

Tomasz Szczepański¹⁾
Stanisław Orzeszak²⁾

METODA WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYKI PRĘDKOŚCIOWEJ MOMENTU OBROTOWEGO SILNIKA DO SAMOCHODU OSOBOWEGO

1. Wstęp

Należy zauważyć, że konstrukcję współczesnych samochodów charakteryzuje ich modułowa budowa. Wiele elementów konstruuje się niemal niezależnie. Konieczne stają się więc pewne narzędzia dialogowe, które umożliwiają komunikację między projektantami poszczególnych elementów.

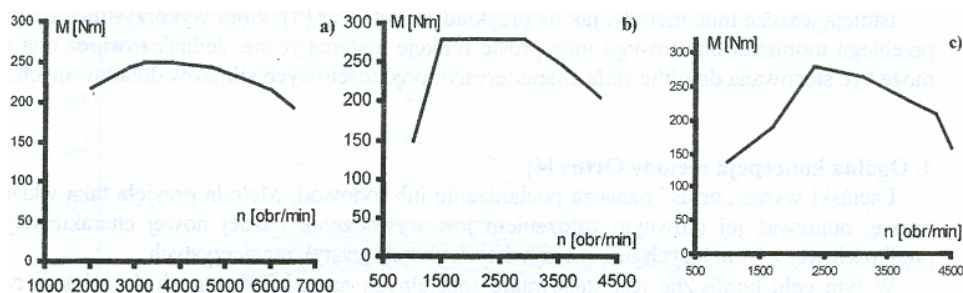
Jednym z takich narzędzi jest charakterystyka prędkościowa silnika, która umożliwia wymianę informacji między konstruktorem silnika, a na przykład konstruktorem skrzynki biegów.

Aby umożliwić jednoczesne projektowanie, korzystne byłoby poznanie charakterystyki prędkościowej przed skonstruowaniem silnika. Niestety brak jest wystarczająco dokładnych metod jej wstępnego wyznaczenia.

Dlatego celem prezentowanej pracy jest opracowanie metody wyznaczenia charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego silnika.

2. Obserwowane kształty charakterystyk prędkościowych

W celu opracowania metody konieczna była analiza najczęściej spotykanych kształtów charakterystyk prędkościowych współczesnych silników.



Rys. 1. Charakterystyki prędkościowe silników: a) o zapłonie iskrowym, niedoładowanych, b) o zapłonie iskrowym, doładowanych, c) o zapłonie samoczynnym, doładowanych

¹⁾ Tomasz Szczepański - Politechnika Warszawska, Wydział SiMR, dyplomant w Instytucie Pojazdów

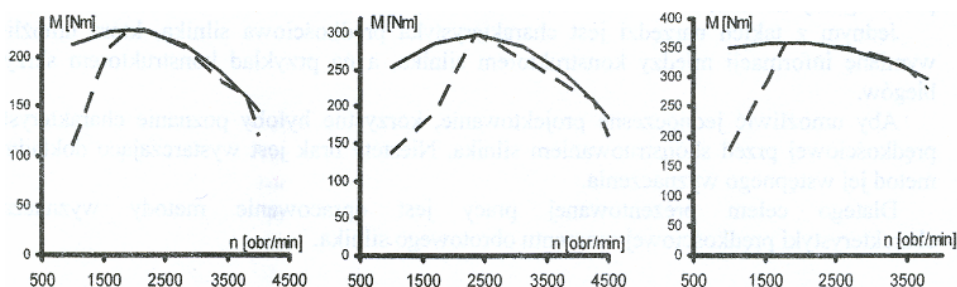
²⁾ dr inż. Stanisław Orzeszak - Politechnika Warszawska, Wydział SiMR, Instytut Pojazdów

Na rys. 1a przedstawiono typowy wykres momentu obrotowego niedoładowanego silnika o zapłonie samoczynnym. Charakteryzuje się on mocno „zaokrąglonymi” kształtami, bez widocznych załamań. Dlatego w wypadku silników z tej grupy można stosunkowo łatwo przewidywać charakterystyki prędkościowe.

Jednak coraz częściej spotykane są silniki doładowane zarówno o zapłonie samoczynnym, jak i o zapłonie iskrowym. Przebiegi momentu obrotowego ukazujące cechy charakterystyczne tych silników pokazano na rys. 1b oraz rys. 1c. Widoczne są typowe załamania wykresu, powodujące znaczne utrudnienia przy próbach przewidywania ich kształtów.

3. Dotychczasowe metody wyznaczania charakterystyki prędkościowej

Podstawową metodą wyznaczania charakterystyki prędkościowej jest metoda Hahna [1], która do opisu przebiegu momentu obrotowego wykorzystuje wielomiany drugiego stopnia. Na rys. 2 przedstawiono zastosowanie tej metody do trzech przykładowych silników doładowanych o zapłonie samoczynnym. Linia kreskową przedstawiono charakterystykę rzeczywistą, a linią ciągłą obliczoną za pomocą metody Hahna.



Rys. 2. Charakterystyki prędkościowe rzeczywiste i obliczone za pomocą metody Hahna

Jak widać, występują wyraźne rozbieżności między przebiegiem rzeczywistym, a obliczonym, zwłaszcza przy niskich prędkościach obrotowych. Tak duże błędy uznano za nieakceptowalne.

Istnieją jeszcze inne metody, jak na przykład metoda Car [3], która wykorzystuje do opisu przebiegu momentu obrotowego inne proste funkcje matematyczne. Jednak również ona nie może być stosowana do obliczania charakterystyk prędkościowych silników doładowanych.

4. Ogólna koncepcja metody Ortus [4]

Łaciński wyraz „ortus” oznacza pochodzenie lub rodowód. Metoda przyjęła taką właśnie nazwę, ponieważ jej głównym założeniem jest wywodzenie każdej nowej charakterystyki prędkościowej z istniejących już, rzeczywistych charakterystyk macierzystych.

W tym celu konieczne jest stosowanie specjalnych narzędzi służących do selekcji tych charakterystyk, które mają być wykorzystane do obliczeń.

Inną cechą szczególną przedstawionej metody jest modyfikacja wartości momentu obrotowego przebiegów macierzystych w celu stworzenia nowego przebiegu przy jednoczesnym zachowaniu ich kształtów.

W metodzie Ortus nie występuje opis charakterystyk prędkościowych za pomocą funkcji matematycznych. Zamiast tego stosuje się opis tabelaryczny — korzystniejszy pod wieloma względami w tym zastosowaniu.

5. Algorytm działania

5.1 Dane wejściowe

Za dane wejściowe do obliczeń uważa się dwie grupy informacji.

Pierwszą grupą jest zbiór wszystkich charakterystyk prędkościowych silników podobnych do tego, którego przebieg momentu obrotowego ma być wyznaczony. Będą one używane, jako charakterystyki macierzyste, na podstawie których zostanie wyznaczony poszukiwany przebieg momentu obrotowego.

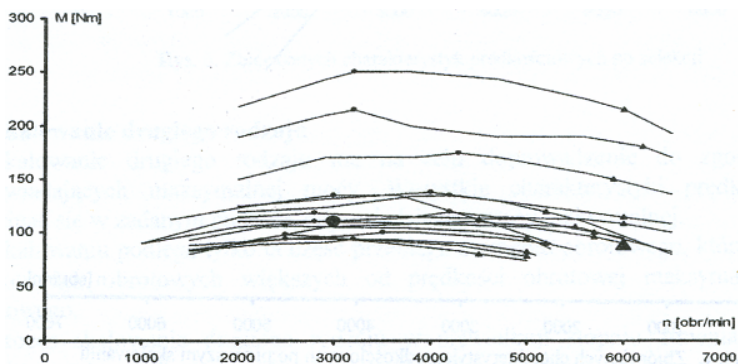
Rozważając teoretycznie oznacza to zupełną dowolność wprowadzonych przez użytkownika metody charakterystyk prędkościowych tych silników, które zostały uznane za wystarczająco zbliżone swoją budową lub innymi cechami.

W praktyce jednak, do obliczeń przedstawionych w pracy, za kryterium podobieństwa przyjęto rodzaj zapłonu (ZI lub ZS) oraz istnienie doładowania.

Drugą grupą danych wejściowych są informacje o dwóch punktach charakterystycznych poszukiwanego przebiegu momentu obrotowego. Są nimi: wartość maksymalnego momentu obrotowego, wartość maksymalnej mocy oraz wartości prędkości obrotowych, przy których te dwie wielkości występują.

Dodatkowo podaje się wartości dwóch parametrów, potrzebnych do wykonania obliczeń. Z reguły jednak użytkownik nie zna tych wielkości, dlatego program (metoda) potrafi dobrać je samodzielnie na podstawie analizy wprowadzonej grupy charakterystyk prędkościowych (jako pierwsza grupa danych wejściowych).

Na rys. 3 przedstawiono przykładowy zbiór charakterystyk prędkościowych wprowadzonych jako dane wejściowe. Duży, okrągły znak oznacza punkt maksymalnego momentu obrotowego wyznaczonej charakterystyki prędkościowej. Mniejsze, okrągłe znaki, to punkty maksymalnych momentów obrotowych wprowadzonych charakterystyk prędkościowych. Analogicznie: duży, trójkątny znak oznacza moment obrotowy odpowiadający mocy maksymalnej poszukiwanej charakterystyki prędkościowej, a mniejsze, trójkątne znaki, to momenty obrotowe odpowiadające mocom maksymalnym wprowadzonych charakterystyk prędkościowych.



Rys. 3. Zbiór danych charakterystyk prędkościowych

Widoczny jest nieuporządkowany charakter przebiegów momentów obrotowych. Jak łatwo zauważyć praktycznie dla żadnej charakterystyki prędkościowej małe, okrągłe i trójkątne znaki nie pokrywają się z dużymi.

W związku z tym konieczne jest stosowanie pewnych zabiegów, które pozwolą na takie przedstawienie zbioru danych charakterystyk prędkościowych, aby można było wyznaczyć za ich pomocą poszukiwany przebieg momentu obrotowego.

5.2 Skalowanie pierwszego rodzaju

Skalowanie pierwszego rodzaju ma na celu doprowadzenie do zgodności maksymalnych momentów obrotowych (i prędkości obrotowych, przy których one występują) na danych charakterystykach prędkościowych i charakterystyce poszukiwanej.

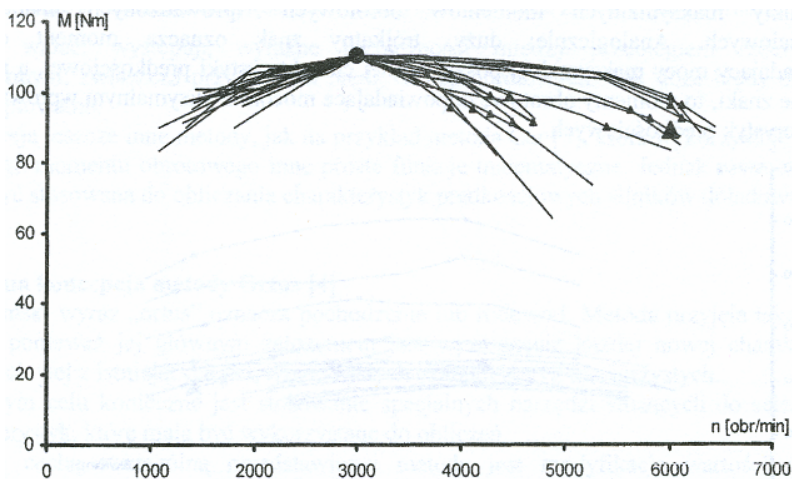
Skalowaniu podlegają wszystkie punkty, z których składają się dane (macierzyste) charakterystyki prędkościowe.

W wyniku tego skalowania nie następuje zmiana kształtu zadanych charakterystyk prędkościowych, ponieważ osobno zarówno wartości momentów obrotowych, jak i prędkości obrotowych każdej charakterystyki zmieniają się proporcjonalnie.

Na rys. 4 pokazano zbiór zadanych charakterystyk prędkościowych po pierwszym skalowaniu. Widać, że wszystkie przebiegi momentu obrotowego mają punkt maksymalnego momentu obrotowego wspólny z zadaniem dla poszukiwanej charakterystyki prędkościowej.

Jednak niektóre z widocznych charakterystyk prędkościowych posiadają punkt odpowiadający maksymalnej mocy w nienaturalnym położeniu względem punktu maksymalnego momentu obrotowego, a przede wszystkim jest on bardzo odległy odadanego punktu odpowiadającego mocy maksymalnej poszukiwanej charakterystyki prędkościowej.

Dlatego istnieje konieczność wyeliminowania tych, zadanych przebiegów momentów obrotowych, które są najmniej zgodne z poszukiwanym kształtem charakterystyki prędkościowej.



Rys. 4. Zbiór danych charakterystyk prędkościowych po pierwszym skalowaniu

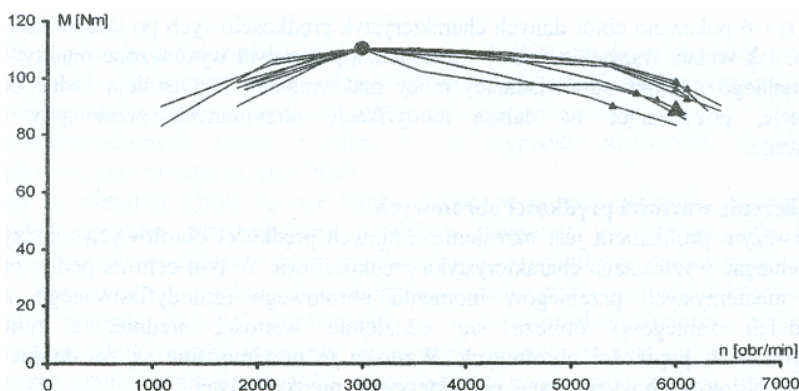
5.3 Selekcja charakterystyk prędkościowych

Selekcja charakterystyk prędkościowych ma na celu wyeliminowanie tych zadanych przebiegów momentu obrotowego, których kształt w najmniejszym stopniu odpowiada poszukiwanej charakterystyce prędkościowej. Pozostawia się jedynie te przebiegi, dla których dopasowanie do poszukiwanego kształtu będzie najmniejszą modyfikacją.

W praktyce sprowadza się to do wyeliminowania tych charakterystyk, dla których punkty odpowiadające mocy maksymalnej są najbardziej odległe odadanego punktu nowej, tworzonej charakterystyki prędkościowej.

W tym celu określa się dwa parametry: procent charakterystyk, które powinny pozostać, których współrzędne poziome punktów odpowiadających maksymalnej mocy są najbliższe poszukiwanej współrzędnej poziomej oraz analogicznie procent pozostawionych charakterystyk, dla których współrzędne pionowe są najbliższe poszukiwanej współrzędnej pionowej. Wartości tych parametrów są dobierane drogą optymalizacji dla zadanej grupy charakterystyk macierzystych, co zostało szczegółowo opisane w pracy [3].

Rys. 5 przedstawia zbiór danych charakterystyk prędkościowych po zastosowaniu procedury selekcji. Jak widać, pozostałe przebiegi momentu obrotowego są znacznie bardziej zgodne z poszukiwanym kształtem, niż przebiegi wyeliminowane. Jednak nadal istnieje potrzeba modyfikacji ich kształtu. Konieczne jest, aby wszystkie charakterystyki prędkościowe miały punkty odpowiadające maksymalnej mocy dokładnie w punkcie odpowiadającym maksymalnej mocy wyznaczonej charakterystyki prędkościowej.



Rys. 5. Zbiór danych charakterystyk prędkościowych po selekcji

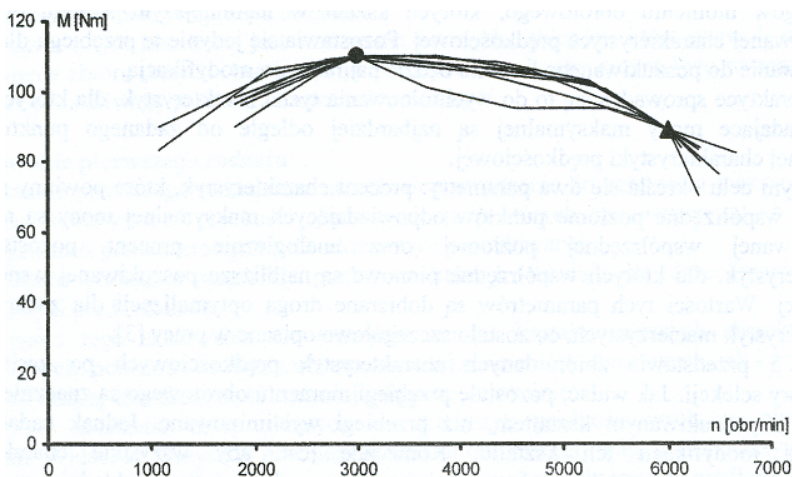
5.4 Skalowanie drugiego rodzaju

Skalowanie drugiego rodzaju ma na celu doprowadzenie do zgodności punktów odpowiadających maksymalnej mocy. Wszystkie charakterystyki prędkościowe muszą przecinać się w danym punkcie, odpowiadającym mocy maksymalnej.

Skalowaniu podlega tylko ta część przebiegu momentu obrotowego, która występuje przy prędkościach obrotowych większych od prędkości obrotowej maksymalnego momentu obrotowego.

Proces skalowania drugiego rodzaju w niewielkim stopniu zmienia kształt danych charakterystyk prędkościowych. Jest to konieczne, gdyż kształty danych przebiegów momentu obrotowego różnią się od poszukiwanego kształtu wyznaczonej

charakterystyki prędkościowej. Zabieg ten jest jednak ograniczony do minimum pod względem wartości wprowadzanych zmian.



Rys. 6. Zbiór danych charakterystyk prędkościowych po skalowaniu drugiego rodzaju

Na rys. 6 pokazano zbiór danych charakterystyk prędkościowych po skalowaniu drugiego rodzaju. Jak widać, wszystkie funkcje przechodzą przez dwa wyznaczone punkty: momentu maksymalnego i punkt odpowiadający mocy maksymalnej. Nie istnieją żadne dodatkowe informacje, pozwalające na dalszą modyfikację otrzymanych przebiegów momentu obrotowego.

5.5 Obliczenie wartości prędkości obrotowych

Pierwszym problemem jest określenie skrajnych prędkości obrotowych między którymi ma przebiegać wyznaczana charakterystyka prędkościowa. W tym celu na podstawie danego zbioru macierzystych przebiegów momentu obrotowego (zmodyfikowanego w trakcie poprzednich zabiegów) oblicza się oddzielnie wartości średnie: z minimalnych i maksymalnych prędkości obrotowych. Wartości te przyjmowane są za skrajne wartości prędkości obrotowych wyznaczanej charakterystyki prędkościowej.

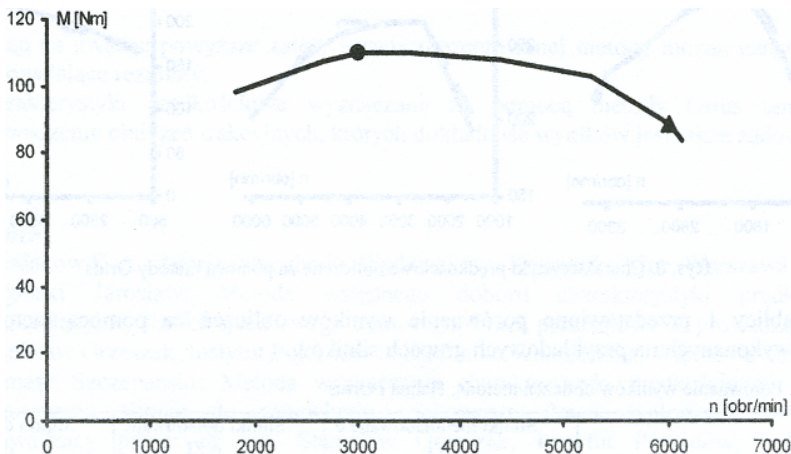
Powstały w ten sposób zakres prędkości obrotowych dzielony jest na pięć równych przedziałów, których wartości graniczne przyjmuje się za kolejne, równomiernie rozłożone prędkości obrotowe.

Do tego dokładane są prędkości obrotowe odpowiadające maksymalnemu momentowi obrotowemu i maksymalnej mocy. Tak powstały zbiór wartości (po sortowaniu od wartości najmniejszych do największych) stanowi dziedzinę tworzonej charakterystyki prędkościowej.

5.6 Obliczanie wartości momentów obrotowych

Dla każdej z przyjętych wcześniej wartości prędkości obrotowych wyznaczanej charakterystyki prędkościowej oblicza się wartości momentów obrotowych dla każdej z danych (już zmodyfikowanych) macierzystych charakterystyk prędkościowych, przy użyciu interpolacji liniowej między znanymi punktami tych charakterystyk. Następnie

dla każdej prędkości obrotowej wyznaczonej charakterystyki prędkościowej oblicza się wartość średnią z momentów obrotowych wynikających z poszczególnych danych przebiegów momentów obrotowych. Funkcja powstała z przyporządkowania wartości średnich momentów obrotowych wartościom wyznaczonych prędkości obrotowych jest nową charakterystyką prędkościową, która była poszukiwana – rys.7.



Rys. 7. Uśredniony przebieg momentu obrotowego

Jednak z powodu uśredniania wartości momentu obrotowego dla wielu punktów istnieje niebezpieczeństwo, że wartość mocy będzie większa niż maksymalna lub równa maksymalnej i będzie występować przy innej prędkości obrotowej silnika niż zadana.

Z przeprowadzonych badań wynika, że w wypadku niektórych charakterystyk prędkościowych generowane są takie błędy.

Jednak w metodzie Ortus są one bardzo łatwe do wyeliminowania, ze względu na tabelaryczny charakter przedstawienia przebiegu momentu obrotowego. Dla każdego z obliczonych punktów charakterystyki prędkościowej, z wyjątkiem punktu maksymalnego momentu obrotowego i punktu odpowiadającego mocy maksymalnej, dokonywane jest sprawdzenie wartości mocy i porównanie jej z dopuszczalną wartością maksymalną. Wszędzie tam, gdzie wartość momentu obrotowego okazuje się zbyt duża, następuje jego automatyczne zmniejszenie do wartości odpowiadającej mocy maksymalnej, pomniejszonej o 1 Nm (czyli o najmniejszą wartość wynikającą z dokładności przedstawiania wyniku).

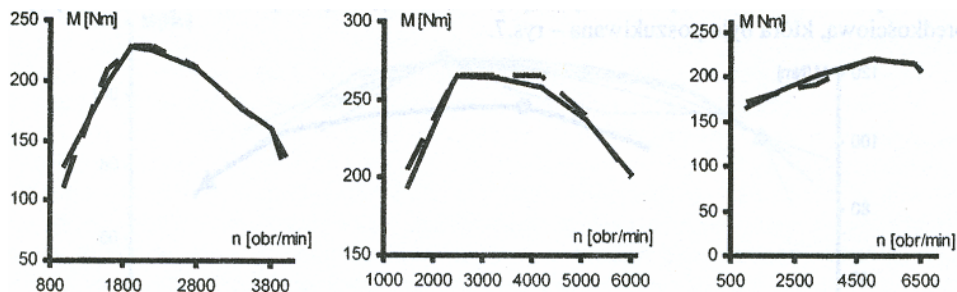
Procedura korekcji przynosi oczekiwane rezultaty i eliminuje całkowicie omawiany problem.

6. Ocena przydatności metody i podsumowanie

Na rys. 8 przedstawiono zastosowanie metody Ortus do trzech silników doładowanych o zapłonie samoczynnym (tych samych, na których w podrozdziale 3 prezentowano metodę Hahna). Linia kreskową przedstawiono charakterystykę rzeczywistą, a linią ciągłą obliczoną za pomocą prezentowanej metody.

Do oceny przydatności metody przyjęto dwa kryteria: wartość średnią błędu względnego oraz wskaźnik błędu, będący iloczynem wartości średniej błędu względnego i jego odchylenia standardowego. Pierwszy wskaźnik informuje o wielkości

popelnianych błędów, a drugi jednocześnie o ich wielkości i o równomierności ich rozłożenia. Pożądane jest, aby obydwa te wskaźniki przybierały możliwie najmniejsze wartości.



Rys. 8. Charakterystyki prędkościowe obliczone za pomocą metody Ortus

W tabelicy 1 przedstawiono porównanie wyników obliczeń za pomocą metod Ortus i Hahna wykonanych na przykładowych grupach silników.

Tabelica 1. Porównanie wyników obliczeń metodą: Hahna i Ortus

Nazwa metody	Silniki niedoładowane o ZI		Silniki doładowane o ZI		Silniki doładowane o ZS	
	Hahna	Ortus	Hahna	Ortus	Hahna	Ortus
Wartość średnia (dla grupy silników) wartości średnich błędu względnego [%]	4	3	5	2	12	5
Odchylenie standardowe wartości średniej (dla grupy silników) wartości średnich błędu względnego [%]	3	2	3	1	6	3
Wartość średnia (dla grupy silników) wskaźnika błędu	40	18	66	8	390	54
Odchylenie standardowe wartości średniej (dla grupy silników) wskaźnika błędu	75	43	78	10	340	61

Do podstawowych zalet metody należą:

- Małe wartości błędów generowanych przebiegów.
- Dość równomierny rozkład błędów w całym przedziale prędkości obrotowych.
- Uniwersalność metody, czyli jej przydatność do tworzenia charakterystyk silników dowolnego typu.
- Niewrażliwość na załamania przebiegu momentu obrotowego oraz inne jego cechy trudne do przewidzenia i opisanie.
- Brak konfliktów przebiegu momentu obrotowego z przebiegiem mocy.
- Wyznaczanie granicznych wartości prędkości obrotowej.

Do podstawowych wad tej metody można natomiast zaliczyć:

- Konieczność dysponowania macierzystymi przebiegami momentu obrotowego silników podobnych do silnika, którego charakterystyka prędkościowa jest wyznaczana.
- Wrażliwość metody na różnorodność przebiegów macierzystych, co wymusza ich bardzo staranny dobór.

Mając na uwadze powyższe zalety i wady prezentowanej metody można uznać, że daje ona zadowalające rezultaty.

Charakterystyki prędkościowe wyznaczone za pomocą metody Ortus umożliwiają przeprowadzenie obliczeń trakcyjnych, których dokładność wyników jest także zadowalająca.

Literatura:

- [1] Czudakow E. A.: Teoria samochodu, Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa 1954.
- [2] Bagiński Jarosław: Metoda wstępnego doboru charakterystyki prędkościowej eksploatacyjnej silnika spalinowego tłokowego, Praca przejściowa II, prowadzący pracę: Stanisław Orzeszak, Instytut Pojazdów Politechnika Warszawska, Warszawa 1996.
- [3] Tomasz Szczepański: Metoda wyznaczania charakterystyki prędkościowej momentu obrotowego silnika do samochodu osobowego, Praca dyplomowa inżynierska, prowadzący pracę: dr inż. Stanisław Orzeszak, Instytut Pojazdów, Politechnika Warszawska, Warszawa 2005.

Streszczenie

Ze względu na modułową budowę samochodów konieczne jest tworzenie narzędzi dialogowych między konstruktorami poszczególnych elementów takich, jak charakterystyka prędkościowa momentu obrotowego silnika. Bardzo korzystna jest możliwość jej wstępnego wyznaczenia przed konstrukcją silnika. Dotychczasowe metody służące do tego celu nie dają wystarczająco dokładnych wyników. Dlatego w pracy zaprezentowano metodę Ortus, która umożliwia oszacowanie przebiegu takiej charakterystyki. Polega ona na doborze przebiegów momentu obrotowego silników podobnych do projektowanego silnika, którego charakterystyka jest tworzona. Następnie poddaje się je takiej modyfikacji, aby zachowane zostały ich charakterystyczne kształty. Umożliwia to otrzymanie charakterystyki o dość niewielkich wartościach błędów i stosunkowo równomiernym ich rozkładzie. Przedstawiona metoda posiada szereg zalet, które umożliwiają jej wykorzystanie w praktyce.

Summary

Because of the block designing of cars, there is necessary to create some dialog tools between designers of individual elements, like in case of torque-speed characteristics. Possibility to preliminary assign it before engine would be designed is very profitable. Hitherto, the methods used do not give precise enough results. This is why in this development work the Ortus method, which makes it possible to estimate this characteristic is presented. It consists in a selection of torque curves of engines, which are similar to designed engine, whose characteristic is created. Then it is subject to some modifications with preserving their typically shapes. It allows getting the torque-speed characteristic with small enough error values of relatively uniform distribution. The presented method has got some advantages, which allow to used it in the design practice.