

Janusz MYSŁOWSKI
Jaromir MYSŁOWSKI

SYMULACYJNE BADANIE ELASTYCZNOŚCI SILNIKÓW FIRMY MAN

Simulation testing of the “MAN” engines response

Wstęp

Elastyczność silnika spalinowego mówi o jego zdolności przystosowania się do zmiennych obciążeń i prędkości obrotowych. Dla silników trakcyjnych jest to bardzo istotny wskaźnik ich możliwości eksploatacyjnych. Duże natężenie ruchu drogowego wymusza stosowanie silników przeznaczonych do napędu pojazdów samochodowych o większej elastyczności niż to miało miejsce dotychczas. Dotyczy to szczególnie pojazdów drogowych o dużej masie, które mogą wpływać na zmniejszenie płynności ruchu w wyniku małej elastyczności silnika.

Liczbowym wyrazem elastyczności silnika jest współczynnik elastyczności. Można określić go między innymi na podstawie charakterystyki zewnętrznej silnika [1], w sposób podany niżej:

$$E = e_M e_n = \frac{M_{o\max}}{M_N} \frac{n_N}{n_{Mo\max}} \quad (1)$$

gdzie:

- e_M – rozpiętość (elastyczność) momentu obrotowego,
- e_n – rozpiętość prędkości obrotowej,
- $M_{o\max}$ – maksymalny moment obrotowy silnika,
- M_N – moment obrotowy odpowiadający mocy znamionowej,
- $n_{Mo\max}$ – prędkość obrotowa maksymalnego momentu obrotowego,
- n_N – znamionowa prędkość obrotowa.

Pierwszy z członów iloczynu przedstawia rozpiętość (elastyczność) momentu obrotowego i zależy ona od przebiegu krzywej momentu obrotowego silnika. Przebieg ten zależy od szeregu czynników, takich jak: parametry charakterystyczne układu dolotowego, charakterystyka rozrządu, charakterystyka układu zasilania. Przez zmianę tych parametrów można wpływać na przebieg krzywej momen-

tu obrotowego w kierunku pożądanym przez użytkownika, tak by silnik był dobrze przystosowany do wykonywanych zadań. Sposób realizacji poprawy elastyczności momentu obrotowego zależy od możliwości wykonawczych i analizy opłacalności danego rozwiązania w przypadku konkretnego silnika.

Jeśli chodzi o możliwości zmian drugiego członu iloczynu, są one ściśle związane ze zmianą pierwszego członu, polegającą na przemieszczeniu położenia maksimum krzywej momentu obrotowego. Od położenia tego maksimum zależy rozpiętość prędkości obrotowej i przez wpływanie na nią można skutecznie sterować elastycznością silnika.

Silniki MAN

Wytwórnia ta produkuje jedynie silniki o wtrysku bezpośrednim, a właściwie jego modyfikacji, znanej jako system wtrysku (wytwarzania mieszaniny palnej) M, wymyślony i opatentowany przez Sigfrieda Maurera. Silniki tej firmy są również wyposażone w modyfikacje tego systemu wtrysku, oznaczone HM i FM. Konstrukcje ostatnich lat cechuje dążenie do stworzenia silnika o tzw. „stałej mocy”, spełniają one wszelkie wymagania odnośnie do czystości spalin przewidziane normą EURO-2 (tab. 1).

Tabela 1. Elastyczność silników MAN EURO-2

Silnik	e_M	e_n	E
EURO2 290*	1.180	2.000	2.360
EURO2 340	1.250	2.000	2.500
EURO2 400	1.236	2.000	2.472
EURO2 460	1.239	2.000	2.478
D 824 LFL 10*	1.365	2.000	2.730
D 824 LFL 09	1.278	1.500	1.917
D 0824 LF 09	1.300	1.714	2.228
Średnio	1.264	1.887	2.383

*EURO-2 – silniki spełniające wymagania tej normy w odniesieniu do toksyczności spalin i emitowanego hałasu, cyfra oznacza moc silnika w KM,

**Pozostałe silniki stosowane do napędu samochodów STAR.

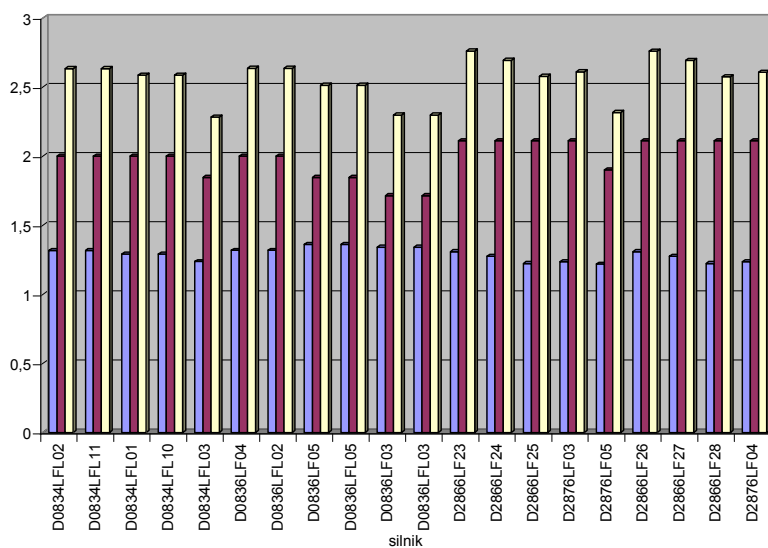
Wartość średnia elastyczności silników MAN jest dosyć duża (2.074), jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że autorzy w przypadku tej firmy nie prowadzili podziału na silniki starszej generacji i nowe [2]. Gdyby wziąć np. tylko silniki nowe oznaczone EURO-2, to okaże się, że wartość średnia elastyczności dla tej grupy silników wynosi 2.383 i jest bardzo wysoka. Uzyskano to dzięki dużej wartości rozpiętości prędkości obrotowej, wynoszącej dla wszystkich silników tej grupy 1.887, co widać wyraźnie w tabeli 1.

Duża elastyczność silników przeznaczonych do napędu samochodów STAR 8.125; 12.155 i 12.157 w połączeniu ze skrzyniami biegów firmy ZF pozwala na niskie zużycie paliwa przy zachowaniu dobrych właściwości dynamicznych.

Dalszy rozwój silników MAN zmierza w kierunku uzyskania stałego momentu obrotowego w dużym zakresie użytecznych prędkości obrotowych.

Silniki MAN EURO-3

Dla ocenianej grupy silników, nazywanej dalej umownie MAN EURO-3 określono wartości elastyczności poszczególnych modeli, jak i średnie dla całej grupy, co przedstawiono na rys. 1. Średnia wartość elastyczności całkowitej dla silników z rysunku 1 wynosi 2.56 i jest to wartość duża, jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że dla dużej zbiorowości silników wysokoprężnych [2] wynosiła ona 2.195. Próbką tych silników obejmowała zarówno silniki do samochodów ciężarowych, jak i osobowych, doładowanych oraz wolnossących. W porównaniu z silnikami samochodów osobowych, oznaczanych umownie TDI, była to wartość mniejsza, gdyż silniki TDI mają elastyczność całkowitą w granicach 3.0 [2]. Niemniej jednak wskaźnik uzyskany dla silników MAN jest bardzo dobry, co świadczy o ich nowoczesności.



Rys. 1. Elastyczność silników wysokoprężnych MAN EURO-3: pierwszy słupek – e_M , drugi słupek – e_n , trzeci słupek – E

Jak widać z danych przedstawionych na rys. 1, wartość maksymalna momentu obrotowego wpływa w mniejszym stopniu na elastyczność całkowitą niż rozpiętość prędkości obrotowej i jest to rozumowanie poprawne, poparte wynikami licznych badań. W odniesieniu do silników stosowanych do napędu maszyn roboczych istotniejszy jest charakter przebiegu krzywej momentu obrotowego, to jest to, jaka część krzywej momentu obrotowego leży powyżej jego

wartości równej 95% [3], co zbliża go do silnika o stałej mocy, a więc nie wymagającego ciągłej zmiany przełożeń. Dla silników tych ważniejszą rolę odgrywa elastyczność momentu obrotowego, często podawana w publikacjach jako zapas momentu obrotowego.

Dla porównania elastyczności silników wysokoprężnych MAN z modelami wcześniej produkowanymi posłużono się danymi przedstawionymi w pracy [2]. Średnia wartość elastyczności całkowitej dla tej grupy silników wynosi 2,074 i jest o 23% niższa niż nowej generacji silników (rys. 1). W przypadku porównania z silnikami MAN EURO-2, których dane znajdują się na rys. 1, postęp już nie jest tak duży, bo wynosi 7% (średnia elastyczność MAN EURO-2 jest równa 2,383). Przy bardzo dobrych wartościach parametrów operacyjnych silników poprzedniej generacji uzyskanie przyrostu 7% jest poważnym osiągnięciem, biorąc pod uwagę fakt, że są to rezultaty przedstawiane jako średnie dla pewnych zbiorowości ocenianych silników, a nie pojedynczych egzemplarzy.

Jak wspomniano wcześniej, w przypadku doboru silnika do napędu maszyn roboczych istotniejsze znaczenie będzie miała elastyczność momentu obrotowego niż elastyczność prędkości obrotowej (rozpiętość prędkości obrotowej) i ten parametr jest przede wszystkim brany pod uwagę. Z grupy silników przedstawionych na rys. 1 wybrano do porównań cztery ostatnie silniki, charakteryzujące się dużą wartością momentu obrotowego (od 1500 do 2100 Nm), uzyskiwaną przy małej prędkości obrotowej wynoszącej 900 min^{-1} . Dla tej grupy silników elastyczność momentu obrotowego wynosiła 1,264 przy 1,226 dla silników EURO-2 i 1.127 dla całej zbiorowości silników MAN opisanych w pracy [2]. W tym porównaniu widać również stały postęp, mimo bardzo restrykcyjnych wymagań w odniesieniu do ochrony środowiska, jakie stawia norma EURO-3. Postęp ten polega na sterowaniu przebiegiem krzywej momentu obrotowego, możliwym do realizacji przez odpowiednie zgranie doładowania silnika oraz skutecznego działania układu wtryskowego, dzięki coraz bardziej rozwiniętej elektronice stosowanej w silnikach wysokoprężnych.

Taką zasadę stosuje znana wytwórnia silników wysokoprężnych MAN, proponując swoim klientom całą gamę silników spełniających wymagania EURO-3 w dziedzinie ekologii. Są to silniki o mocy od 103 kW przy 2400 min^{-1} do 375 kW przy 1900 min^{-1} , które charakteryzuje bardzo niskie jednostkowe zużycie paliwa w granicach 195 do 197 g/kWh (co odpowiada 144 do 148 g/KWh) i, jak wspomniano wcześniej, spełnienie wymogów EURO-3 w odniesieniu do toksyczności spalin (zawartości CO, HC i NO_x). Z grupy tych silników na uwagę zasługuje silnik D 2866 LF 26 o mocy 228 kW przy 1900 min^{-1} i maksymalnym momencie obrotowym 1500 Nm przy 900 min^{-1} . Zwraca uwagę fakt, że moment obrotowy silnika jest stały od prędkości 900 do 1300 min^{-1} , co pozwala na mniejsze zużycie zastosowanej przekładni napędowej dla maszyny roboczej w związku z mniejszą liczbą jej włączeń. Również przebieg krzywej mocy jest bardzo korzystny, bo w zakresie prędkości obrotowych $1800\text{-}1900 \text{ min}^{-1}$ silnik ma stałą moc. Współczynnik elastyczności całkowitej dla tego silnika obliczony wg wzoru (1) wynosi:

$$E = e_M e_n = \frac{1500}{1146,5} \frac{1900}{900} = 1,308 \cdot 2,111 = 2,759 \cong 2,76$$

Jest to wartość bardzo duża, mówiąca o znacznych możliwościach przystosowania się pojazdu napędzanego tym silnikiem do zmiennych warunków drogowych, wyrażających się koniecznością dostosowania do gwałtownie zmieniającego się obciążenia silnika i jego prędkości obrotowej. Silnik ten jednocześnie spełnia warunki stawiane jednostkom napędowym pociągów drogowych w Europie, wymagających mocy jednostkowej 6 kW/t masy całkowitej, co przy masie 38 t daje 228 kW.

Na przykładzie opisanych silników firmy MAN widać jak dokonuje się stały postęp w dziedzinie konstrukcji silników spalinowych, wymuszany przez coraz bardziej restrykcyjne przepisy dotyczące ochrony środowiska i dążenie do poprawy wskaźników ekonomiczności pracy.

Piśmiennictwo

1. Dębicki M.: Teoria samochodu. Teoria napędu. WNT Warszawa, 1969.
2. Mysłowski J., Kołtun J.: Elastyczność tłokowych silników spalinowych. WNT Warszawa, 2000.
3. Mysłowski J.: Comments concernig determination of flexibility of spark ignition combustion engines. Journal of kones internal combustion engines. Warsaw-gdynia, 2001.

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań elastyczności silników firmy MAN na przykładzie kolejnych zmian w konstrukcji wymuszonych przez coraz ostrzejsze wymagania w dziedzinie ochrony środowiska. Analizę przeprowadzono w oparciu o podstawowe parametry robocze tych silników.

Summary

The paper presents results of tests on the response of "MAN" engines exemplified by consecutive changes in their construction caused by stricter and stricter regulations concerning the protection of environment. The analysis was carried out using the basic working parameters of the engines

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Krasowski