

## Metodyka wyznaczania charakterystyki zastępczej zespołu silnik spalinowy-przekładnia hydrokinetyczna

### Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania charakterystyki zastępczej zespołu silnik spalinowy - przekładnia hydrokinetyczna. Zaprezentowano podstawowe zależności potrzebne do sporządzenia poszczególnych charakterystyk, jak również sposób wykorzystania oprogramowania komputerowego w trakcie prowadzenia obliczeń. Wyniki prac zaprezentowano w odniesieniu do rzeczywistych obiektów: przekładni hydrokinetycznej PH2.340-25 oraz silnika spalinowego Volvo-Penta D5A T.

**Słowa kluczowe:** układy napędowe, przekładnia hydrokinetyczna, charakterystyki wymiarowe przekładni, charakterystyki bezwymiarowe

**Keywords:** drive systems, hydrokinetic gear, dimensional characteristics of gear, dimensionless characteristics

### Summary

Methodology for determination of substitute characteristics of the system diesel engine-hydrokinetic gear is presented. Basic relationships necessary to prepare given characteristics as well as the method of using the software programme in calculations are given. Work results regarding the real objects, i.e. PH2.340-25 hydrokinetic gear and Volvo-Penta D5A T diesel engine are presented.

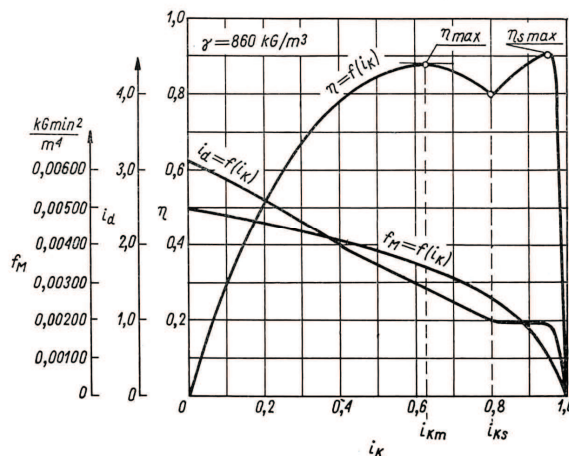
## 1. Wstęp

Układy napędowe z przekładnią hydrokinetyczną są powszechnym rozwiązaniem w budowie maszyn. Przykładem mogą być napędy pojazdów tj.: lokomotywy dołowej spalinowej typu Lds-100 produkcji Energo-Mechanik Sp. z o. o. [9], ładowarki typu LKP produkcji KGHM Zanam [10] oraz innych maszyn roboczych, w trakcie pracy których konieczne jest płynne przeniesienie momentu obrotowego pod dużym obciążeniem pochodzącym od sił zewnętrznych (masa transportowana, ładowany urobek itp.) [2, 3]. W przypadku układu napędowego wyposażonego w przekładnię hydrokinetyczną, należy uwzględnić cechy pierwotnego źródła napędu (np. silnik spalinowy), w połączeniu z przekładnią. Utworzona charakterystyka zastępcza stanowi punkt wyjścia do analizy parametrów trakcyjnych pojazdu. Prace rozwojowe, dotyczące lokomotyw szynowych, prowadzone w ITG KOMAG, wymagały określenia cech trakcyjnych opracowywanych układów napędowych. Do sporządzenia charakterystyk zastępczych zespołu silnik-przekładnia hydrokinetyczna, do dyspozycji konstruktora-projektanta pozostaje często co najwyżej opis przekładni w postaci charakterystyki bezwymiarowej, uzupełniony sporadycznie o tabelaryczne zestawienie głównych parametrów przekładni. W niniejszym artykule zaprezentowano więc metodykę wyznaczania charakterystyki zastępczej zespołu silnik spalinowy-przekładnia hydrokinetyczna w oparciu o typowe dane, opisujące przekładnię hydrokinetyczną, jak również silnik spalinowy. Do opisu osi wykresów,

przedstawionych na rysunkach 1, 2, 3 i 4, ilustrujących zależności pomiędzy głównymi parametrami przekładni hydrokinetycznych użyto jednostek spoza układu SI. Nie ma to jednak wpływu na jakościowy charakter prezentowanych charakterystyk.

## 2. Współpraca przekładni hydrokinetycznej z silnikiem – podstawowe informacje

Cechy przekładni hydrokinetycznej najwygodniej przedstawić w postaci charakterystyki zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami przekładni. Jedną z nich jest charakterystyka bezwymiarowa, stosowana do ogólnego opisu rodziny przekładni hydrokinetycznych. Przykładową postać charakterystyki bezwymiarowej pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Charakterystyka bezwymiarowa przekładni hydrokinetycznej [1]

Poszczególne wykresy na rysunku 1 przedstawiają zmianę wartości przełożenia dynamicznego  $i_d$  w zależności od przełożenia kinematycznego  $i_k$  oraz przebieg wartości współczynnika  $f_M$  i sprawności  $\eta$  w funkcji przełożenia kinematycznego  $i_k$ . Znając wartości  $f_M$  dla kolejnych wartości argumentu (w tym przypadku  $i_k$ ) oraz wartość średnicy czynnej  $D$ , możliwe jest za pomocą charakterystyki bezwymiarowej sporządzenie charakterystyki wymiarowej przekładni hydrokinetycznej. Krzywe momentów charakterystyki wymiarowej poszczególnych wartości  $i_k$  można wyznaczyć na podstawie zależności (1):

$$M_1 = f_M \cdot n_1^2 \cdot D^5 \quad (1)$$

gdzie:

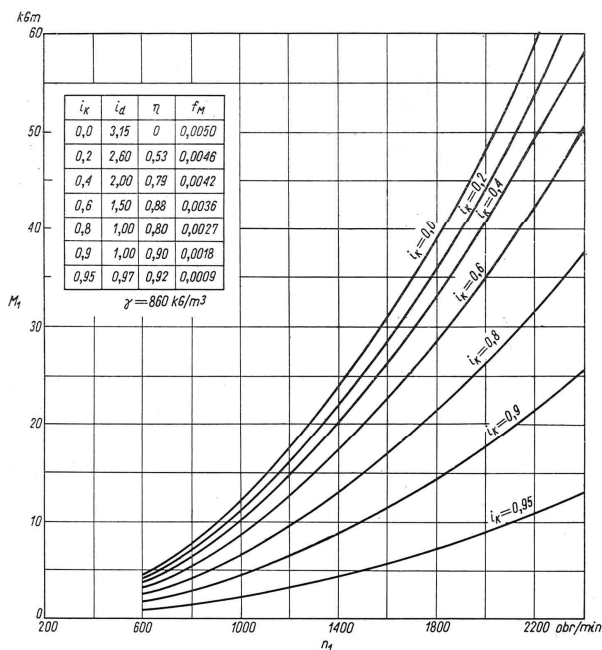
$M_1$  – wartość momentu obrotowego rozwijana przez wirnik pompy przekładni [ $N \cdot m$ ],

$f_M$  – współczynnik momentu [ $\frac{N \cdot \text{min}^2}{m^4}$ ],

$n_1$  – prędkość obrotowa wirnika pompy przekładni [ $\text{min}^{-1}$ ],

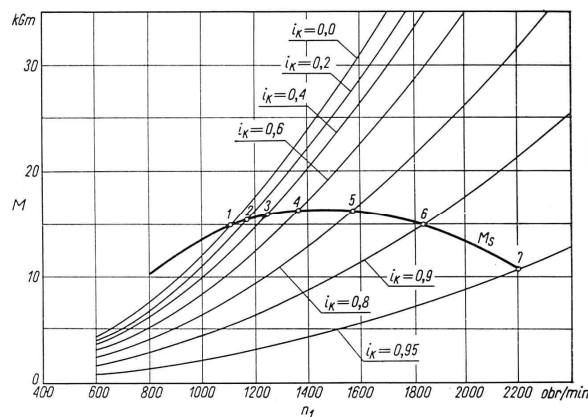
$D$  – średnica czynna przekładni [ $m$ ].

Przykładową charakterystykę wymiarową przekładni przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Charakterystyka wymiarowa przekładni hydrokinetycznej [1]

Na podstawie charakterystyki wymiarowej sporządza się charakterystykę zastępczą zespołu silnik spalinowy-przekładnia hydrokinetyczna, nanosząc krzywą momentu obrotowego silnika na charakterystykę wymiarową przekładni:



Rys.3. Charakterystyka wymiarowa przekładni hydrokinetycznej z nałożoną charakterystyką silnika spalinowego [1]

Na podstawie wartości momentu obrotowego  $M_1$  w punktach przecięcia krzywej  $M_s$  z krzywymi  $i_k = 0 \div 0,95$  można obliczyć wartości momentu obrotowego  $M_2$  na wyjściu przekładni hydrokinetycznej według zależności (2):

$$M_2 = M_1 \cdot i_d \quad (2)$$

gdzie:

$M_2$  – wartość momentu obrotowego rozwijana przez wirnik turbiny przekładni [ $N \cdot m$ ],

$i_d$  – przełożenie dynamiczne.

Wartość przełożenia dynamicznego  $i_d$  określa się z charakterystyki  $i_d = f(i_k)$  (por. rys. 1).

Prędkość na wyjściu z przekładni hydrokinetycznej obliczyć można z zależności:

$$n_2 = n_1 \cdot i_k \quad (3)$$

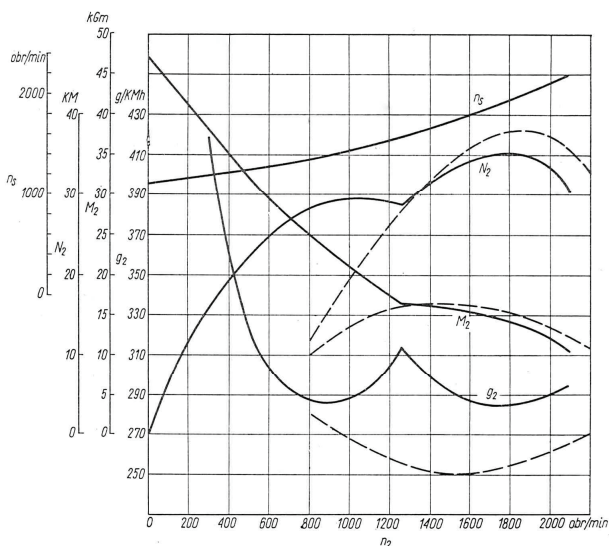
gdzie:

$n_2$  – prędkość obrotowa wirnika turbiny przekładni [ $\text{min}^{-1}$ ],

$i_k$  – przełożenie kinematyczne.

W rezultacie otrzymuje się rodzinę charakterystyk zastępczych zespołu silnik spalinowy-przekładnia hydrokinetyczna (rys. 4).

Przedstawia ona, oprócz przebiegu momentu obrotowego, także jednostkowe zużycie paliwa ( $g_e$ ), moc na wyjściu z przekładni ( $N_2$ ) oraz prędkość obrotową silnika, równą prędkości obrotowej części pompowej przekładni hydrokinetycznej w przypadku, gdy pomiędzy nią a silnikiem nie stosuje się innej przekładni. Do sporządzenia charakterystyki zastępczej niezbędna jest zatem informacja o zakresie zmienności dwóch parametrów przekładni hydrokinetycznej: współczynnika momentu  $f_M$  oraz przełożenia dynamicznego  $i_d$  w funkcji przełożenia kinematycznego  $i_k$ . Są to dane konieczne i jednocześnie wystarczające.



Rys.4. Rodzina charakterystyk zastępczych zespołu silnik spalinywo-przekładnia hydrokinetyczna [1]

### 3. Sporządzanie charakterystyki zastępczej na przykładzie obliczeń dotyczących lokomotywy typu Lds-100K-EMA

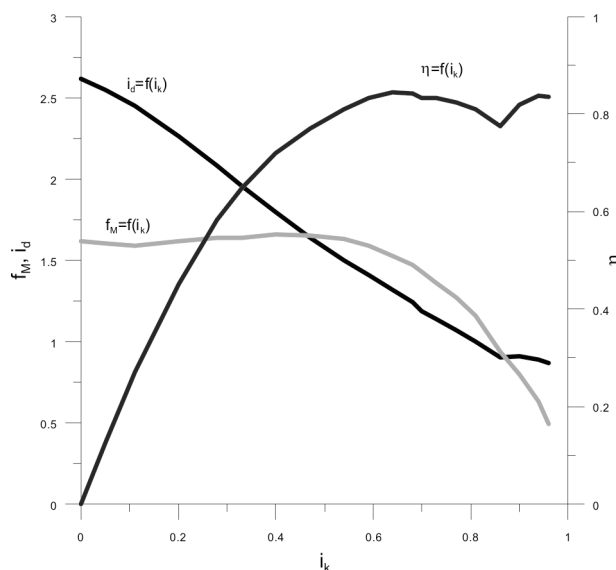
Pierwszy etap modelowania pracy układu napędowego górniczej lokomotywy spągowej Lds-100K-EMA, które przedstawiono szerzej w [3] to obliczenia parametrów pracy układu napędowego. W niniejszym artykule opisano proces sporządzania charakterystyki zastępczej zespołu silnik spalinywo-przekładnia hydrokinetyczna. Obliczenia przeprowadzono na podstawie danych technicznych i badań stanowiskowych podzespołów układu napędowego lokomotywy:

- silnik spalinywo ZS Volvo – Penta D5A T,
- przekładnia hydrokinetyczna ZHS PH2.340-25.

Obliczenia oraz wykresy wykonano w środowisku Matlab. Część danych wejściowych do programu Matlab przygotowano w programach Grapher i Excel w postaci plików \*.csv. Zaprezentowany sposób wykonania obliczeń jest wynikiem ograniczonego (lub braku) dostępu do szczegółowych danych opisujących przekładnie hydrokinetyczne. Do wyznaczenia charakterystyki wymiarowej danego typu przekładni potrzebne są zależności  $i_d = f(i_k)$ ,  $f_M = f(i_k)$  oraz wartość średnicy czynnej przekładni  $D$ . Podczas realizacji pracy [3] autor miał do dyspozycji wspomniane charakterystyki oraz tabelaryczne zestawienie wartości funkcji. Jeden z producentów przekładni hydrokinetycznych udostępnia charakterystyki bezwymiarowe oraz podstawowe parametry, takie jak: średnica czynna, maksymalne przełożenie kinematyczne i dynamiczne, maksymalne moc i moment obrotowy na wejściu przekładni, maksymalna sprawność, umożliwiając przeprowadzenie analizy. Wymaga to jednak wyznaczenia szukanych wartości parametrów bezpośrednio z wykresów, co w przypadku

udostępnianych w niewielkiej rozdzielczości plików graficznych może powodować błędy. Innym podejściem producenta przekładni jest uzyskanie podstawowych informacji o układzie napędowym: źródło napędu, typ zastosowanego układu przeniesienia napędu oraz rodzaj pojazdu, w którym będzie on stosowany. Po uzyskaniu danych przeprowadza analizy i proponuje dobór konkretnego typu przekładni. W tym przypadku nie ma możliwości otrzymania charakterystyk i danych do samodzielnej analizy.

Pierwszym krokiem jest tabelaryczne zestawienie zależności, udostępnionych przez producenta przekładni, które przedstawiono na rysunku 5.

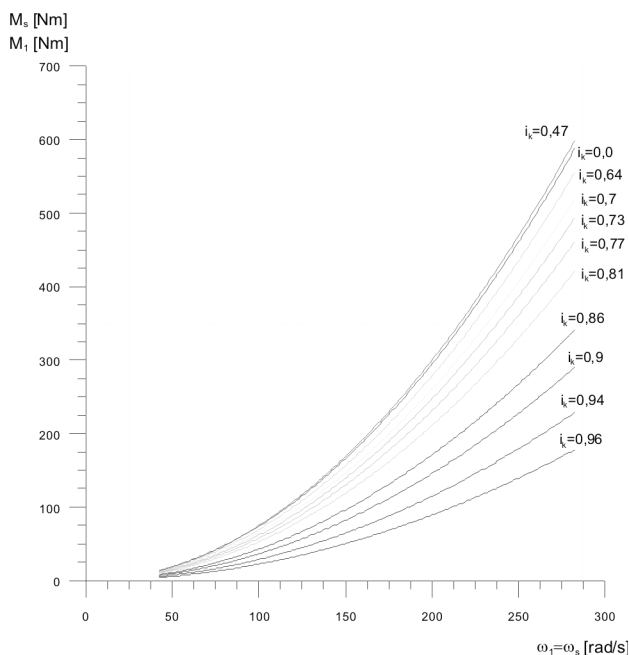


Rys.5. Charakterystyka bezwymiarowa przekładni ZHS PH2.340-25, na podstawie [7]

Umożliwia to prace obliczeniowo-analityczne oraz wyznaczenie wartości poszczególnych parametrów, w całym zakresie pracy przekładni, w postaci zależności:  $f_M = f(i_k)$  i  $i_d = f(i_k)$ .

Znając wartości  $f_M$ , w funkcji przełożenia kinematycznego  $i_k$ , średnicę czynną  $D$  oraz prędkość obrotową  $n$  na wejściu przekładni możliwe jest sporządzenie kompletnej charakterystyki wymiarowej przekładni, składającej się z krzywych momentu obrotowego przenoszonego przez przekładnię. Wynik obliczeń z wykorzystaniem zależności (1) przedstawiono na rysunku 6. Krzywe sporządzono w zakresie zmienności  $i_k = 0 \div 0,96$  ze skokiem 0,05. Ich kolejność na wykresie jest zależna od zmienności współczynnika momentu, co oznacza, że niekoniecznie musi rozpoczynać się od  $i_k = 0,0$  i przyrastać.

W zaprezentowanym przypadku wartość  $f_M$  osiąga maksimum przy wartości  $i_k = 0,47$ , co można zauważyć na sporządzonej charakterystyce wymiarowej przekładni.



Rys. 6. Charakterystyka wymiarowa przekładni ZHS PH2.340-25 [3]

Drugim krokiem prezentowanej metodyki jest określenie współczynników parabol będących wykresami poszczególnych krzywych momentu przy stałej wartości przełożenia kinematycznego  $i_k$ . Operację tę przeprowadzono w programie Grapher, otrzymując zestaw danych o poszczególnych krzywych. Przykładowy opis jednej z krzywych przedstawiono na rysunku 7.

Fit Results

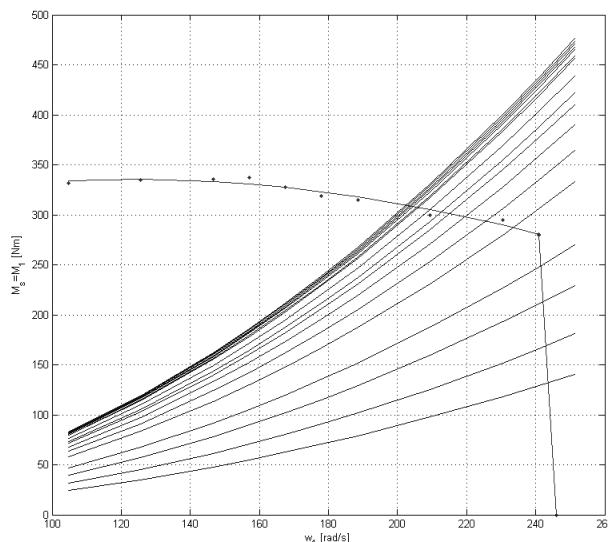
$i_k=0,33$  (wielomian)  
Equation  $Y = 7.940846195E-013 - 8.323613248E-015 * X + 0.007451409536 * \text{pow}(X,2)$

Degree = 2  
Number of data points used = 24  
Average X = 162.313  
Average Y = 235.466

Coefficients:  
Degree 0 = 7.940846195E-013  
Degree 1 = -8.323613248E-015  
Degree 2 = 0.007451409536

Rys.7. Zestawienie wartości współczynników opisujących jedną z krzywych, wykonane w programie Grapher [7]

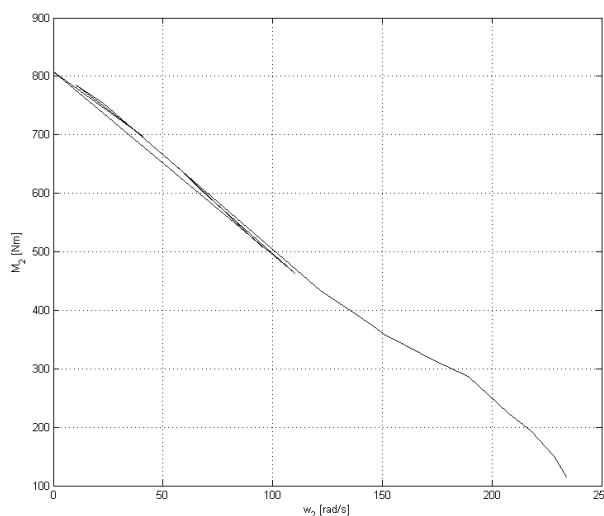
Następnie kompletną charakterystykę wymiarową wprowadza się do programu Matlab i nanosi krzywą przebiegu momentu obrotowego silnika spalinowego współpracującego z przekładnią. Na tej podstawie, z użyciem środowiska programistycznego Matlab opracowano skrypt, którego działanie polega na znalezieniu punktów przecięcia charakterystyki  $M_s(n)$  (moment obrotowy silnika) z krzywymi momentu. Dane niezbędne do sporządzenia charakterystyki  $M_s(n)$  zgromadzono podczas badań stanowiskowych silnika spalinowego, szerzej opisanych w [5] i [6]. Graficzną interpretację pracy skryptu w Matlabie przedstawiono na rysunku 8.



Rys.8. Charakterystyka wymiarowa przekładni z nałożoną charakterystyką  $M_s(n)$  silnika [7]

Z uwagi na wzajemne położenie charakterystyki momentu obrotowego silnika spalinowego względem krzywych momentu przenoszonego przez przekładnię, dokonano operacji domknięcia charakterystyki  $M_s(n)$  wzdłuż charakterystyki regulatorowej. Z rysunku 8 wynika, że współpraca silnika z przekładnią ma miejsce przy stosunkowo dużych wartościach prędkości obrotowej i przy niewielkiej wartości sprawności (por. rys. 5). Efektem jest stosunkowo mało wydajna praca zespołu. Duża część energii zostaje rozproszona w postaci ciepła w przekładni hydrokinetycznej.

Ostatecznie, na podstawie danych, pochodzących z programu Matlab oraz przy wykorzystaniu zależności (2) i (3), sporządzono charakterystykę zastępczą zespołu silnik spalinowy-przekładnia hydrokinetyczna, przedstawioną na rysunku 9.



Rys.9. Charakterystyka zastępcza zespołu silnik spalinowy-przekładnia hydrokinetyczna [7]

Niewielkie zróżnicowanie krzywych momentu w zakresie  $i_k = 0 \div 0,6$  (pokazane na rysunkach 6 i 8;

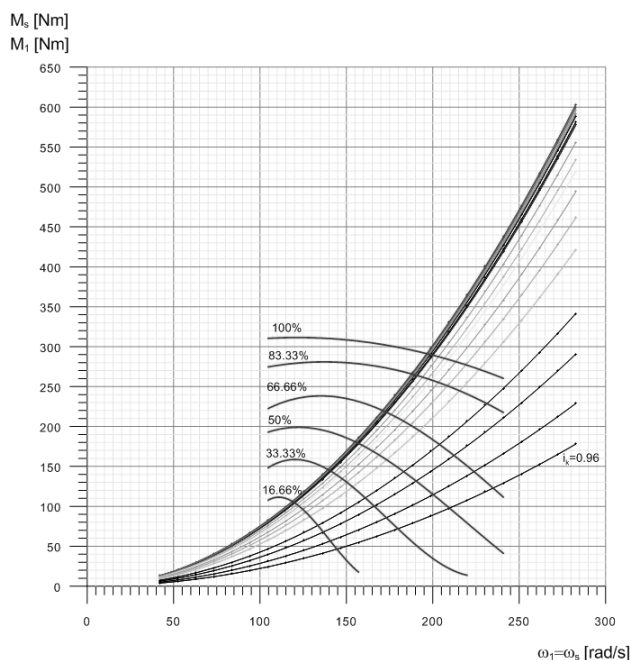


na rysunku 6 nie pokazano wszystkich krzywych, by nie zaciemniać wykresu) jest związane z niewielką zmiennością współczynnika momentu w tym samym zakresie. Efektem tego są duże zmiany wartości momentu obrotowego  $M_2$  w zakresie prędkości obrotowych, które stanowią punkty przecięcia krzywej  $M_s(n)$  i krzywych  $i_k = \text{const}$ .

Na podstawie charakterystyki zastępczej zespołu silnik-przekładnia przeprowadza się dalsze prace analityczne w zakresie oceny własności trakcyjnych maszyny lub pojazdu wyposażonego w tego typu układ przeniesienia napędu.

#### 4. Podsumowanie

Prace dotyczące oceny współpracy silnika spalinowego i przekładni hydrokinetycznej mają na celu ocenę stopnia wykorzystania mocy źródła napędu podczas wykonywania typowych cykli pracy. W analizach uwzględnia się charakterystykę zewnętrzną silnika, z uwagi na to, że poszukiwane są maksymalne parametry pracy układu napędowego. Jednak w przypadku, gdy podczas wykonywania typowych zadań maszyny, silnik spalinowy zasilany jest częściowymi dawkami paliwa, konieczne jest uzupełnienie charakterystyki pokazanej na rysunku 8 o krzywe przebiegu momentu obrotowego silnika przy ww. warunkach pracy. Efektem takiego podejścia są wyniki dotyczące pracy analizowanego zespołu, w pełnym zakresie dawek paliwa zasilających silnik. Jednak niezbędne do tego są charakterystyki częściowe silnika spalinowego lub charakterystyka uniwersalna, które na ogół są niedostępne. Wyjściem w tej sytuacji jest prowadzenie badań stanowiskowych. Przykładowe charakterystyki silnika, odpowiadające częściowym dawkom paliwa zasilającego silnik, przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Charakterystyki silnika przy częściowych dawkach paliwa [7]

Na podstawie charakterystyk silnika zasilanego częściowymi dawkami paliwa, przy przewidywanym cyklu obciążenia maszyny, można dokładniej ocenić stopień dopasowania zespołu silnik spalinowy-przekładnia hydrokinetyczna, szczególnie w aspekcie wykorzystania parametrów silnika w trakcie prognozowanego trybu pracy (np. brak lub niewielka liczba cykli pracy z pełnym obciążeniem). Charakterystykę silnika przy częściowych dawkach paliwa, jak również uniwersalną, można sporządzić jedynie na podstawie badań stanowiskowych. Osobną kwestią jest znajomość rzeczywistych cykli obciążenia maszyny – dokładne informacje można uzyskać jedynie podczas badań w warunkach „in-situ”. Metodyka wyznaczania charakterystyki zastępczej zespołu silnik spalinowy-przekładnia hydrokinetyczna, odnosząca się do charakterystyki zewnętrznej silnika (przebieg wartości momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej przy maksymalnej dawce paliwa) jest ogólnym sposobem postępowania podczas oceny maksymalnych wartości momentów obrotowych przenoszonych przez układ napędowy. Można także ocenić stopień dopasowania zespołu silnik-przekładnia, jednak przy założeniu, że silnik pracuje, osiągając maksymalne parametry. Według [1] poprawnie dopasowując przekładnię i silnik na podstawie jego charakterystyki zewnętrznej można osiągnąć zadowalające rezultaty. Efektywność układu napędowego (zespołu silnik-przekładnia) przy zapotrzebowanych (lub przewidywanych) cyklach obciążenia maszyny można dokładniej ocenić, stosując dane o pracy silnika, zasilanego częściowymi dawkami paliwa (lub przy częściowych otwarciach przepustnicy w silniku ZI). Możliwe jest również porównanie większej liczby wariantów konfiguracji układu napędowego przy pracy pojazdu podczas różnych stanów obciążenia silnika i dokonanie wyboru zespołu silnik-przekładnia w sensie optymalnym (z uwagi na określone kryteria i przy uwzględnieniu znanych ograniczeń). W efekcie analizy współpracy silnika z przekładnią hydrokinetyczną, przeprowadzonej zgodnie z opisaną metodyką, otrzymuje się dodatkowe informacje, dotyczące możliwości wystąpienia nieprawidłowej pracy napędu, do której zalicza się zjawisko pełzania pojazdu wskutek zastosowania przekładni hydrokinetycznej o zbyt małej średnicy czynnej lub strat mocy silnika w przypadku przekładni hydrokinetycznej o zbyt dużej średnicy czynnej. W przypadku, gdy dysponujemy jedynie charakterystyką bezwymiarową przekładni, już sporządzenie jej charakterystyki wymiarowej pozwala ocenić, czy analizowana przekładnia jest typu przenikalnego czy nieprzenikalnego. Określa to jej przydatność w projektowanym zespole, zwłaszcza jeśli chodzi o przekładnię nieprzenikalną. Te zagadnienia nie były jednak tematem niniejszego artykułu.

---

Podsumowując, można stwierdzić, że sporządzenie analizy współpracy silnika z przekładnią hydrokinetyczną może rodzić problemy związane z ograniczonym dostępem do danych. Chcąc przeprowadzić analizę, należy dysponować charakterystyką bezwymiarową przekładni (por. rys. 5) oraz charakterystyką momentu obrotowego silnika w funkcji prędkości obrotowej. Brak tabelarycznego zestawienia argumentów i wartości każdej z funkcji nie jest zasadniczym problemem, gdyż można je sporządzić na podstawie wykresów. Współpraca silnika i przekładni jest jednak dużo bardziej skomplikowana i prace wykonywane według zaprezentowanej metodyki mogą być źródłem jedynie ogólnych informacji, choć wystarczających w procesie oceny parametrów napędu.

### Literatura

1. Szydelski Z.: Sprzęgła i przekładnie hydrokinetyczne, WNT, Warszawa 1965.
2. Zając M.: Układy przeniesienia napędu samochodów ciężarowych i autobusów, WKŁ, Warszawa 2003.
3. Borkowski W., Konopka S., Prochowski L.: Dynamika maszyn roboczych, WNT, Warszawa 1996.
4. Dobrzaniecki P., Mężyk A.: Kształtowanie cech eksploatacyjnych górniczych pojazdów szynowych, ITG KOMAG, Gliwice 2012.
5. Dobrzaniecki P.: Badania stanowiskowe górniczego napędu spalinowego, Maszyny Górnicze 2011 nr 4.
6. Kaczmarczyk K.: Badania górniczego napędu spalinowego w aspekcie emisji substancji toksycznych, Maszyny Górnicze 2012 nr 1.
7. Projekt badawczy N N524 354838 – materiały nie publikowane.
8. Parametry techniczne silnika Volvo – Penta D5A T (dane producenta).
9. [www.energomechanik.pl](http://www.energomechanik.pl)
10. [www.kghmzanam.pl](http://www.kghmzanam.pl)
11. [www.zhs.com.pl/](http://www.zhs.com.pl/)

*Artykuł wpłynął do redakcji w czerwcu 2014 r.*