

# DROGI ROZWOJU NAPĘDÓW LOTNICZYCH

**W. Balicki, Z. Pągowski, S. Szczeciński**

Instytut Lotnictwa

**R. Chachurski, A. Kozakiewicz**

Wojskowa Akademia Techniczna

**P. Głowacki**

Central European Engine Services

**J. Szczeciński**

General Electric Poland

## **Streszczenie**

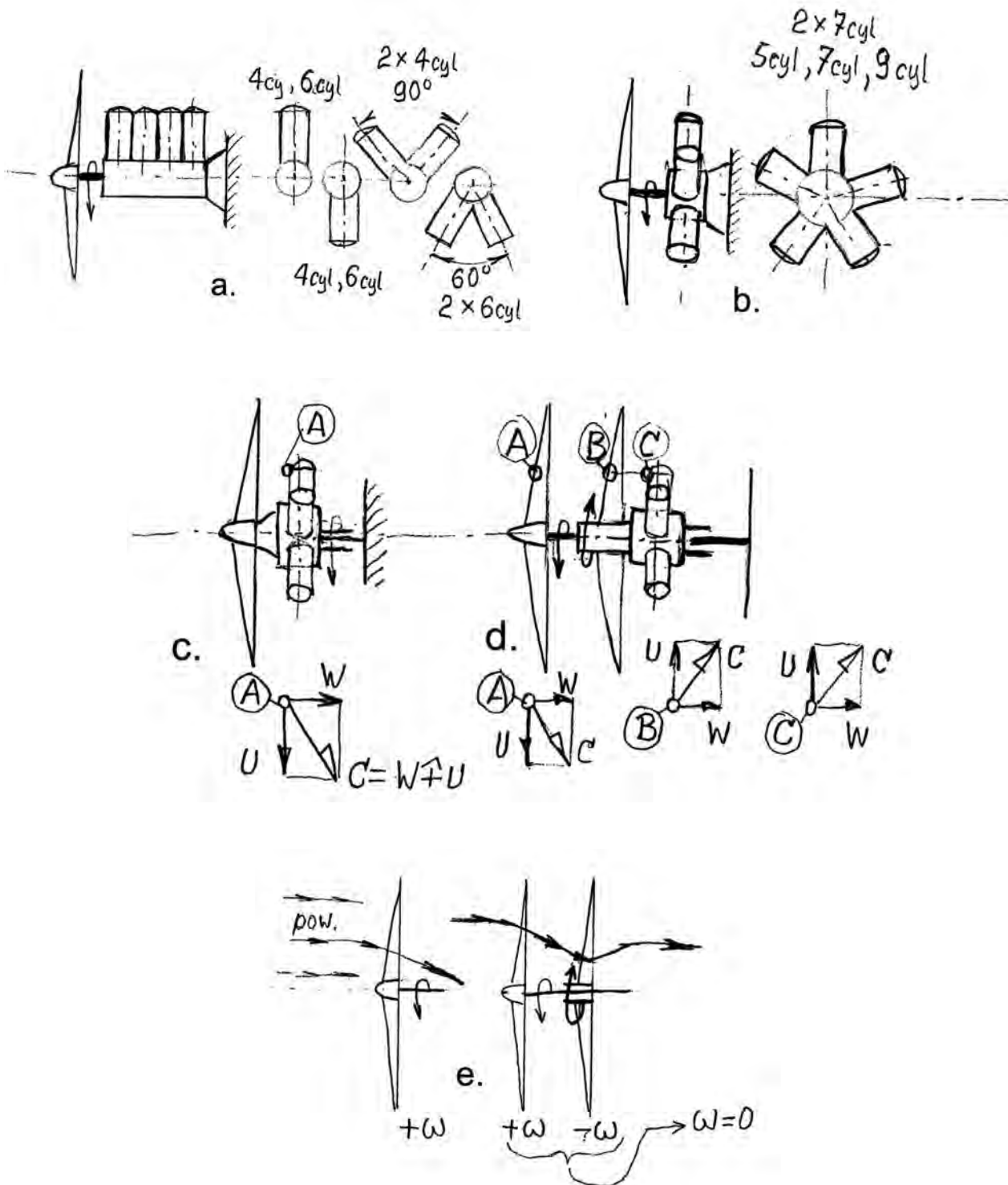
*W artykule starano się przedstawić w kolejności historycznej najważniejsze udoskonalenia napędów lotniczych mające na celu latanie „wyżej - dalej - szybciej”. W lotnictwie może być wykorzystywany wyłącznie napęd odrzutowy: od śmigła napędzanego silnikiem tłokowym czy turbinowym, bezpośrednio wytwarzanego ciągu przez turbinowe silniki odrzutowe jedno- i dwuprzepływowe do ... przeciwbieżnych śmigłowentylatorów (ciągnących lub pchających) napędzanych przez silniki turbinowe. W każdym przypadku rozwój osiągnęto przez ograniczanie masy i wymiarów silników a jednocześnie wzrost ich mocy lub ciągu, wzrost sprawności śmigieł, wentylatorów i śmigłowentylatorów, obniżenie zużycia paliwa. W ostatnich latach szczególnie uwidoczniła się wzrost trwałości i niezawodności oraz zainteresowanie wielopaliwowością, paliwami odtwarzalnymi a także ograniczaniem emisji hałasu i składników toksycznych w spalinach.*

**Słowa kluczowe:** napęd lotniczy, silnik odrzutowy, śmigłowentylator, emisja hałasu i toksyn

Początki lotnictwa preferowały szczególnie lekkie (i superlekkie) konstrukcje silników t.j. przystosowywane trakcyjne rzędowe chłodzone wodą o zapłonie iskrowym (ZI). Silniki już specjalnie dla lotnictwa chłodzone powietrzem: gwiazdowe (równomierne chłodzenie cylindrów), gwiazdowe rotacyjne (intensywniejsze chłodzenie), birotacyjne (zmniejszenie efektu giroskopowego ale i intensywne chłodzenie) (rys. 1).

Moc silników lotniczych do I wojny światowej to kilkadziesiąt KM, a od lat 30-ub.w. gwałtowny wzrost do wartości, 800...1800(2000) KM. Po II-iej wojnie światowej przy próbie „ratowania” zastosowań silników tłokowych w lotnictwie bojowym osiągnięto moce 3000...4000 KM. Obecnie silniki tłokowe w lotnictwie sportowym (moce 100...300 KM), a w zanikającym rolniczym (!) to nawet 1000 KM jak w samolocie AN-2. Lotnicze silniki tłokowe zawsze o ZI „szczyty” swoich osiągnięć uzyskały w czasie II-iej wojny. Jednostkowe wartości parametrów charakterystycznych to: zużycie paliwa 220...200 g/KMh, moc z pojemności cylindrów: 50...60 KM/dm<sup>3</sup>, masa: ~ 0,5 kg/KM. Uzyskane sukcesy osiągnięć silników lotniczych nie poszły na marne. Powstały warianty czołgowe: Amerykanie (dodając wentylatory) stosowali 7-mio cylindrowe gwiazdowe silniki lotnicze (o ZI i mocy 350 KM) chłodzone powietrzem w „generalskiej” serii masowo użytych w końcowej fazie II-iej w.św. w Europie. Rosjanie we wszystkich czołgach II-iej wojny. stosowali silniki W-2 (o ZS i mocy 500 KM) będący wysokoprężną wersją silników lotniczych AM-38 (o ZI

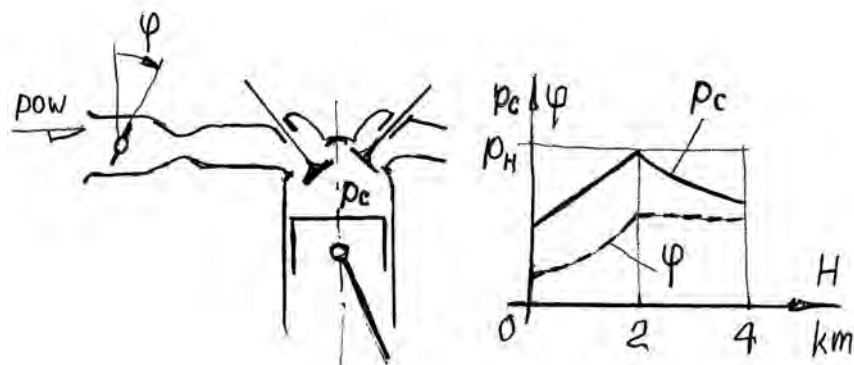
i zasilanych gaźnikowo) stanowiących napęd słynnych szturmowców IŁ-2 (zwanymi przez Niemców „czarną śmiercią”<sup>1</sup>). Współcześnie wersje silników W-2 osiągnęły moc 700 KM (doładowane sprężarką mechanicznie napędzaną), a ostatnio z dwiema turbosprężarkami – „aż” 900 KM w naszym czołgu „Twardy”.



**Rys. 1. Schematy układów cylindrów silników stosowanych w początkowych latach rozwoju lotnictwa: (a) - silniki rzędowe, (b) - gwiazdowe, (c) - gwiazdowe rotacyjne, (d) - gwiazdowe birotacyjne, (e) - przepływ strumienia powietrza przez śmigło pojedyncze i przeciwbieżne**

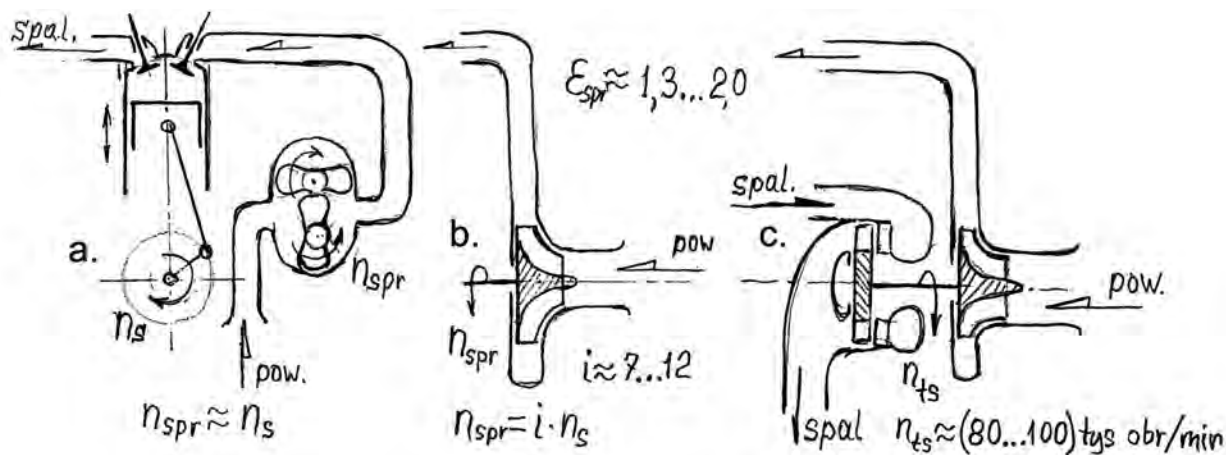
<sup>1</sup> Słyszałem, widziałem – jako przymusowy robotnik po berlińskiej stronie Odry w czasie jej forsowanie przez naszych „Kościuszkowców” - S. Szczeciński.

Na początku rozwoju lotniczych silników tłokowych (w czasie I-ej wojny) potrzeba przekraczanie linii frontów na bezpiecznej wysokości lotu (powyżej celnego zasięgu ówczesnej broni przeciwlotniczej, (~ 2000m), wykorzystywano „metody” przewymiarowania cylindrów oraz ich „przeprężania”. W obu przypadkach pełne otwarcie przepustnic gaźników (stosowanych wówczas powszechnie) można było wykorzystać dopiero w zakresie osiągnięcia ~ 2000 m, dla ochrony układu korbowego przed przeciążeniem (rys. 2).



**Rys. 2. Zależność ciśnienia napelniania  $p_c$  cylindrów silnika i kąt  $\varphi$  otwarcia przepustnicy gaźnika od wysokości  $H$  lotu**

Dla zwiększenia mocy silników zwiększano ich prędkość obrotową, co wymusiło stosowanie przekładni redukcyjnych śmigieł dla utrzymania ich sprawności i wytrzymałości łopat na zadowalającym poziomie. Równolegle wprowadzano pojemnościowe sprężarki doładowujące i wirnikowe sprężarki promieniowe<sup>2</sup> (rys. 3).



**Rys. 3. Sposoby doładowywania cylindrów silników lotniczych: (a) – sprężarka pojemnościowa, (b) – sprężarka wirnikowa napędzana mechanicznie przez doładowywany silnik, (c) – turbosprężarka**

Doświadczenia zdobyte w I-ej wojnie w zakresie użytkowania i produkowania silników lotniczych, krytyczne oceny wiedzy w zakresie teorii, konstrukcji, technologii oraz dostępności materiałów doprowadziły do ustabilizowania form konstrukcyjnych. W czasie II-ej wojny w lotnictwie bojowym występowały 2 grupy silników: rządowe 12-cylindrowe w układzie widlastym chłodzone cieczami niezamarzającymi oraz 14-cylindrowe dwugwiazdowe chłodzone powietrzem doładowywane promieniowymi sprężarkami – napędzanymi mechanicznie przez przekładnie przyspieszające. Silniki były wyposażone w reduktory śmigłowe (jako para kół zębatych) w silnikach rządowych, a w silnikach gwiazdowych zwykle w postaci reduktora obiegowego osiowoosymetrycznego względem wału korbowego. Zasilanie silników w większości

<sup>2</sup> Były także próby zbudowania i zastosowania turbosprężarek.

było gaźnikowe: w brytyjskich i amerykańskich były to konstrukcje jednogaźnikowe (przed sprężarkami doładowującymi), a w radzieckich: jednogaźnikowe tylko w silnikach gwiazdowych a w rządowych: wielogaźnikowe (4-o lub 6-cio) za sprężarką – co pozwoliło na uśrednienie składu i jakości mieszanki, równocześnie chroniąc gaźniki przed oblodzeniem. Tylko Niemcom udało się wprowadzić we wszystkich silnikach („rodzin” DB 600, Jumo 210 oraz BMW-801) samolotów bojowych wysokociśnieniowy wtrysk paliwa bezpośrednio do cylindrów (jak w silnikach o ZS) w suwie sprężania. Silniki te charakteryzowało szczególnie małe jednostkowe zużycie paliwa i niezakłócona praca w każdym położeniu samolotu względem pola grawitacji.

Trwałość mędynaprawczą ówczesnych silników samolotów bojowych przewidywano na ok. 100h (przy statystycznej przeżywalności tych samolotów w czasie wojny ok. 20h).

Obecnie silniki tłokowe są wykorzystywane w „małym” lotnictwie: aeroklubowym, dyspozycyjnym, gospodarczym, ratowniczym, sportowym oraz rekreacyjnym (także jako napęd lotni i parolotni...it.p.). W aspekcie technicznym są to silniki na poziomie przedwojennej wiedzy o teorii pracy, konstrukcji i technologii produkcji zwłaszcza w porównaniu z osiągniętym już poziomem rozwoju napędów samochodów. Rzadko spotyka się silniki z wtryskiem niskociśnieniowym – są one zazwyczaj zasilane gaźnikami o dość prymitywnej konstrukcji – z ręczną np. 4-o dźwigniową (!) możliwością dostosowywania nastaw do bieżących warunków lotu ( $H$ ,  $T_H$ ).

W użyciu znajdują się omal wyłącznie (?) silniki rządowe o przeciwsobnym układzie cylindrów (typu „boxer”) o 2-u, 4-o lub 6-ciu cylindrach chłodzonych powietrzem niedoładowanych o mocach od kilkudziesięciu ... do ok. 300 KM. Jedynie w starszych samolotach wykorzystywanych w rolnictwie są jeszcze stosowane silniki gwiazdowe 5-cio, 7-mio (najczęściej) i 9-cio cylindrowe o mocach od ok. 150...do 1000 KM – niekiedy doładowywane<sup>3</sup>.

Obecnie jest duża szansa (ze względu na wymogi ekologiczne i zmian klimatycznych) rozwoju lotniczych silników tłokowych przez przeniesienie do nich osiągnięć motoryzacyjnych (przynajmniej): wprowadzenie wtrysku niskociśnieniowego z „sondą lambda” i sterowania komputerowego dawki paliwa i kąta wyprzedzania zapłonu oraz (odtworzalnych!) biopaliw. Niezależnie rozważa się wprowadzenie silników o ZS na zunifikowanym paliwie: nafcie lotniczej (z dodatkiem biopaliw). Rozważa się także sensowność wprowadzania udoskonalonych silników Wankla o różnych liczbach jednakowych „plasterków” w zależności od zapotrzebowywanych mocy. Dla wojskowych bezpilotowych samolotów bezpośredniego rozpoznania pola walki znane są już zastosowania elektrycznego napędu śmigieł z wykorzystaniem wydajnych akumulatorów wspartych bateriami słonecznymi – rozpiętymi na płatach skrzydeł.

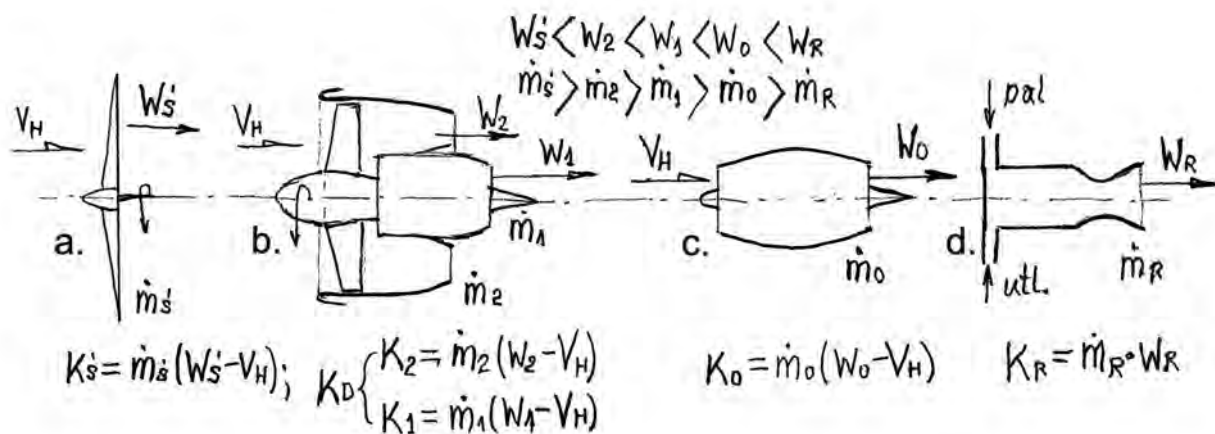
Historia powstania i rozwoju lotnictwa nieznacznie przekroczyła 100 lat, a już kilkakrotnie „grzebano” spalinowe silniki tłokowe i śmigła (bo zbyt małe prędkości lotu...) ale i silniki odrzutowe (bo zbyt duże zużycie paliwa...). Okazuje się jednak, że coraz bardziej rozszerzające się potrzeby wykorzystywania obiektów latających, dają szansę rozwoju i zastosowań różnych rodzajów napędów.

Wkrótce po I-ej wojnie światowej uaktywnili się zapaleńcy lotnictwa z szeregiem wynalazków – mających umożliwić latanie „szybciej – wyżej – dalej”. Poruszanie się w oceanie powietrznym nie pozwala na zastosowanie odpychania od „gruntu” jak to stosuje się w łodziach na płytkich akwenach. W lotnictwie każdy rodzaj napędu jest odrzutowym.

Wśród różnych wynalazków pojawiły się pomysły na obudowane wielołopatowe śmigła – jak we współczesnych dwuprzepływowych wentylatorowych silnikach odrzutowych, strumieniowe silniki odrzutowe (o przepływie pulsacyjnym i ciągłym) oraz, obecnie „klasyczne” turbinowe silniki odrzutowe oraz silniki raketowe na stałe i ciekłe materiały pędne (rys. 4).

<sup>3</sup> Tu absolutnym rekordzistą jest samolot AN-2 i napędzający go 1000-konny silnik. Polski przemysł lotniczy wyprodukował tych samolotów blisko 14000 sztuk i odpowiednią dla nich liczbę silników. Są one wykorzystywane na całym świecie, a w Brazylii latają na najbardziej tam dostępnym (i tanim) paliwie: tj. alkoholu etylowym.





**Rys. 4. Porównanie cech przepływowych (natężenia przepływu  $\dot{m}$  i prędkości  $W$ ) zespołów napędowych samolotu. (a) – śmigło, (b) – dwuprzepływowy wentylatorowy turbinowy silnik odrzutowy, (c) – jednoprzepływowy silnik odrzutowy, (d) – raketowy silnik na ciekły materiał pędny,  $K$  – ciąg zespołu napędowego**

Po I-ej wojnie światowej specjaliści lotniczy wielu państw – zwłaszcza zaangażowanych w planowanie przyszłej wojny – zdawali sobie sprawę, że dalszy rozwój lotnictwa bojowego uzależniony jest od powstania bezśmigłowego napędu odrzutowego. Odpowiednie prace wszczęto na przełomie lat 20/30 ubiegłego wieku w wielu krajach (także u nas: J. Oderfeld...). Mimo zbudowania pierwszego silnika odrzutowego i jego uruchomienia w kwietniu 1937 roku w Wielkiej Brytanii, tylko w Niemczech udało się doprowadzić do pierwszego lotu samolotu odrzutowego już w sierpniu 1939 roku.

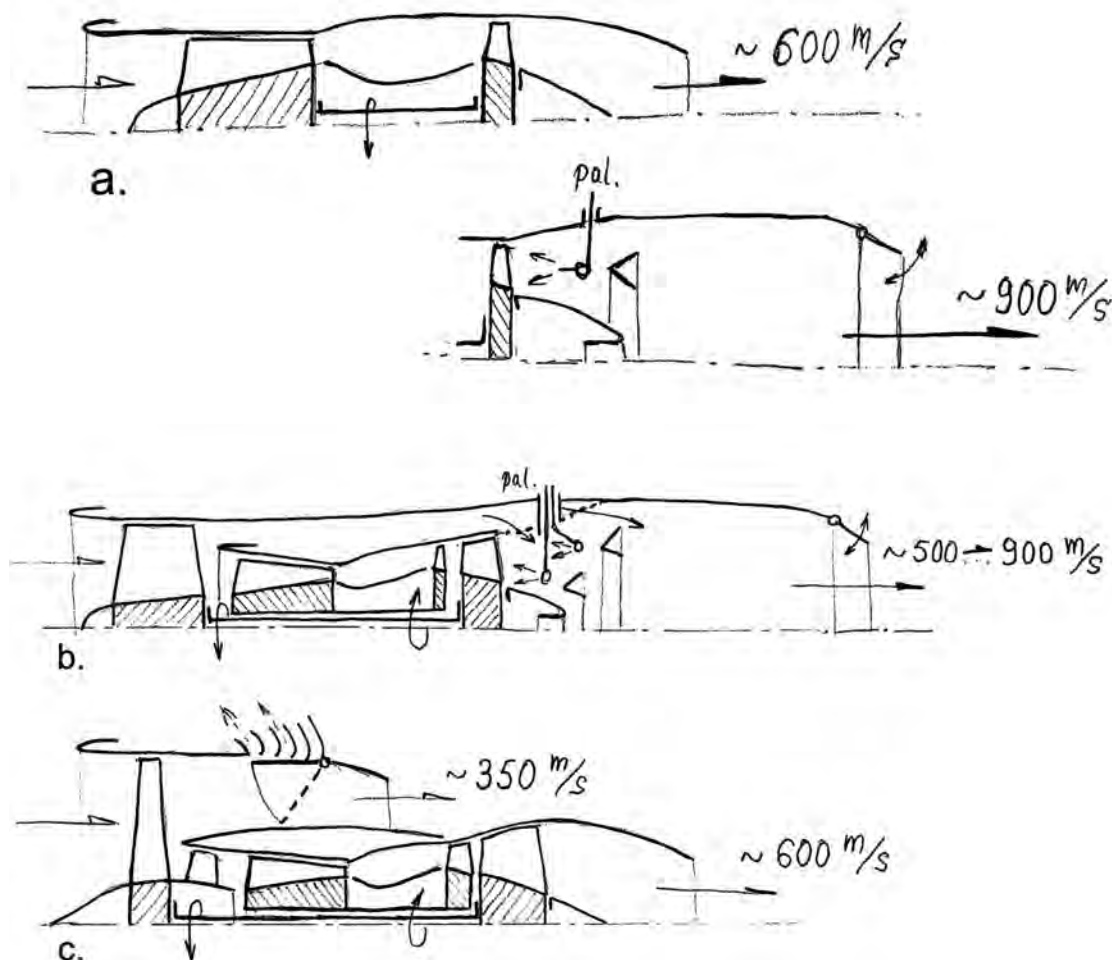
W czasie wojny w Niemczech opracowano, wyprodukowano i wprowadzono do walki blisko 1800 samolotów odrzutowych. Także w tym czasie powstały rakiety przeciwlotnicze RhaJntochter z silnikami na ciekły materiał pędny, rakiety balistyczne V2-z silnikami na ciekły tlen i alkohol etylowy, uskrzydłone bomby latające V1 z pulsacyjnymi strumieniowymi silnikami odrzutowymi oraz podwieszane raketowe silniki na ciekły materiał pędny wspomagające start przeciążonych bombowców. Powstały także raketowe bezbrzechwowe pociski taktyczne (Nebel - werfer) na stały materiał pędny.

Po II-ej wojnie światowej, najpierw w lotnictwie bojowym, pojawiły się turbinowe silniki odrzutowe – początkowo były to kopie zdobycznych silników Jumo 004; BMW 003 wdrażane z pomocą (także „zdobycznych”) specjalistów niemieckich, oraz w tzw. bloku państw socjalistycznych kopie „licencyjne” brytyjskich silników RR-Derwent i rodziny Nene. Nasze ówczesne, omal „mocarstwowe”, lotnictwo to wielkoseryjna produkcja samolotów myśliwskich (licencyjnych) samolotów MiG-15 i MiG-17 i ich silników RD-500, RD-45 (kopie Derwenta i Nene I) oraz WK-1 i WK-1F (radzieckich modyfikacji silników Nene II) w latach 1950...1960...W owym dziesięcioleciu powstały własne konstrukcje samolotu szkolnego (Bies i tłokowy silnik WN..) i szkolno – bojowego (Iskra i odrzutowy S0-1). W następnym dziesięcioleciu projekt i makiet samolotu bojowego Grot z radzieckimi silnikami RD-9B oraz trwające prace nad samolotem Iryda (do oblatanych prototypów) z silnikami jednoprzepływowymi K-15 i udoskonalonym silnikiem K-16 oraz dwuprzepływowym D-18. Dalsze prace silnikowe w kraju to remonty silników jednoprzepływowego AŁ-21F3 (samolotu Su-22) i dwuprzepływowego RD-33 (samolotu MiG-29) oraz dwuprzepływowego wentylatorowego CFM56 (na potrzeby lotnictwa pasażerskiego).

Dalsze prace nad polskimi konstrukcjami lotniczych silników turbinowych to już tylko marzenia...marzenia... Pewną szansą współpracy międzynarodowej może stać się produkcja zdecydowanie unowocześnionych „starych” silników tłokowych w precyzyjnie ustalonych zapotrzebowaniach mocy.

Natomiast lotnicze silniki turbinowe, dzięki swoim strukturalnym walorom jak małe wymiary poprzeczne i masa silników, bezpulsacyjna praca, podatność technologiczna wielu powtarzalnych części, osiągnięty poziom niezawodności i trwałości oraz malejące permanentnie zużycie paliwa spowodowały całkowite opanowanie przez nie lotnictwa we wszystkich obszarach jego zastosowania w gospodarce, szybkim transporcie ludzi i towarów oraz w wojskach.

Obecnie, ze względu na zastosowanie i wynikające stąd warunki lotu, ukształtowały się formy konstrukcyjne, osiągi i cechy użytkowe – szczególnie przydatne do spełniania przewidywanych zadań dla danego rodzaju lotnictwa (rys. 5).



**Rys. 5. Struktury przepływowe turbinowych silników odrzutowych. (a) – jednoprzepływowy bez dopalacza i z dopalaczem, (b) – dwuprzepływowy z dopalaczem, (c) – dwuprzepływowy wentylatorowy z odwracaczem ciągu**

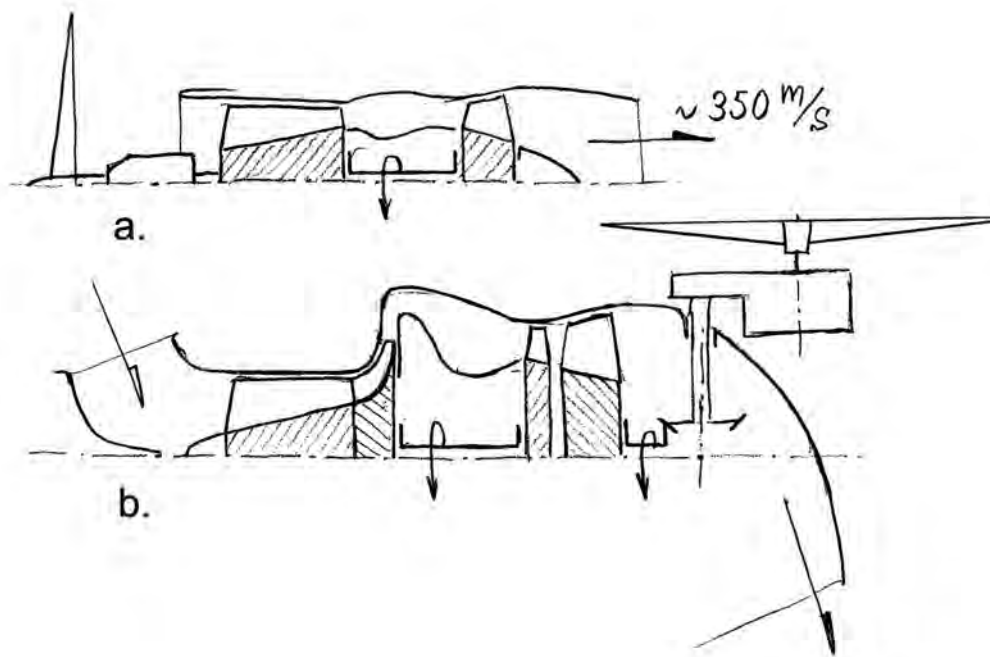
Odrzutowe silniki jednoprzepływowe do niedawna panowały w lotnictwie bojowym tak ze względu na małe wymiary poprzeczne silników – jak i ich względną trwałość (prostota konstrukcji, eksploatacji i zachęcająca niezawodność i trwałość). „Zimna” wojna wymusiła konieczność przewidywania wieloletniej eksploatacji samolotów bojowych o dużym zasięgu i podatnych na wprowadzanie coraz bardziej wyrafinowanego osprzętu i uzbrojenia, oraz sposobów przetrwania na polu walki. Jednym z czynników sprostania tym wymaganiom jest ekonomiczność pracy dwuprzepływowych silników odrzutowych, co zadecydowało o ich powszechności zastosowania we współczesnym lotnictwie bojowym.

Nie jest to naturalnie jedyna pozytywna z cech, lecz inne wynikają niewyłącznie z odrębności strukturalnej silników tego typu – a „tylko” z faktu ich powstawania w czasie dojrzałości konstrukcyjnej, technologicznej oraz doświadczeń wieloletniego użytkowania silników turbinowych w różnych rodzajach lotnictwa.

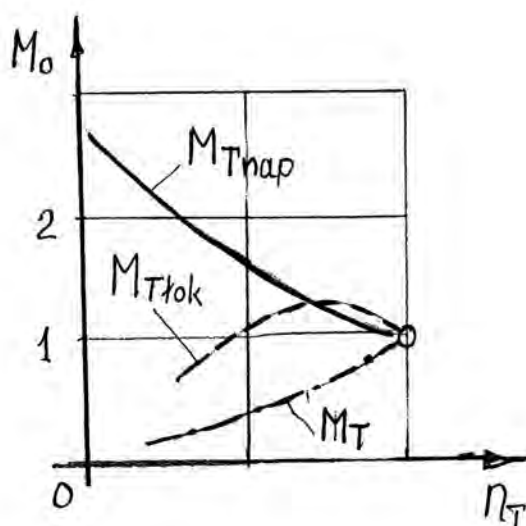
Warto pamiętać jaki wpływ na osiągi i cechy użytkowe mają odmienności strukturalne lotniczych silników turbinowych.

W grupie silników odrzutowych to przede wszystkim bezpośrednie wytwarzanie ciągu na skutek wzrostu prędkości między wlotem i wylotem podgrzanego powietrza w kanałach przepływowych silnika.

Natomiast w grupie silników śmigłowych i śmigłowcowych wykorzystanie nadwyżkowej mocy turbiny (nad niezbędną do napędu sprężarki silnika) do napędu śmigła samolotowego lub wirnika nośnego śmigłowca (rys. 6 oraz rys. 7).



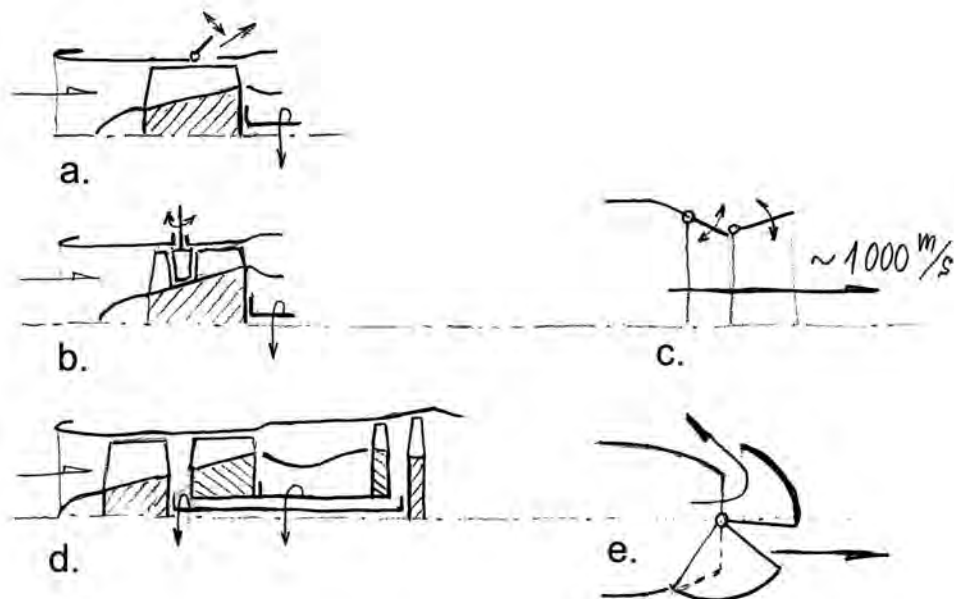
**Rys. 6. Struktury przekazu mocy silników śmigłowych i śmigłowcowych. (a) – jednowirnikowy silnik śmigłowy, (b) – silnik śmigłowcowy z oddzielną turbiną napędową**



**Rys. 7. Obrotowe charakterystyki porównawcze momentu obrotowego.  $M_{łok}$  - silnik tłokowy,  $M_T$  - jednowirnikowy silnik turbinowy,  $M_{Tnap}$  - silnik z oddzielną turbiną napędową**

Struktura przepływowa turbinowych silników odrzutowych pozwala na jej przystosowanie do potrzeb określonego rodzaju lotnictwa. Najprostsza struktura to jednoprzepływowy jednowirnikowy silnik: prosty technologicznie, tani. Wprowadzenie upustu powietrza ze sprężarki i nastawnych kierownic to rozszerzenie zakresu stabilnej i wysokosprawnej pracy sprężarki a jej

wielowirnikowość to radykalna poprawa tych cech (rys. 8). Praca silnika z dużym nadmiarem powietrza to możliwość zastosowania dopalacza i wykorzystania nastawności dyszy wylotowej w szerszym zakresie pracy silnika i warunków lotu samolotu.

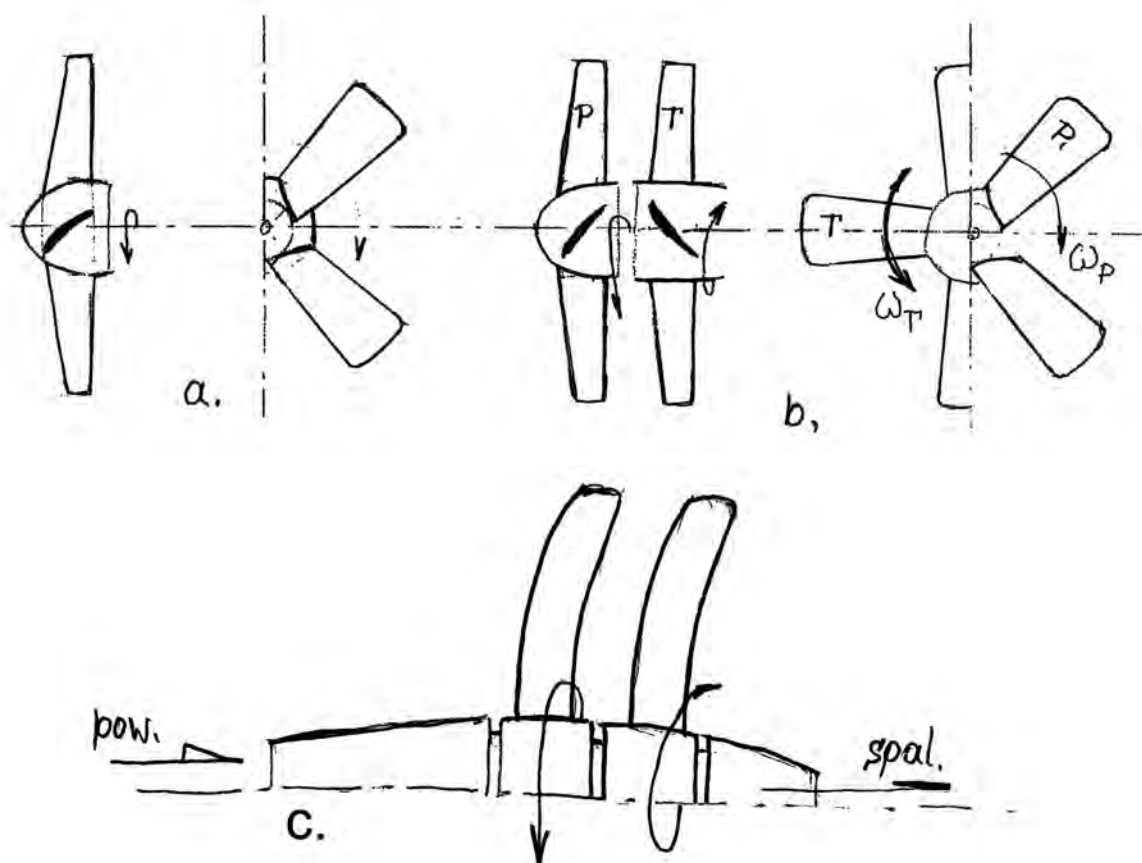


**Rys. 8. Mechanizacja przepływów silników turbinowych jako sposób poprawy cech użytkowych silników. (a) – upust powietrza ze sprężarki, (b) – nastawność kierownic sprężarki, (c) – nastawność dyszy wylotowej, (d) – dwuwirnikowość sprężarki i turbiny, (e) – odwracacz ciągu**

Silniki dwuprzepływowe samolotów bojowych (o niewielkim – ale z możliwością wyboru wartości stosunku natężeń przepływu w kanałach silnika) to skutek kompromisu między ekonomicznością silnika a jego gabarytem poprzecznym (ale i obniżeniem temperatury gazów wylotowych do poziomu utrudniającego celność pocisków np. sterowanych na podczerwień. W lotnictwie t.zw. komercyjnym – to rozwój dwuprzepływowych silników wentylatorowych o dużym stosunku natężeń przepływu ( $m = 5 \dots 10 \dots$  i więcej) w miarę rozwoju materiałów konstrukcyjnych – lżejszych i wytrzymalszych. Najbardziej pożądane cechy tych silników to: ekonomiczność, trwałość, niezawodność. Jednostkowe zużycie paliwa silników wentylatorowych współcześnie wprowadzanych do produkcji osiągają wartość 5-cio krotnie mniejszą niż osiągnęto w pierwszych silnikach odrzutowych samolotów bojowych końca II-iej wojny światowej-i tuż po niej. Warunki lotu samolotów pasażerskich i transportowych dalekiego zasięgu to ich stałość i wykorzystywanie specyfiki: Jeden lot = jeden cykl zmęczeniowy konstrukcji silnika, oraz minimalizacja strat przepływu spalin przez turbinę na drodze minimalizacji luzów wierzchołkowych jej łopatek (1...2)% przez sterowane schładzanie kadłubów turbin. Poprawę sprawności napędowej należy upatrywać także w „aerodynamicę” łopat śmigieł i wentylatorów (rys. 9) – których położenie krawędzi natarcia wielkościściwowych łopat względem ich zamocowania w tarczach wirnikowych jest analogiczne do osadzenia skośnych skrzydeł w samolotach naddźwiękowych i osiąganie prędkości obwodowych ich wierzchołków do nawet ponad 500 m/s. W turbinowych silnikach śmigłowych i śmigłowcowych cechy konstrukcyjne ich zespołów wirnikowych podlegają analogicznym zmianom dostosowawczym do wymagań lotnych samolotów i śmigłowców. Są one podobne do (na ogół) wcześniej wprowadzanych do silników odrzutowych. Są to przede wszystkim upusty powietrza ze sprężarek, nastawność palisad łopatek kierownic sprężarek, ich dwuwirnikowość (także z przeciwbieżnością).

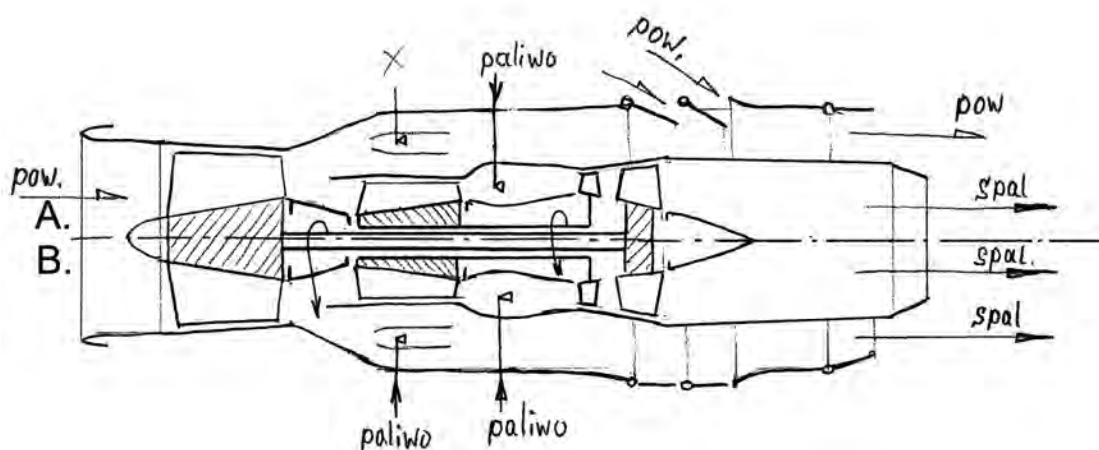
Już w początkach wprowadzania napędu turbinowego do śmigłowców ich cechą wyróżniającą stały się oddzielne turbiny napędowe – ze względu na szczególnie korzystną charakterystykę momentu obrotowego takiej turbiny (por. rys.6.b oraz rys. 7).





**Rys. 9. Rozwój konstrukcji śmigłowentylatorowych. (a) - zmodyfikowane łopaty śmigła pojedynczego, (b) - przeciwbieżny śmigłowentylator, (c) - śmigłowentylator napędzany bezpośrednio przeciwbieżnymi turbinami**

Na ewentualność wykorzystywania samolotów jako wstępnych stopni wynoszących obiekty kosmiczne w pobliże orbitalnych prędkości czynione są próby zbudowania silników odrzutowych o zmiennej strukturze przepływowej (zwanymi silnikami adaptacyjnymi) zapewniających ich pracę z wysoką sprawnością w szczególnie szerokim zakresie prędkości lotu: od  $Ma < 1$  do  $Ma = 5 \dots 6$  (rys. 10).



**Rys. 10. Jedna z idei struktury przepływowej odrzutowego silnika adaptacyjnego. A - „klasyczny” silnik dwuprzepływowy, B - silnik z kanałem zewnętrznym pracującym jako silnik strumieniowy,**

W najbliższym czasie, z dużą dozą prawdopodobieństwa, należy się spodziewać permanentnego wprowadzenia coraz lżejszych, wytrzymalszych, odpornych na zanieczyszczenia środowiska, podatnych technologicznie na automatyczne wytwarzanie materiałów konstrukcyjnych

i produkcję części. Wydaje się wielce prawdopodobne wprowadzenie łożysk magnetycznych i elektromagnetycznych do podpór wirnikowych: sprężarek, turbin i wentylatorów wielowirnikowych odrzutowych silników dwuprzepływowych.

To krótkie opracowanie nie jest w stanie opisać wielu niuansów, meandrów i wybojów (czasem zapór nie do przebycia) dróg rozwojowych napędów lotniczych. Konieczne jest krytyczne śledzenie bieżących informacji także w literaturze popularno – specjalistycznej – traktowanej przez Czytelników i Decydentów bardzo poważnie – bo ich odpytywanymi specjalistami są zwykle Redaktorzy Czasopism Lotniczych którzy niegdyś byli pilotami.