

Prof.dr hab.inż. Eugene Kossov

Instytut Naukowo-Badawczy Transportu Kolejowego , Moskwa

dr inż. Marek Babel

Politechnika Krakowska

Lokomotywy z silnikiem turbinowym

W artykule przedstawiono zagadnienia celowości zastosowania silników turbinowych na środkach transportu, określono zadania, rozwiązanie których pozwoli zbudować lokomotywę nowego pokolenia z silnikiem turbinowym. Zaprezentowano obliczenia trakcyjne dla trzech wariantów lokomotyw z silnikiem turbinowym, opisano schemat perspektywicznego silnika turbinowego dla lokomotyw, przedstawiono charakterystyki porównawcze sprawności silników turbinowych i silnika wysokoprężnego lokomotyw, dokonano oceny wskaźników trakcyjnych i energetycznych perspektywicznych lokomotyw liniowych z silnikiem turbinowym.

Powrót do rozwiązań z lat poprzednich, w tym do zastosowania silników turbinowych (ST) na środkach transportu, jest procesem naturalnym, potwierdzonym przez historię rozwoju techniki. Można przytoczyć wiele przykładów, kiedy wspomniany powrót podyktowany był osiągnięciami ogólnego rozwoju technologii. W obecnym okresie, w porównaniu do lat 70-ch XX wieku, nastąpiły duże zmiany. Powstały następujące okoliczności, potwierdzające celowość zastosowania ST w pojazdach.

1. Zużycie paliwa przez lokomotywę określane jest sprawnością zespołu napędowego, która to z kolei zależy od maksymalnej temperatury cyklu pracy silnika. Rozwój lotniczych ST i materiałów konstrukcyjnych pozwolił na znaczne podniesienie maksymalnej dopuszczalnej temperatury cyklu pracy w komorze spalania, np. w 1960-1970-ch latach temperatura ta wynosiła 700-750°C, a obecnie osiąga ona wartość 1700°C. Oznacza to, że sprawność termiczna prostego cyklu ST może być zwiększona z 20 do 48%.

2. W sposób znaczący zmieniły się możliwości przemysłu elektrotechnicznego w zakresie budowy prądnic wysokoobrotowych, zapewnienia przekazania mocy od zespołu napędowego do kół, realizacji sterowania silnikiem i urządzeniami pomocniczymi. W chwili obecnej nie ma problemu z wykorzystaniem dowolnego pierwotnego źródła napędu dla realizacji siły pociągowej niezależnie od jego charakterystyk (zależność momentu i mocy od prędkości obrotowej).
3. W porównaniu do lat poprzednich znaczącej zmianie uległ na świecie stosunek społeczeństw do problemów ochrony środowiska. Normy emisji szkodliwych substancji do atmosfery, zwłaszcza tlenków azotu, stały się bardziej rygorystyczne. W omawianych ST emisje szkodliwych substancji do atmosfery na jednostkę wytworzonej energii są 10-15 razy mniejsze, niż dla silników spalinowych, przez co ich zastosowanie staje się coraz bardziej uzasadnione.
4. Znaczącą zaletą silnika turbinowego w porównaniu z innymi silnikami są jego wskaźniki dotyczące ciężaru i wymiarów gabarytowych. Ma to duże ogólne znaczenie dla transportu, a w szczególności przy organizacji ruchu pasażerskiego dużych prędkości.
5. Jednym z ważnych czynników, wpływających na podjęcie decyzji o zastosowaniu ST, jest możliwość jego zasilania różnymi rodzajami paliw, w tym także gazem ziemnym. W tym przypadku jest to związane z ceną, jak i ze zmniejszeniem emisji szkodliwych substancji do atmosfery.
6. W zespole napędowym z ST nie jest wymagany układ chłodzenia nośników ciepła, co jest szczególnie ważne przy eksploatacji w niskich temperaturach. W tych warunkach zwiększają się sprawność i moc silnika turbinowego, a zmniejszają się koszty obsługi.
7. Niezmiernie ważnym czynnikiem przy zastosowaniu ST na środkach transportu jest pracochłonność obsługi i napraw w miejscu eksploatacji. Przy obsłudze silników turbinowych w warunkach lokomotywni nie jest wymagany demontaż rewizyjny silnika, dlatego przy tworzeniu nowych linii znacznie zmniejszają się nakłady na infrastrukturę.
8. Producenci posiadają określone doświadczenie w zakresie budowy i eksploatacji wysokotemperaturowych wymienników ciepła dla realizacji złożonych cykli w ST. Sprawność silnika turbinowego z wymiennikiem - podgrzewaczem zwiększa się o 8-10%, a przy mocach powyżej 4000 kW i umiarkowanej temperaturze w komorze spalania (1500K) może być o 2-8% wyższa, niż dla nowoczesnego silnika spalinowego

(43%). Zastosowanie dodatkowego chłodzenia międzystopniowego powietrza w sprężarce pozwala zwiększyć sprawność ST do 55% i więcej.

Wymienione osiągnięcia w rozwoju technologii pozwalają zbudować lokomotywy z silnikiem turbinowym (LST) o wysokich wskaźnikach techniczno-ekonomicznych. W tym celu należy rozwiązać szereg odpowiednich zadań, a mianowicie opracować i zbudować:

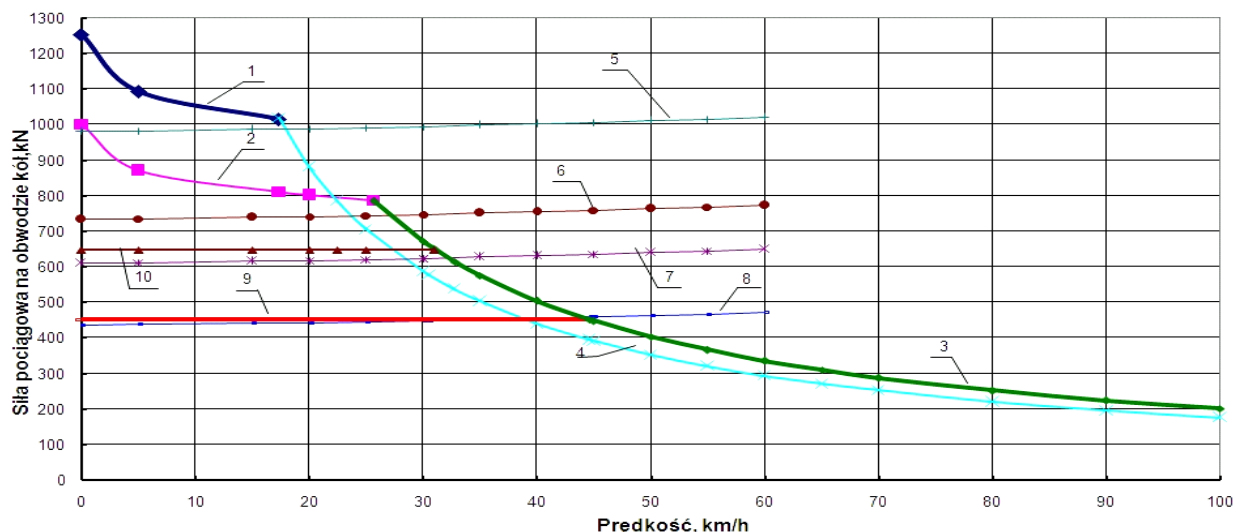
- specjalny silnik turbinowy dla lokomotyw z wymiennikiem - podgrzewaczem i dodatkowym chłodzeniem powietrza w sprężarce;
- wysokoobrotową prądnicę o odpowiedniej mocy, połączoną bezpośrednio (bez przekładni redukującej) z wałem ST;
- wyposażenie elektryczne, zapewniające realizację siły pociągowej z silnikami prądu przemiennego, zasilanie wszystkich urządzeń pomocniczych i sieci pokładowej z jednej prądnicy;
- odpowiedni zespół przetwornic (falowników trakcyjnych);
- układ sterowania, diagnostyki i bezpieczeństwa, zapewniający współpracę układów lokomotywy;
- zasobnik energii, włączony w obwód główny, w celu wykonywania manewrów lokomotywą, rekuperacji energii hamowania i stabilizacji warunków pracy ST;
- układ przechowywania i dawkowania skroplonego gazu ziemnego do silnika z układem zabezpieczenia przeciwpożarowego i przeciwybuchowego.

Można skonstatować, że aktualnie dostępne są wszystkie niezbędne środki do rozwiązania problemów budowy lokomotyw z silnikami turbinowymi nowej generacji, znacznie różniących się od pojazdów budowanych w latach 70-ch zeszłego wieku.

W pierwszej kolejności należy ocenić, jaka powinna być moc lokomotywy na liniach kolejowych. Proponuje się wykorzystać pojęcia zunifikowanej masy pociągów towarowych (6000 Mg), średniej prędkości technicznej (47 km/h) i realnych profili linii kolejowych na odcinkach obsługi trakcyjnej. Skład wagonów o masie 6000 Mg i długości 850 m zestawiony jest z 60-u wagonów o masie 100 Mg każdy.

Na rys. 1 przedstawiono charakterystyki trakcyjne lokomotyw z 12-a i 16-a osiami napędnymi, o nacisku 250 kN na oś i mocy, odpowiednio, 5600 i 4900 kW. Na ww. rysunku wykreślono także charakterystyki całkowitych oporów ruchu dla pociągu 6000 Mg na wzniesieniach 9, 11 i 15 %.

Lokomotywa z 12-a osiami nie może prowadzić pociągu o masie 6000Mg na wzniesieniu powyżej 11%. Zwiększenie mocy trakcyjnej z 4900 do 5600kW nie rozwiązuje problemu. Przy 16-u osiach napędnych do prowadzenia pociągu 6000Mg na



Rys. 1. Charakterystyki trakcyjne lokomotyw z silnikiem turbinowym LST1, LST2 i LST3

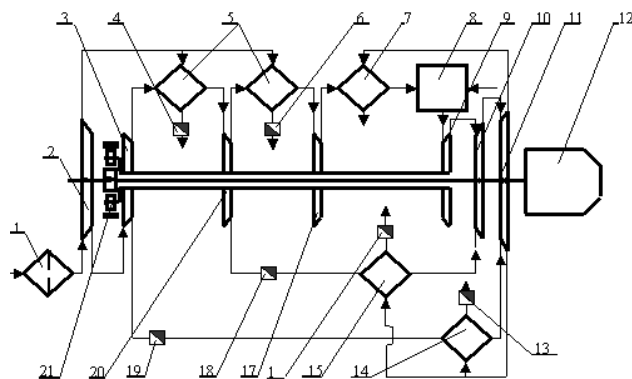
1 – ograniczenie przyczepności przy masie lokomotywy 376t (LST2, LST3); 2 – ograniczenie przyczepności przy masie lokomotywy 300Mg (LST1); 3 – siła pociągowa na obwodzie kół przy mocy 5600kW (LST1); 4 – siła pociągowa na obwodzie kół przy mocy 4900kW (LST2, LST3); 5,6,7 – opory ruchu pociągu o masie 6000Mg na wzniesieniach odpowiednio 15, 11 i 9%; 8 – opory ruchu pociągu o masie 4100Mg na wzniesieniu 9%; 9 – ograniczenie siły pociągowej ciąglej lokomotywy LST1; 10 – ograniczenie przy prędkości $V = 31,1$ km/h

wzniesieniu 15‰ wystarczy 4900kW, jednakże należy zapewnić siłę pociągową ciągłą 1000kN przy prędkości 17,5 km/h.

Obliczenia wykazują, że moc 4900kW jest wystarczająca dla zapewnienia średniej prędkości technicznej 47km/h przy masie pociągu 6000Mg na wszystkich odcinkach obsługi trakcyjnej. Przy współczynniku wykorzystania mocy 0,82 zainstalowana moc silnika powinna wynosić 6000kW. Przy wyborze lokomotywy nowej generacji należy uwzględnić fakt, że silnik turbinowy przy wtrysku wody pozwala zwiększyć moc o 25-30% bez zmniejszenia sprawności. W tym przypadku moc silnika turbinowego może wynosić 4500kW.

Głównym zagadnieniem jest oczywiście budowa silnika turbinowego dla lokomotyw o mocy 6000kW. Na rys. 2 przedstawiono schemat ST dla lokomotyw opracowany przez Centralny Instytut Lotnictwa (CIAM) [1].

W silniku należy realizować złożony obieg termodynamiczny. Wentylator (2) tłoczy powietrze do silnika i do chłodnicy powietrza (5) za pierwszą (3) i drugą (20) sprężarką. Po sprężeniu w trzeciej sprężarce (17) powietrze ogrzewa się w wymienniku – podgrzewaczu (7) i przepływa do komory spalania (8). Turbina posiada trzy stopnie rozprężania. Pierwszy stopień (9) napędza sprężarki (3, 20, 17). Dwa drugie stopnie (10, 11) napędzają wentylator (2) i prądnicę (12). Wał sprężarek (3, 17, 20) i turbiny (9) połączony jest z wałem wentylatora (2), turbiny (10, 11) i prądnicy (12) poprzez reduktor synchronizujący (21). Przewidziana jest możliwość przepuszczania powietrza pierwszego i drugiego stopnia sprężania przez wymienniki ciepła (14, 15)



Rys. 2. Schemat silnika turbinowego GTD-7,5 CIAM (7500 kW)

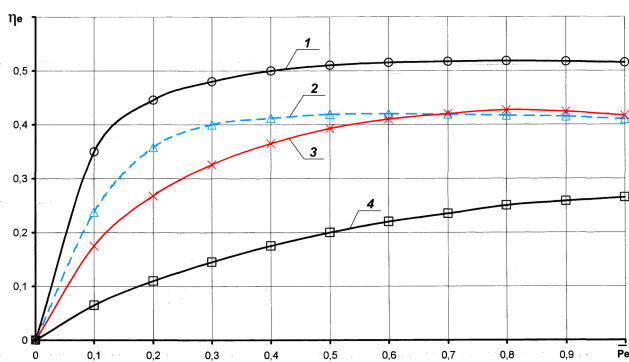
1 - filtr; 2 – wentylator chłodzenia powietrza; 3, 17, 20 - sprężarki; 4, 6, 13, 16, 18, 19 – przysłony regulacyjne; 5 – chłodnice powietrza pierwszej i drugiej sprężarki; 7,14,15 – wymienniki ciepła-podgrzewacze; 8 – komora spalania; 9 – turbina gazo-generatora; 10,11 – turbina prądnicy; 12 - prądnica; 21 – reduktor synchronizujący

do drugiego (10) i trzeciego (11) stopnia turbiny. Pozwala to zwiększyć sprawność ST na obciążeniach częściowych. Do sterowania stopniem chłodzenia i przepuszczaniem powietrza przewidziano przysłony regulacyjne (4, 6, 13, 16, 18, 19).

Podstawowe zespoły tego silnika zostały już opracowane, sprawdzone (zbadane) i wykonane są w metalu. Dopracowania wymagają turbina i wymiennik - podgrzewacz.

Na rys. 3 przedstawiono charakterystyki porównawcze sprawności silników turbinowych i silnika spalinowego. Zastosowanie silnika turbinowego wg obiegu pracy zaproponowanego przez CIAM (krzywa 1, rys. 3) pozwala na znaczne zwiększenie sprawno-

ści silnika w całym zakresie charakterystyk dławiających.



Rys. 3. Sprawność efektywna silników turbinowych i spaliny- wych w zależności od względnego ciśnienia użytecznego 1 – ST-7,5 CIAM (7500 kW); 2 – ST1000 - jednostka napędowa lokomotywy manewrowej GEM10 (1000 kW); 3 – silnik spaliny-owy D49 lokomotywy 2TE70 (3000 kW); 4 – ST HK-361 – jednostka napędowa instalacji energetycznej GTE-8.3/HK (8300 kW).

Niezmiernie ważnym jest fakt, że w układzie silnika nie przewidziano przekładni redukujących, napędów pomocniczych, prądnicy pomocniczej, urządzenia rozruchowego itp., w sposób znaczący wpływających na cenę, niezawodność i koszty wyposażenia.

Uproszczenie układu mechanicznego i zastosowanie międzystopniowego chłodzenia powietrza pozwala w efekcie osiągnąć wysoką niezawodność i trwałość eksploatacyjną silnika. Planowany resurs silnika – 100 tys. motogodz., przebieg do pierwszego przeglądu – 25 tys. motogodz.

Dla zapewnienia charakterystyk trakcyjnych lokomotywy koniecznym jest opracowanie prądnicy (12) i przetwornic (falowników), pozwalających na obracanie wałem ST z zasobnika energii, zasilanie silników trakcyjnych, urządzeń pomocniczych, sieci pokładowej i innych układów.

Część postawionych zadań rozwiązywana jest w trakcie budowy lokomotywy manewrowej GEM10 z silnikiem turbinowym o mocy 1000kW. Silnik GTD 1000 pracuje na skroplonym gazie ziemnym. ST wyposażony jest w wymiennik - podgrzewacz i napędza prądnicę synchroniczną. Dzięki zastosowaniu wymiennika ciepła maksymalna sprawność silnika wynosi 42% przy stosunkowo niskiej temperaturze gazu w komorze spalania 1220K (krzywa 2, rys. 3). Wał silnika i wirnik wysokoobrotowej prądnicy synchronicznej tworzą wspólną konstrukcję, opartą na łożyskach powietrznych i magnetycznych. Prędkość obrotowa prądnicy - 433 1/s (26 000 obr/min).

Układ elektryczny zespołu napędowego przewiduje zasilanie z jednej prądnicy silników trakcyjnych, silników sprężarek i wentylatorów, rozruch silnika turbinowego z zasobnika energii, zasilanie sieci pokładowej i ładowanie akumulatorów. Przewidziano

możliwość przekazania energii do zasobnika i wykorzystanie tej energii przy zmianie warunków pracy trakcyjnej.

Wszystkimi procesami steruje pokładowy sterownik mikroprocesorowy, który realizuje także funkcje kontrolne przed rozruchem i kontroluje stan techniczny układów lokomotywy.

Można przewidzieć pracę silnika turbinowego na skroplonym gazie ziemnym lub na innych rodzajach paliwa. Przejście na jakościowo inną moc nie wymaga wprowadzania zasadniczych modyfikacji w układzie elektrycznym, wymagane są tylko zmiany ilościowe.

Dla dokładnej oceny wskaźników trakcyjnych i energetycznych lokomotyw liniowych z silnikiem turbinowym przeprowadzone zostały porównawcze obliczenia trakcyjne lokomotywy spalinywej 2TE70 i proponowanych do budowy lokomotyw LST2 i LST3 z silnikami turbinowymi.

Na lokomotywie LST2 zaproponowano do realizacji obieg ST z wymiennikiem - podgrzewaczem, bez dodatkowego chłodzenia powietrza. Na perspektywicznej lokomotywie LST3 dzięki zastosowaniu wtrysku wody zainstalowana moc jest o 25% mniejsza, niż na lokomotywie LST2. Oprócz tego, na tej lokomotywie należy realizować obieg pracy ST wg propozycji CIAM.

Porównanie charakterystyk technicznych tych lokomotyw zestawiono w tabelicy 1. Masa pociągu była wybierana z uwzględnieniem warunków przejazdu składu na wybranym odcinku linii kolejowej, no nie większy niż 6000 Mg. Wyniki obliczeń trakcyjnych przedstawiono w tabelicy 2.

Wyprodukowanie silnika turbinowego dla lokomotyw pozwoli zbudować lokomotywy LST2 i LST3 ze wskaźnikami, znacznie przewyższającymi analogiczne parametry współczesnych lokomotyw spaliny-owych: odnośnie zużycia paliwa – o 1,1 -1,3 razy (tabl. 2), kosztów eksploatacji – o 30 - 40% i wskaźników ekologicznych – o 10-15 razy.

Niezmiernie interesującym jest zastosowanie współczesnych silników turbinowych do lokomotyw pasażerskich i manewrowych. Sprzyjające wskaźniki dotyczące ciężaru i wymiarów gabarytowych silników turbinowych pozwalają zbudować środki transportu, łączące właściwości pojazdów elektrycznych i autonomicznych.

W najbliższym dziesięcioleciu pojawią się na świecie w transporcie kolejowym seryjnie produkowane autonomiczne lokomotywy z silnikami turbinowymi.

Tablica 1

Przyjęte do obliczeń trakcyjnych i energetycznych charakterystyki lokomotyw 2TE70, LST1, LST2, LST3

Lp.	Nazwa	2TE70	LST1	LST2	LST3
1	Zainstalowana moc jednostki napędowej, kW	6000	8200	6000	4500
2	Moc lokomotywy godzinna, kW	6000	7000	6000	6000
3	Moc na cele trakcyjne godzinna, kW	4680	5600	4900	4900
4	Ilość osi	12	12	16	16
5	Masa, Mg	282	300	376	376
6	Nacisk zestawu na tor, kN	230	245	230	230
7	Siła pociągowa przy prędkości ciągłej, kN	600	427	1040	1040
8	Prędkość ciągła, m/s (km/h)	7,8(28)	13,1(47)	4,7(17)	4,7(17)
9	Maksymalna sprawność jednostki napędowej	0,43	0,26	0,46	0,56
10	Sprawność lokomotywy	0,34	0,21	0,38	0,46
11	Godzinowe zużycie paliwa, kg/h	1170	1980	960	786
12	Zużycie paliwa na biegu jałowym, kg/h	32	400	96	80

Tablica 2

Porównanie wskaźników lokomotywy spalinowej 2TE70 i lokomotyw z silnikami turbinowymi LST1, LST2, LST3 (na podstawie wyników obliczeń trakcyjnych na odcinkach linii kolejowych)

Typ lokomotywy i moc, kW	Nr odcinka trakcyjnego	Masa pociągu	Prędkość		Jednostkowe zużycie paliwa		Cena paliwa za przejazd	
		Mg	minimalna, km/h	średnia techniczna, km/h	kg/10 ⁴ btkm	krotność	PLN	krotność
2TE70, 2*3000	1	6000	25,0	47,0	16,1	1,0	7293,4	1,00
	2	2900	28,0	48,3	27,2	1,0	3427,6	1,00
	3	6000	36,2	47,0	12,3	1,0	8988,2	1,00
LST1, 7000	1	6000	28,0	47,1	33,2	2,06	9483,8	1,30
	2	3000	32,0	49,5	60,1	2,21	4938,3	1,44
	3	6000	39,8	47,0	29,3	2,38	13558,6	1,51
LST2, 6000	1	6000	24,3	47,2	14,9	0,93	4270,1	0,58
	2	4200	18,0	48,4	23,8	0,87	2739,5	0,80
	3	6000	36,3	47,0	12,3	1,00	5738,7	0,63
LST3, 6000	1	6000	24,3	47,0	12,3	0,76	3514,2	0,48
	2	4200	18,0	48,4	19,6	0,72	2253,3	0,66
	3	6000	36,3	47,2	10,2	0,83	4726,3	0,52

1. Odcinek trakcyjny – długość 429 km, maksymalne wzniesienie 18,3 ‰.
2. Odcinek trakcyjny – długość 247 km, maksymalne wzniesienie 25,0 ‰.
3. Odcinek trakcyjny – długość 692 km, maksymalne wzniesienie 9,4 ‰.

Literatura

[1] Коссов Евгений: Газотурбовоз: будет ли место? Под солнцем ли? РЖД-Партнер. №6(130) 2008.