ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1967
Seria: ENERGETYKA z. 25 Nr kol. 181

ERYK PRUGAR
Katedra Cieplnych Maszyn Tłokowych

NOWE KONCEPCJE KONSTRUKCYJNE 3-CYLINDROWYCH 2-SUWOWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH TYPU TRAKCYJNEGO*)

Streszczenie. Praca traktuje o zaletach i korzystniejszej technologiczności nowych konstrukcji 3-cylindrowych, 2-suwowych silników spalinowych o zapłonie iskrowym, z wstępnym sprężaniem mieszanki paliwowo-powietrznej w skrzyni korbowej.

1. WSTĘP

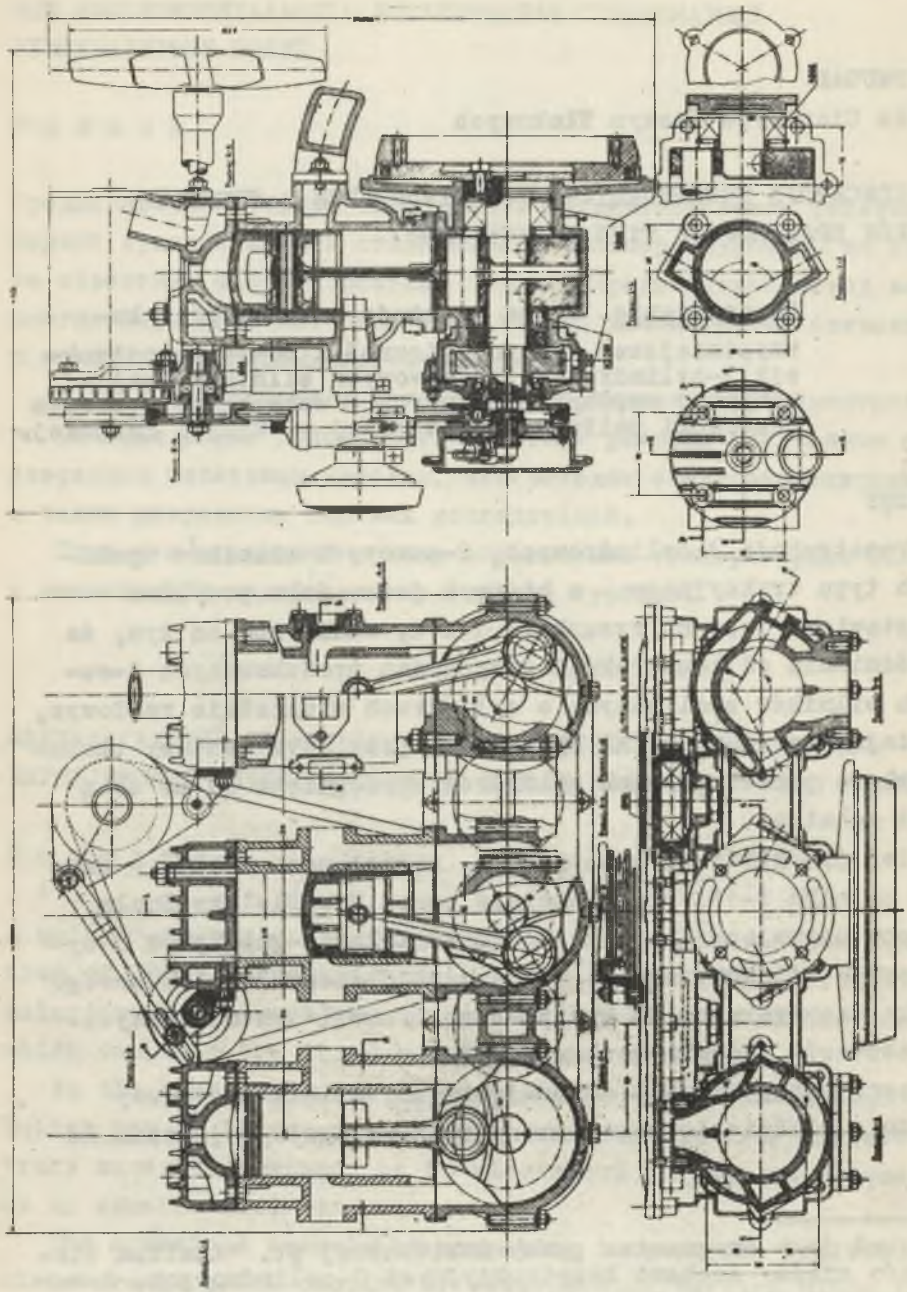
Nowe konstrukcje 3-cylindrowych, 2-suwowych silników spalinowych typu trakcyjnego - z których jedna jako przykład przedstawiona jest na rysunkach 1 i 2, znamienne są tym, że w odróżnieniu od konstrukcji dotychczas produkowanych 2-suwowych silników spalinowych o cylindrach w układzie rzędowym, posiadają szeregowy układ cylindrów, przy czym zestawy tłokowo-korbowe poszczególnych cylindrów sprzęgnięte są ze sobą kołami zębatymi.

W tej przykładowej konstrukcji, zastosowano niektóre części z silnika S-15, produkowanego przez WSM Bielsko-Biała. Powyższe uczyniono dla możliwości porównania gabarytów 3-cylindrowego silnika rzędowego i projektowanego 3-cylindrowego silnika szeregowego, do których konstrukcji użyto identycznych zestawów tłokowo-korbowych.

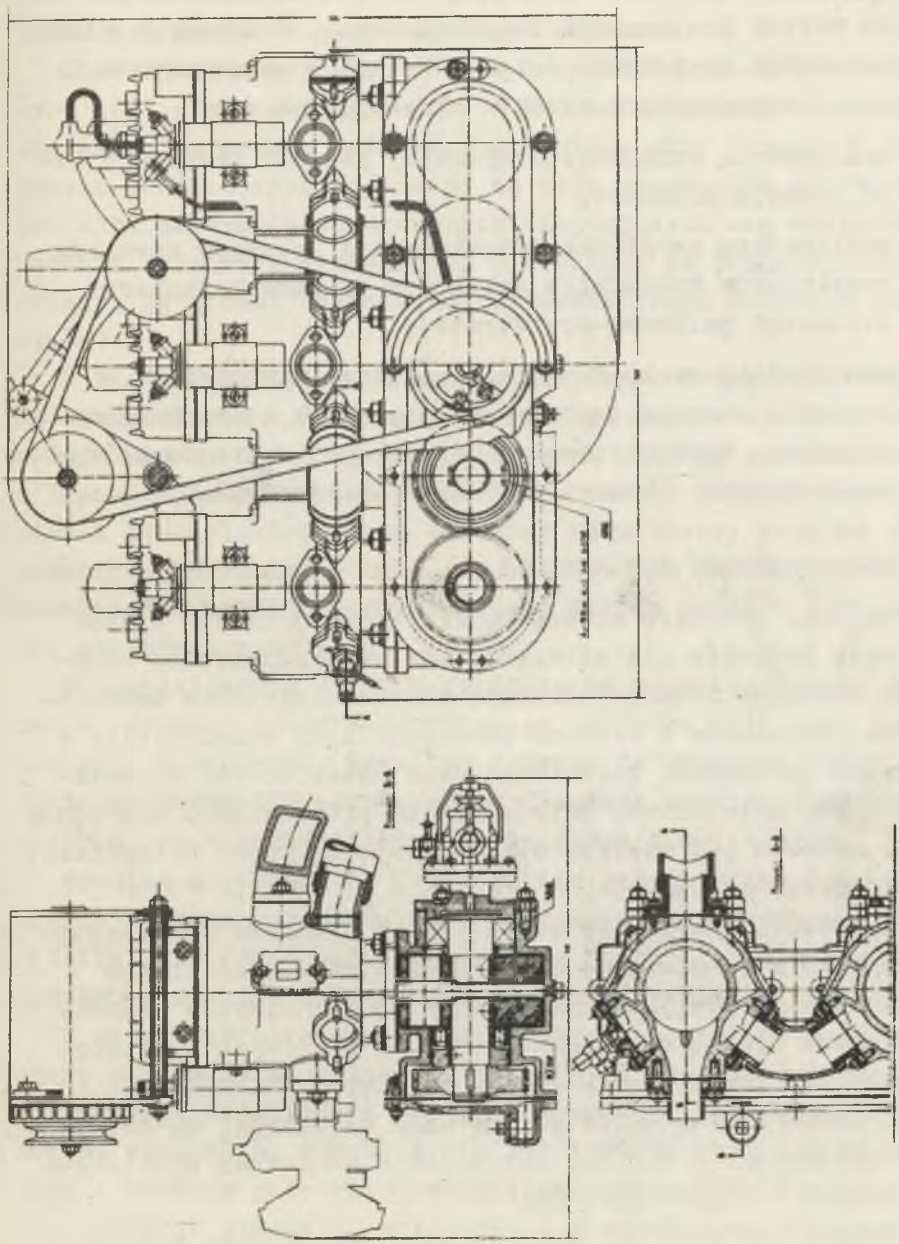
Z porównania wynika, że projektowany silnik szeregowy swobodnie mieści się w miejscu przewidzianym w pojeździe na

---

*) Artykuł jest fragmentem pracy doktorskiej pt. "Analiza stosunków między cechami konstrukcyjnymi 3-cylindrowych, 2-suwowych silników spalinowych typu trakcyjnego". Promotorem pracy był prof. mgr inż. Kazimierz Szawłowski.



Rys. 1. Projektowany silnik spalinowy 3-cylindrowy 2-suwowy o zapłonie iskrowym (przekrój poprzeczny i podłużny



Rys. 2. Projektowany silnik spalinowy 3-cylindrowy 2-suwowy o zapłonie iskrowym (częściowe przekroje i widoki)

identyczny silnik rzędowy, przy czym znacznie mniejsza długość silnika szeregowego pozwala na zwiększenie powierzchni użytkowej pojazdu.

Celem nowych konstrukcji 3-cylindrowych, 2-suwowych silników spalinowych typu trakcyjnego w układzie szeregowym było osiągnięcie zamierzonych skutków wyrażających się:

1) możliwością osiągnięcia wysokiej jakości produkcji tego rodzaju silników,

2) możliwością uzyskania jednakowych i lepszych warunków napełniania wszystkich cylindrów silnika ładunkiem mieszanki paliwowo-powietrznej,

3) możliwością wyeliminowania względnie złagodzenia w znacznym stopniu skutków niepożądanych zjawisk dynamicznych, występujących podczas pracy zestawów tłokowo-korbowych, tłokowego silnika spalinowego.

1. TECHNOLOGICZNOŚĆ KONSTRUKCJI

Przy analizie przyczyn niewspółmiernie dużej liczby braków w odlewach kadłubów dla silników S-31 stwierdzono, że ustalone po żmudnych i czasochłonnych obliczeniach oraz doświadczeniach, położenia i wymiary poszczególnych okienek były w większości przypadków niedotrzymywane przez trudne do uniknięcia błędy odlewnicze, polegające na przesunięciu względnie wyporze rdzenia pod naporem wpływającego do formy odlewniczej roztopionowego żeliwa.

Od zgodności wzajemnego położenia i wymiarów poszczególnych okienek z założeniami konstrukcyjnymi w zasadniczym stopniu zależy rozwijana przez silnik moc i zużycie paliwa. Z powyższych względów wysokości okienek wlotowych i wylotowych oraz odległości ich krawędzi od górnej płaszczyzny skrzyni korbowej względnie od osi wału korbowego, są tolerowane w granicach: $\pm$ 0,5 mm, natomiast dla okienek dolotowych w granicach: $\pm$ (0,15-0,20) mm.

Uzyskanie tak wysokich dokładności bezpośrednio w odlewie piaskowym kadłuba jest bardzo trudne, możliwość zachowania

tych stosunkowo zawężonych pól tolerancyjnych daje dodatkowa obróbka wykończeniowa, polegająca na korekcji kształtu, położenia i wymiarów poszczególnych okienek.

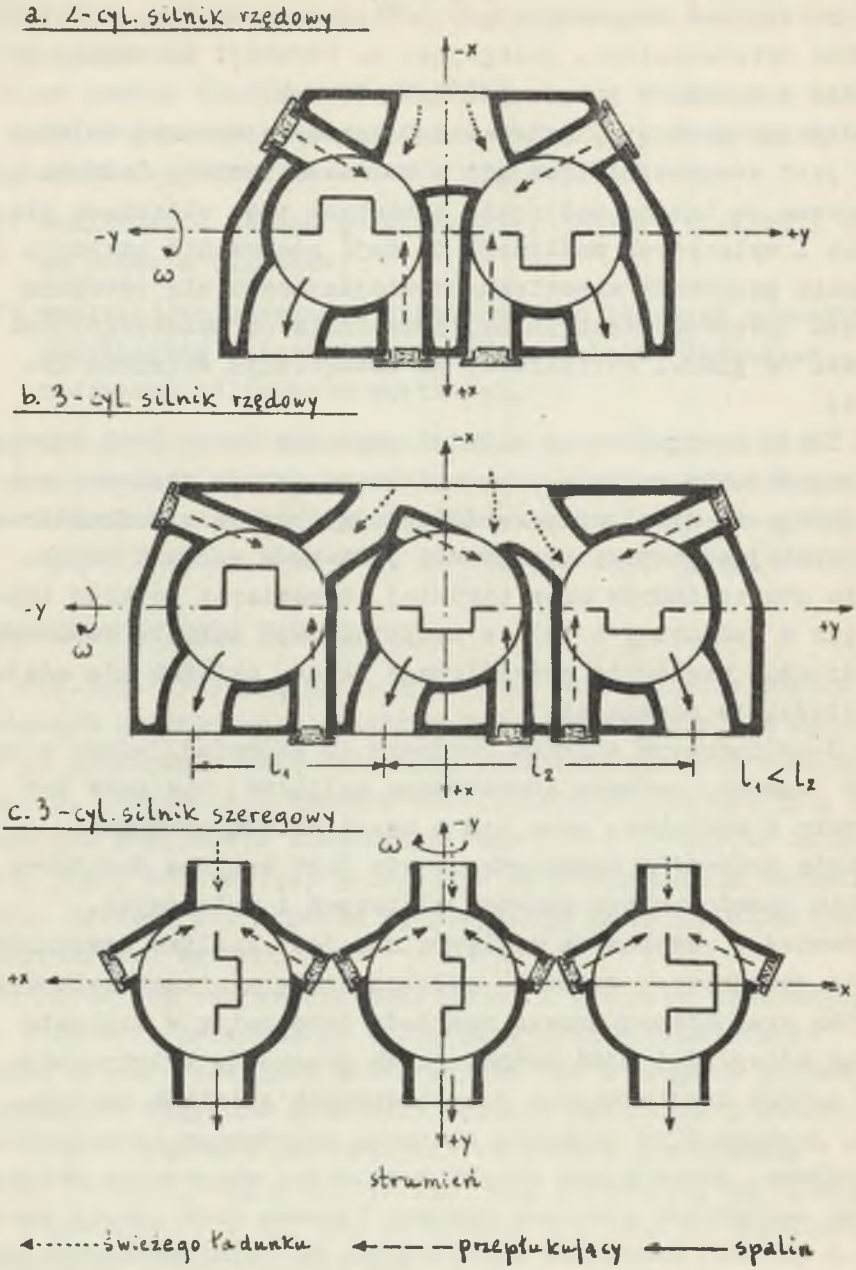
Korekcja kształtu, położenia i wymiarów okienek dolotowych jest wówczas możliwa gdy w kanałach wymiany ładunku stosowane są boczne zaślepki, natomiast przy okienkach wlotowych i wylotowych możliwość tę daje stosowanie prostych i krótkich przewodów wewnętrznych znajdujących się wewnątrz kadłuba (przewody wewnętrzne, prowadzące od poszczególnych okienek na gładzi cylindrowej ku zewnętrznym ściankom kadłuba).

O ile w 2-cylindrowym silniku rzędowym łatwo jest rozwiązać zagadnienie względnie prawidłowego układu okienek, zezwalającego na wyżej opisaną dodatkową obróbkę wykończeniową i zapewniającego przy tym prawie jednakowe warunki napełniania obu cylindrów oraz bardziej równomierny rozkład temperatur w kadłubie, o tyle w 3,cylindrowym silniku rzędowym zagadnienia względnie prawidłowego układu okienek nie udaje się właściwie rozwiązać.

W 3-cylindrowym silniku rzędowym co najmniej jednej z kanałów wymiany ładunku (środkowego cylindra) nie może być wykonany z zaślepką, poza tym z uwagi na skomplikowane kształty przewodów wewnętrznych nie jest możliwa dodatkowa obróbka wykończeniowa okienek wlotowych i wylotowych.

Również z powyższych względów nie jest możliwe uzyskanie prawie jednakowych warunków napełniania wszystkich cylindrów silnika oraz równomiernego rozkładu temperatur w kadłubie (różne odległości ujść wewnętrznych przewodów wylotowych).

W nowych konstrukcjach 3,cylindrowych silników szeregowych, poszczególne cylindry stanowią pojedyncze (powtarzalne) odlewy, zezwalające dzięki możliwości stosowania zaślepek we wszystkich kanałach wymiany ładunku oraz dzięki prostym i krótkim przewodom wewnętrznym, na łatwe przeprowadzenie korekcji kształtu, położenia i wymiarów wszystkich okienek.



Rys. 3. Układy okienek i przewodów wewnętrznych w kadłubie 2-cylindrowego silnika rzędowego, w kadłubie 3-cylindrowego silnika rzędowego i w cylindrach 3-cylindrowego silnika szeregowego (projektowanego)

Na rysunku 3 przedstawiono, dla możliwości porównania, układy poszczególnych okienek i przewodów wewnętrznych:

a) w kadłubie 2-cylindrowego silnika rzędowego,

b) w kadłubie 3-cylindrowego silnika rzędowego,

c) w cylindrach 3-cylindrowego silnika szeregowego (projektowanego).

Z uwagi na prosty i łatwy odlew pojedynczych cylindrów, przy których nie zachodzi potrzeba stosowania skomplikowanych rdzeni oraz ze względu na łatwe przeprowadzenie korekcji kształtu, położenia i wymiarów poszczególnych okienek, przy produkcji tego typu silników nie powinno być praktycznie żadnych braków, powodowanych jak dotychczas przy silnikach rzędowych, nieudanym odlewem kadłuba. Powyższe umożliwi osiągnięcie wysokiej jakości produkcji 3-cylindrowych 2-suwowych silników spalinowych typu trakcyjnego, budowanych według nowej konstrukcji.

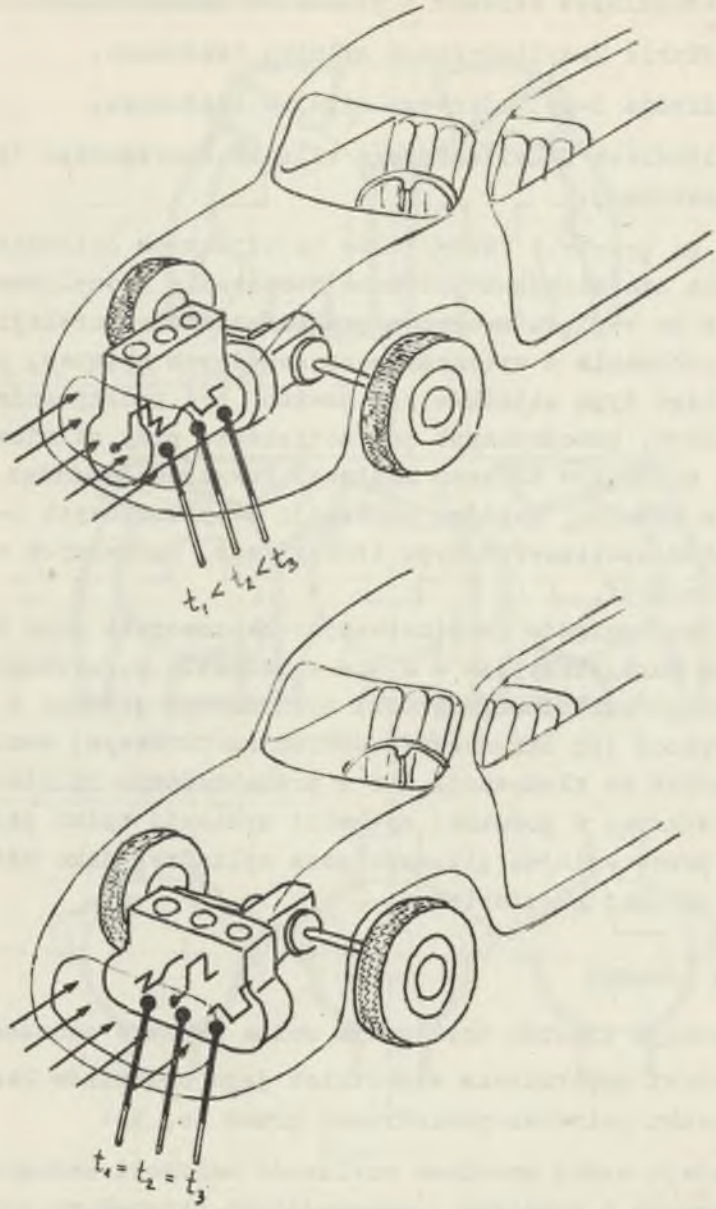
Również ze względów eksploatacyjno-naprawczych nowe konstrukcje są korzystniejsze - o ile w kadłubie 2-suwowego silnika rzędowego uszkodzenie gładzi cylindrowej jednego z cylindrów (np. przez jej zarysowanie sworzniem tłokowym) kwalifikuje cały kadłub do złomowania, to w projektowanym silniku szeregowym wystarczy w podobnej sytuacji wymienić tylko jeden z cylindrów pozostawiając nieuszkodzone cylindry, jako nadające się do dalszej eksploatacji.

2. WYMIANA ŁADUNKU

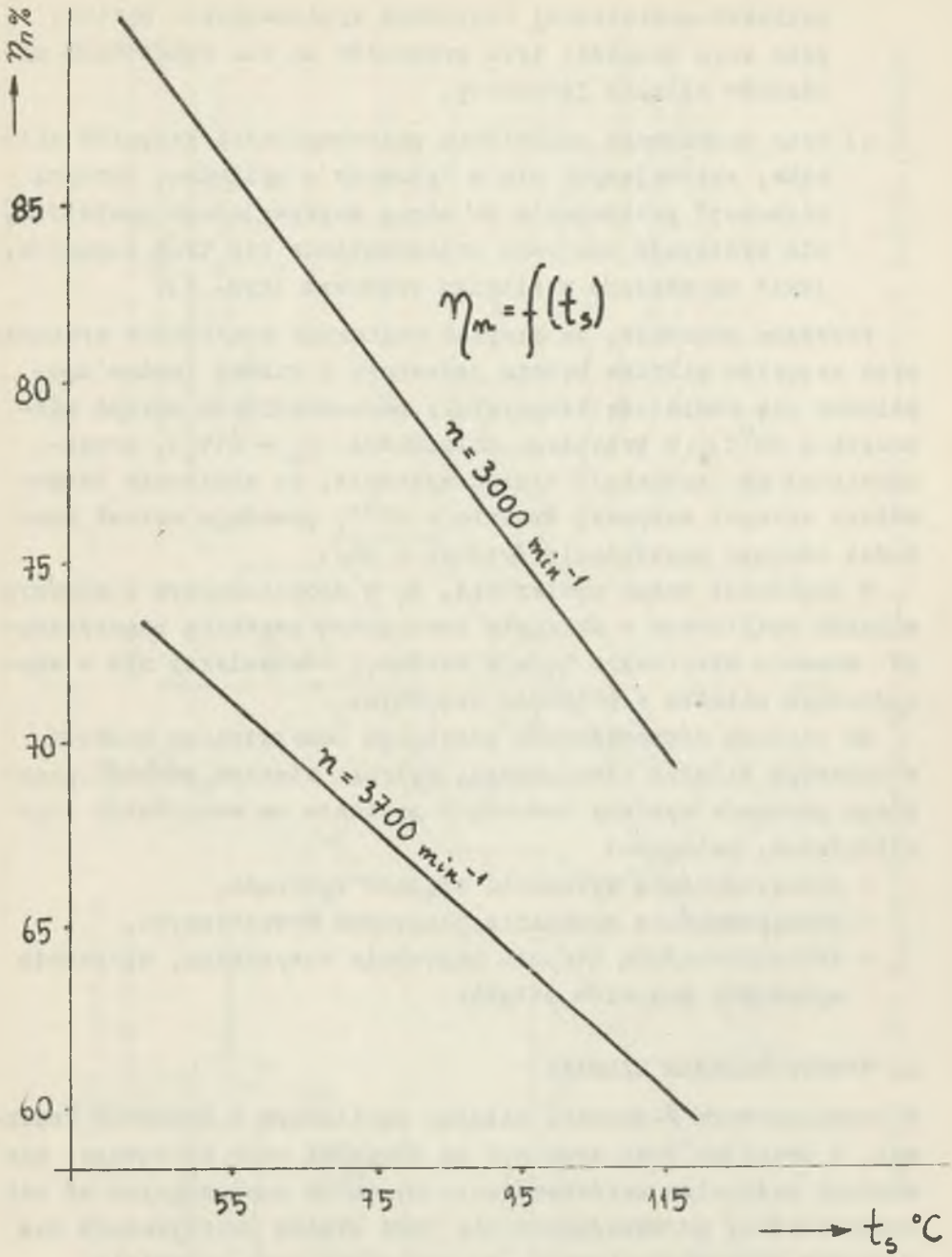
W projektowanym silniku szeregowym można uzyskać jednakowe i lepsze warunki napełniania wszystkich jego cylindrów ładunkiem mieszanki paliwowo-powietrznej przez to, że:

a) istnieje wyżej omówiona możliwość korekcji kształtu, położenia i wymiarów poszczególnych okienek we wszystkich cylindrach silnika,

b) kształt wewnętrznych przewodów jest prosty, nie powoduje odchylenia strug napływającego ładunku mieszanki



Rys. 4. Rozkład temperatur w kadłubie 3-cylindrowego silnika rzędowego oraz szeregowego (projektowanego)



Rys. 5. Zależność pomiędzy stopniem napełniania i temperaturą skrzyni korbowej

paliwowo-powietrznej względnie wypływających spalin, przy czym długości tych przewodów są dla wszystkich cylindrów silnika jednakowe,

c) przy szeregowym ustawieniu poszczególnych zespołów silnika, składających się z "głowicy - cylindra, skrzyni korbowej" prostopadle do strug napływającego powietrza, nie występuje wzajemne przesłanianie się tych zespołów, jakie ma miejsce w silniku rzędowym (rys. 4).

Powyższe powoduje, że stopień nagrzania wszystkich wymienionych zespołów silnika będzie jednakowy i niższy (można spodziewać się obniżenia temperatury poszczególnych skrzyń korbowych o 20°C). Z przebiegu zależności $\eta_n = f(t_s)$, przedstawionej na rysunku 5 wynika wyraźnie, że obniżenie temperatury skrzyni korbowej średnio o 20°C, powoduje wzrost wartości stopnia napełniania średnio o 5%.

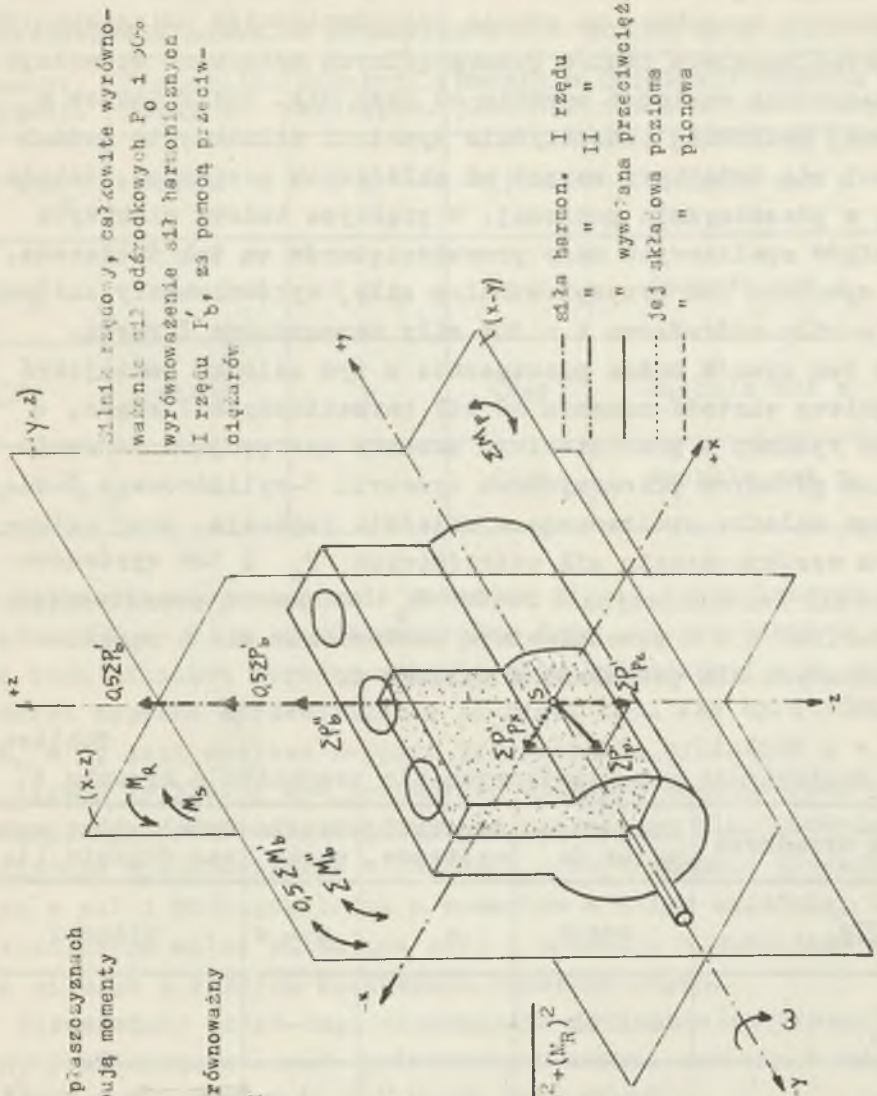
W konkluzji można stwierdzić, że w 3-cylindrowym 2-suwowym silniku spalinowym o układzie szeregowym przebieg sumarycznego momentu obrotowego będzie bardziej równomierny niż w analogicznym silniku o układzie rzędowym.

Na większą równomierność przebiegu sumarycznego momentu obrotowego silnika szeregowego, wpłynie większa równość przebiegu procesów wymiany ładunku i spalania we wszystkich jego cylindrach, osiągana:

- identycznością wykonania organów rozrządu,
- identycznością wykonania przewodów wewnętrznych,
- równomiernością stopnia nagrzania wszystkich, uprzednio opisanych zespołów silnika.

3. WYRÓWNOWAŻENIE SILNIKA

W 3-cylindrowym 2-suwowym silniku spalinowym o układzie rzędowym, z uwagi na brak symetrii na długości wału korbowego, nie wystąpi naturalne wyrównoważenie momentów pochodzących od sił bezwładności, pojawiających się jako skutek przyspieszeń mas zestawów tłokowo-korbowych, wykonujących ruch posuwisto-zwrotny.



Rys. 6. Momenty od sił masowych występujące w 3-cylindrowym 2-suwowym silniku rzędowym

Jakkolwiek sztuczne wyrównoważenie sił harmonicznych I rzędu prostym sposobem, za pomocą przeciwciężarów umieszczonych na przedłużeniach ramion poszczególnych wykorbień spowoduje zmniejszenie wartości momentu od tych sił, działających w głównej podłużnej płaszczyźnie symetrii silnika, to jednak pojawi się dodatkowy moment od składowych poziomych, działający w płaszczyźnie poziomej. W praktyce budowy tłokowych silników spalinowych masy przeciwciężarów są tak dobierane, aby wywołane ich przyspieszaniem siły, wyrównoważały całkowicie siły odśrodkowe i w 50% siły harmoniczne I rzędu.

W ten sposób można praktycznie w tym silniku zmniejszyć do połowy wartość momentu od sił harmonicznych I rzędu.

Na rysunku 6 przedstawiono momenty występujące we wszystkich głównych płaszczyznach symetrii 3-cylindrowego 2-suwowego silnika spalinowego o układzie rzędowym, przy całkowitym wyrównoważeniu sił odśrodkowych P_o i 50% wyrównoważeniu sił harmonicznych I rzędu P'_b za pomocą przeciwciężarów.

Tablica 1 i 2 przedstawiają zestawienie sił i momentów wypadkowych dla przykładu z rysunku 6.

Tablica 1

Zestawienie sił wypadkowych dla przykładu z rysunku 6

Siła wypadkowa	Proporcjonalna do	Częstotl. występow.	Działa w osi	Dział. siły wymusza drgania lin.
$\frac{1}{2}\ \Sigma P'_b$	$\cos\alpha$	n	z - z	pionowe
$\Sigma P''_b$	$\cos 2\alpha$	2 n	z - z	pionowe
$\Sigma P'_p$ jej skład. pion. $\Sigma P'_{pz} = \frac{1}{2}\ \Sigma P'_b$ jej skład poz. $\Sigma P'_{px}$	$\sin\alpha$	n	x - x	poziome

Tablica 2

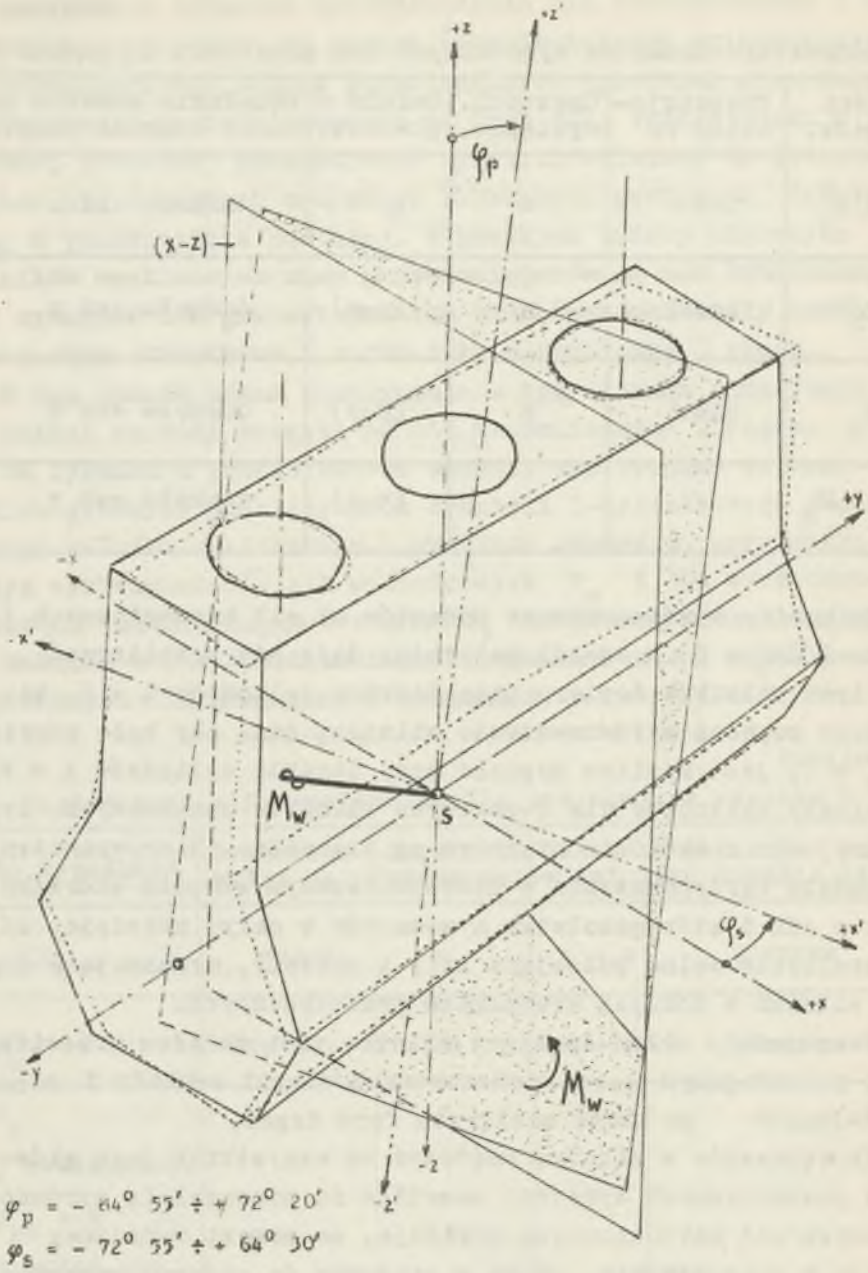
Zestawienie momentów wypadkowych dla przykładu z rysunku 6

Moment wypadk.	Proporcjonalny do	Częstotl. występow.	Działa w płaszcz.	Działanie momentu wymusza drgania skrętne
$\frac{1}{2}\Sigma M_b'$	$\cos\alpha$	n	(y-z)	dookoła osi x
$\Sigma M_b''$	$\cos 2\alpha$	2 n	(y-z)	dookoła osi x
ΣM_p	$\sin\alpha$	n	(x-y)	dookoła osi z
$M_s = M_R$			(x-z)	dookoła osi y

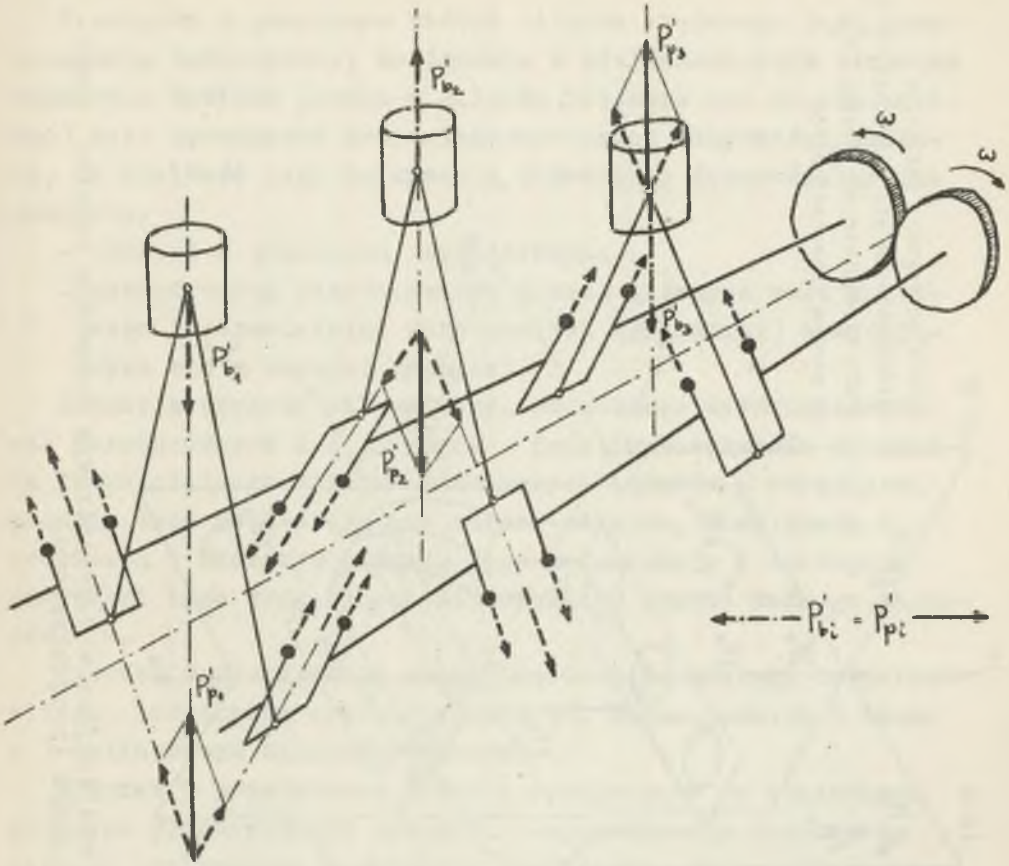
Całkowite wyrównoważenie momentów od sił harmonicznych I rzędu ($\Sigma M_b' = 0$) w sposób naturalny daje się zrealizować dla tych silników dopiero przy liczbie cylindrów i = 6, natomiast zupełne wyrównoważenie silnika, tzn. aby było również $\Sigma M_b'' = 0$, jest możliwe dopiero przy liczbie cylindrów i = 12. Te liczby cylindrów dla 2-suwowych silników spalinowych, typu trakcyjnego o układzie rzędowym są nierealne. Nierównoważenie względnie wyrównoważenie w niedostatecznym stopniu którejkolwiek z sił i któregokolwiek z momentów w całym układzie, daje w rezultacie wolne pulsujące siły i momenty, wymuszające drgania silnika w różnych kierunkach przestrzennych.

Rzeczywisty układ drgający silnika jest układem przestrzennym, posiadającym sześć podstawowych stopni swobody i odpowiadających im sześć możliwych form drgań.

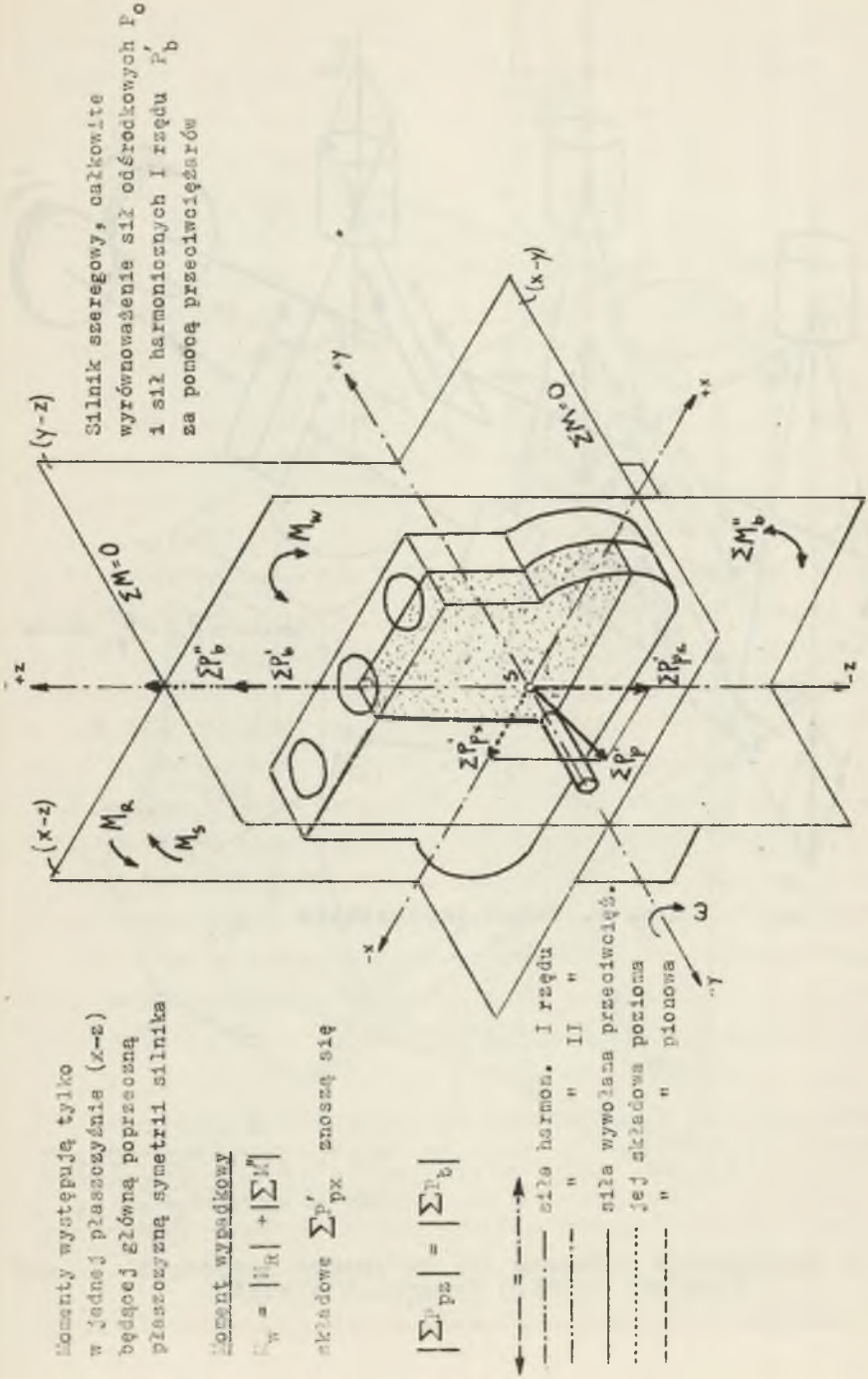
Występowanie w silniku rzędowym we wszystkich jego głównych płaszczyznach symetrii momentów od niezupełnie wyrównoważonych sił harmonicznych powoduje, że moment wypadkowy działa w płaszczyźnie, która w stosunku do głównej poprzecznej płaszczyzny symetrii zmienia stale swoje położenie określone na rysunku 7 kątami: pochylenia φ_p i skrętu φ_s.



Rys. 7. Wypadkowy moment od sił masowych występujący w 3-cylindrowym 2-suwowym silniku rzędowym



Rys. 8. Układ Lanchestera



Rys. 9. Momenty od sił masowych występujące w 3-cylindrowym 2-suwowym silniku szeregowym (projektowanym)

Wartości tych kątów zmieniają się w stosunkowo szerokich granicach.

W związku z powyższym kadłub silnika rzędowego jest przestrzennie deformowany, co łącznie z nierównomiernym stopniem nagrzania kadłuba (czego w silniku rzędowym nie da się uniknąć) może spowodować przy niedostatecznej sztywności kadłuba, że wielkość jego deformacji przekroczy dopuszczalny luz pomiędzy:

- tłokami i gładziami cylindrowymi,
- zewnętrznymi pierścieniami łożysk głównych wału korbowego i odpowiednimi wytoczeniami (gniazdami) znajdującymi się w skrzyni korbowej.

Istnieją sposoby całkowitego, sztucznego wyrównoważenia sił harmonicznych I i II rzędu - przez wprowadzenie do układu funkcjonalnego silnika dodatkowych układów z wirującymi masami, lecz zwiększają one ciężar silnika, komplikują i podrażają w znacznym stopniu jego konstrukcję i dlatego w silnikach typu trakcyjnego nie znalazły prawie żadnego zastosowania.

Rysunek 8 przedstawia układ Lanchestera służący do całkowitego, sztucznego wyrównoważenia sił harmonicznych I rzędu w 3-cylindrowym silniku rzędowym.

Rysunek 9 przedstawia momenty występujące we wszystkich głównych płaszczyznach symetrii 3-cylindrowego 2-suwowego silnika spalinowego o układzie szeregowym, przy całkowitym wyrównoważeniu sił odśrodkowych P_o i całkowitym wyrównoważeniu sił harmonicznych I rzędu, za pomocą przeciwciężarów.

Tablice 3 i 4 przedstawiają zestawienie sił i momentów wypadkowych dla przykładu z rysunku 9.

Tablica 3

Zestawienie sił wypadkowych dla przykładu z rysunku 9

Siła wypadk.	Proporcjonalna do	Częstotl. występow.	Działa w osi	Działanie siły wymusza drgania liniowe
$\Sigma p_b''$	cos 2α	2 n	z-z	pionowe

Tablica 4

Zestawienie momentów wypadkowych dla przykładu z rysunku 9

Moment wypadk.	Proporcjonalny do	Częstotl. występow.	Działa w płaszcz.	Działanie momentu wymusza drgania skrętne
$\Sigma M_b''$	cos 2α	2 n	(x-z)	dookoła osi y
$M_s = M_R$			(x-z)	dookoła osi y

4. WNIOSKI

A. Nowe konstrukcje 3-cylindrowych 2-suwowych silników spalinowych o układzie szeregowym w porównaniu z dotychczasowymi konstrukcjami takich silników lecz o układzie rzędowym, odznaczają się korzystniejszą technologicznością. Korzystniejsza technologiczność nowych konstrukcji polega na większej prostocie procesu technologicznego, osiąganej przez:

a) prostotę kształtu geometrycznego poszczególnych cylindrów silnika, stanowiących pojedyncze (powtarzalne) łatwe do wykonania odlewy,

b) możliwość łatwej do przeprowadzenia korekcji kształtu, położenia i wymiarów wszystkich okienek znajdujących się na gładzi cylindrowej,

c) możliwość zredukowania do minimum braków powodowanych błędami odlewniczymi.

B. W projektowanych silnikach o układzie szeregowym przebieg sumarycznego momentu obrotowego będzie bardziej równomierny niż w analogicznych silnikach lecz o układzie rzędowym.

Na większą równomierność przebiegu sumarycznego momentu obrotowego silników o układzie szeregowym, wpłynie większa równość przebiegu procesów wymiany ładunku i spalania we wszystkich jego cylindrach, osiągana:

a) identycznością wykonania organów rozrządu,

b) identycznością wykonania przewodów wewnętrznych.

c) równomiernością stopnia nagrzania poszczególnych zespołów silnika, składających się z "głowicy - cylindra - skrzyni korbowej".

C. Z porównania zestawień sił i momentów wypadkowych, przedstawionych w tablicach 1,2, 3 i 4 wyraźnie wynika, że w 3-cylindrowym 2-suwowym silniku spalinowym o układzie szeregowym:

a) jest możliwe całkowite wyrównoważenie sił harmonicznych I rzędu, a dzięki temu również całkowite wyrównoważenie momentów od tych sił, za pomocą przeciwciężarów umieszczonych na przedłużeniach ramion poszczególnych wykorbień, czego nie da się osiągnąć w silniku rzędowym bez pojawienia się ujemnych skutków w postaci momentu M_p, działającego w płaszczyźnie poziomej.

W związku z powyższym warunek: $\Sigma M_b' = 0$ daje się zrealizować już przy liczbie cylindrów i = 3, dla przypomnienia warunek ten przy silniku rzędowym występuje dopiero przy liczbie cylindrów i = 6,

b) płaszczyzna działania momentu wypadkowego pokrywa się stale z główną poprzeczną płaszczyzną symetrii silnika. W związku z powyższym w silniku szeregowym nie wystąpią takie deformacje, jakim podlegał kadłub silnika rzędowego,

c) nie występują ani drgania liniowe, ani drgania skrętne takie, z którymi mamy do czynienia w silniku rzędowym, a które wymuszane są nie dającymi się zupełnie wyrównoważyć siłami harmonicznymi I rzędu.

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ КОНЦЕПЦИИ 3-ЦИЛИНДРОВЫХ 2-ХОДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ТРАКЦИОННОГО ТИПА

Р е з ю м е

В работе указывается на достоинства и более полезные технологические преимущества новых конструкции 3-цилиндровых, 2-ходовых двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием, с предварительным сжатием топливно-воздушной смеси в картере.

NEW CONSTRUCTION IDEAS OF 3 CYLINDER TWO STROKE TRACTION TYPE COMBUSTION ENGINES

S u m m a r y

The paper discusses high qualities and more efficient technology of the new 3 cylinder two stroke combustion engines suplied with a spark ignition and an initial compression of a petrol-air mixture in the crankshaft casing.