

# SPECYFIKA OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH LOTNICZYCH SILNIKÓW TŁOKOWYCH

**W. Balicki, S. Szczeciński**

Instytut Lotnictwa

**J. Szczeciński**

General Electric Poland

**R. Chachurski, A. Kozakiewicz**

Wojskowa Akademia Techniczna

## Streszczenie

*W artykule przytoczono, zapomniane w lotniczej literaturze silnikowej, cechy dynamiczne lotniczych silników tłokowych – rzutujące na procesy napełniania cylindrów mieszanką palną oraz przekazywane na płatowiec siły i momenty obrotowe. Wiele uwagi poświęcono wyrównoważeniu sił bezwładności wywoływanych ruchem posuwistozwrotnym tłoków w układach korbowych silników i sposobów ograniczenia ich przenoszenia na płatowiec doбором liczby cylindrów i ich położenia w silniku oraz stosowania przeciwciężarów. Przeprowadzono analizę wyrównoważenia na prostych przykładach cztero cylindrowego silnika rzędowego i w układzie przeciwsobnym oraz trzy cylindrowego gwiazdowego. Przypomniano zasadę przeciwciężarów wahliwie zamocowanych na wale korbowym i ich efektywność. Zwrócono uwagę na ograniczenia napełniania cylindrów spowodowane kinematycznym sprzężeniem tłoków i zaworów w suwie ssania. Przedstawiono modele obliczeniowe o różnym stopniu uproszczenia drgań skrętnych wału silnika ze śmigłem.*

**Słowa kluczowe:** układ korbowy, wahliwy przeciwciężar, napełnianie cylindra

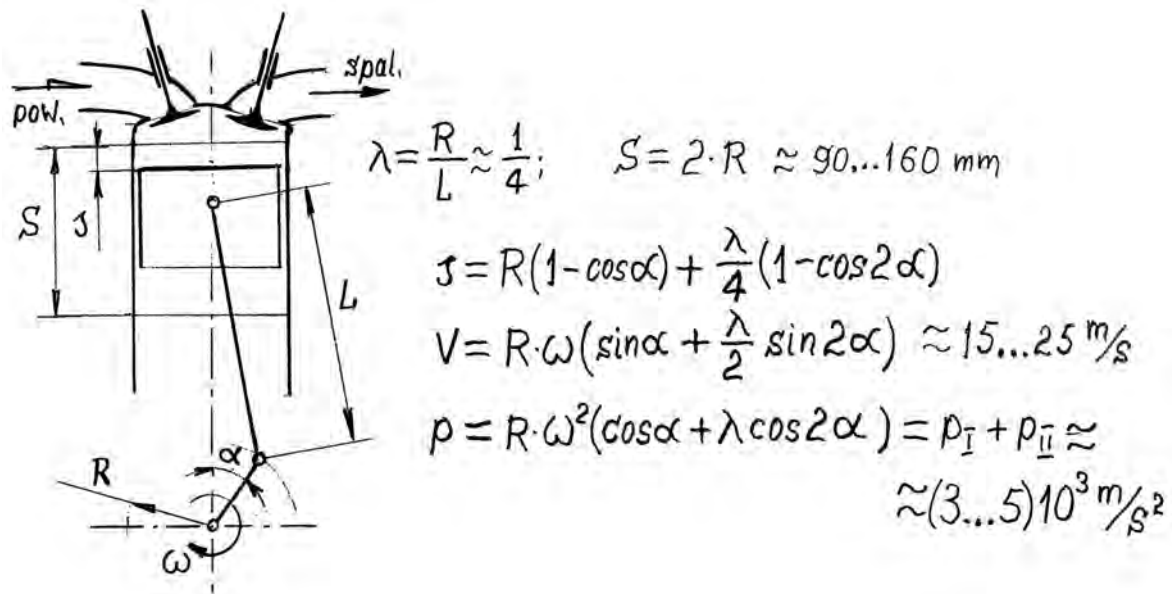
Wszystkie spalinowe silniki tłokowe charakteryzuje pulsacja momentu obrotowego – zależna od liczby cylindrów przede wszystkim, a niewyważone siły bezwładności zależne są od układów cylindrów. W lotnictwie obecnym ilościowo królują „silniki” rzędowe w układzie przeciwsobnym (typu „bokser”) oraz w układzie jednogwiazdowym cylindrów. Silniki tłokowe stanowią największą masę<sup>1</sup> skupioną w każdym samolocie, a ich niewyważone siły przenoszone są na konstrukcję płatowca – ograniczając wytrzymałość zmęczeniową węzłów mocowania silników i komfort pracy załogi. Względnie prosta konstrukcja układu korbowego – zamieniająca posuwisto – zwrotny ruch tłoków na ruch obrotowy wału korbowego szczególnie komplikuje przebiegi zależności drogi  $s$  tłoka, jego prędkości  $V$  i przyspieszenia  $p$  od położenia kąтового  $\alpha$  wału (rys. 1).

Cykl związków kinematycznych ruchów tłoka w cylindrze jest powtarzalny w jednym obrocie wału korbowego (rys. 2), co pozwala na wyrównoważenie sił bezwładności przemieszczających się tłoków w silnikach rzędowych doбором liczby cylindrów i ich układem w silniku oraz wzajemnym położeniem wykorbień wału korbowego. Rys. 3 przedstawia przykładowe schematy

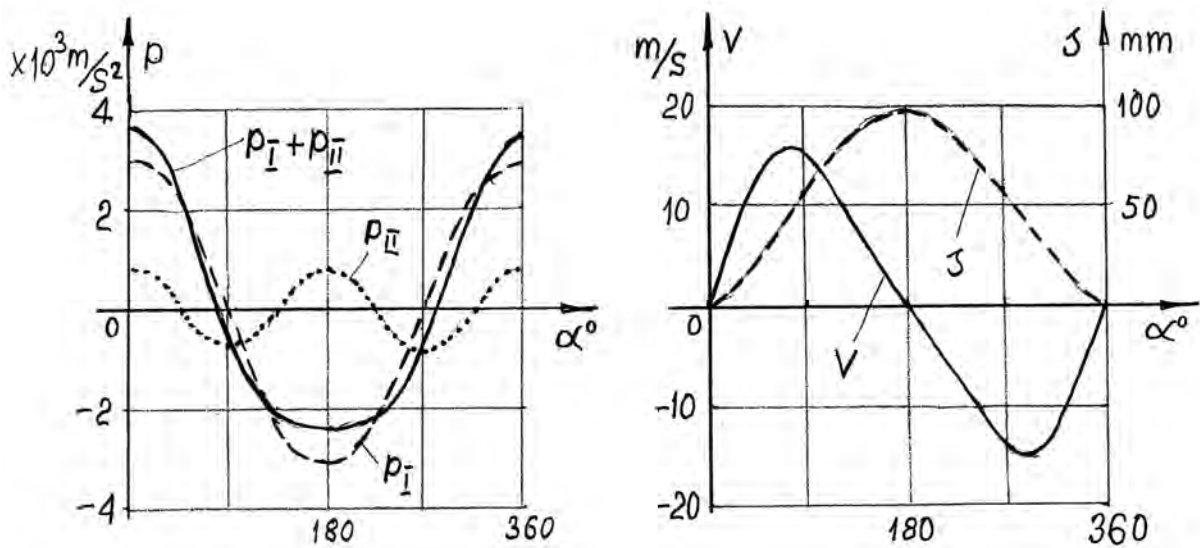
---

<sup>1</sup> Masa jednostkowa (przypadająca na jednostkę mocy) współcześnie użytkowanych w lotnictwie silników tłokowych jest 3÷4 większa niż silników turbinowych

położen wykorbień wałów czterocyldrowego silnika o jednorzędowym układzie cylindrów oraz silnika także czterocyldrowego – ale w układzie dwóch przeciwsobnie usytuowanych rzędów oraz graficzną analizę stopnia wyrównoważenia tych silników.



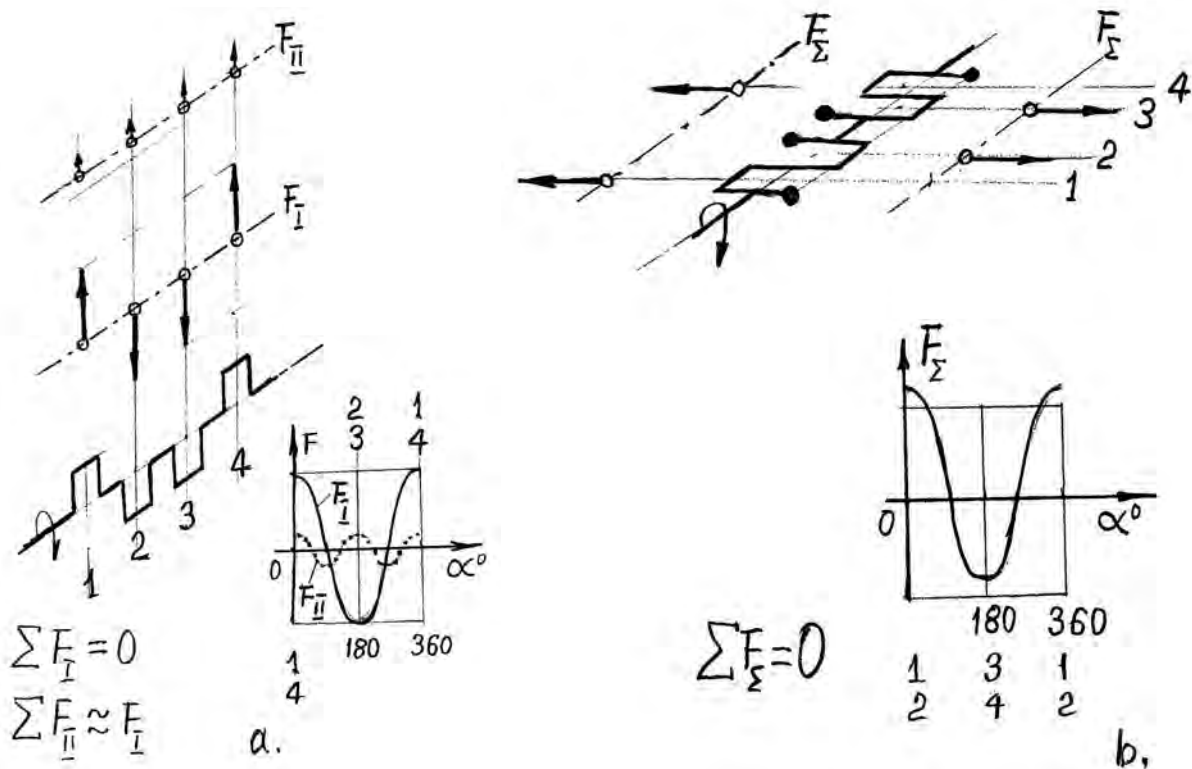
Rys. 1. Schemat układu korbowego i cechy ruchu posuwisto - zwrotnego tłoka;  
Bieżące:  $s$  - droga tłoka,  $V$  - prędkość,  $p$  - przyspieszenie



Rys. 2. Zależność drogi tłoka  $s$ , jego prędkości  $V$  i przyspieszeń  $p$  od położenia kątowego wykorbienia przy ustalonej prędkości obrotowej wału korbowego

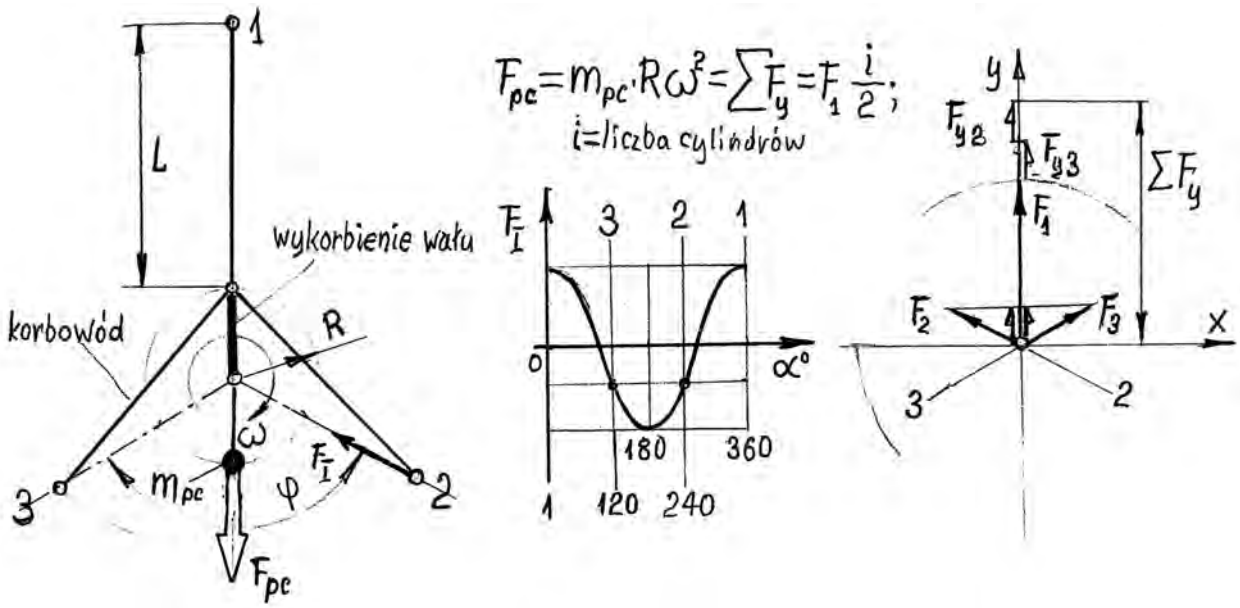
W rzędowym silniku wykazano całkowite wyrównoważenie sił od I harmonicznej działających przyspieszeń na masy pozostające w ruchu posuwisto - zwrotnym, a całkowicie się sumujące siły II harmonicznej. Z wartości  $\lambda$  wynika, że niewyrównoważona suma sił tej harmonicznej dla silnika jest bliska wartości pierwszej harmonicznej jednego cylindra – jednak o częstotliwości dwukrotnie większej. Natomiast w silniku o przeciwsobnym układzie czterech cylindrów zachodzi całkowite wyrównoważenie (parami cylindrów 1-2 oraz 3-4) sił bezwładności obu harmonicznych<sup>2</sup> od mas przemieszczających się w cylindrach silnika. Niektóre firmy, w silnikach opisanego typu, stosowały przeciwciężary – jednak ich przeznaczenie polegało wyłącznie na odciążeniu czopów wału korbowego i panwi łożysk kadłubowych w silniku.

<sup>2</sup> a także wszystkich wyższych rzędów



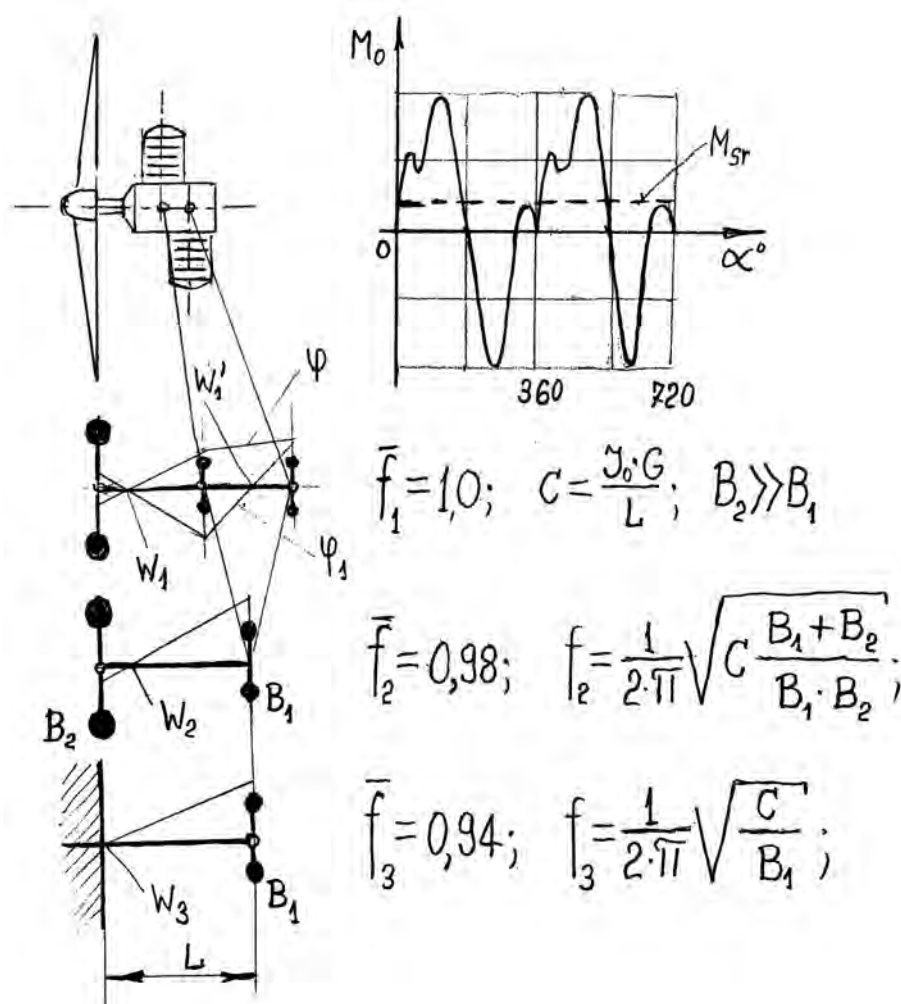
Rys. 3. Siły działające na masy układu korbowego przemieszczające się w cylindrach silnika ruchem posuwisto - zwrotnym; (a) w 4-o cylindrowym rzędownym, (b) w 4-o cylindrowym typu „bokser”

W silnikach specjalnie powstałych dla potrzeb lotnictwa w czasie jego burzliwego rozwoju – t.j. silników gwiazdowych – problem wyrównoważenia sił powstających w wyniku skomplikowanej kinematyki ruchu posuwisto - zwrotnego tłoków w cylindrach promieniowo rozmieszczonych względem osi obrotów wału silnika, jak się okazało, jest wyjątkowo prosty. Schematy na rys.4 wyraźnie to wyjaśniają.



Rys. 4. Siły działające na masy układu korbowego przemieszczające się ruchem posuwisto-zwrotnym w cylindrach silnika gwiazdowego  $\varphi$  – kąt między osiami sąsiednich cylindrów (tu  $\varphi=120^\circ$ ),  $F_1, F_{y2}, F_{y3}$  – składowe wzdłuż wykorbienia sił niewyważonych wszystkich cylindrów,  $m_{pc}$  – masa przeciwiężaru,  $F_{pc}$  – zrównowажająca siła przeciwiężaru

Do rozważań wybrano najprostszy silnik: z trzema cylindrami<sup>3</sup> rozmieszczonymi promieniowo co 120° oraz korbwodami współosiowo sprzęgniętymi z czopem wykorbienia. Analiza wartości i kierunków wektorów sił bezwładności działających na masy przemieszczające się w cylindrach wykazała, że składowe poziome (jak na rysunku), znoszą się – a ich algebraiczna suma w kierunku pionowym jest stała (przy  $n=const$ ) i równa  $\sum F_y = F_1 \frac{i}{2}$ ; (gdzie:  $i$  jest liczbą cylindrów), którą można zrównoważyć przeciwciężarem o masie  $m_{pc}$  obliczonej wg przytoczonego na rys. 4 wzoru.

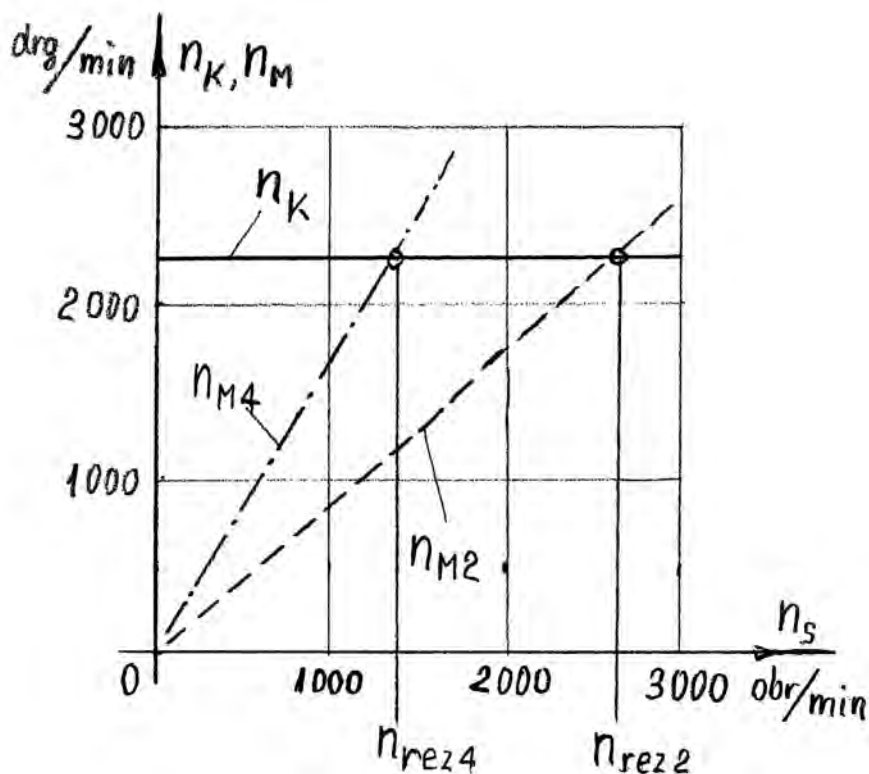


**Rys. 5. Zasada budowania modelu obliczeniowego częstotliwości własnych drgań skrętnych na przykładzie 2-u cylindrowego silnika typu „bokser” napędzającego śmigło, oraz przebiegu jego momentu obrotowego;  $\varphi$  - linia kątów skręcenia wału korbowego,  $W_1, W_1'$  - węzły drgań w modelu trzy masowym,  $W_2, W_3$  - węzły drgań modeli 2-u masowego i 1-o masowego,  $C$  - sztywność wału na skręcanie  $G$  - moduł sprężystości poprzecznej materiału wału,  $J_0$  - geometryczny biegunowy moment bezwładności przekroju poprzecznego wału**

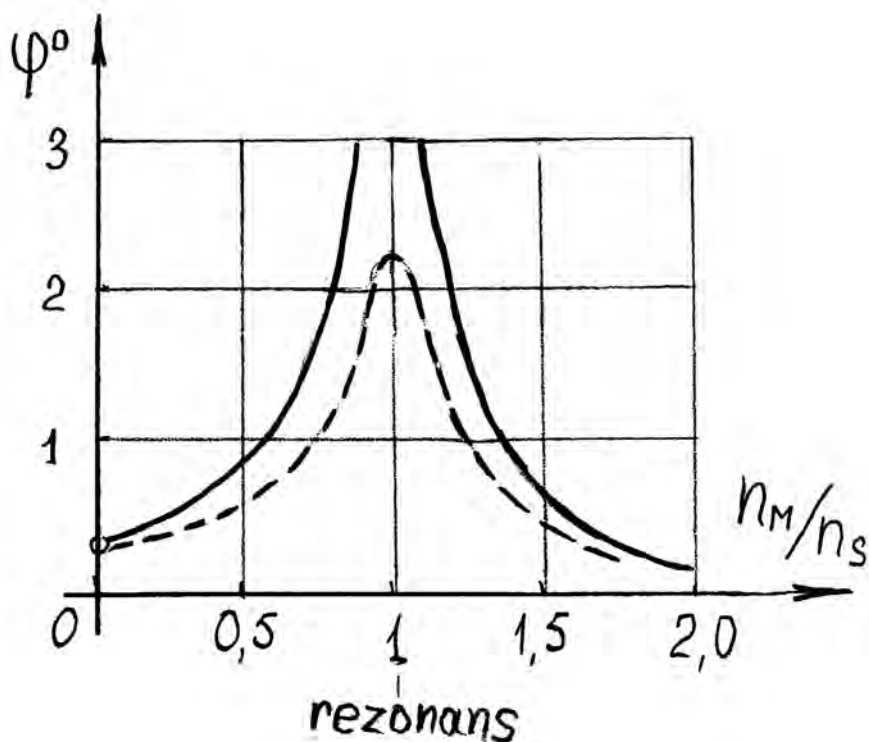
Specyfikę lotniczych silników tłokowych, w odróżnieniu od trakcyjnych, stanowi brak koła zamachowego. Jego rolę w lotnictwie spełnia śmigło, którego moment bezwładności jest większy – co najmniej o rząd wielkości. Pulsujący moment obrotowy silnika przekazywany na śmigło stanowi źródło drgań skrętnych wału silnika, który w przypadku częstotliwości pokrywających się z drganiami własnymi układu silnik – śmigło grozi awarią silnika. Na rys. 5 przedstawiono ideę budowania modeli obliczeniowych drgań skrętnych układu przenoszącego moment obro-

<sup>3</sup> W lotnictwie rozpowszechnione były silniki o 5, 7, 9 cylindrach w pojedynczej gwiazdzie a w podwójnej 2x7 cylindrów

towy od silnika do śmigła o różnym stopniu uproszczenia z przytoczeniem wzorów obliczeniowych. Przytoczone wyniki obliczeń odniesiono do uzyskanych z modelu trójmasowego. Różnice są zapewne mniejsze niż wynikające z obliczeń redukcji odcinków wału korbowego.

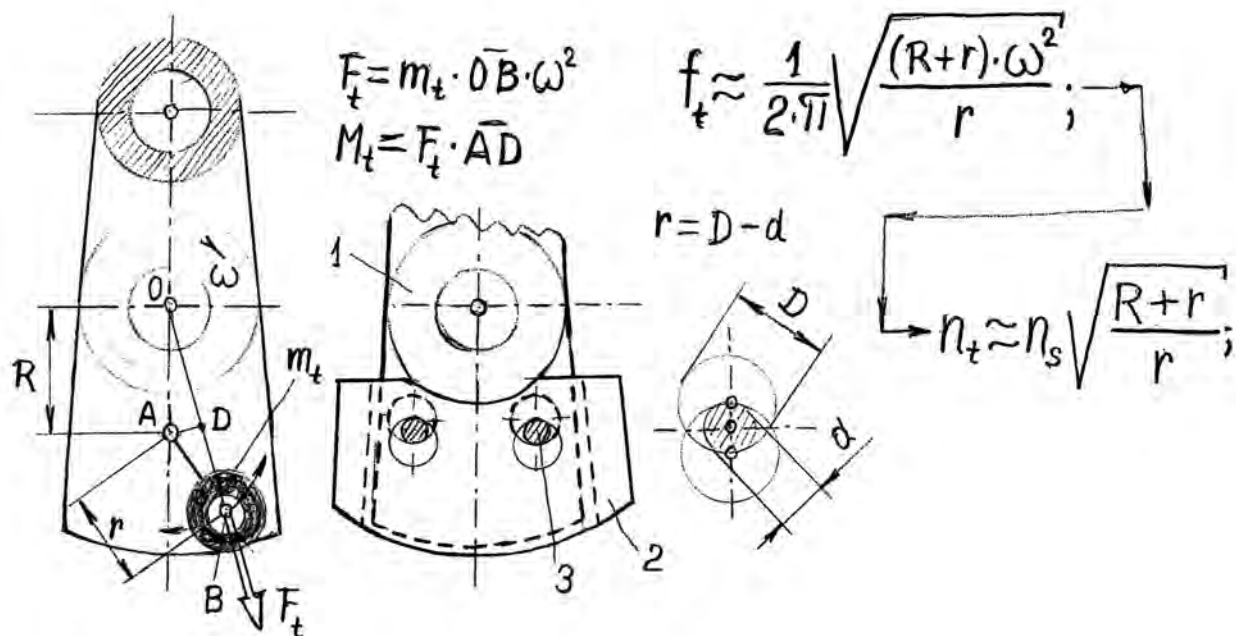


Rys. 6. Zależność częstotliwości własnych drgań skrętnych wału korbowego  $n_K$  oraz wymuszających  $n_M$  przebiegiem momentu obrotowego drgań rezonansowych  $n_r$  od prędkości obrotowej silnika  $n_s$ ;  $n_{M2}$ ,  $n_{M4}$  - częstotliwości wymuszane pulsacją momentu obrotowego 2-u i 4-o krotną na 1 obrót wału silnika,  $n_{rez2}$ ,  $n_{rez4}$  - odpowiednio rezonansowe prędkości obrotowe silnika

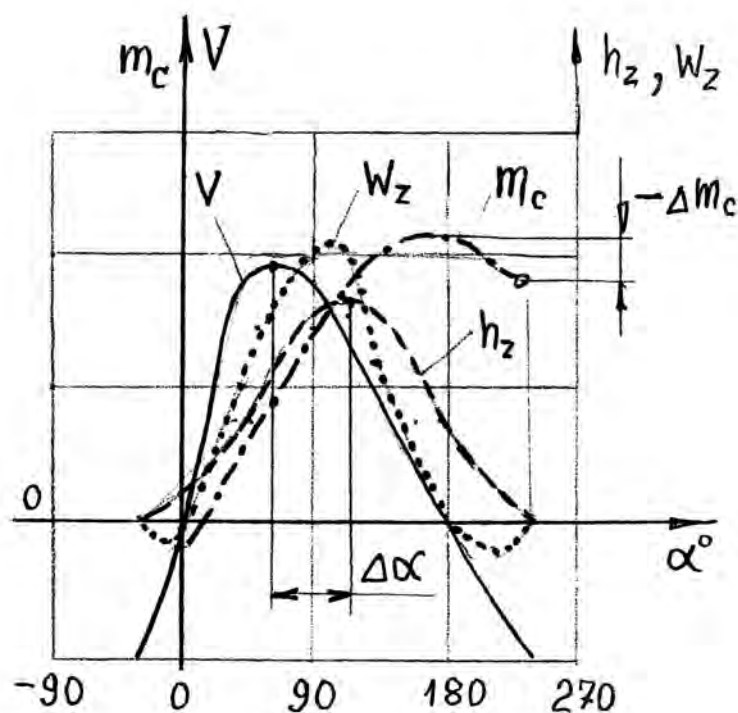


Rys. 7. Zależność kątów skręcania  $\varphi$  wału korbowego w zakresie rezonansowym prędkości obrotowej  $n_s$  silnika z częstotliwością wymuszeń  $n_M$  pulsujących momentu obrotowego

Zagrożenia uszkodzenia wału przenoszącego pulsujący moment obrotowy silnika na śmigło wynikają z ewentualności wystąpienia rezonansu drgań – przedstawionego na rys. 6. Dla ograniczenia możliwości uszkodzeń z tego powodu stosowano dawniej dość powszechnie tłumiki drgań o zróżnicowanych ideach tłumienia: od podatnych sprzęgieł sprężynowych, hydraulicznych do bezwładnościowych. W każdym przypadku uzyskiwano radykalne zmniejszenie amplitud - rys. 7, a niekiedy także przemieszczenie zakresu rezonansowej prędkości obrotowej poza zakres roboczy silnika.



Rys. 8. Zasada działania bezwładnościowego tłumika drgań skrętnych i wykorzystania wahadłowo zamocowanego przeciwcieżaru na wale korbowym.  
 1 - wał korbowy, 2 - przeciwcieżar, 3 - rolka przeciwcieżaru



Rys. 9. Zależność prędkości tłoka  $V$ , wzniosu zaworu dolotowego  $h_z$ , prędkości przepływu powietrza  $W_z$  przez szczelinę zaworową oraz bieżącej zawartości masy  $m_c$  powietrza zassanego do cylindra od położenia kąтового wału korbowego suwu podczas napełniania.

W okresie II-ej wojny światowej rozpowszechnił się (głównie w silnikach gwiazdowych) typ tłumika bezwładnościowego polegającego na wahadłowym zawieszeniu przeciwmasy wyważeniowej na wale korbowym silnika – rys. 8. Zaletę tych tłumików stanowi brak poboru energii do ich działania oraz możliwości dostrajania częstotliwości wahań (na drodze wyboru „długości” wahadła) przez właściwy dobór średnicy  $D$  w ramieniu wału korbowego i przeciwmasy oraz średnicy  $d$  sworznia osadzonego w tych otworach. Ponadto częstotliwość wahań tłumika zmienia się proporcjonalnie do prędkości obrotowej wału na którym osadzony jest tłumik – co czyni go tłumikiem „całozakresowym” pracy silnika.

Skomplikowana kinematyka przemieszczającego się posuwisto – zwrotnie tłoka w cylindrach silnika i związanego „sztywno” z nim mechanicznie napędu zaworów rozrządu silnika wpływa na skomplikowanie przepływu powietrza (lub mieszanki palnej) przez zmieniające się szczeliny zaworów dolotowych i spalin przez zawory wylotowe. Na rys. 9 przedstawiono zależności prędkości tłoka  $V$  i wzniosu  $h_z$  zaworu dolotowego od kąтового położenia  $\alpha$  wału korbowego podczas suwu ssania silnika niedoładowanego. Już z pierwszego spojrzenia wynika, że wartości maksymalnej prędkości tłoka nie pokrywają się kątowo z maksymalnym wzniosem zaworu dolotowego. Ma to poważne konsekwencje w procesie napełniania cylindra tzw. „świeżym” ładunkiem. Podobnie jak uchylanie się zaworu przed zewnętrznym zwrotem tłoka i domykanie po zwrocie wewnętrznym tłoka.

W obu przypadkach występują przepływy zwrotne (z cylindra) co charakteryzuje na rys.9 prędkość przepływu  $W_z$  przez szczelinę zaworową. Szczególnie duża strata (ubytek) już zaszanego do cylindra ładunku  $m_c$  jest wynikiem wypchnięcia części ładunku  $\Delta m_c$  powrotem do kanału dolotowego silnika podczas rozpoczynającego się suwu sprężania. Powyżej opisane procesy wskazują na potrzebę głębszego opracowania naukowego procesów towarzyszących wymianie ładunku w cylindrach silników tłokowych.

## LITERATURA

- [1] **Balicki W., Kawalec K., Pągowski Z., Szczeciński J., Szczeciński S.:** *Historia i perspektywy rozwoju napędów lotniczych*. Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2005.
- [2] **Bohner C.:** *Der Flugmotor*. Berlin, 1943.
- [3] **Dzierżyński P., Łyżwiński M., Szczeciński S.:** *Napędy lotnicze. Silniki tłokowe*. WKiŁ, Warszawa, 1981.
- [4] **Januła J., Szczeciński J., Szczeciński S.:** *Poprawa ekonomiczności i dynamiki samochodów osobowych*. III Wyd., WKiŁ, Warszawa, 1989.
- [5] **Maslennikow M., Rppiort M.:** *Awiacjonnyje porszniewyje dwigatieli*. Oborongiz, Moskwa, 1951.
- [6] **Niewiarowski K.:** *Tłokowe silniki spalinowe*. WKiŁ, Warszawa, 1989.