rozwiązań proponowanych przez producentów maszyn roboczych, np. lokomotyw górniczych, pozwoli istotnie poszerzyć zakres wiedzy o cyklach i wartościach obciążenia układu przeniesienia napędu podczas realizacji zadań transportowych. W przypadku omawianego napędu określenie obciążenia układu wymaga pomiaru momentu obrotowego. Identyfikacja siły napędowej w układzie o innej postaci konstrukcyjnej może być uzyskana poprzez pomiary parametrów pracy, takich jak: ciśnienie w układzie hydraulicznym, napięcie lub natężenie prądu elektrycznego. Propozycja rozwiązania technicznego, przedstawiona w niniejszym artykule, może stanowić wstęp do podjęcia prac mających na celu opracowanie układu napędowego oraz układu sterowania i kontroli pracy

maszyny, które umożliwiłyby określenie obciążeń układu, jakim jest poddawany podczas pracy.

Literatura

1. BOSCH. Informator techniczny. Sterowanie silników ZS, Wydanie 2011.
2. Mężyk A., Dobrzaniecki P.: Modelowanie charakterystyk trakcyjnych napędów na przykładzie pojazdów górnictwa węglowego. Projekt badawczy N N524 354838 (materiały nie publikowane). Gliwice 2010-2011.
3. Szydelski Z.: Sprzęgła i przekładnie hydrokinetyczne, WNT Warszawa 1965.
4. Zając M.: Układy przeniesienia napędu samochodów ciężarowych i autobusów, WKŁ Warszawa 2003.
5. www.ktr.com (strona producenta oferującego elementy układów przeniesienia napędu).
6. www.hbm.com.pl (strona producenta oferującego przetworniki pomiarowe, w tym przetworniki momentu obrotowego).

Artykuł wpłynął do redakcji w grudniu 2014 r.