

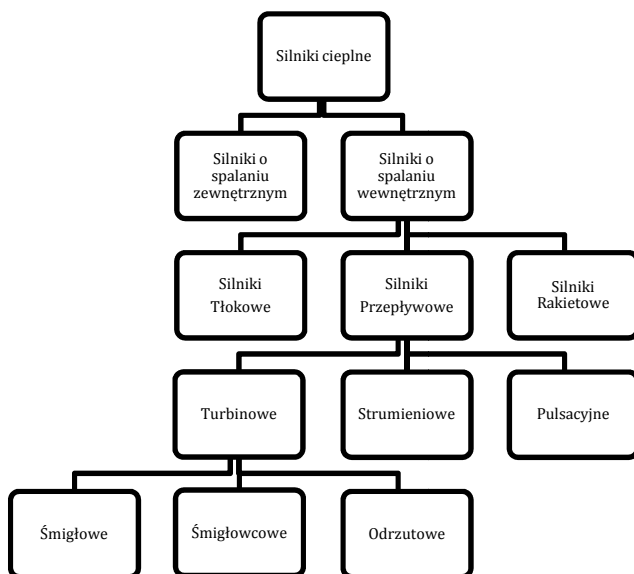
Zastosowanie lotniczego turbinowego silnika przepływowego do zasilania stacjonarnych generatorów elektrycznych

Streszczenie: Praca zawiera opracowanie nt. możliwości zastosowania silników które już nie mogą być zastosowane w lotnictwie, natomiast doskonale zdają egzamin jako silniki do napędu elektrycznych generatorów stacjonarnych. Na przykładzie silnika GTD-350, wycofanego z eksploatacji po ukończonym resursie godzinowym, przeprowadzono analizę zasadności zastosowania turbinowego silnika przepływowego w porównaniu do tradycyjnego silnika tłokowego – charakterystyki, jednostkowe zużycie paliwa, możliwość zastosowania różnych paliw (lotniczych, konwencjonalnych i alternatywnych)

Słowa kluczowe: turbinowe silniki przepływowe, wielopaliwowość, generator elektryczny

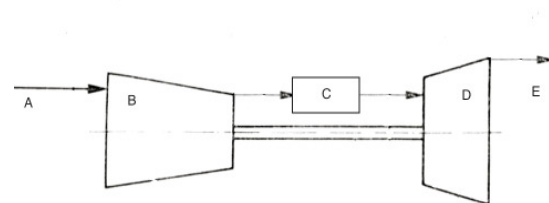
1. Ogólne informacje o turbinowym silniku przepływowym

Turbinowy silnik przepływowy jest silnikiem cieplnym o spalaniu wewnętrznym wykorzystującym energię chemiczną paliwa. Jest jednym z wielu typów silników cieplnych, które możemy podzielić na kilka grup przedstawionych na rysunku 1.1.



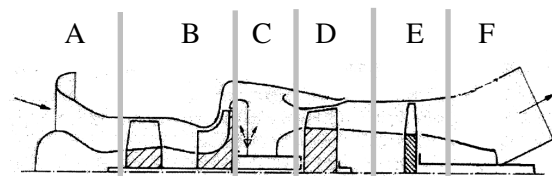
Rys. 1.1. Podział silników spalinowych

Ponadto silniki przepływowe podzielić możemy na silniki jednowałowe i wielowałowe. Schemat ideowy silnika przepływowego przedstawia rysunek 1.2.



Rys. 1.2. Schemat ideowy silnika przepływowego: A – wlot powietrza do silnika; B – sprężarka; C – komora spalania; D – turbina; E – wylot spalin; [4]

W dalszych rozważaniach zajmować będziemy się tylko silnikami przepływowymi śmigłowcowymi. Silniki te charakteryzuje zastosowanie tzw. wolnej turbiny napędowej, oznacza to że turbina sprężarki nie jest powiązana kinematycznie z turbiną napędową. Przykład takiego rozwiązania przedstawia rysunek 1.3.



Rys. 1.3.: turbinowy silnik przepływowy: A – wlot powietrza; B – sprężarka; C – komora spalania; D – turbina sprężarki; E – turbina napędowa; F – dysza wylotowa; [4]

Na rysunku nr 1.3. przedstawiono turbinowy silnik przepływowy podzielony na części składowe:

A. Wlot powietrza do silnika

- B. Sprężarka – schemat przedstawia silnik w którym zainstalowano sprężarkę osiową oraz sprężarkę promieniową.
- C. Komora spalania – w zależności od rodzaju silnika:
- indywidualna (dzbanowa),
 - rurowo–pierścieniowa,
 - pierścieniowa.
- D. Turbina sprężarki – turbina ta lub zespół turbin ma za zadanie dostarczyć napęd do wirnika sprężarki, oraz do agregatów silnikowych tak jak:
- prądnica/rozsusznik,
 - pompa/regulator paliwa,
 - pompy olejowe (tłoczące i odsysające),
 - nadajniki prędkości obrotowej sprężarki.
- E. Turbina napędowa – turbina która przekazuje moment obrotowy bezpośrednio do przekładni głównej śmigłowca.
- F. Dysza wylotowa – w silnikach śmigłowcowych jej zadaniem jest bezpieczne wyprowadzenie gazów spalinowych poza obrys śmigłowca.

Ze względu na zwartość konstrukcji małą masę jednostkową, oraz stosunkowo małe jednostkowe zużycie paliwa turbinowe silniki przepływowe znalazły szerokie zastosowanie w lotnictwie.

2. Obieg termodynamiczny turbiny silnika przepływowego

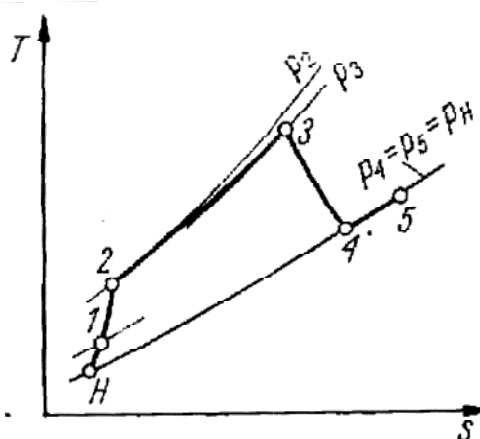
Rzeczywisty obieg przepływowego silnika turbinowego jest oparty na obiegu Braytona – Joule’a.

Rzeczywisty obieg silnika to następujące przemiany [rys. 2.1]:

H-1 politropowe sprężanie powietrza we wlocie. Turbinowe silniki śmigłowcowe pracują przy prędkościach lotu znacznie poniżej prędkości dźwięku (maksymalna prędkość lotu śmigłowca nie przekracza 350 km/h) spręż dynamiczny jest niewielki, $\pi_{wl}^* \leq 1,4 \dots 1,5$

1-2 politropowe sprężanie powietrza w sprężarce

2-3 doprowadzenie do strumienia rzeczywistego ciepła w komorze spalania przy nieznacznym spadku ciśnienia spowodowanego oporami przepływu



Rys. 2.1. Rzeczywisty obieg silnika śmigłowego w układzie T-s z rozprężaniem w turbinie do ciśnienia otoczenia $P_4 = P_5 = P_H$ [4]:

3-4 politropowe rozprężanie spalin w turbinie do ciśnienia otoczenia $p_4 = p_5 = p_H$

4-5 politropowe odprowadzenie spalin do otoczenia w układzie wylotowym – przepływ spalin przez rurę wylotową ($c_4 \approx c_5$)

Praca wewnętrzna obiegu l_i jest równa różnicy pracy politropowego rozprężania l_{pr} i pracy politropowego sprężania l_{ps}

$$l_i = l_{pr} - l_{ps}$$

Obieg powyższy różni się od obiegu teoretycznego ponieważ uwzględnia on straty takie jak tarcie wewnętrzne w procesach sprężania i rozprężania oraz straty ciśnienia w procesie ogrzewania i chłodzenia.

3. Opis silnika GTD-350

Turbospalinowe silniki lotnicze tak, jak np. GTD-350, których głównym zastosowaniem były radzieckie, a w późniejszym terminie produkowane w Polsce śmigłowce Mi-2 są do dnia dzisiejszego użytkowane w lotnictwie cywilnym jak i przez służby użyteczności publicznej takie jak wojsko i policja. Silnik ten ma ciekawą i nietypową budowę jak na silnik przepływowy. Klasyczny silnik przepływowy opisano w pkt. 1, i przedstawiono na rysunku 1.3.

Na temat silnika GTD-350 było wiele publikacji natomiast silnik ten zbudowany jest w ciekawy sposób – ma „odwróconą” konstrukcję, ponieważ turbiny umiejscowione są pomiędzy komorą spalania a sprężarką. Sprężarka i turbina sprężarki [TS] w fazie rozruchu napędzana jest od prądnicy – rozsuszniaka. W trakcie normalnej pracy TS napędza prądnicę – rozsuszniak,

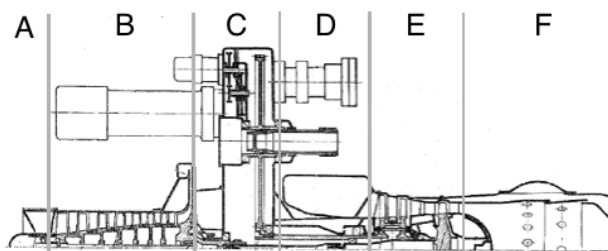
pompę – regulator, nadajnik prędkości obrotowej oraz zespół pomp olejowych. Turbina napędowa – wolna turbina napędza przekładnię a za jej pośrednictwem takie agregaty jak: nadajnik prędkości obrotowej (nie wykorzystywane w śmigłowcu Mi-2), ogranicznik obrotów wolnej turbiny oraz odśrodkowy odpowietrznik. W układzie tego typu w silniku wały zostają skrócone – obniża się jego masa.

Parametry silnika przedstawia tabela 1

Tabela 1. Podstawowe parametry silnika GTD – 350. Basic parameters of GTD – 350 engine [3]

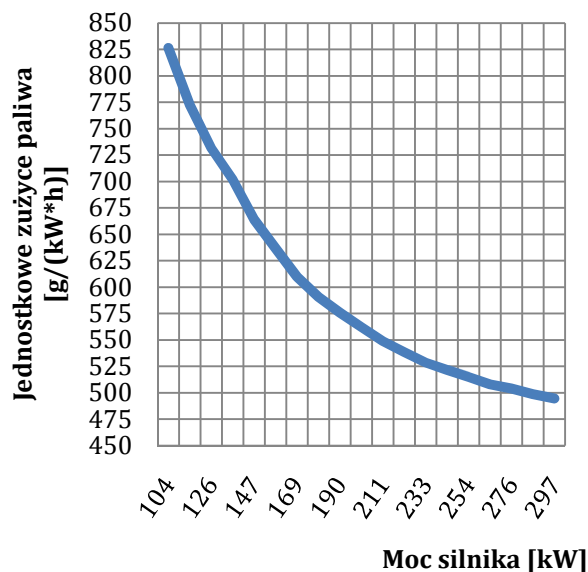
Podstawowe parametry silnika	
Temperatura gazów przed turbiną sprężarki	max 940 °C
Prędkość obrotowa turbiny sprężarki	$n = 45\,000 \frac{1}{\text{min}}$
Prędkość obrotowa turbiny napędowej	$n = 24\,000 \frac{1}{\text{min}}$
Prędkość obrotowa wału wyjściowego	$n = 5904 \frac{1}{\text{min}}$
Stopień sprężania	$\pi = 6,05$
Natężenie przepływu powietrza	$\dot{m} = 2,4 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Każdy silnik lotniczy ma swoją żywotność godzinową i kalendarzową tzw. resurs. Dla silnika GTD – 350 wartość ta wynosi 1000h lotu. Po tym czasie silnik musiał być wysłany do naprawy głównej.



Rys. 3.1.: A – wlot powietrza; B - sprężarka; C – skrzynia przekładniowa/napędów; D – dysza wylotowa; E – zespół turbin; F – komora spalania; [4]

Operację tę można było powtórzyć dwa razy. Finalnie silnik z nalotem 3000 h zostawał wycofywany z eksploatacji w lotnictwie. Natomiast silnik ten mógł być zastosowany do innych celów. Podstawowym parametrem, który będzie brany pod uwagę w dalszych rozważaniach będzie jednostkowe zużycie paliwa – rysunek 3.2.



Rys. 3.2. Jednostkowe zużycie paliwa silnika GTD – 350 w funkcji mocy silnika

4. Porównanie parametrów silnika GTD-350 do silnika o zapłonie samoczynnym ZS o podobnej mocy

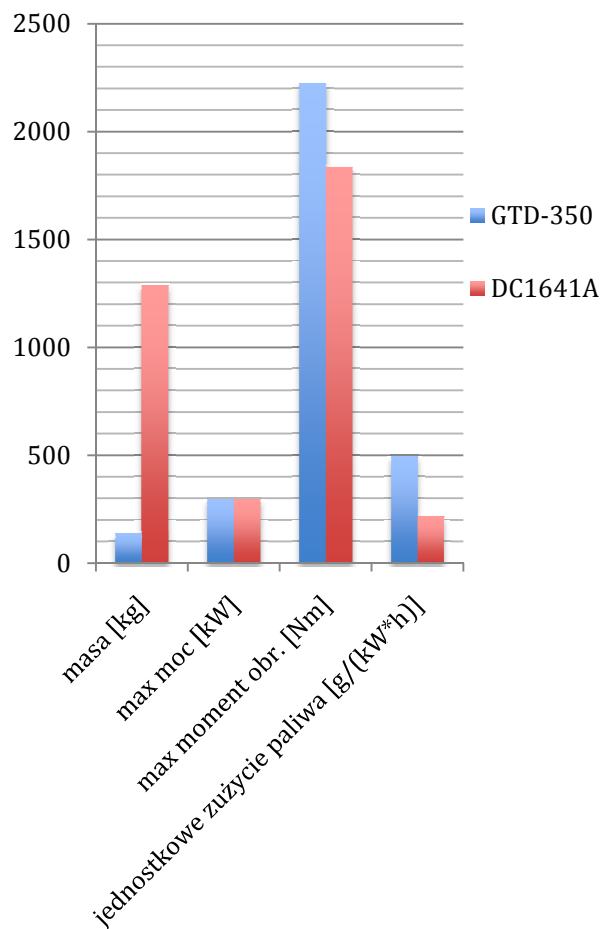
Jako porównawczy wybrany został silnik ZS DC16 41A ponieważ w stacjonarnych agregatach prądotwórczych o mocy ok 350 kVA wykorzystywane są silniki o podobnych parametrach. A cały zespół jest używany jako zapasowe źródło zasilania lub jako podstawowe źródło zasilania tymczasowego w sytuacji gdy stałe zapotrzebowanie obiektu jest dużo niższe, natomiast chwilowe na potrzeby jednego odbiornika jest w granicach 350 kVA. Parametry porównawcze zawarto w tabeli 2 i graficznie przedstawiono na rysunku 4.1.

Tabela 2. Dane porównawcze – tabelarycznie Comparative data - in table [7], [8]

	Silnik GTD-350	Silnik DC16 41A
Wymiary [mm]		
długość	1350	1747
szerokość	522	1085
wysokość	680	1347
Masa [kg]	137 ^{#2}	1290
Moc max [kW]	294	294
Moment max [Nm]	2226	1834

Prędkość obrotowa wału wyjściowego [1/min]	5904	2200
Jednostkowe zużycie paliwa [g/(kW*h)]	495	215

Poniżej przedstawiono wybrane cechy robocze silnika ZS i silnika turbinowego w formie wykresu.



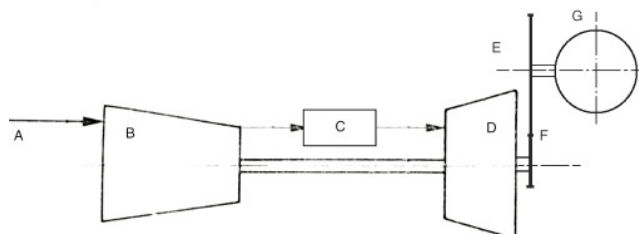
Rys. 4.1. Porównanie cech roboczych silnika ZS i turbinowego.

Jak można zaobserwować z powyższego wykresu parametry takie jak: masa i jednostkowe zużycie paliwa znacznie się od siebie różnią

5. Schemat zespołu silnik-prądnica

Generator pracuje przy stałej prędkości obrotowej ($1500 \frac{1}{\text{min}}$, lub $3000 \frac{1}{\text{min}}$). W celu zastosowania przepływowego silnika turbinowego do pracy w zespole z prądnicą musimy zasto-

sować przekładnię redukcyjną, w celu dostosowania obrotów wyjściowych silnika przepływowego do obrotów wymaganych dla zapewnienia właściwych parametrów wyjściowych generatora (220/380 ACV 50Hz). Rysunek 5.1 przedstawia zespół silnik – generator.



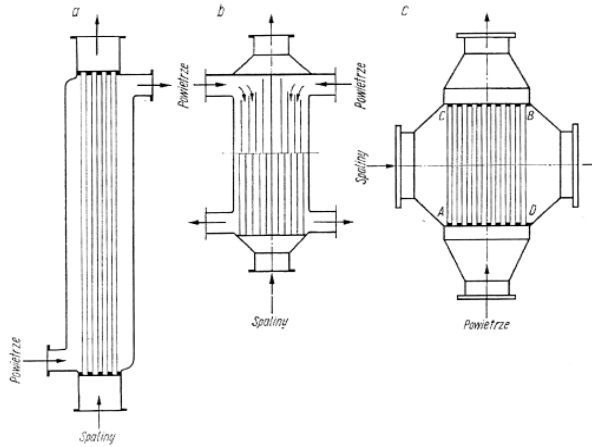
Rys. 5.1: Zespół silnik – generator: A – wlot powietrza do silnika; B – sprężarka; C – komora spalania; D – turbina; E – wylot spalin; F – przekładnia redukcyjna; G – generator; [4]

6. Wymienniki ciepła wady i zalety

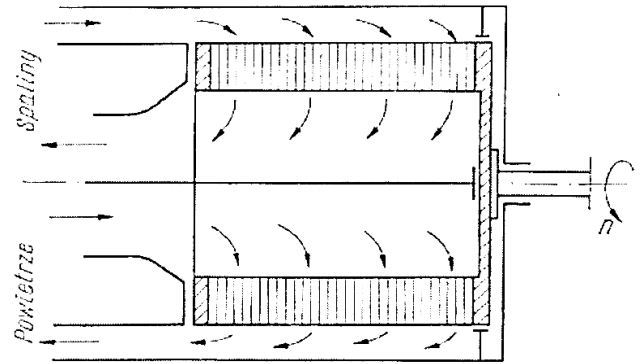
Wymiennikiem ciepła nazywamy urządzenie które ma za zadanie wymianę ciepła pomiędzy jej nośnikami. W naszym przypadku wymienniane będzie ciepło pomiędzy spalinami, a powietrzem z za sprężarki. Zastosowanie wymiennika jest najskuteczniejszą metodą podniesienia sprawności silnika. Wymienniki możemy podzielić na dwie grupy :

- wymienniki rekuperacyjne
- wymienniki regeneracyjne

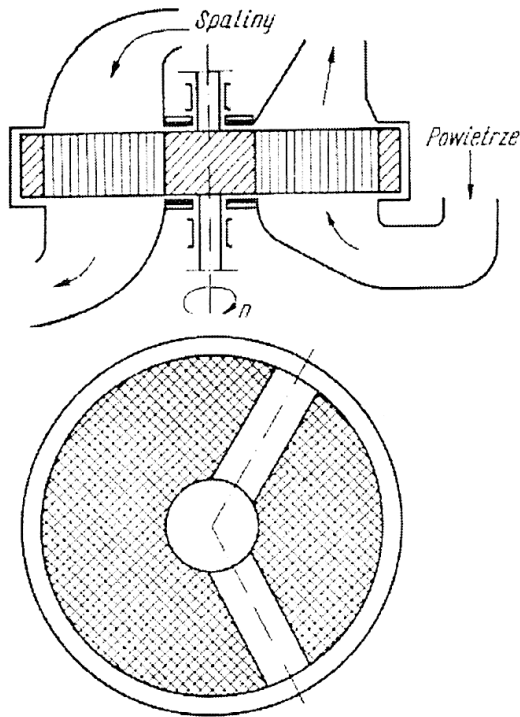
W wymienniku rekuperacyjnym spaliny są oddzielone od powietrza nieruchomą przeponą. Podzielić je możemy pod względem konstrukcyjnym na płytowe i rurowe oraz ze względu na kierunek przepływu na współbieżne, przeciwbieżne i krzyżowe. Schemat wymienników przedstawia rysunek 6.1. Wymienniki regeneracyjne są to wymienniki w których spaliny i powietrze przepływają przez te same części obracającego się zasobnika. Przepływ gazów przez regenerator jest z zasady przeciwbieżny. Wymienniki tego typu mogą być wymiennikami tarczowymi rysunek 6.2 lub bębnowymi rysunek 6.3 i 6.4. Parametrem podstawowym dla wymienników ciepła jest stopień odzyskania ciepła (η_w), dla wymienników rekuperacyjnych jest możliwe osiągnięcie $\eta_w = 0,82$. Wymienniki regeneracyjnych mogą osiągnąć wartość $\eta_w = 0,92$.



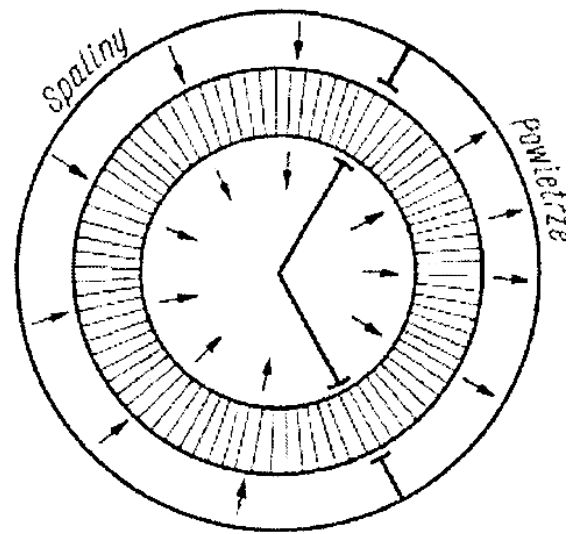
Rys. 6.1. Wymienniki rekuperacyjne: a – współbieżny; b – przeciwbieżny; c – krzyżowy; [3]



Rys. 6.3: regeneracyjny wymiennik ciepła z zasobnikiem bębnowym – przekrój podłużny [3]

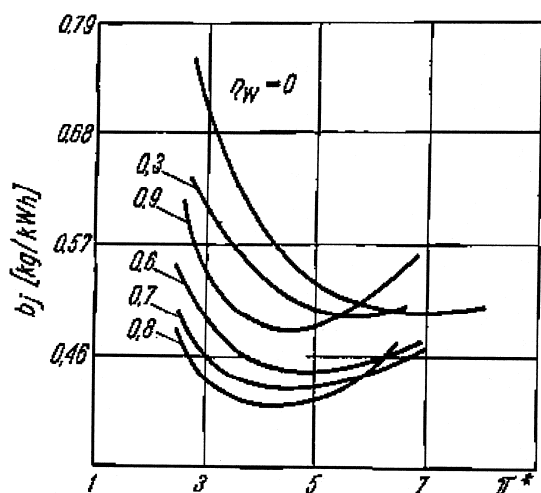


Rys. 6.2: regeneracyjny wymiennik ciepła z zasobnikiem tarczowym. [3]



Rys. 6.4. Regeneracyjny wymiennik ciepła z zasobnikiem bębnowym – przekrój poprzeczny [3]

Zastosowanie wymienników ciepła pozwala nam na zwiększenie sprawności silnika turbiny oraz na zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa. Zależy jest to między innymi od natężenia przepływu czynnika przez silnik i sprężu. Rysunek 6.5 przedstawia wykres zależności jednostkowego zużycia paliwa od stopnia odzyskania ciepła i sprężu silnika.



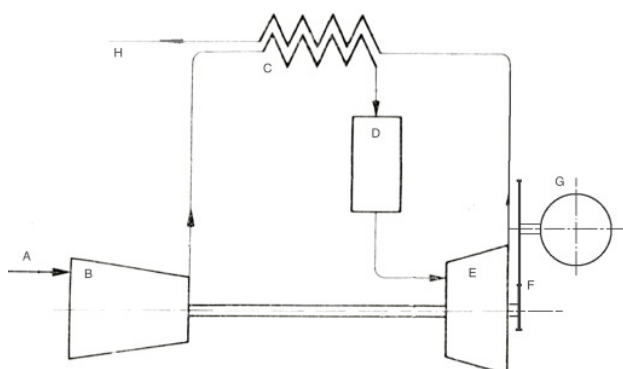
Rys. 6.5. Zależność jednostkowego zużycia paliwa b_j od sprężu π_s^* przy różnych stopniach odzyskania ciepła η_w [3]

Niestety stosowanie regeneracyjnych wymienników ciepła poza korzyściami w postaci najwyższego stopnia odzyskania ciepła przy stosunkowo niewielkich rozmiarach, niesie pewne niedogodności w postaci problemów z uszczelnieniem kanałów przepływowych i co się z tym wiąże przysparza problemów z przeciekami czynnika.

Stosowanie wymienników powoduje zwiększenie oporów przepływu w trakcie eksploatacji z powodu osadzania się nagaru.

7. Schemat zespołu silnik-prądnica z zastosowaniem wymiennika ciepła

Poniżej przedstawiono schemat zespołu silnik – prądnica rys. 7.1. z zastosowaniem wymiennika ciepła.



Rys. 6.1. zespołu silnik – generator: A – wlot powietrza do silnika; B – sprężarka; C – wymiennik ciepła; D – komora spalania;

E – turbina; F – przekładnia redukcyjna; G – generator; H – wylot spalin; [4]

Zastosowanie wymiennika ciepła do napędu silnika zasilającego agregat prądowłoczy spowoduje obniżenie jednostkowego zużycia paliwa a w konsekwencji podwyższenie opłacalności jego stosowania. Warunkiem opłacalności takiego rozwiązania jest zastosowanie wymiennika o dużym stopniu odzyskania ciepła.

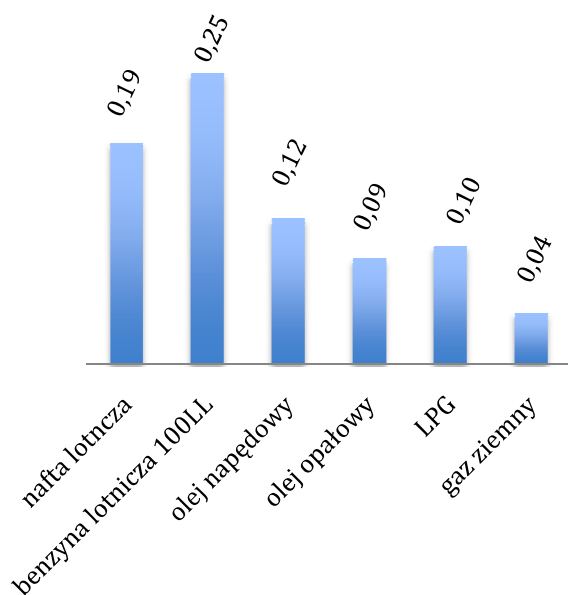
8. Możliwość zastosowania różnych paliw do turbinowych silników przepływowych

W celu wykazania możliwości zastosowania różnych paliw w tabeli 3 przedstawiono parametry różnych paliw.

Tabela 3. Podstawowe parametry wybranych paliw (wartości średnie). Basic parameters of selected fuels (average). [2]

Paliwo	Gęstość [kg/m ³]	Wartość opałowa [MJ/kg]
Nafta Lotnicza	800	43,2
Benzyna Lotnicza	740	43,7
Olej Napędowy	850	42,9
Gaz Ziemny	0,695	49,9
Gaz Fermentacyjny	1,10	21,0
Etanol	810	25,9
Metanol	791	19,7
Propan C ₃ H ₈	1,81	50,0
Butan C ₄ H ₁₀	2,38	49,2
Mieszanka Propan-Butanu	2,36	46,0
Olej opałowy	860	42,8

Najprostszym porównaniem jest zestawienie wartości opałowej każdego rodzaju paliwa niemniej jednak nie jest to porównanie w pełni miarodajne ponieważ aby rozważyć możliwość zastosowania paliw innych niż dedykowane przez producenta (nafta lotnicza) należy przeprowadzić regulację silnika. Po zastosowaniu odpowiednich ustawień silnik przepływowy po uruchomieniu będzie pracował na każdym z ww. paliw. Problemy stanowią może magazynowanie paliwa.



Rys. 8.1: Średnia cena paliwa [PLN/MJ].

Jak można zaobserwować w tabeli 3 wartość opałowa nafty lotniczej wynosi 43,2 MJ/kg a gęstość 800 kg/m³. Zastosowanie paliwa płynnych o zbliżonych parametrach jak np. olej napędowy spowoduje jedynie nieznaczne zwiększenie oporów przepływu w instalacji paliwowej. Zużycie paliwa pozostanie na podobnym poziomie. Porównując cenę za 1 MJ łatwo możemy zaobserwować iż najtańszym nośnikiem energii jest gaz ziemny.

9. Podsumowanie - wnioski

Punktem wyjścia do rozważań nad zastosowaniem przepływowego silnika turbinowego GTD-350 do napędu agregatu prądotwórczego były uwarunkowania ekonomiczne.

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe rozważania, zastosowanie silnika turbinowego do napędu stacjonarnego generatora elektrycznego jest możliwe. Wiąże się jednak z zastosowaniem wielu rozwiązań których w lotnictwie się nie stosuje.

Silnik przepływowy może pracować z każdym paliwem z grupy analizowanych paliw które zastosujemy, w zależności od paliwa silnik może nie osiągnąć pełnej mocy. Silnik projektowany był dla paliwa lotniczego jakim jest nafta lotnicza.

Zastosowanie paliw gazowych zmusza nas do zaprojektowania instalacji paliwowej nowego typu. Sterowanie silnikiem przepływowym odbywa się za pośrednictwem pompy – regulatora, który we współpracy z ogranicznikiem prędkości obrotowej wolnej turbiny dostarcza

do komory spalania wymaganą dawkę paliwa. Kolejnym problemem do rozwiązania będzie magazynowanie paliw gazowych. Jak łatwo zauważyć gęstość paliw gazowych to wartości średnio od 0,7 kg/m³ do 2,4 kg/m³. Koszt 1 MJ uzyskanego z paliw analizowanych przedstawiono na rysunku 8.1. Bazową ceną wyjściową będzie cena nafty lotniczej. Zastosowanie jakiegokolwiek paliwa nielotniczego spowoduje obniżenie kosztów eksploatacji takiego zestawu.

Najlepszym zastosowaniem dla zestawu byłoby użycie go do zasilenia wysypisk śmieci, gdzie istnieje możliwość wykorzystania gazu fermentacyjnego (wysypiskowego). Przygotowanie wysypiska do wytwarzania gazu to oczywiście oddzielny temat. Niestety wiąże się to z przebudową instalacji paliwowej i z dużymi nakładami finansowymi.

Kolejnym problemem stacjonarnego silnika turbinowego jest środowisko jego pracy. Zapylenie powierzchni powoduje konieczność zastosowania odpylaczy powietrza, nie stanowi to problemu technicznego, natomiast zwiększa koszty.

Wziąwszy pod uwagę, iż wiele tych silników zostało zdemontowanych, zakonserwowanych i pozostawionych w magazynach, oraz fakt że silniki te do zastosowań lotniczych są silnikami niesprawnymi (tzw. poresursowymi), a dla zastosowań nielotniczych uznać je można za sprawne. Wykonanie wszystkich niezbędnych przeróbek takich jak:

- dobranie wymiennika ciepła o właściwym stopniu odzyskania ciepła
- zaprojektowanie nowego typu układu paliwowo – regulacyjnego
- zastosowanie układu odpylania powietrza
- zastosowanie dodatkowych osłon dźwiękochłonnych.

Proponowane rozwiązanie nie może być stosowane w lotnictwie co daje pewną dowolność w zastosowaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych oraz materiałowych. Układ paliwowo – regulacyjny może być zastosowany jako układ hybrydowy – na paliwo płynne do rozruchu i paliwo gazowe jako podstawowy czynnik roboczy.

Bilansując konieczne nakłady i korzyści zastosowanie poresursowych silników turbinowych w agregatach prądotwórczych wydaje się być w pełni zasadne.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

TS Turbina sprężarki
TN Turbina napędowa

ZS Silnik z zapłonem samoczynnym
LPG Liquefied Petroleum Gas/gaz skroplony

Bibliography/Literatura

- [1] B. Kaczan, J. Krysiński, Z. Orzechowski, R. Przybylski: „Silniki turbospalinowe małej mocy” WNT Warszawa 1963
- [2] K. Górski, W. Górski: „Materiały pędne i smary” WKiŁ Warszawa 1986
- [3] Praca zbiorowa pod red. S. Szczecińskiego: „Turbinowe napędy samochodowe”
- [4] P. Dzierżanowski, W. Korodziński, J. Otyś, S. Szczeciński, R. Wiatrek: „Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe” WKiŁ Warszawa 1985
- [5] T. Gajewski, A. Lesikiewicz, R. Szymanek: „Przeplływowe silniki odrzutowe”. WNT Warszawa 1973
- [6] W. Cheda, M. Malski: „TPL Silniki”. WKiŁ Warszawa 1984
- [7] WSK PZL – Rzeszów: „Opis Techniczny silnika GTD – 350”. WSK PZL Rzeszów 1986 (wyd. 3)
- [8] http://138.106.100.11/i&m/litt_cd/Pre-sales/Spec_industrial/DC16_41A_400.pdf
- [9] <http://www.drewnozamiastbenzyny.pl/olej-napedowy/>
- [10] http://www.olej-opalowy.pl/index.php?symbol=olej_opalowy.htm
- [11] http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/poland/wrs_poland/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/k/karta_charakterystyki_olej_opalowy.pdf
- [12] <http://www.obr.pl/produkty-naftowe-benzyny-lotnicze.php>
- [13] http://www.benzol-gaz.pl/gaz.php?subaction=showfull&id=134875455&archive=&start_from=&ucat=6&
- [14] <http://www.orlengaz.pl/image.php?id=30&type=FILES>
- [15] <http://www.e-petrol.pl/index.php/wiedza-i-porady/lpg/nosnik-energii>

Mgr inż. Michał Rys

GTL-LOT Usługi Lotniskowe Sp. z o.o.

Mechanik Lotniczy / Z-ca Kierownika
ds. Obsługi Liniowej

rysmichal@gmail.com

