

Mgr inż. Tadeusz Wolfram

# WYKORZYSTANIE SPALINOWYCH SILNIKÓW TURBINOWYCH W NAPĘDZIE POJAZDÓW SZYNOWYCH

## SPIS TREŚCI

1. Wstęp
2. Pojazdy napędzane spalinowym turbinowym silnikiem lotniczym
3. Uwagi końcowe

## STRESZCZENIE

*W artykule opisano możliwość zastosowania spalinowych silników turbinowych do napędu pojazdów szynowych. Scharakteryzowano zalety takich silników w stosunku do silników tłokowych, takie jak: korzystny wskaźnik mocy, większa trwałość, zasilanie gorszymi gatunkami paliw płynnych. Stwierdzono, że główną wadą tych silników jest mniejsza sprawność cieplna. Opisano układy napędowe wybranych, prototypowych pociągów z turbinowymi silnikami lotniczymi. Stwierdzono, że ten rodzaj napędu zwiększa zużycie paliwa w stosunku do silników turbinowych przeznaczonych do trakcji kolejowej.*

## 1. WSTĘP

Możliwości trakcyjne pojazdu z napędem spalinowym oraz napędem elektrycznym różnią się w sposób istotny. Za główny czynnik określający tę różnicę można uznać stosunek mocy na obwodzie kół napędnych do masy pojazdu. Nowoczesne lokomotywy elektryczne dużych mocy wykazują wartość tego stosunku na poziomie 70–75 kW/t, podczas gdy w lokomotywach spalinowych z przekładnią elektryczną wynosi on 15–24 kW/t. Okoliczność ta stała się powodem dążenia do wykorzystania w pojazdach trakcyjnych spalinowych silników turbinowych. Wskaźnik mocy dla takiego silnika (z przeznaczeniem podstawowym dla trakcji kolejowej) wynosi 0,15 kW/kg, a w przypadku silnika tłokowego 0,1–0,2 kW/kg.

Wspomniane silniki turbinowe wykazują też inne zalety w stosunku do silników tłokowych:

- brak elementów współpracujących przez tarcie, wykazujących szybkie zużycie,
- mniejsza liczba części,
- mniejsze zużycie oleju smarnego,
- możliwość zastosowania gorszych gatunków paliw płynnych (oleju ciężkiego).

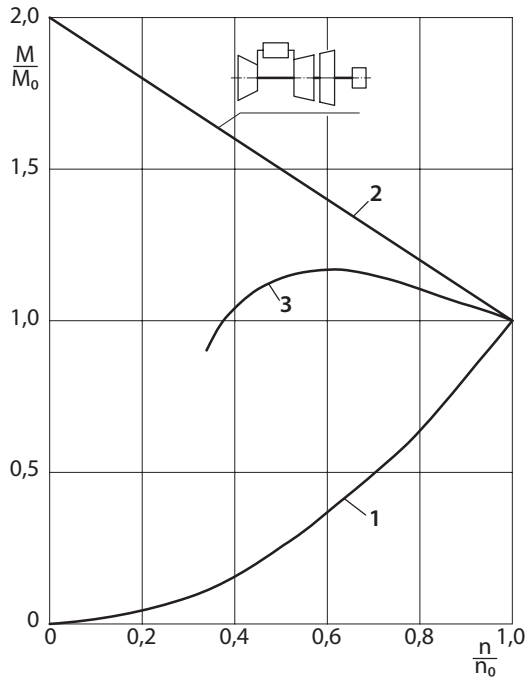
W konkretnych rozwiązaniach lokomotyw nie uzyskano jednak znacznych możliwości obniżenia masy pojazdu. Tablica 1 obrazuje tę okoliczność, wskaźniki mocy dla pojazdu kształtują się na poziomie 15–20 kW/t. Zasadniczą zmianę pod tym względem przyniósł pomysł wykorzystania do napędu pojazdu szynowego lotniczych silników turbinowych, co obrazują wskaźniki trzech ostatnich pozycji w tablicy 1. Silniki te wykazują wskaźnik mocy 3,5–6 kW/kg, znacznie korzystniejszy od turbinowych silników pierwotnie przeznaczonych dla trakcji kolejowej. Zastosowano silniki o układzie z tak zwaną turbiną swobodną, w którym jeden zespół turbinowy napędza sprężarkę powietrza, a drugi niezależny wytwarza moc dla napędu pojazdu. Taki układ wykazuje bardzo korzystny przebieg zależności momentu obrotowego od obrotów silnika (rys. 1), co na przykład umożliwiło zrezygnowanie z przekładni między silnikiem a zestawem kół w pociągu turbinowym kolei Kanadyjskich.

Tablica 1

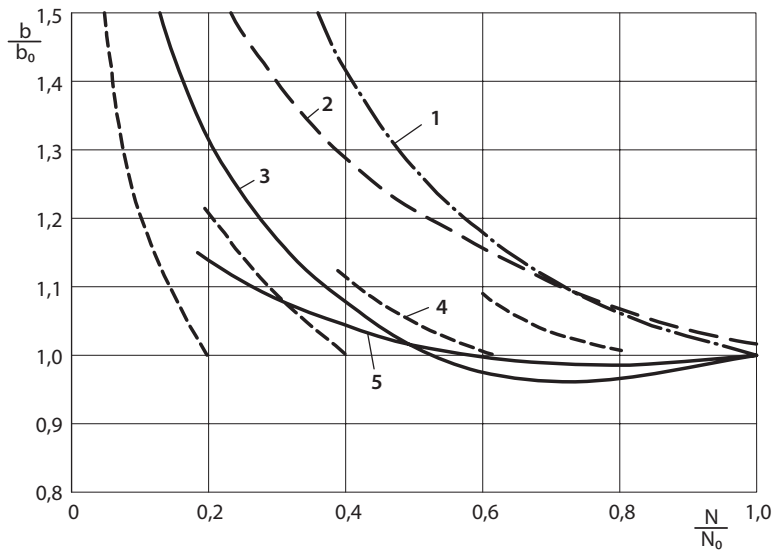
#### Wskaźnik mocy dla lokomotyw z napędem turbinowym

Lokomotywa	Moc [kW]	Masa służbowa [t]	kW / t
MetropolitanVickers	2208	131,5	16,8
GE Alko	6256	408	15,33
Skoda	2355	126	18,7
EE	1987	123,4	16,1
Brown Boveri	1848	121,1	15,3
Renault	1619	120	13,5
Kołomna	2576	138	18,7
Bombardier	3750	90,8	41,3
Alstom TGV-001	2200	48,3	45,5
MAN – Duewag DB BR 602	1620	51,0	31,8

Istotną wadą spalinowych silników turbinowych jest mniejsza sprawność cieplna – jednostkowe zużycie paliwa kształtuje się zazwyczaj na poziomie nie mniejszym niż 300 g/kWh. Szczególnie niekorzystnie przedstawia się zużycie paliwa przy częściowych obciążeniach silnika, co przedstawia rysunek 2. Poprawę sytuacji pod tym względem można osiągnąć przez podział mocy na kilka zespołów turbinowych, tak jak w pociągu TMT-3D kolei USA, czy pociągu TMT-7D kolei kanadyjskich. W dalszej części artykułu omówiono pojazdy szynowe z napędem, w którym wykorzystano lotnicze silniki turbinowe.



Rys. 1. Zależność momentu obrotowego od obrotów silnika: 1) z turbiną jednowalową, 2) z turbiną dwuwalową, 3) silnika wysokoprężnego



Rys. 2. Zależność zużycia paliwa od częściowych obciążeń silnika [8]: 1) silnik turbinowy jednowalowy bez wymiennika ciepła, 2) silnik turbinowy dwuwalowy z wymiennikiem ciepła 3) silnik turbinowy dwuwalowy z wymiennikiem ciepła i nastawnymi łopatkami turbiny, 4) pięć silników turbinowych dwuwalowych bez wymiennika ciepła kolejno włączanych, 5) silnik wysokoprężny z doładowaniem

## 2. POJAZDY NAPĘDZANE SPALINOWYM TURBINOWYM SILNIKIEM LOTNICZYM

### 2.1. Pociąg ETG

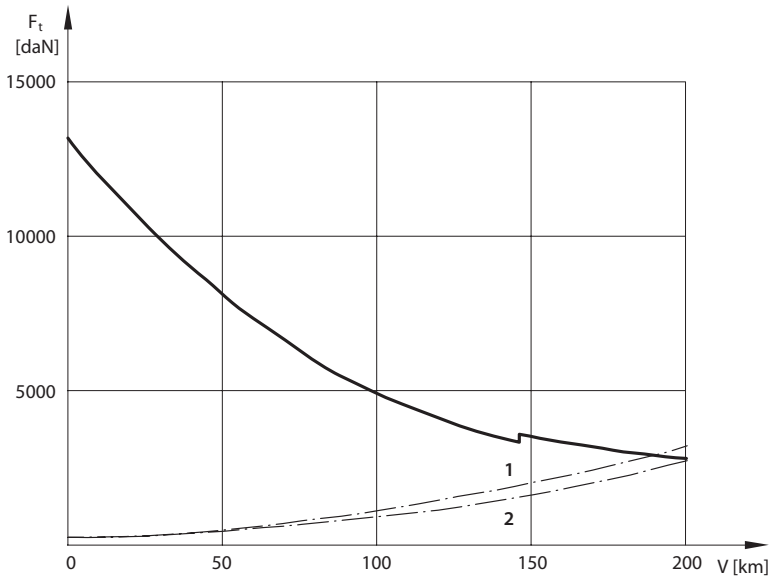
W dążeniu do zwiększenia prędkości jazdy pociągów na liniach nie zelektryfikowanych, w 1969 roku koleje SNCF wprowadziły do eksploatacji zespół spalinowy ETG, obsługujący relację Paryż – Caen – Cherbourg. Pociąg składał się z czterech wagonów, w tym wagonu silnikowego z silnikiem wysokoprężnym o mocy 330 kW i wagonu napędzanego silnikiem turbinowym TURMO III o mocy 860 kW. Przebieg pociągu do czasu naprawy rewizyjnej silnika określono na 2000 km. Masa własna pociągu wynosiła 144 ton, przy zapewnieniu 188 miejsc do siedzenia. Pociąg był wyposażony w przekładnię hydrauliczną, największa prędkość pociągu wynosiła 180 km/h. Stwierdzono, że zużycie paliwa (oleju napędowego) dla pociągu ETG wyniosło 2,44 l/1000 kW, w porównaniu do 2,20 l/1000 kW dla pojazdu o masie własnej 119,4 ton, napędzanego silnikiem tłokowym mocy 660 kW i prędkości 120 km/h.

Eksploatowano 12 takich pociągów (8 pociągów do 2001 roku). Ocena wszystkich kosztów eksploatacji – utrzymania, energii, obciążeń finansowych, w odniesieniu do 1 km przebiegu wykazała, że dla ETG są one mniejsze o około 10%, w stosunku do zespołu spalinowego z silnikiem tłokowym 2 x X4500.

### 2.2. Pociąg RTG

W wyniku pozytywnych doświadczeń z pociągiem ETG, koleje francuskie podjęły decyzję o wprowadzeniu pociągów z napędem turbinowym w relacji Lyon – Strasburg i Nantes – Bordeaux. Przewidziano dwie wersje pociągu: o pięciu wagonach i o czterech wagonach. Liczba miejsc wynosiła odpowiednio 280 i 200, masy w stanie służbowym 225 ton i 187 ton, największa prędkość 200 km/h. W obu przypadkach napęd był wytwarzany przez dwa silniki turbinowe TURMO III F1 o mocy 850 kW każdy, wyposażone w przekładnie hydrauliczne firmy Voith o układzie przekładnik – sprzęgło. Jednostkowe zużycie paliwa wynosiło 400 g/kWh. Nadmienić należy, że w okresie rozruchu oraz przed zakończeniem pracy, wspomniany silnik jest zasilany naftą pozbawioną parafiną, a przy pełnym obciążeniu – olejem napędowym.

W kolejnej wersji pociągu przewidziano zastosowanie silników TURMO X o mocy zwiększonej do 1100 kW i korzystniejszym zużyciem paliwa wynoszącym 340 g/kWh. Pociąg wyposażono również w dwa silniki turbinowe ASTAZOU o mocy po 320 kW do zasilania urządzeń pokładowych mocą 2 x 250 kW. Jednostkowe zużycie paliwa tych silników wynosiło 400 g/kWh, rysunek 3 przedstawia charakterystykę trakcyjną tego pociągu. W 1973 roku eksploatowano 38 pociągów tego rodzaju, eksploatację zakończono w 2005 roku, wycofując ostatnie 5 pociągów.

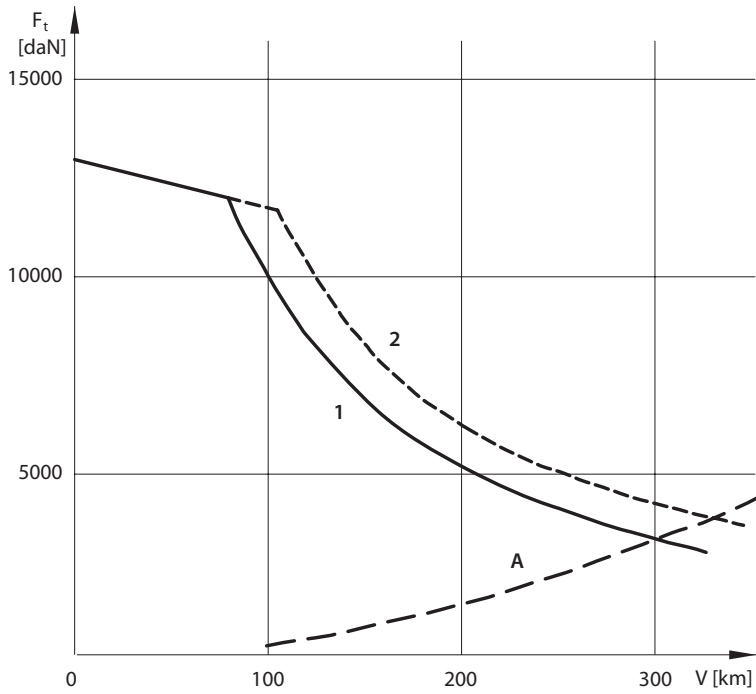


Rys. 3. Wykres tracyjny pociągu RTG dla składu [9]: 1) s-3d-s, 2) s-2d-s

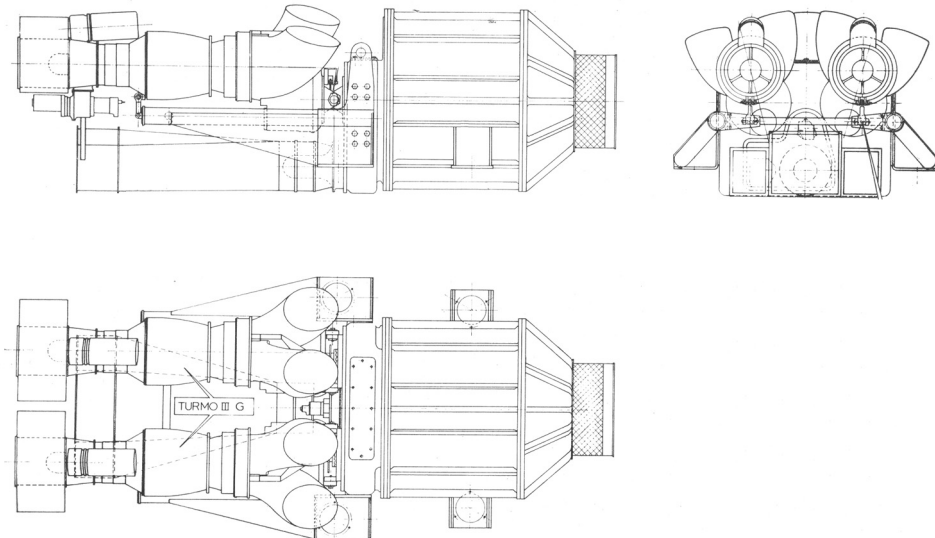
### 2.3. Pociąg doświadczalny TGV 001

Pociąg powstał w założeniu uzyskania prędkości jazdy 250 km/h w eksploatacji, przy utrzymaniu nacisku zestawów kół odpowiadającego masie 16 ton. Pociąg składał się z dwóch członów silnikowych i trzech doczepnych. Człony tworzyły układ przegubowy, to znaczy wózki środkowe pociągu były wspólne dla dwóch członów sąsiednich. Każdy wagon silnikowy wyposażono w napęd główny złożony z dwóch silników TURMO III G o mocy 940 kW (łącznie moc napędu pociągu wynosiła 3760 kW). Pozwoliło to uzyskać w rzeczywistości prędkość 300 km/h. Silniki były zasilane naftą bez parafiny w okresie rozruchu i przed zakończeniem pracy, a w okresie pełnego obciążenia – olejem napędowym. Jednostkowe zużycie paliwa dla wspomnianego silnika wynosiło 400 g/kWh. Wspomnieć należy, że pojemność zbiornika na naftę wynosiła 150 litrów, a na olej napędowy – 4000 litrów. Silniki turbinowe przez przekładnię mechaniczną napędzały prądnicę główną zasilającą silniki trakcyjne i urządzenia pomocnicze. Masa w stanie służbowym wynosiła 192 ton, w pociągu zapewniono 300 miejsc do siedzenia.

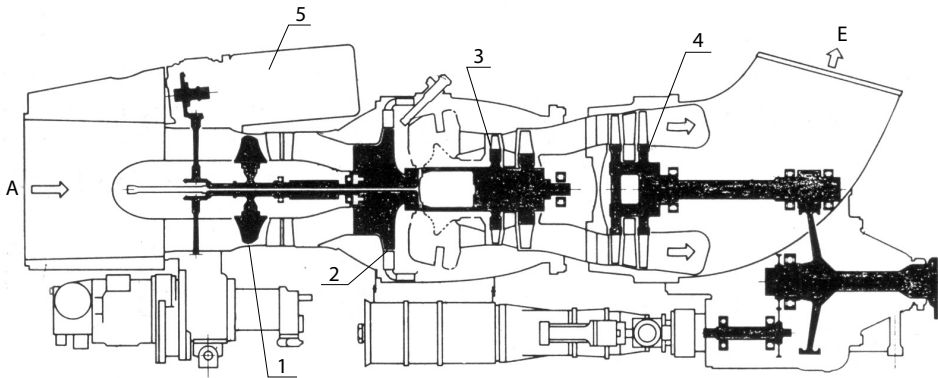
Wersja pociągu z silnikami TURMO X o łącznej mocy 4400 kW stworzyła możliwość osiągnięcia prędkości 330 km/h. Jednostkowe zużycie paliwa dla tych silników nie przekraczało 342 g/kWh. Zasilanie urządzeń pomocniczych o łącznej mocy  $2 \times 225$  kW (prądem o częstotliwości 400 Hz) zapewniono z prądnic pomocniczych, które były osadzone na wspólnych wałach z prądnicami głównymi. Rysunek 4 przedstawia charakterystykę tracyjną pociągu, rysunek 5 układ zespołu napędowego, a rysunek 6 turbinę TURMO III G.



Rys. 4. Wykres trakcyjny pociągu doświadczalnego TGV-001 [9]:  
1) z silnikiem TURMO III G, 2) z silnikiem TURMO X, A – opory ruchu pociągu



Rys. 5. Zespół napędowy pociągu doświadczalnego TGV z silnikiem TURMO III G [9]

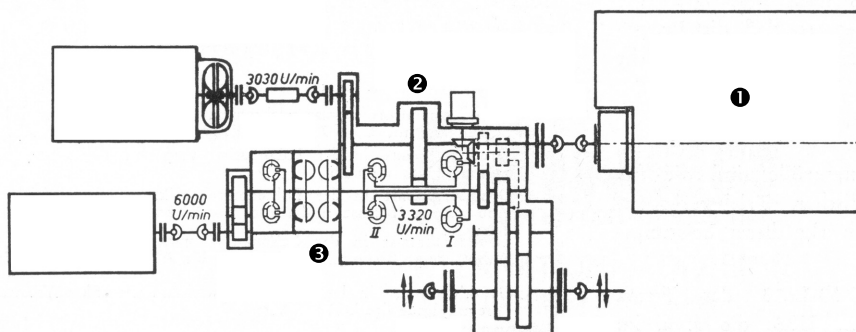


Rys. 6. Silnik turbinowy TURMO III G [4]: 1) sprężarka osiowa, 2) sprężarka promieniowa, 3) silnik turbinowy napędzający sprężarkę, 4) główny silnik turbinowy, 5) rozrusznik

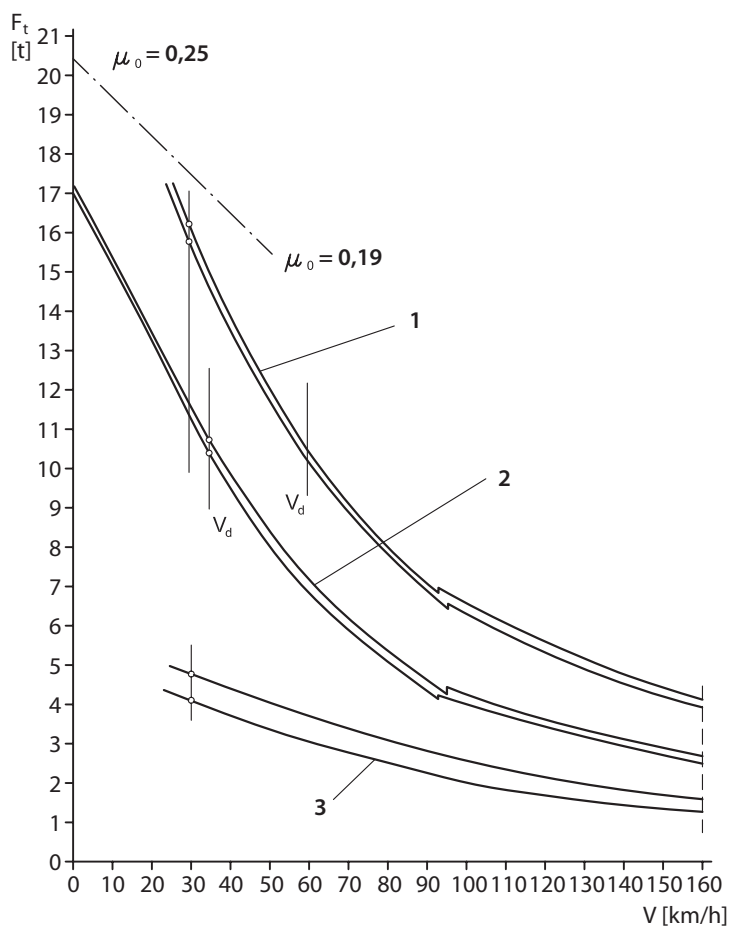
## 2.4. Lokomotywy spalinowe DBV 210 i V 219

Istotną, lecz niekorzystną cechą napędu silnikiem spalinowym tłokowym, jest brak możliwości jego przeciążenia, to znaczy okresowego zwiększenia mocy znamionowej dla celów trakcyjnych. Jednym ze sposobów poprawienia tej wady napędu, jest zastosowanie w lokomotywie dodatkowego spalinowego silnika turbinowego. Pozwoli to na uzyskanie znaczącego zwiększenia mocy trakcyjnej przy nieznacznym wzroście masy pojazdu i niewielkim zapotrzebowaniu na dodatkowe miejsce. Możliwe są dwa rozwiązania. Do silnika głównego o mocy 1840 kW (MTU MA 12V 956 TB) można dołączyć silnik turbinowy LM 100 8 o mocy 600 kW firmy General Electric lub silnik turbinowy T53-L13 o mocy 732 kW firmy AVCO Lycoming (30 C na poziomie 0).

Drugie rozwiązanie jest korzystniejsze, ponieważ liczba obrotów na minutę wału wyjściowego tej turbiny wynosi 6000, podczas gdy liczba obrotów na minutę turbiny według pierwszego wariantu była równa 19 500. Przekładnią główną w obu wersjach lokomotywy była przekładnia Voitha typu przekładnik – przekładnik. Z przekładni głównej wyprowadzono napęd prądnicy ogrzewania składu wagonów. Ogólny schemat napędu przedstawia rysunek 7. Masa lokomotywy w stanie służbowym wynosiła 80 ton, a największa prędkość 100 i 160 km/h w zależności od wybranego przełożenia. Uzyskane możliwości trakcyjne lokomotywy z dodatkowym silnikiem T53-L 13 z przekładnią dla prędkości 160 km/h obrazuje rysunek 8.



Rys. 7. Układ ogólny napędu lokomotywy DB V210 [12]: 1) silnik główny MDU MA12 V956TB 1500 obr./min, 2) przekładnia główna, 3) hamulec hydrauliczny



Rys. 8. Wykres trakcyjny lokomotywy DB V210 z dodatkowym silnikiem T53-L13 [12]: 1) silnik wysokoprężny z turbiną, 2) silnik wysokoprężny wyłącznie, 3) turbina wyłącznie



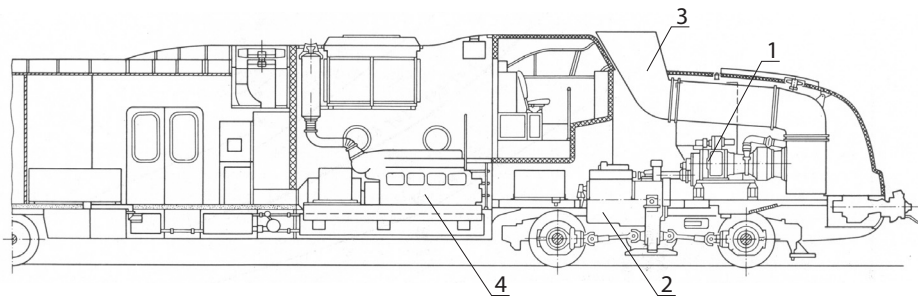
## 2.5. Wagon silnikowy GE

Przedsiębiorstwo New York Metropolitan Transportation Authority zamówiło cztery prototypowe wagony silnikowe z firmy General Electric do obsługi odcinków linii pozbawionych zasilania w energię elektryczną przez trzecią szynę. Dwa wagony tworzyły zespół trakcyjny. Każdy wagon był wyposażony w dwa silniki turbinowe o mocy 405 kW. Silnik napędza prądnicę prądu przemiennego 500 kVA, 400 Hz, która zasila silniki trakcyjne prądem stałym 650 V, w okresie kiedy wagon nie korzysta z zasilania sieciowego. Moc napędu turbinowego zapewnia osiągnięcie prędkości pojazdu 153 km/h, jego włączanie odbywa się samoczynnie. W wagonie o długości 25,9 m przewidziano 224 miejsca do siedzenia.

## 2.6. Pociąg spalinowy TEE-BR 601

W celu przystosowania do prędkości 160 km/h pociągu TEE-BR 601, złożonego z 10 członów, zastąpiono pięć członów napędu spalinowego o mocy 750 kW silnikiem turbinowym Lycoming TF 35 o mocy 1620 kW.

Prototyp oznaczony BR 602 poddano próbom, których zasadniczym celem była ocena zachowania się tego silnika przy zmiennych obciążeniach oraz trwałości jego elementów w warunkach odmiennych od zastosowań lotniczych. Zabudowę silnika w członie napędnym przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Zabudowa silnika turbinowego w członie napędnym pociągu TEE – BR601 [11]:  
1) silnik turbinowy TF35, 2) przekładnia główna Voitha, 3) kanał dopływu powietrza,  
4) wspomagający silnik wysokoprężny

## 2.7. Lokomotywa według programu NEL

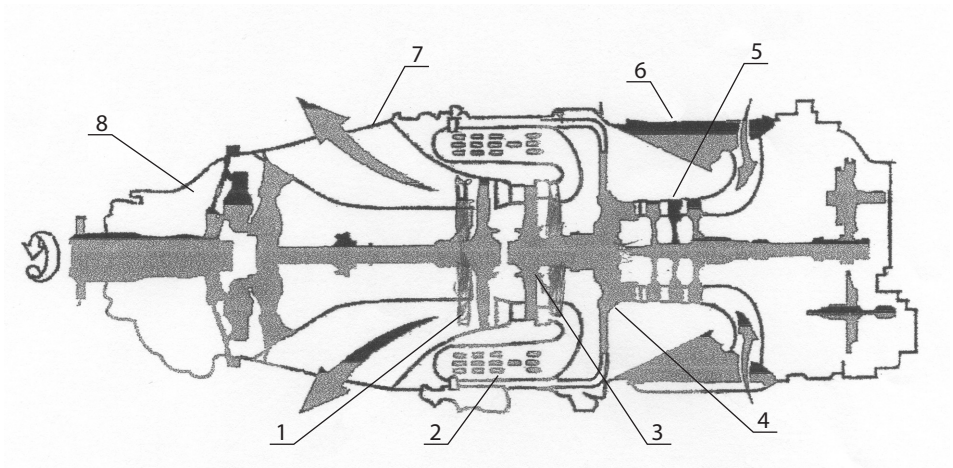
Założeniem podstawowym dla prototypu tej lokomotywy było uzyskanie pojazdu trakcyjnego, pozwalającego na osiągnięcie prędkości i przyspieszeń zbliżonych do uzyskiwanych przez pociągi trakcji elektrycznej. W tym celu w 1998 r. Federal Railway Authority zaprosiło przedsiębiorstwa przemysłowe do prac w tym zakresie. Do współpracy wybrano firmę Bombardier Transportation, współpracującą z firmą Alstom. Projekt prototypu oparto na rozwiązaniach wagonu silnikowego „Acela Express” z napędem

silnikiem turbinowym Pratt & Whitney o mocy 3680 kW (przy 16 000 obr./min). Silnik ten miał napędzać dwie prądnice prądu przemiennego, które zasilają asynchroniczne silniki trakcyjne przez chłodzony wodą przekształtnik ONIX, zbudowany na zespołach IGBT. Określono moc na obwodzie kół napędnych na 3 140 kW, jedna z prądnic miała zasilać urządzenia pomocnicze mocą 500 kW.

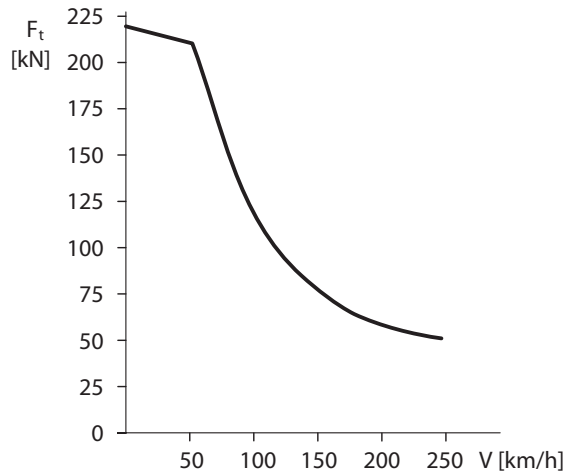
Masę lokomotywy w stanie służbowym określono na 96 ton. Jej największa prędkość miała wynosić 240 km/h. Lokomotywa powinna odpowiadać wymaganiom II poziomu bezpieczeństwa taboru pasażerskiego, w tym wymaganiom odporności na zderzenia.

## 2.8. Człon napędny pociągu „Jet Train”

W wyniku opisanych prac powstał człon napędny o układzie osi Bo-Bo, będący lokomotywą pociągu firmy Bombardier. Prace rozwojowe rozpoczęto w 1998 roku we współdziałaniu tej firmy i federalnej administracji dróg kolejowych USA (FRA). Wyposażony był w silnik turbinowy Pratt & Whitney PW 150 o mocy 3750 kW, wykorzystujący olej napędowy. Schemat silnika przedstawia rysunek 10. Silnik napędza prądnicę prądu przemiennego, która zasilą asynchroniczne silniki trakcyjne przez prostowniki z elementami IGBT chłodzonymi wodą. Moc na obwodzie kół napędnych wynosi 3300 kW. Największa prędkość lokomotywy (i całego pociągu) wynosi 240 km/h, masa w stanie służbowym – 90,75 ton. Strukturę nadwozia wykonano ze stali nierdzewnej. Lokomotywę wyposażono w hamulec główny – dynamiczny oraz dodatkowy cierny – tarczowy i klockowy. Człon napędny spełnia wymagania bezpieczeństwa urzędu FRA II poziomu. Jego charakterystykę trakcyjną przedstawia rysunek 11.



Rys. 10. Schemat silnika turbinowego Pratt & Whitney zastosowanego do napędu pociągu „Jet Train”:  
1) główny silnik turbinowy, 2) komora spalania, 3) silnik turbinowy napędu sprężarek, 4) sprężarka promieniowa,  
5) sprężarka osiowa, 6) wlot powietrza, 7) wylot gazów spalinowych, 8) przekładnia mechaniczna



Rys. 11. Wykres traktacyjny członu napędzonego pociągu „Jet Train” [7]

### 3. UWAGI KOŃCOWE

Pomysł wykorzystania spalinowego silnika turbinowego zrodził się w połowie lat trzydziestych i jak wspomniano, początkowo opierał się na pomysłe zastosowania specjalnych silników turbinowych projektowanych do napędu pojazdu szynowego. Nie przyniosło to spodziewanych korzyści pod względem możliwości trakcyjnych, gdyż niekorzystnie kształtowało się zużycie paliwa.

Zastosowanie spalinowych turbinowych silników lotniczych stwarzało wprawdzie możliwość instalowania znacznych mocy w pojeździe trakcyjnym, lecz powodowałoby zwiększenie rozchodów paliwa w stosunku do silników turbinowych przeznaczonych dla trakcji kolejowej, szczególnie w przypadku częściowych obciążeń silnika. Lokomotywa pociągu „Jet Train” firmy Bombardier była ostatnią konstrukcją pojazdu szynowego z napędem silnikiem tego rodzaju. Wspomniana firma zaniechała dalszych prac w tej dziedzinie. Wydaje się, że wznowienie ich jest mało prawdopodobne w dającej się przewidzieć przyszłości.

### BIBLIOGRAFIA

1. Bernard J.Ph.: *SNCF Turbas in the move*. „Revue Générale des Chemines de Fer”, 1970, nr 11.
2. Brauer G.: *Gasturbinen als Hauptantrieb in Triebzugen*. „Eisenbahntechnische Rundschau”, 1971, nr 11.
3. Friedrich K.: *Zufriedenstellend Betriebserfahrungen mit der ersten Turbo-Diesellokomotive der Deutschen Bundesbahn*. „Glasers Annalen”, 1968, nr 6.

4. Funlner A.: *Anwendung und Behwarung von Gasturbinen in Triebfahrzeuge der Deutschen Bundesbahn*. „*Glasers Annalen*“, 1974, nr 7/8.
5. *GE delivres turbine / electric commuters prototypes*. „*Revue Générale des Chemines de Fer*“, 1975, nr 6.
6. *High Speed Trains with Gas Turbine Traction*. „*Revue Générale des Chemines de Fer*“, 1969, nr 24.
7. *Jet Train Triebkopf mit Gasturbine für Nord Ameryka*. „*Glasers Annalen*“, 2003, nr 1.
8. Kroschel H.U.: *Gasturbinen für Schienenfahrzeuge*. „*Eisenbahntechnische Rundschau*“, 1969, nr 5.
9. *La Traction à Turbine à Gaz en France en 1972*. „*Revue Générale des Chemines de Fer*“, 1972, nr 5.
10. *Lightweight Turbine Motor Trains*. „*Revue Générale des Chemines de Fer*“, 1966, nr 13.
11. Ran T., Stoffels W.: *Die Gasturbine in der Zugforderung*. „*Eisenbahntechnische Rundschau*“ 1972, nr 5.
12. Schmucker B.: *Die V 210 eine Diesellokomotive mit Gasturbine*. „*Glasers Annalen*“, 1970, nr 11, s. 348.
13. Stoffels W.: *Europäischen Gasturbinenlokomotiven*. „*Glasers Annalen*“, 1961, nr 11.
14. Zboralski D., Fürst W.: *Gasturbinen treiben Triebzüge der Deutschen Bundesbahn*. „*Glasers Annalen*“, 1970, nr 12, s. 403.
15. Zintel K.: *Turbinowe silniki spalinowe w trakcji szynowej*. „*Silniki Spalinowe*“, 1965, nr 3, 4.