

Obroty znamionowe a układ spalinowego silnika kolejowego

W artykule opisano konsekwencje poprawy relacji masy własnej do mocy spalinowego silnika kolejowego poprzez zwiększenie jego obrotów znamionowych, formułując zależność mocy uzyskanej z cylindra od tych obrotów. Wykazano ponadto wpływ: p_e , C_{sr} tłoka oraz S/d na wartość N_e/i . Analiza w/w zależności pozwoliła na ocenę skutku przyjętych obrotów znamionowych dla układu silnika przy określonej mocy.

1. Uwagi ogólne

Istotną, aczkolwiek niekorzystną cechą napędu spalinowego jest stosunkowo znaczna jego masa. W przypadku pociągów elektrycznych dużej mocy uzyskuje się wskaźnik masy własnej $12 \div 15$ kg/kW, odniesiony do mocy na obwodzie kół napędnych. Najkorzystniejszy tego rodzaju wskaźnik dla pociągów lokomotyw spalinowych z silnikiem tłokowym o mocy ponad 2000 kW, wynosi $50 \div 60$ kg/kW (również w odniesieniu do mocy na obwodzie kół napędnych) [1,7,8], przy czym mniejsze wartości odnoszą się do lokomotyw Bo-Bo z przekładnią hydrauliczną. Zmierzana się do uzyskania w projektowanych lokomotywach spalinowych wskaźnika $42 \div 45$ kg/kW [10]. Najlepszy wskaźnik masy w przypadku napędu spalinowego uzyskano dla członu napędowego szybkiego zespołu trakcyjnego – ok. 28 kg/kW.

Wspomnieć należy, że w przypadku pociągów elektrycznych, w warunkach europejskich, potrzebna ich masa przyczepna zawiera się w granicach $80 \div 90$ t. Porównanie tych wielkości z parametrami lokomotyw spalinowych wskazuje na znaczny „nadmiar” masy własnej tych ostatnich. Masa lokomotyw spalinowych z silnikiem o mocy ponad 2200 kW przekracza zazwyczaj 100 t.

Jednostkowa masa samego układu napędowego nowoczesnej lokomotywy elektrycznej wynosi $6 \div 8$ kg/kW. W przypadku napędu spalinowego ten wskaźnik wynosi ok. 20 kg/kW dla lokomotyw dużej mocy z przekładnią elektryczną i $10 \div 12$ kg/kW dla napędów o mniejszych mocach i przekładni hydraulicznej.

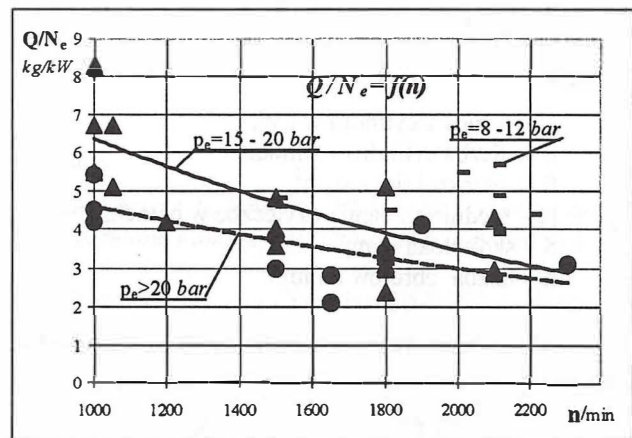
Udział masy silnika spalinowego w masie całkowitej lokomotywy spalinowej stanowi $10 \div 15$ %. Dla zespołów trakcyjnych i wagonów silnikowych tej trakcji udział masy silnika w całkowitej masie pojazdu jest mniejszy, wynosi odpowiednio $3 \div 5$ %. Potrzeba utrzymania w tych pojazdach – z rozmaitych względów – małej masy własnej i ograniczonych nacisków zestawu kół na szyny powoduje, że sprawa zmniejszenia masy napędu spalinowego i w tym przypadku ma istotne znaczenie. Problem w znacznym stopniu dotyczy masy samego silnika spalinowego. Stąd obserwuje się systematyczne podejmowanie wysiłków w tym zakresie.

2. Główne czynniki wpływające na wskaźnik masy silnika spalinowego

Dla grupy silników o tym samym przeznaczeniu (w tym przypadku do napędu pojazdów szynowych), zbliżonych warunkach eksploatacji, podobnych wymaganiach odnośnie do trwałości i podatności utrzymania, rozchodów paliwa i oleju smarnego oraz takich samych zasadach

konstrukcji, głównymi czynnikami decydującymi o jednostkowej masie silnika są: średnie ciśnienie użyteczne i znamionowe obroty.

Wykres na rys. 1 przedstawia współzależność tych czynników dla silników nowszej produkcji. Tabela 1 podaje podstawowe parametry niektórych silników kolejowych [2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11]. Należy zauważyć, że współcześnie budowane silniki spalinowe wykazują średnie ciśnienia użyteczne nie przekraczające 23 barów. Można oceniać, że w przypadku stosowania dostępnych materiałów konstrukcyjnych i technologii, przy zachowaniu wymaganych cech użytkowych silnika, wspomniana wartość nie prędko będzie mogła być przekroczona. W stosunkowo znacznym zakresie mogą być dobierane obroty znamionowe, bo w granicach $1000 \div 2300$ /min. Obserwuje się wykorzystanie większych obrotów znamionowych (silniki MTU, Cummins, Paxman) nawet przy dużych mocach.



Rys. 1 Zależność wskaźnika masy własnej Q do mocy N_e od obrotów znamionowych n dla silników nowej produkcji wg tab. 1.

Nadmienić należy, że silniki kolejowe budowane są wyłącznie w układzie cylindrów - widlastym lub szeregowym (pionowym lub poziomym). Inne układy – np. X, H czy Δ nie znalazły zastosowania. Ze względu na złożoność konstrukcji (liczba elementów ruchomych), warunki pracy w pojeździe szynowym, wymagania dotyczące utrzymania, liczba cylindrów nie przekracza 8 w przypadku szeregowego układu cylindrów i 20 w przypadku układu widlastego. W silnikach napędu wagonów silnikowych liczba cylindrów zazwyczaj nie przekracza 12. Okoliczności te stwarzają istotne ograniczenie mocy jaką można wytworzyć w silniku kolejowym. Niektóre wytwórnice ze wspomnianych już powodów, w sposób wyraźny dążą do zachowania możliwie małej liczby cylindrów przy dużych mocach.

lp.	wytwornia seria	moc z cyl. kW/cyl.	liczba obrotów obr/min	układ i liczba cylindrów	wym. gł. cylindra mm	średnie ciśnienie użyteczne bar	śr. prędkość tłoka m/s	wskaźnik Q/N_e kg/kW	S/d
1	Cummins QSK78	145	1900	V60 18	170 / 190	21,2	12,0	4,1	1,12
2	GE 7HDL	288	1050	V45 12,16	250 × 320	20,9	11,2	4,7	1,28
3	GM-EMD 16V265H	290	1000	V45 16	265 × 300	20,1	10,0	5,2	1,13
4	Iveco	100	2300	V90 6,8,12,16	145 × 152	21,7 ÷ 24,6	11,7	3,1	1,05
5	Kolomna CzN 26/26	250	750 ÷ 1000	V45, 12,16,20	260 × 260	21,7	6,5 ÷ 8,7	4,2	1
6	MTU 2000 4000	63	1500 ÷ 2100	V90 8,12,16	130 × 150	13,6 ÷ 18,1	7,5 ÷ 10,5	2,95	1,15
		135	1500 ÷ 1800	V90 8,12,16,20	165 × 190	17,6 ÷ 22,1	9,5 ÷ 11,4	3,4	1,15
7	Alstom Paxman VP 185	172	1500 ÷ 1800	V90 12,18	185 × 196	21,8	9,8 ÷ 11,8	3,25	1,06

3. Zależność wielkości użytecznej mocy znamionowej uzyskiwanej z cylindra od obrotów znamionowych silnika

Podstawę określenia wielkości mocy uzyskiwanej z poszczególnego cylindra silnika spaliniowego przedstawia zależność:

$$\frac{N_e}{i} = 0,8333 F S p_e n \quad (1)$$

gdzie :

- N_e/i – moc z cylindra w kW,
- i – liczba cylindrów silnika,
- F – przekrój tłoka w m^2 ,
- p_e – średnie ciśnienie użyteczne w barach,
- S – skok tłoka w m,
- n – liczba obrotów na min.

Należy zauważyć, że parametry: S , n oraz średnica tłoka są ze sobą związane w sposób następujący:

$$S = \frac{30 C_{sr}}{n}; \quad d = \frac{S}{k};$$

w których:

- C_{sr} – średnia prędkość tłoka w m/s,
- k – stosunek skoku do średnicy tłoka.

Podstawiając te relacje w zależność (1), otrzyma się:

$$\frac{N_e}{i} = 0,8333 \frac{\pi S^2}{4 k^2} p_e n;$$

a następnie po przekształceniach:

$$\frac{N_e}{i} = 17662 \frac{C_{sr}^3}{k^2} p_e \frac{1}{n^2}; \quad (2)$$

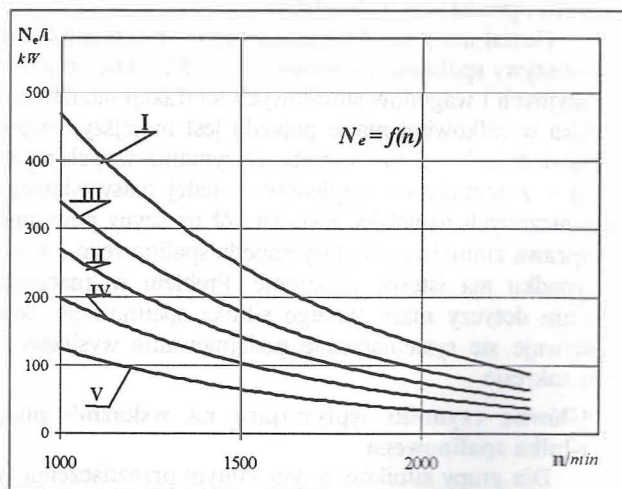
Oznaczając przez $\Psi = 17662 \frac{C_{sr}^3}{k^2} p_e$, ostatecznie uzyska się:

$$\frac{N_e}{i} = \frac{\Psi}{n^2}; \quad (3)$$

Wartości współczynnika Ψ przykładowo podane są w tabeli 2.

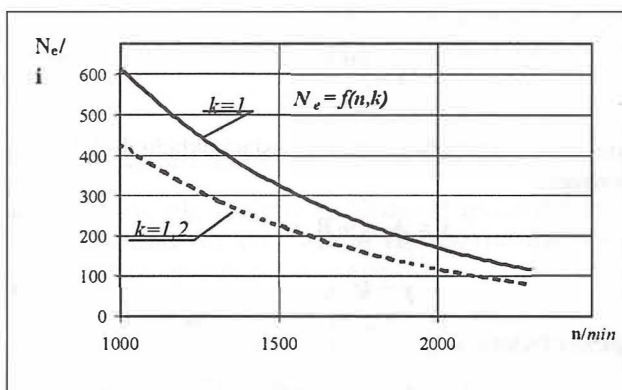
Wartości współczynnika Ψ Tabela 2

	p_e	C_{sr}	k	$\Psi \cdot 10^{-6}$
I	22	12	1,15	508
II	22	10	1,15	293
III	16	12	1,15	369
IV	16	10	1,15	214
V	10	10	1,15	135

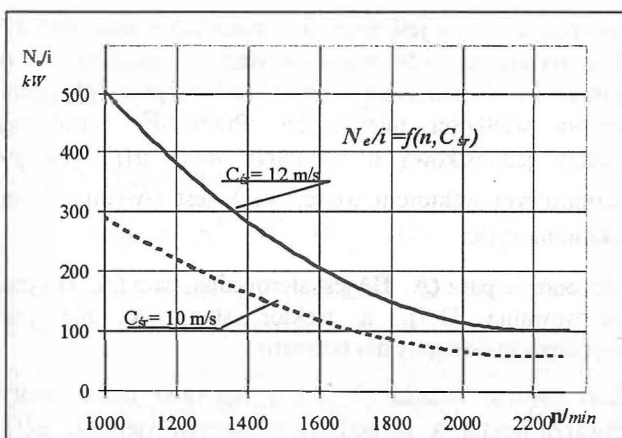


Rys. 2 Zależność mocy z jednego cylindra (N_e/i) od obrotów silnika dla wartości Ψ wg tabeli 2.

W nowoczesnych silnikach kolejowych największe średnie ciśnienia użyteczne jak wspomniano nie przekraczają wartości 22 barów co związane jest ze stosowanymi materiałami, systemem smarowania i cechami oleju smarowego, jak i przewidywaną trwałością silnika. Średnia prędkość tłoka zależna od podobnych czynników nie przekracza 12 m/s. Stosunek S/d ma istotny wpływ na proces spalania, od którego przebiegu zależą rozchody paliwa i utrzymanie składu spalin w dopuszczalnych granicach warunkujących ochronę środowiska człowieka. Jego wartość nie jest większa od 1,15 (z wyjątkiem silnika GE 7HDL16, co być może łączy się z koniecznością spełnienia nowych wymagań USA co do składu spalin). Obserwuje się jednocześnie wyraźne odstępianie od wartości $k = 1$. Wykresy na rysunku 2 przedstawiają zależność $N_e = f(n)$ dla wartości Ψ podanych w tabeli 2. Jak wynika z tych wykresów moc znamionowa uzyskiwana z jednego cylindra maleje w sposób istotny wraz ze wzrostem obrotów znamionowych. Przy określonej mocy silnika powoduje to konieczność zwiększenia liczby cylindrów. Wykresy na rys. 3 wykazują wpływ wartości k na moc silnika w odniesieniu do cylindra, a wykresy na rys. 4 - wpływ średniej prędkości tłoka na wspomnianą moc. Wynika z nich, że na ograniczenie mocy z cylindra wpływa też wzrost stosunku S/d, oraz zmniejszenie średniej prędkości tłoka. Trzeba jednak zauważyć, że te ostatnie parametry we współczesnych silnikach kolejowych zawierają się w stosunkowo wąskich granicach, co spowodowane jest uprzednio omówionymi względami.



Rys. 3 Wpływ wartości k na moc silnika z 1 cylindra



Rys. 4 Wpływ średniej prędkości tłoka C_{sr} na moc silnika z 1 cylindra

4. Uwagi końcowe

Wykazany przebieg zależności mocy uzyskiwanej z cylindra od znamionowych obrotów silnika spalinowego powoduje znaczące skutki dla jego układu. We współcześnie produkowanych silnikach o mocy do ok. 1500 kW, obroty znamionowe nie przekraczają 2100 ÷ 2300 /min (Iveco), dla mocy do ok. 3000 kW 1800 /min (MTU, Paxman, Cummins), a powyżej \square 1000/min (GM, GE, Kolomna). Wytwornie które przyjęły obroty znamionowe 1800 /min mogą uzyskać moc nie większą od 3100 kW w silniku o 20 cylindrach (przy innych parametrach zbliżonych do poz. I w tabeli 2), co w niektórych przypadkach może stanowić istotne ograniczenie zdolności trakcyjnych lokomotywy pociągowej. Inne wytwornie dążące do uzyskania możliwie dużych mocy przy mniejszej liczbie cylindrów przyjmują obroty znamionowe 1000 /min, co pozwala na uzyskanie mocy 4400 kW w silniku 12 cylindrowym. Należy zaznaczyć, że zmniejszanie znamionowych obrotów powoduje wzrost wskaźnika masy własnej w zakresie obrotów 1000 ÷ 1800 /min szacunkowo o ok. 40 %, jednak względy skupienia potrzebnej mocy w jednym silniku o możliwie małej liczbie cylindrów okazały się w wymienionych przypadkach decydujące. O wyborze stosunkowo lekkiego silnika wielocylindrowego czy stosunkowo cięższego o mniejszej liczbie cylindrów decyduje wielkość potrzebnej mocy, czynnik złożoności konstrukcji \square wpływający w sposób istotny na podatność utrzymaniową, oraz cechy pojazdu, w którym ma być zastosowany.

W przypadku napędu wagonów silnikowych o obrotach znamionowych silnika decyduje jak największe zmniejszenie jego masy, nie mniej jednak ograniczenie liczby cylindrów najczęściej do 12 i uzyskanie potrzebnej mocy powoduje, że znamionowe obroty nie przekraczają 2100 ÷ 2300 /min.

Literatura

- [1] Brenneisen J., Beyer E., *Blue-Tiger – eine moderne modulare Familie von Diesel lokomotiven*, GA nr. 9/10 – 1998
- [2] Brezonick M., *New Cummins QSK 78 targets larger mining equipment*, Diesel Progress Int. nr. 3/4 – 2001
- [3] Cavanaugh J. N., *EMD's first 6000 hp locos enter revenue service*, GA nr. 4 – 1998
- [4] Chellini R., *Iveco introduces new line of high power V engines*, Diesel Progress Int. nr. 7/8 – 2001
- [5] - *GE's engine of change*. Railway Age nr. 2, 2003
- [6] Haug F., Baumann H., *Die Entwicklung der Baureihe 2000*, MTZ wyd. spec. 1996
- [7] Körner O., *Diesellokomotiven für schweren Güterverkehr in Nord-amerika*, E. Rev. Int. nr. 1,2,3- 2004
- [8] Marl R., Schieber Ch., Fries D., *Dieselektrische Lokomotive Reihe „Hercules” für Österreichischen Bundesbahnen*, GA nr. 6/7 – 2001
- [9] - *Paxman unveils powerfull new engine*, IRJ nr. 5 – 1998
- [10] - *Power packs expand the range of hydraulic transmissions*, RG nr. 2 – 2004