

Zbigniew Korczewski
Marcin Zacharewicz
Akademia Marynarki Wojennej

DIAGNOSTYKA SYMULACYJNA UKŁADU TURBODOŁADOWANIA OKRĘTOWEGO TŁOKOWEGO SILNIKA SPALINOWEGO

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono model matematyczny procesów gazodynamicznych zachodzących w kanale spalin wylotowych silnika okrętowego z turbodoładowaniem. W pierwszej części artykułu opisano metodykę prowadzenia badań diagnostycznych na obiekcie rzeczywistym. Omówiono w nim aparaturę pomiarową stosowaną do badań, a na schemacie realizacji badań umiejscowiono aktualnie rozpracowane zagadnienia. W dalszej części opisano obiekt rzeczywisty oraz bazujący na nim model fizyczny. Ostatnią część artykułu stanowi opis modelu matematycznego procesów gazodynamicznych zachodzących w kanale wylotowym silnika. Model ten umożliwia wyznaczenie wybranych parametrów stanu czynnika w dowolnym przekroju charakterystycznym kanału.

Słowa kluczowe:

modelowanie, turbodoładowanie, okrętowe tłokowe silniki spalinowe, model fizyczny, model matematyczny.

Parametry:

- c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu
- c_v – ciepło właściwe przy stałej objętości
- D – średnica cylindra
- i – entalpia właściwa
- l – długość korbowodu
- m – masa
- M – moment obrotowy
- \dot{m} – masowe natężenie przepływu
- p – ciśnienie

R	– indywidualna stała gazowa
r	– długość ramienia wykorbienia korbowodu
T	– temperatura bezwzględna w skali Kelvina
t	– temperatura w skali Celsjusza
u	– energia wewnętrzna
V	– objętość
w	– prędkość liniowa
x	– przesunięcie tłoka, długość
α	– kąt obrotu wału korbowego
ε	– kąt przesunięcia fazy pomiędzy cylindrami
μ	– współczynnik przepływu
λ	– współczynnik nadmiaru powietrza
ρ	– gęstość
τ	– czas
χ	– wykładnik izentropy
ω	– prędkość kątowna wału korbowego

Skróty i indeksy:

CH	– chłodnica
OTSS	– okrętowy tłokowy silnik spalinowy
S	– sprężarka
T	– turbina
1, 2, 3	– kolejny numer cylindra
1–1	– przekrój zaworu wylotowego cylindra nr 1
2–2	– przekrój zaworu wylotowego cylindra nr 2
3–3	– przekrój zaworu wylotowego cylindra nr 3
cyl	– cylinder
k	– przekrój kontrolno-pomiarowy
kan	– kanał
ks	– komora spalania
n	– krok obliczeń
n–1	– poprzedni krok obliczeń
pocz	– parametry początkowe
pow	– powietrze
sp	– spaliny
sum	– suma wartości parametrów
śr	– średnia wartość parametru
T	– turbina
zaw	– zawór wylotowy
zturb	– parametr z turbiny
1–1, 1–2, 1–3	– dotyczy przekrojów kontrolnych kanału spalin wylotowych odpowiednio na wyjściu z 1., 2. i 3. kanału zasilającego

WSTĘP

Jednym z istotniejszych problemów badawczych podejmowanych aktualnie w Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów (IKiEO) Akademii Marynarki Wojennej (AMW) jest opracowanie metody diagnozowania okrętowych tłokowych silników spalinowych (OTSS) z turbodoładowaniem na podstawie parametrów gazodynamicznych czynnika w kanale spalin wylotowych. Opracowywana metoda może znaleźć zastosowanie do diagnozowania silników niewyposażonych standardowo w zawory indykatorowe. W ostatnich latach silniki takie zostały wdrożone do eksploatacji na okrętach Marynarki Wojennej RP zarówno jako silniki napędu głównego, jak i silniki pomocnicze elektrowni okrętowych.

Istotą realizowanych badań jest określenie relacji diagnostycznych pomiędzy parametrami stanu czynnika termodynamicznego w kanale spalin wylotowych a zmianami wartości parametrów struktury przestrzeni roboczych silnika.

Jednym z początkowych etapów pracy badawczej było opracowanie modelu matematycznego procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych OTSS. Model ten wykorzystywany jest do badań symulacyjnych wpływu stanu technicznego wybranych elementów OTSS na przebiegi wartości parametrów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych jako funkcji czasu.

W środowisku specjalistów zajmujących się tłokowymi silnikami spalinowymi znane są opracowania dotyczące modelowania procesów gazodynamicznych w układzie wymiany ładunku silników z turbodoładowaniem. Szeroko znane w środowisku badaczy są monografie C. Kordzińskiego dotyczące teoretycznych podstaw zjawisk pulsacyjnych w układach wylotowych i dolotowych OTSS [9, 10]. Nowsze publikacje opisujące rozpatrywane zagadnienia to opracowania zespołu M. Grobel, T. Dornseifer oraz T. Neunhoeffler [4] dotyczące modelowania dynamiki przepływów płynów w kanałach z wykorzystaniem metody elementów brzegowych czy publikacje W. Mitanieca i A. Jaroszewskiego [14], w których rozpatrywane są metody modelowania procesów fizycznych w silnikach spalinowych, w tym procesów gazodynamicznych w kanałach wylotu spalin. Najnowszą polską pozycją literatury dotyczącą tej kwestii jest monografia M. Sobieszkańskiego, który porusza problematykę modelowania procesu zasilania tłokowego silnika spalinowego [17].

Podjęte w IKiEO AMW badania procesów gazodynamicznych w kanałach spalin wylotowych ukierunkowane są na zagadnienia diagnostyczne, ich celem nadrzędnym jest więc opracowanie metodyki oceny stanu technicznego przestrzeni roboczych silnika na podstawie parametrów czynnika w kanale wylotu spalin. Dla realizacji postawionego celu konieczne jest między innymi opracowanie modelu matematycznego powyższych zjawisk.

METODYKA BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH

Pierwszym etapem opracowywania metodyki badań diagnostycznych była identyfikacja konstrukcyjna i parametryczna obiektu rzeczywistego, w tym przypadku silnika okrętowego SULZER typu 6AL20/24. Na tej podstawie wytypowano przekroje charakterystyczne (kontrolne) kanału wylotu spalin, w których realizowane są pomiary ciśnienia za pomocą przetworników optoelektronicznych. Inne rejestrowane parametry to: kąt obrotu wału korbowego (a stąd jego prędkość obrotowa) mierzony za pomocą przetwornika kąta obrotu, drgania pokrywy zaworowej mierzone piezoelektrycznym czujnikiem przyspieszeń. W celu realizacji pomiarów zaprojektowano i wykonano w IKiEO AMW rejestrator parametrów szybkozmiennych „MA-2005”. Umożliwia on pomiar oraz rejestrację obserwowanych parametrów z częstotliwością próbkowania 10 kHz.

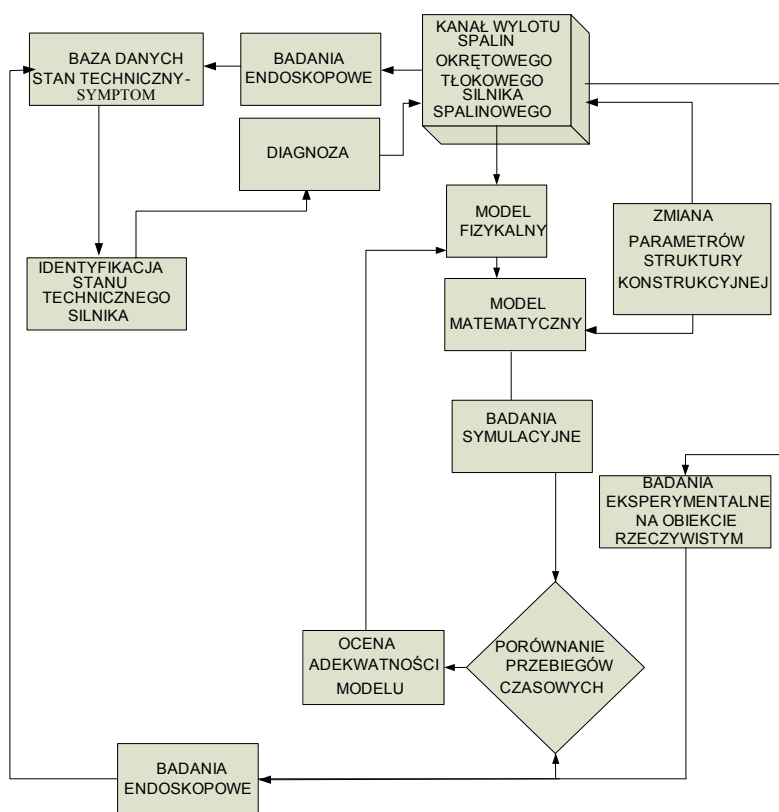
Drugim etapem badań było opracowanie modelu fizykalnego procesów pulsacyjnych, by na tej podstawie sformułować model matematyczny. Podstawowym problemem, który należało rozwiązać podczas opracowywania zarówno modelu fizykalnego, jak i matematycznego, była współpraca maszyny generującej spalinę w sposób pulsacyjny (silnik tłokowy) z maszyną wirnikową o przepływie ciągłym (wirnikiem turbosprężarki). Zaznaczyć należy, że silnik tłokowy generuje impulsy z częstotliwością zależną od: rodzaju silnika (2-suwowy lub 4-suwowy), liczby cylindrów oraz prędkości obrotowej wału korbowego. Ponadto amplitudy natężeń przepływu oraz ciśnień i temperatur zależą między innymi od obciążenia silnika. Fakt współdziałania obydwu maszyn przepływowych o tak różnym charakterze pracy stanowi dużą trudność przy modelowaniu ich współpracy. Opracowany model matematyczny umożliwił symulowanie stanów niezdatności eksploatacyjnej silnika oraz ich wpływu na przebiegi parametrów gazodynamicznych czynnika w kanałach wylotu spalin. Wprowadzanie szeregu stanów niezdatności do obiektu rzeczywistego jest praktycznie niewykonalne ze względów bezpieczeństwa oraz ekonomicznych. W celu rejestracji stanów niezdatności na obiekcie rzeczywistym przewidywane jest wykonywanie pomiarów na znacznej populacji silników eksploatowanych na okrętach Marynarki Wojennej (eksperyment bierny). W sytuacji zaobserwowania zmian charakteru rejestrowanych (obserwowanych) parametrów przeprowadzane będą badania endoskopowe przestrzeni roboczych silników mające na celu ujawnienie zmian parametrów struktury konstrukcyjnej rozpatrywanych obiektów.

Trzeci etap prowadzonych badań to dokonanie analizy porównawczej parametrów zarejestrowanych na obiekcie rzeczywistym w stanie jego pełnej oraz częściowej zdatości technicznej oraz wyników badań endoskopowych z wynikami

uzyskiwanymi z modelowania. Analiza ta umożliwi ocenę adekwatności opracowanego modelu, tzn. pozwala na modyfikację postaci i doskonalenie założeń modelu fizycznego, a w konsekwencji doprecyzowanie postaci równań modelu matematycznego.

Ostatnim etapem prowadzonego projektu jest opracowanie bazy danych zawierającej różne stany niezdatności eksploatacyjnej silnika, które mogą wystąpić w czasie jego użytkowania, oraz odpowiadające tym stanom przebiegi rejestrowanych parametrów bazy danych: „stan techniczny – symptom”. Opracowywana baza danych diagnostycznych umożliwi wyznaczenie granicznych wartości parametrów gazodynamicznych, a zarazem prowadzenie badań diagnostycznych na silnikach eksploatowanych w MW RP.

Podjęty temat zrealizowano etapami, według schematu przedstawionego na rysunku 1.



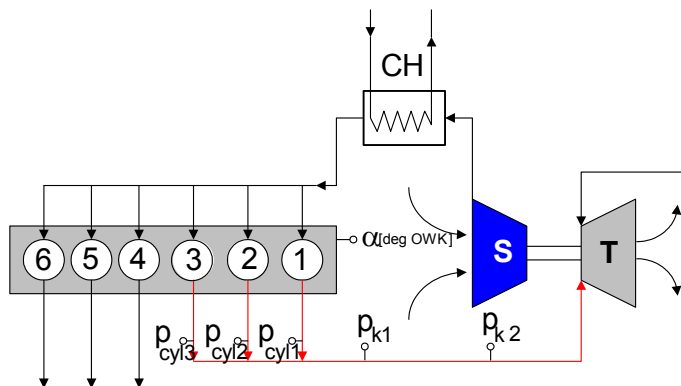
Rys. 1. Schemat realizacji badań procesów gazodynamicznych dla celów diagnostyki OTSS

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz pomiarów wstępnych na obiekcie rzeczywistym opracowano metodykę diagnozowania OTSS, uwzględniającą następujące elementy proceduralne:

1. Co i gdzie mierzyć?
2. Jak i kiedy mierzyć?
3. Jak wnioskować?
4. Czy silnik jest uszkodzony pierwotnie, tzn. „tylko” zanieczyszczony lub rozregulowany, czy też nastąpiło już jego uszkodzenie wtórne, będące skutkiem zanieczyszczenia lub rozregulowania?
5. Jaką „terapię” zastosować, w sensie podjęcia skutecznej decyzji eksploatacyjnej odnośnie zakresu działań obsługowych, ewentualnie decyzji operacyjnej odnośnie dalszego użytkowania silnika?
6. Jak często należy powtarzać badania diagnostyczne, aby zapewnić wymaganą trwałość, niezawodność i ekonomiczność pracy silnika?
7. Który z wybranych parametrów diagnostycznych jest najbardziej przydatny w eksploatacji, tzn. wnosi najwięcej informacji diagnostycznych przy jednocześnie łatwym jego pomiarze?

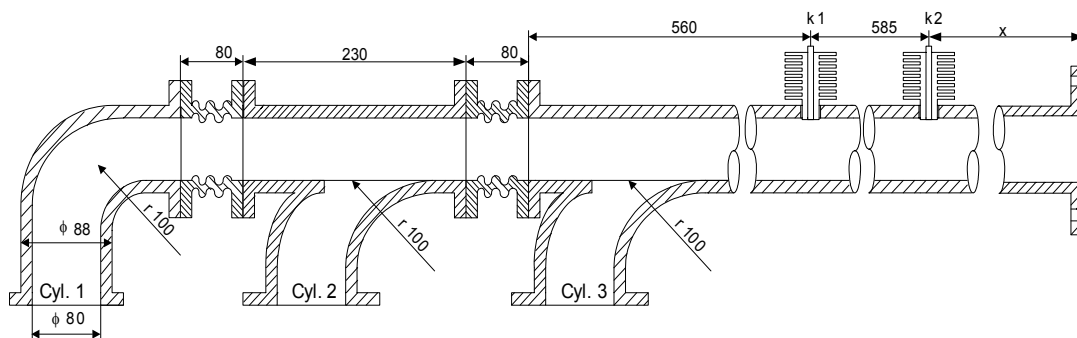
OBIEKT BADAŃ

Przedmiotem modelowania są procesy gazodynamiczne mające miejsce w kanale spalin wylotowych okrętowego tłokowego silnika spalinowego z turbodoładowaniem. Obiektem rzeczywistym, który pozwoli na weryfikację opracowanego modelu symulacyjnego, będzie silnik okrętowy SULZER typu 6AL 20/24 zainstalowany na stanowisku laboratoryjnym IKiEO AMW. Jest to średnioobrotowy sześciocylindrowy rzędowy czterosurowy silnik okrętowy z turbodoładowaniem. W skład modelowanego układu silnik – turbosprężarka wchodzi następujące podzespoły: zespół wirnikowy turbosprężarki z turbiną T i sprężarką S, kanały przepływowe spalin i powietrza, chłodnica powietrza doładowującego CH. Schemat układu przepływowego silnika z zaznaczonymi miejscami pomiarów obserwowanych parametrów przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Schemat układu przepływowego silnika SULZER typu 6AL 20/24 z zaznaczonymi miejscami pomiarów obserwowanych parametrów [7]

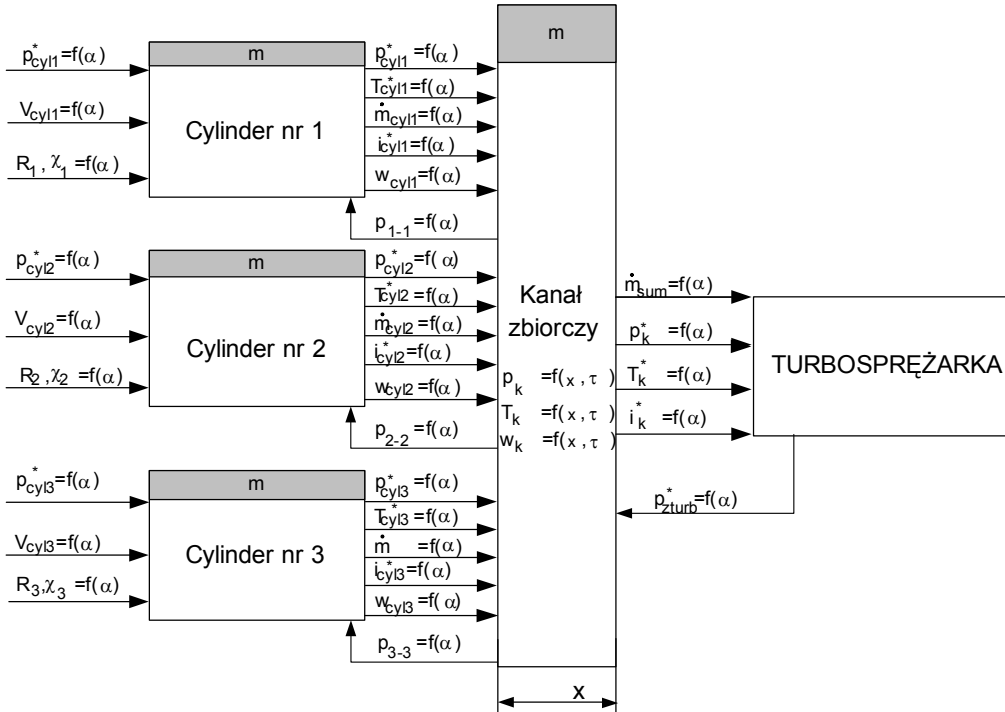
W zaprezentowanym układzie cylindry nr 1, 2 i 3 wydają spalin do jednego kanału wylotowego (zbiórczego), natomiast cylindry nr 4, 5 i 6 zasila drugi kanał zbiórczy. Oba kanały spalin wylotowych zasila turbinę turbosprężarki. Ponadto na schemacie przedstawiono jednokanałowy układ zasilania silnika powietrzem. Zarówno w kanale powietrza doładowującego, jak i w kanale spalin wylotowych przepływ ma charakter pulsacyjny. Na rysunku 2. zaznaczono dodatkowo przekroje charakterystyczne k1 oraz k2, w których zainstalowane są czujniki pomiaru ciśnienia. Przekrój poprzeczny kanału spalin wylotowych silnika z zaznaczeniem numerów cylindrów przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny kanału spalin wylotowych silnika SULZER typu 6AL 20/24

MODEL FIZYKALNY

Opracowanie modelu matematycznego (zgodnie ze schematem realizacji badań procesów gazodynamicznych przedstawionym na rysunku 1.) poprzedzone zostało zdefiniowaniem założeń modelu fizykalnego stanowiącego teoretyczne ujęcie procesów realizowanych w obiekcie rzeczywistym. Opracowany model fizykalny procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Model fizykalny procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych silnika SULZER typu 6AL 20/24

W modelu fizykalnym przyjęto następujące parametry wejściowe:

- ciśnienia czynnika termodynamicznego w cylindrach silnika;
- objętości cylindrów;
- indywidualne stałe gazowe oraz wykładniki izentrop czynnika w cylindrach.

Zadane zmiany parametrów wejściowych jako funkcje kąta obrotu wału korbowego determinują pulsacyjny charakter pracy modelowanego układu.

Opracowany model fizyczny uwzględnia akumulację masy przepływającego czynnika termodynamicznego w cylindrach oraz w kanałach przepływowych. Pominięto natomiast proces wymiany ciepła z otoczeniem. Dla dalszego zmniejszenia stopnia złożoności modelu matematycznego cylindry nr 1, 2 i 3 rozpatrywane są jako obiekty zerowymiarowe, gdzie dla wszystkich parametrów stanu czynnika termodynamicznego zmienną niezależną jest kąt obrotu wału korbowego silnika. Parametrami wyjściowymi dla cylindrów są:

- ciśnienia i temperatury spalin;
- entalpie właściwe spalin;
- strumienie masy spalin;
- prędkości spalin.

Kanał zbiorczy rozpatrywany jest jako obiekt jednowymiarowy, w którym zmiennymi niezależnymi dla parametrów stanu czynnika termodynamicznego są:

- czas;
- odległość przekroju kontrolnego od przekroju wlotowego turbiny turbosprężarki.

W przekrojach kontrolnych oznaczonych jako k1 i k2 wyznaczane są następujące parametry czynnika termodynamicznego:

- ciśnienie i temperatura spiętrzenia;
- prędkość przepływu spalin,

będące funkcją czasu oraz współrzędnej x (rys. 3.) przekroju kontrolnego kanału względem turbiny turbosprężarki [1, 5, 6, 8, 16].

MODEL MATEMATYCZNY

Model matematyczny procesów fizycznych stanowi układ równań podstawowych opisujących symulowane procesy fizyczne oraz zależności uzupełniających określających wartości stałych bądź zmiennych współczynników tych równań.

Założonymi parametrami wejściowymi modelu matematycznego procesów gazodynamicznych w kanale spalin wylotowych okrętowego tłokowego silnika spalinowego są:

- przebiegi zmian ciśnienia wewnątrzcyldrowego jako funkcji kąta obrotu wału korbowego $p_{cy/(1,2,3)n} = f(\alpha)$;

- udziały masowe składników paliwa $C = 0,8663$, $H = 0,1337$;
- współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 2$;
- fazy rozrządu (rys. 9.); autorzy zamodelowali otwieranie się zaworów wylotowych silnika za pomocą funkcji kwadratowej (znane są kąty otwarcia i zamknięcia zaworów oraz maksymalne czynne pola przepływu spalin przez zawory).

Przyjęte parametry struktury modelowanego obiektu to:

- objętości komór spalania;
- geometria układu cylinder – tłok;
- geometria kanałów spalin wylotowych (długość i średnica wewnętrzna);
- geometria układu korbowego (promień wykorbienia wału korbowego, długość korbowodu).

Wielkościami wyjściowymi otrzymywanymi z modelu matematycznego mają być następujące chwilowe wartości parametrów gazodynamicznych czynnika termodynamicznego w przekrojach charakterystycznych kanału zbiorczego oznaczonych jako p_{k1} i p_{k2} :

- temperatura $T_{(k1,k2)n} = f(t)$;
- ciśnienie $p_{(k1,k2)n} = f(t)$;
- prędkość przepływu (pomiędzy przekrojami kontrolnymi) $w_{(k1,k2)n} = f(t)$.

Wszystkie te parametry wyznaczane są jako funkcje czasu (t).

Aby maksymalnie uprościć opracowanie modelu matematycznego, poczyniono pewne założenia. Najistotniejsze z punktu widzenia autorów to:

- przemiany termodynamiczne zachodzące w modelowanym obiekcie są traktowane jako izentropowe;
- paliwo spalane w cylindrach składa się tylko z węgla $C = 86,7\%$ i wodoru $H = 13,3\%$;
- zjawiska dynamiczne traktowane są jako ciąg chwilowych stanów ustalonych (ujęcie quasi-stacjonarne).

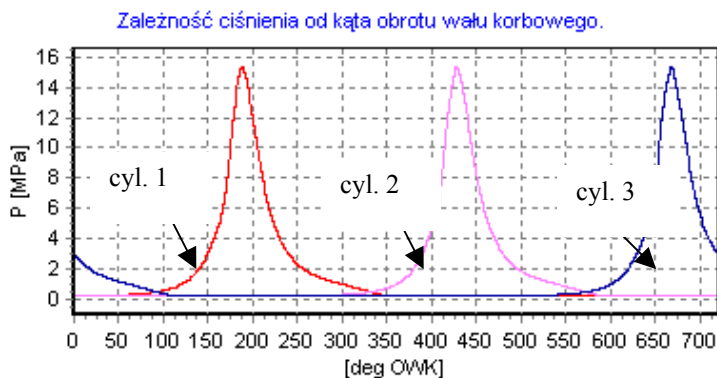
Na podstawie znajomości przebiegów zmienności parametrów wejściowych do modelu, parametrów struktury konstrukcyjnej modelowanego obiektu oraz parametrów wyjściowych, które należy uzyskać w wyniku modelowania zjawisk fizycznych, możliwe było opracowanie modelu matematycznego.

Wyznaczanie parametrów czynnika termodynamicznego w cylindrach silnika

Pierwszym etapem opracowywania modelu matematycznego procesów gazodynamicznych w kanale wylotu spalin było wyznaczenie parametrów stanu czynnika termodynamicznego opuszczającego cylindry silnika.

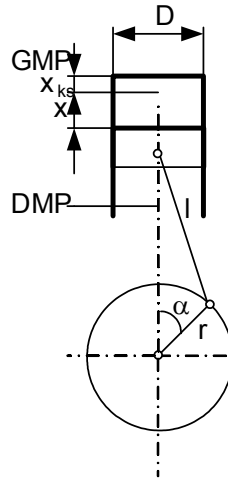
Dysponując przebiegami zmian ciśnienia czynnika termodynamicznego w cylindrach jako funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika [$^{\circ}$ OWK] (parametr otrzymany w wyniku indykowania silnika) należało ustalić temperatury czynnika w poszczególnych cylindrach.

Wykres przedstawiający zależności zmian ciśnień czynnika termodynamicznego w cylindrach jako funkcji kąta obrotu wału korbowego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wykres zmiany ciśnienia jako funkcji kąta α obrotu wału korbowego

Aby możliwe było określenie temperatur czynnika w cylindrach, niezbędna jest znajomość zmiany objętości cylindrów jako funkcji kąta OWK. Do wyznaczenia szukanej objętości skorzystano z zależności na określenie drogi tłoka w cylindrach jako funkcji kąta OWK [15]. Aby wyznaczyć drogę tłoka w cylindrze, należy znać wartość długości ramienia wykorbienia r oraz długość korbowodu l . Natomiast aby określić zmianę objętości cylindrów jako funkcji kąta OWK, konieczna jest dodatkowo znajomość objętości komór spalania $V_{k1,2,3}$ oraz średnicy tłoka D . Podstawowe wymiary geometryczne zostały przedstawione symbolicznie na rysunku 6.



Rys. 6. Geometria układu korbowego silnika tłokowego

Drogę tłoka wyznaczono z następującej zależności:

$$x_{(1,2,3)_n} = r \cdot (1 - \cos(\alpha + \varepsilon)) + \frac{r}{2l} \sin^2(\alpha + \varepsilon), \quad (1)$$

gdzie ε – kąt przesunięcia fazy pomiędzy poszczególnymi cylindrami silnika.

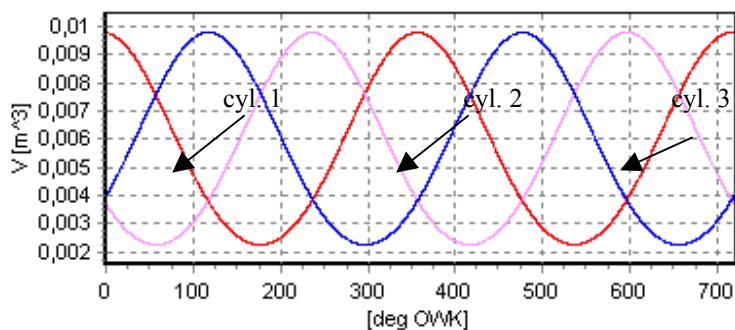
Znając wymiary geometryczne układu cylindrowo-tłokowego, wyznaczono objętości komór spalania jako:

$$V_{ks(1,2,3)} = x_{ks(1,2,3)} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}. \quad (2)$$

Określona w ten sposób zależność pozwala na wyznaczenie czynnej objętości cylindrów jako funkcji kąta OWK:

$$V_{cyl(1,2,3)_n} = \frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot \left[(2 \cdot r + x_{ks(1,2,3)}) - r \left(1 - \cos(\alpha + \varepsilon) + \frac{r}{2l} \sin^2(\alpha + \varepsilon) \right) \right]. \quad (3)$$

Wykres prezentujący zależność bieżącej objętości czynnej cylindrów jako funkcji kąta obrotu wału korbowego przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Wykres bieżącej zmiany objętości czynnej cylindrów jako funkcji kąta α obrotu wału korbowego

Kolejnym krokiem w czasie opracowywania modelu matematycznego było wyznaczenie parametrów stechiometrycznych czynnika termodynamicznego znajdującego się w poszczególnych cylindrach, tzn. indywidualnych stałych gazowych R , wykładników izentropy χ oraz ciepła właściwego przy stałej objętości c_v i przy stałym ciśnieniu c_p . Indywidualne stałe gazowe oraz wykładniki izentrop χ można wyznaczyć, bazując na równaniach stechiometrycznych [9, 16 i 19]. Dysponując składem paliwa, tzn. udziałami masowymi węgla $C = 0,87$ oraz wodoru $H = 0,13$, wyznaczono indywidualne stałe gazowe R jako:

$$R_{(1,2,3)} = 287 + 18,8\tau_{sp(1,2,3)}, \quad (4)$$

gdzie:

$$\tau_{sp(1,2,3)} = \frac{1}{\lambda_{(1,2,3)} \cdot L_t}, \quad (5)$$

gdzie $\tau_{sp(1,2,3)}$ – ilość paliwa doprowadzana na jednostkę ilości powietrza.

Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza do spalania jednego kilograma paliwa wynosi:

$$L_t = 11,48 \cdot C + 34,214 \cdot H. \quad (6)$$

Dla zaproponowanego składu paliwa $L_t = 14,51$ indywidualne stałe gazowe można opisać zależnością:

$$R_{(1,2,3)} = 287 + 18,8 \cdot \frac{1}{\lambda_{(1,2,3)} \cdot 14,51}. \quad (7)$$

Zakładając, że współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda = 2$, indywidualna stała gazowa spalin wynosi $287,65 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$.

Wykładniki izentrop można wyznaczyć z zależności empirycznych wg [19]:

$$\chi_{(1,2,3)_n} = \chi_{p_{ow}(1,2,3)} - 0,6\tau = \frac{1}{0,7267 + 6,1 \cdot 10^{-5}(t_{(1,2,3)_n} - 600) - 2 \cdot 10^{-8}(t_{(1,2,3)_n} - 600)^2} - 0,6\tau_{sp(1,2,3)}, \quad (8)$$

czyli:

$$\chi_{(1,2,3)_n} = \frac{1}{0,7267 + 6,1 \cdot 10^{-5}(t_{(1,2,3)_n} - 600) - 2 \cdot 10^{-8}(t_{(1,2,3)_n} - 600)^2} - 0,6 \cdot \frac{1}{\lambda_{(1,2,3)} \cdot 1,82}. \quad (9)$$

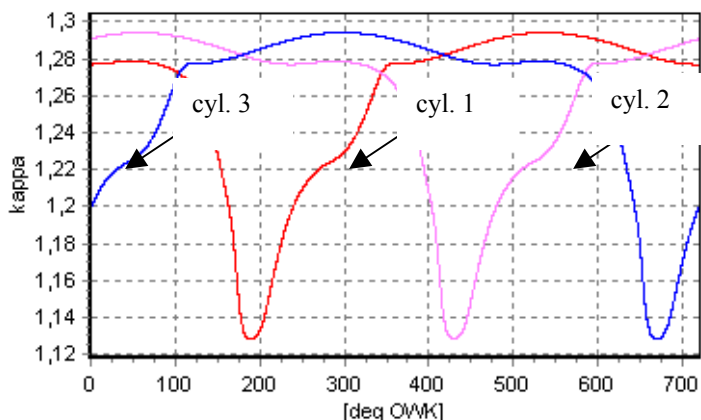
Ciepła właściwe czynnika termodynamicznego wyznaczono z zależności wiążących wykładniki izentrop χ z indywidualnymi stałymi gazowymi R , odpowiednio ciepła właściwe przy stałym ciśnieniu z zależności:

$$c_{v_{cyl}(1,2,3)_n} = \frac{R_{(1,2,3)}}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1} \quad (10)$$

oraz ciepła właściwe przy stałej objętości z zależności:

$$c_{p_{cyl}(1,2,3)_n} = \frac{\chi_{(1,2,3)_n}}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1} \cdot R_{(1,2,3)}. \quad (11)$$

Aby skorzystać z zależności dla stechiometrycznych składów mieszanki, konieczna była znajomość temperatur czynnika termodynamicznego w poszczególnych cylindrach jako funkcji kąta OWK. Temperaturę czynnika termodynamicznego założono w pierwszej iteracji (w kolejnych iteracjach była ona wyznaczana). Wykres zależności wykładników izentrop χ jako funkcji kąta obrotu wału korbowego przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Wykres zmiany wykładników izentropy χ jako funkcji kąta α obrotu wału korbowego

Znając wartości ciśnienia i temperatury (z poprzednich iteracji) czynnika termodynamicznego w poszczególnych cylindrach, ich objętości jako funkcji kąta OWK oraz indywidualne stałe gazowe, wyznaczono masy czynnika termodynamicznego w cylindrach (z prawa Clapeyrona). Sposób wyznaczenia mas czynnika w cylindrach przedstawia zależność:

$$m_{cyl(1,2,3)_n} = \frac{p_{cyl(1,2,3)_n} \cdot V_{cyl(1,2,3)_n}}{R_{(1,2,3)} \cdot T_{cyl(1,2,3)_n}} \quad (12)$$

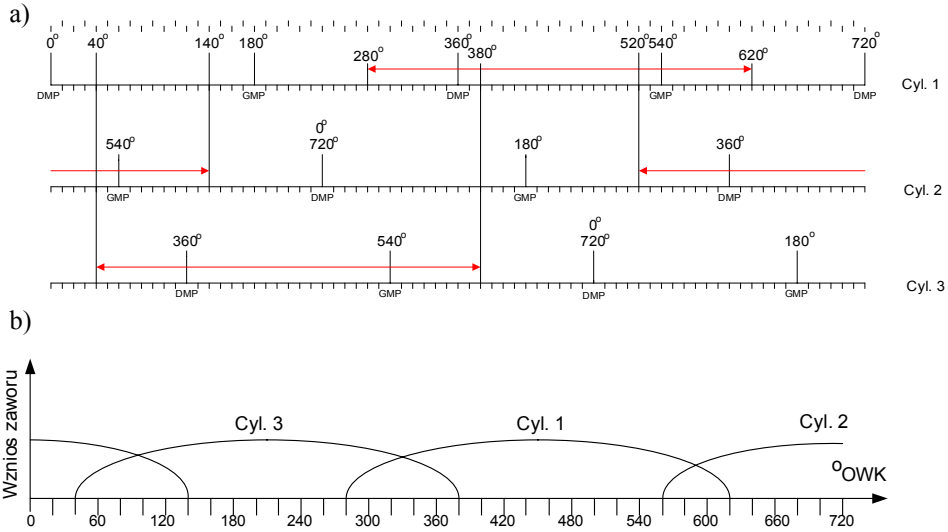
Dysponując powyższymi parametrami stanu czynnika termodynamicznego, można określić jego temperaturę. Temperatura spalin w cylindrach, gdy nie występuje zmiana masy czynnika, wyznaczona została z zależności:

$$T_{cyl(1,2,3)_n} = \frac{p_{cyl(1,2,3)_n} \cdot V_{cyl(1,2,3)_n}}{m_{cyl(1,2,3)_n} \cdot R_{(1,2,3)}} \quad (13)$$

Podstawiając równanie (3) opisujące zmiany objętości cylindrów jako funkcji kąta obrotu wału korbowego, zależność (13) przyjmuje poniższą postać:

$$T_{cyl(1,2,3)_n} = \frac{p_{cyl(1,2,3)_n} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot \left[(2 \cdot r + x_{ks(1,2,3)}) - r \left(1 - \cos(\alpha + \varepsilon) + \frac{r}{2l} \sin^2(\alpha + \varepsilon) \right) \right]}{m_{cyl(1,2,3)_n} \cdot R_{(1,2,3)}} \quad (14)$$

W czasie cyklu pracy silnika tłokowego występuje proces wypływu spalin, podczas którego zmianie ulega masa czynnika w cylindrach. Aby ją uwzględnić w czasie suwu wydechu, konieczna jest znajomość układu faz rozrządu silnika, który został przedstawiony na rysunku 9.



Rys. 9. Fazy rozrządu silnika SULZER typu 6AL 20/24 dla cylindrów nr 1, 2 i 3 [2]

Przedstawiony na rysunku 9. układ faz rozrządu determinuje, przy jakich kątach OWK następuje wypływ czynnika termodynamicznego z poszczególnych cylindrów.

W celu określenia ubytków mas spalin z cylindrów należy określić charakter ich wypływu, tzn. czy wypływ jest nadkrytyczny, czy podkrytyczny. Aby poznać charakter przepływu czynnika przez przekroje zaworów wylotowych, należy sprawdzić warunek, czy krytyczny stosunek ciśnień β jest większy czy mniejszy od jedności. Gdy β jest większe od jedności, przepływ jest nadkrytyczny, natomiast, gdy β jest mniejsze od jedności, przepływ jest podkrytyczny. Współczynnik β opisany jest poniższą zależnością [16]:

$$\beta_{zaw(1,2,3)_n} = \frac{p_{kr(1,2,3)_n}}{p_{cyl(1,2,3)_n}} = \left(\frac{2}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1} \right)^{\frac{\chi_{(1,2,3)_n}}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1}} \quad (15)$$

Z zależności (15) wyznaczono ciśnienie krytyczne:

$$p_{kr(1,2,3)_n} = p_{cyl(1,2,3)_n} \cdot \left(\frac{2}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1} \right)^{\frac{\chi_{(1,2,3)_n}}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1}} \quad (16)$$

Znajomość charakteru wypływu czynnika z cylindrów oraz pozostałe dane umożliwiły wyznaczenie prędkości spalin opuszczających cylindry silnika (z zależności de St-Venanta).

Zależność de St-Venanta przyjmuje następującą postać dla przepływów poddźwiękowych:

$$w_{zaw(1,2,3)_n} = \sqrt{\frac{2 \cdot \chi_{(1,2,3)_n}}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1} m_{cyl(1,2,3)_n} \cdot R_{(1,2,3)} \cdot T_{cyl(1,2,3)_n} \left[1 - \left(\frac{p_{kan_n}}{p_{cyl(1,2,3)_n}} \right)^{\frac{\chi_{(1,2,3)_n} - 1}{\chi_{(1,2,3)_n}} \right]} \quad (17)$$

oraz postać dla przepływów naddźwiękowych:

$$w_{zaw(1,2,3)_n} = \sqrt{\frac{2 \cdot \chi_{(1,2,3)_n}}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1} m_{cyl(1,2,3)_n} \cdot R_{(1,2,3)} \cdot T_{cyl(1,2,3)_n} \left[1 - \beta_{zaw(1,2,3)_n} \frac{\chi_{(1,2,3)_n} - 1}{\chi_{(1,2,3)_n}} \right]} \quad (18)$$

Dysponując wartościami prędkości wypływu spalin oraz znając geometrię zaworów wylotowych, określono strumienie mas spalin wypływających z cylindrów z zależności:

$$\dot{m}_{kan(1,2,3)_n} = s_{zaw(1,2,3)_n} \cdot \mu \cdot w_{zaw(1,2,3)_n} \cdot \rho_{cyl(1,2,3)_n} \quad (19)$$

Gęstości spalin w cylindrach można wyznaczyć w następujący sposób:

$$\rho_{cyl(1,2,3)_n} = \frac{p_{cyl(1,2,3)_n}}{R_{1,2,3} \cdot T_{cyl(1,2,3)_n}} \quad (20)$$

Początkowa wartość temperatury spalin zostaje założona w pierwszej iteracji.

Kolejnym krokiem opracowywania modelu matematycznego było określenie ubytków mas spalin z cylindrów, a w konsekwencji wyliczenie temperatur spalin w cylindrach.

Masy spalin w cylindrach wyznaczone zostały z zależności:

$$m_{cyl(1,2,3)_n} = m_{pocz(1,2,3)_n} - \dot{m}_{kan(1,2,3)_n} \cdot \tau, \quad (21)$$

gdzie:

$$m_{pocz(1,2,3)_n} = V_{cyl(1,2,3)_n} \cdot \rho_{cyl(1,2,3)_n}. \quad (22)$$

Temperatury spalin w cylindrach określono z równania Clapeyrona:

$$T_{cyl(1,2,3)_n} = \frac{p_{cyl(1,2,3)_n} \cdot V_{cyl(1,2,3)_n}}{m_{cyl(1,2,3)_n} \cdot R_{1,2,3}}. \quad (23)$$

Równanie (23) przyjęło ostateczną postać dla przepływu poddźwiękowego:

$$T_{cyl(1,2,3)_n} = \frac{p_{cyl(1,2,3)_n} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot \left[(2 \cdot r + x_1) - l \left(-\cos(\alpha + \varepsilon) + \frac{r}{2 \cdot l} \sin^2(\alpha + \varepsilon) \right) \right]}{\left(V_{cyl(1,2,3)_n} \cdot \rho_{cyl(1,2,3)_n} - S_{zaw(1,2,3)_n} \cdot z \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \chi_{(1,2,3)_n}}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1}} m_{cyl(1,2,3)_n} \cdot R_{(1,2,3)} \cdot T_{cyl(1,2,3)_{n-1}} \cdot \left[1 - \frac{p_{kan}}{p_{cyl(1,2,3)_n}} \right]^{\frac{\chi_{(1,2,3)_{n-1}}}{\chi_{(1,2,3)_n}}} \right] \cdot \frac{p_{cyl(1,2,3)_n}}{R_{(1,2,3)} \cdot T_{cyl(1,2,3)_{n-1}}} \cdot \tau \cdot R_{(1,2,3)}} \quad (24)$$

oraz dla przepływu naddźwiękowego:

$$T_{cyl(1,2,3)_n} = \frac{p_{cyl(1,2,3)_n} \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot \left[(2 \cdot r + x_1) - l \left(-\cos(\alpha + \varepsilon) + \frac{r}{2 \cdot l} \sin^2(\alpha + \varepsilon) \right) \right]}{\left(V_{cyl(1,2,3)_n} \cdot \rho_{cyl(1,2,3)_n} - S_{zaw(1,2,3)_n} \cdot z \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \chi_{(1,2,3)_n}}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1}} m_{cyl(1,2,3)_n} \cdot R_{(1,2,3)} \cdot T_{cyl(1,2,3)_{n-1}} \cdot \left[1 - \beta_{(1,2,3)_n} \right]^{\frac{\chi_{(1,2,3)_{n-1}}}{\chi_{(1,2,3)_n}}} \right] \cdot \frac{p_{cyl(1,2,3)_n}}{R_{(1,2,3)} \cdot T_{cyl(1,2,3)_{n-1}}} \cdot \tau \cdot R_{(1,2,3)}} \quad (25)$$

Następnie wyznaczono parametry gazodynamiczne spalin na wyjściu z cylindrów.

Entalpie spalin:

$$i_{cyl(1,2,3)_n} = (T_{cyl(1,2,3)_n} - T_{cyl(1,2,3)_{n-1}}) \cdot c_{p_{cyl(1,2,3)_n}} \quad (26)$$

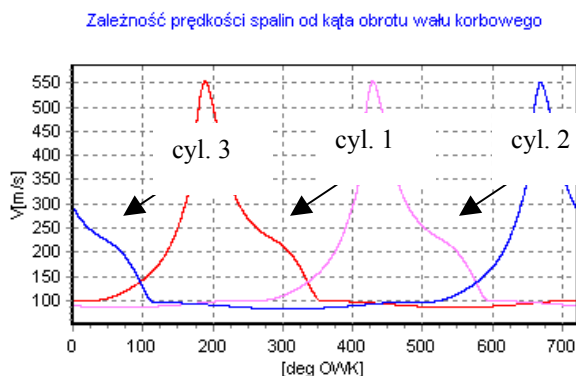
oraz ciepła właściwe przy stałym ciśnieniu:

$$c_{p_{cyl(1,2,3)_n}} = R_{(1,2,3)} \cdot \frac{\chi_{(1,2,3)_n}}{\chi_{(1,2,3)_n} - 1}. \quad (27)$$

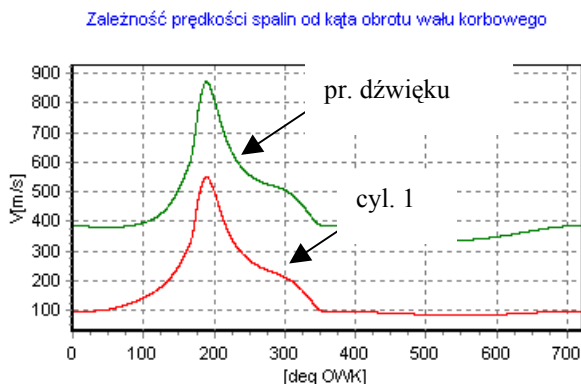
Wyznaczono iloczyny strumieni mas spalin na wyjściu z poszczególnych cylindrów i ich entalpii według zależności:

$$M_{kan(1,2,3)_n} = i_{cyl(1,2,3)_n} \cdot \dot{m}_{kan(1,2,3)_n} \quad (28)$$

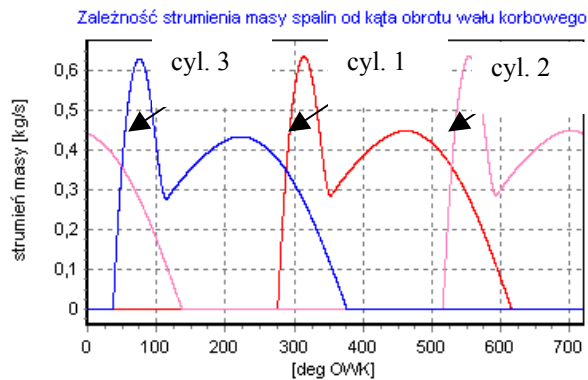
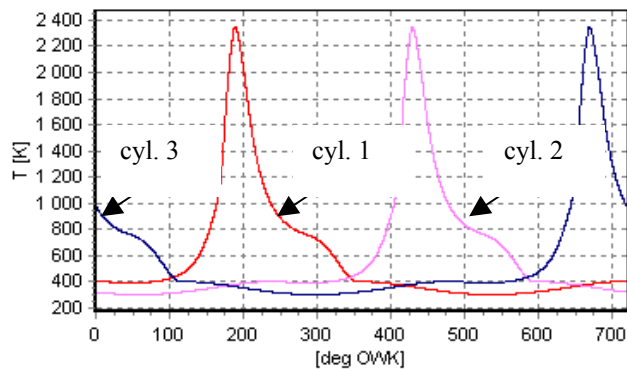
Na rysunkach 10., 11., 12. i 13. przedstawiono odpowiednio wykresy zależności: prędkości, strumieni mas oraz temperatur spalin wpływających z cylindrów jako funkcji kąta obrotu wału korbowego.



Rys. 10. Wykres zmian prędkości spalin jako funkcji kąta α obrotu wału korbowego



Rys. 11. Wykres zmian prędkości spalin z cylindra nr 1 jako funkcji kąta α obrotu wału korbowego oraz wykres prędkości dźwięku w spalinach jako funkcji kąta obrotu wału korbowego

Rys. 12. Wykres zmian strumieni mas spalin jako funkcji kąta α obrotu wału korbowegoRys. 13. Wykres zmian temperatur spalin jako funkcji kąta α obrotu wału korbowego

Otrzymane parametry stanu spalin w czasie ich wypływu z cylindrów stanowią parametry wejściowe do modelowania procesów gazodynamicznych w kanale wylotu spalin okrętowego tłokowego silnika spalinowego. Parametry czynnika termodynamicznego na wyjściu z cylindrów (wyliczone jako parametry w cylindrach) to:

- ciśnienia w cylindrach;
- temperatury spalin;
- strumień masy spalin wypływających z cylindrów;
- entalpie spalin wypływających z cylindrów;
- indywidualne stałe gazowe;
- wykładniki izentropy;
- ciepła właściwe przy stałych objętościach;
- ciepła właściwe przy stałych ciśnieniach.

Wyznaczanie parametrów czynnika termodynamicznego w przekrojach kontrolnych kanałów wylotu spalin

Dysponując przedstawionymi parametrami stanu czynnika termodynamicznego na wyjściu z cylindrów, stanowiącymi parametry wejściowe dla kanału wylotu spalin, wyznaczono parametry wyjściowe modelu, tzn. ciśnienia, temperatury i prędkości spalin w przekrojach kontrolnych kanałów wylotowych jako funkcji czasu.

Do wyznaczenia parametrów wyjściowych modelu poza wyliczonymi parametrami stanu czynnika termodynamicznego niezbędna jest znajomość geometrii kanału wylotu spalin, a konkretnie objętości kanału od zaworów wylotowych do przekrojów kontrolnych k_1 oraz k_2 , zgodnie z rysunkiem 3., oraz opór przepływu przez turbinę turbosprężarki. Zgodnie z dokumentacją przyjęto, że ciśnienie spalin na wejściu do turbiny turbosprężarki wynosi 130 000 Pa.

Pierwszym etapem obliczeń było określenie mas czynnika m_k w kanale wylotu spalin OTSS (z równania Clapeyrona). Oto wartości niezbędne do wyznaczenia masy:

- temperatura i ciśnienie spalin w kanale wylotowym;
- średnia indywidualna stała gazowa;
- objętość kanału do przekroju kontrolnego.

Masy spalin zostały wyznaczone z poniższej zależności:

$$m_{(k_1, k_2)_n} = \frac{P_{(k_1, k_2)_n}}{R_{\acute{s}r} \cdot T_{(k_1, k_2)_n}} \cdot V_{(k_1, k_2)} \quad (29)$$

Indywidualną stałą gazową z trzech cylindrów wyznaczono jako:

$$R_{\acute{s}r} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} \quad (30)$$

Do dalszych obliczeń konieczne było określenie średniego wykładnika izentropy ze wszystkich cylindrów zasilających kanał zbiorczy:

$$\chi_{\acute{s}r_n} = \frac{\chi_{1_n} + \chi_{2_n} + \chi_{3_n}}{3} \quad (31)$$

oraz wyznaczenie średniego iloczynu entalpii i strumieni mas spalin z poszczególnych cylindrów:

$$M_{\acute{s}r_n} = \frac{M_{kan1_n} + M_{kan2_n} + M_{kan3_n}}{3} \quad (32)$$

Ponadto należało wyznaczyć sumę strumieni mas spalin z poszczególnych cylindrów

$$\dot{m}_{sum_n} = \dot{m}_{1_n} + \dot{m}_{2_n} + \dot{m}_{3_n} . \quad (33)$$

Aby określić temperatury, ciśnienia oraz prędkości przepływu czynnika przez przekroje charakterystyczne (k1 oraz k2) kanału wylotu spalin, należało wyznaczyć strumienie mas spalin przepływających przez powyższe przekroje. Określenie strumieni mas spalin zrealizowano na podstawie zależności de St-Venanta, to znaczy określono charakter przepływu czynnika przez poszczególne przekroje kontrolne (określono, czy przepływ jest nad- czy poddźwiękowy). Zrealizowano to poprzez ustalenie, czy współczynnik β przyjmuje wartość większą od jedności dla przepływów naddźwiękowych czy mniejszą dla przepływów poddźwiękowych:

$$\beta_{(k1,k2)_n} = \frac{P_{kr(k1,k2)_n}}{P_{(k1,k2)_n}} = \left(\frac{2}{\chi_{\dot{s}r_n} - 1} \right)^{\frac{\chi_{\dot{s}r_n}}{\chi_{\dot{s}r_n} - 1}} . \quad (34)$$

Następnie wyznaczono ciśnienia krytyczne

$$P_{kr(k1,k2)_n} = P_{(k1,k2)_n} \cdot \left(\frac{2}{\chi_{\dot{s}r_n} - 1} \right)^{\frac{\chi_{\dot{s}r_n}}{\chi_{\dot{s}r_n} - 1}} . \quad (35)$$

Z równania de St-Venanta określono prędkości przepływu spalin w przekrojach kontrolnych. Gdy współczynnik β był mniejszy od jedności, skorzystano z postaci (36), natomiast gdy był większy od jedności, wykorzystano postać (38) wzoru de St-Venanta:

$$w_{(k1,k2)_n} = \sqrt{\frac{2\chi_{\dot{s}r_n}}{\chi_{\dot{s}r_n} - 1} m_{(k1,k2)_n} \cdot R_{\dot{s}r} \cdot T_{(k1,k2)_n} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{zturb_n}}{P_{(k1,k2)_n}} \right)^{\frac{\chi_{\dot{s}r_n}}{\chi_{\dot{s}r_n} - 1}} \right]} ; \quad (36)$$

$$w_{(k1,k2)_n} = \sqrt{\frac{2\chi_{\dot{s}r_n}}{\chi_{\dot{s}r_n} - 1} m_{(k1,k2)_n} \cdot R_{\dot{s}r} \cdot T_{(k1,k2)_n} \cdot \left[1 - \beta_{(k1,k2)_n}^{\frac{\chi_{\dot{s}r_n}}{\chi_{\dot{s}r_n} - 1}} \right]} . \quad (37)$$

Strumienie mas spalin w przekrojach kontrolnych wyznaczono z zależności:

$$\dot{m}_{(k1,k2)_n} = s_{kan} \cdot \mu \cdot w_{(k1,k2)_n} \cdot \rho_{(k1,k2)_n}, \quad (38)$$

gdzie gęstości czynnika wyznaczono z równania:

$$\rho_{(k1,k2)_n} = \frac{P_{(k1,k2)_n}}{R_{sr} \cdot T_{(k1,k2)_n}}. \quad (39)$$

Ostatecznie zależności użyte do wyznaczenia strumieni mas spalin przyjęły następujące postacie:

– dla przepływu poddźwiękowego:

$$\dot{m}_{(k1,k2)_n} = s_{kan} \cdot z \cdot \sqrt{\frac{2\chi_{srn}}{\chi_{srn} - 1} m_{(k1,k2)_n} \cdot R_{sr} \cdot T_{(k1,k2)_n}} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_{atm}}{P_{(k1,k2)_n}} \right)^{\frac{\chi_{srn}-1}{\chi_{srn}}} \right] \cdot \frac{P_{(k1,k2)_n}}{R_{sr} \cdot T_{(k1,k2)_n}}; \quad (40)$$

– dla przepływu naddźwiękowego:

$$\dot{m}_{(k1,k2)_n} = s_{kan} \cdot z \cdot \sqrt{\frac{2\chi_{srn}}{\chi_{srn} - 1} m_{(k1,k2)_n} \cdot R_{sr} \cdot T_{(k1,k2)_n}} \cdot \left[1 - \beta_{(k1,k2)_n}^{\frac{\chi_{srn}-1}{\chi_{srn}}} \right] \cdot \frac{P_{(k1,k2)_n}}{R_{sr} \cdot T_{(k1,k2)_n}}. \quad (41)$$

Masy spalin w kanale wyznaczono z zależności:

$$m_{(k1,k2)_n} = m_{(k1,k2)_{n-1}} - \dot{m}_{(k1,k2)_n} \cdot \tau, \quad (42)$$

gdzie masy początkowe wyniosły

$$m_{(k1,k2)_{n-1}} = V_{(k1,k2)} \cdot \rho_{(k1,k2)}. \quad (43)$$

Następnie wyznaczono ciepła właściwe spalin w przekrojach charakterystycznych k1 i k2 przy stałym ciśnieniu

$$c_{p(k1,k2)_n} = R_{sr} \cdot \frac{\chi_{srn}}{\chi_{srn} - 1} \quad (44)$$

oraz przy stałej objętości:

$$c_{v(k1,k2)_n} = \frac{R_{\dot{s}r}}{\chi_{\dot{s}r_n} - 1} \quad (45)$$

Kolejnym krokiem było wyznaczenie iloczynów entalpii i strumieni mas spalin w przekrojach kontrolnych:

$$M_{(k1,k2)_n} = T_{(k1,k2)_n} \cdot c_{p(k1,k2)_n} \cdot \dot{m}_{(k1,k2)_n} \quad (46)$$

Znając powyższe parametry możliwe było wyliczenie temperatur i ciśnień spalin w omawianych przekrojach kontrolnych:

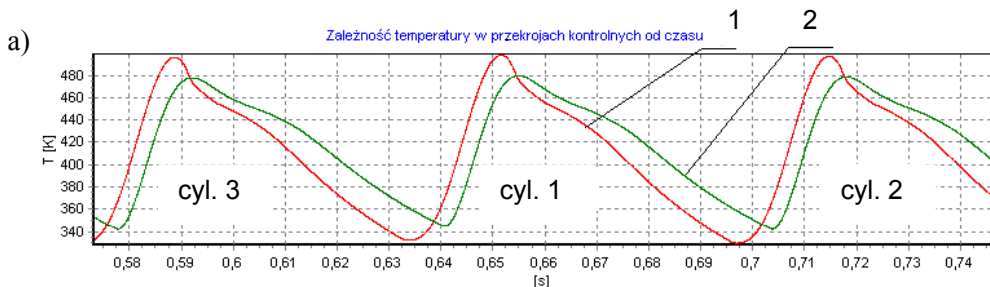
- temperatury wyznaczono z zależności

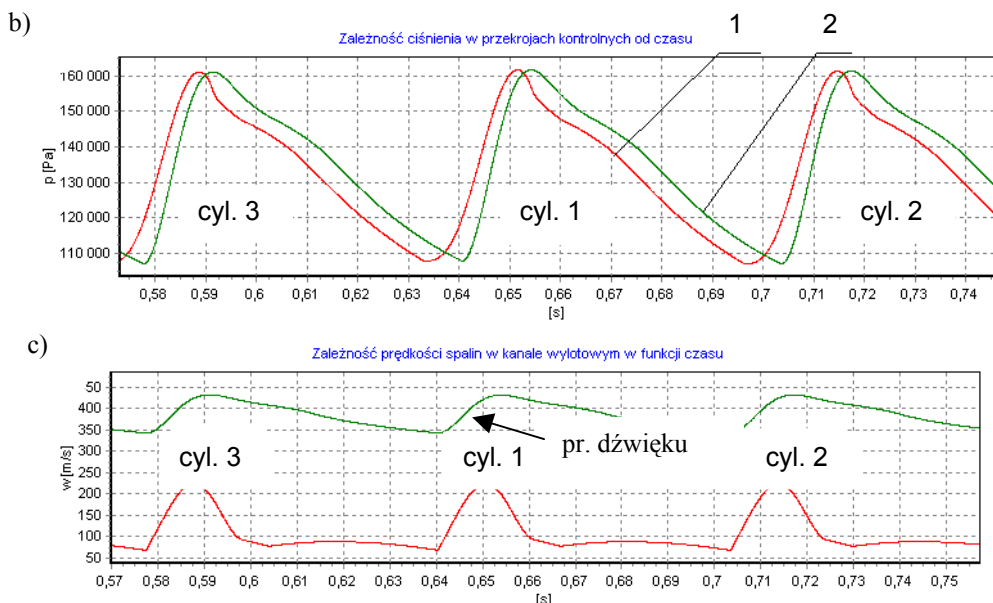
$$T_{(k1,k2)_n} = T_{(k1,k2)_{n-1}} + \frac{M_{\dot{s}r_n} - M_{(k1,k2)_n}}{m_{(k1,k2)_n} \cdot c_{v(k1,k2)_n}} \cdot d\tau ; \quad (47)$$

- ciśnienia w przekrojach kontrolnych wyznaczono z zależności Clapeyrona

$$p_{(k1,k2)_n} = m_{(k1,k2)_n} \cdot R_{\dot{s}r} \cdot \left(\frac{T_{(k1,k2)_n}}{V_{(k1,k2)_n}} \right) \quad (48)$$

Na poniższych rysunkach przedstawiono przebiegi parametrów stanu czynnika termodynamicznego w przekrojach kontrolnych k1 i k2. Przebiegi parametrów stanu czynnika termodynamicznego w przekroju kontrolnym k1 oznaczono jako 1, natomiast w przekroju kontrolnym k2 jako 2 w funkcji czasu.



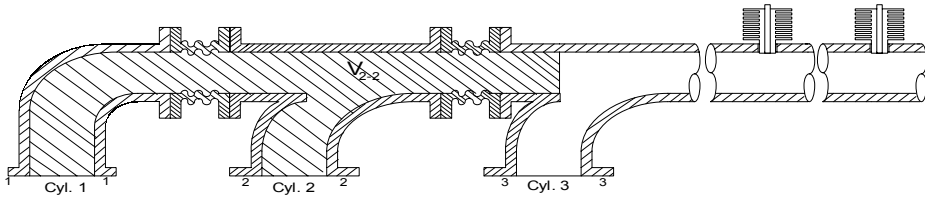


Rys. 14. Przebiegi parametrów stanu czynnika termodynamicznego w przekrojach kontrolnych k1 i k2 jako funkcji czasu: a – temperatury, b – ciśnienia, c – prędkości przepływu z zaznaczoną prędkością dźwięku dla otrzymanych lokalnych parametrów czynnika

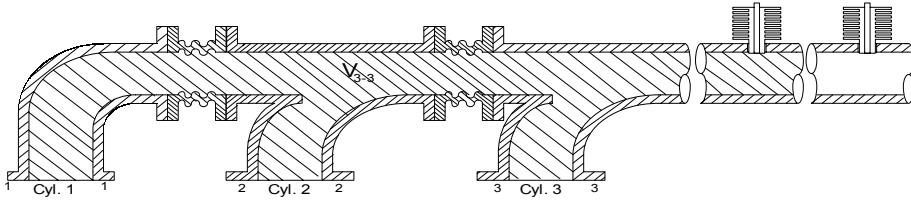
We wzorach de St-Venanta występuje wartość ciśnienia za „dyszą” (w przypadku obliczeń prędkości wypływu z cylindra jest to ciśnienie przeciwdziałające wypływowi spalin z cylindra, natomiast w przypadku obliczeń prędkości przepływu przez przekrój kontrolny jest to ciśnienie atmosferyczne powiększone o opory przepływu przez turbiny). Wartość ciśnienia spalin przeciwdziałającego wypływowi spalin z cylindra wyznaczana jest zgodnie ze schematem przedstawionym poniżej.

W celu wyznaczenia ciśnienia czynnika termodynamicznego przeciwdziałającego wypływowi spalin z cylindra należało uwzględnić wartości ciśnień pochodzących z pozostałych cylindrów. W dalszej części opisu analizie poddano ciśnienie przeciwdziałające wypływowi spalin z cylindra nr 1. Zakładając układ kanału spalin (zaprezentowany na rys. 3.) zasilany z cylindrów nr 1, 2 i 3, należy uwzględnić wpływ ciśnień pochodzących z cylindrów nr 2 i 3.

Aby możliwe było wyznaczenie ciśnienia przeciwdziałającego wypływowi spalin z cylindra nr 1, konieczne jest określenie objętości kanału dla wypływu z cylindrów nr 2 i 3. Zaproponowane objętości kanału zbiorczego dla wypływu z cylindra nr 2 zaprezentowano na rysunku 15., a z cylindra nr 3 na rysunku 16.



Rys. 15. Objętość kanału wykorzystywana do obliczeń składowej ciśnienia pochodzącej od cylindra nr 2



Rys. 16. Objętość kanału wykorzystywana do obliczeń składowej ciśnienia pochodzącej od cylindra nr 3

Pierwszym krokiem przy określaniu ciśnienia spalin przeciwdziałającego wypływowi z cylindra nr 1 było określenie masy spalin w kanałach pochodzących z cylindra nr 2 i 3. Wyznaczono ją z równania Clapeyrona.

Dla cylindra nr 2 równanie przyjmuje następującą postać:

$$m_{2(1-1)n} = \frac{p_{2(1-1)n-1} \cdot V_{2-2}}{R_2 \cdot T_{2(1-1)n-1}}, \quad (49)$$

natomiast dla cylindra nr 3 przyjmuje postać:

$$m_{3(1-1)n} = \frac{p_{3(1-1)n-1} \cdot V_{3-3}}{R_3 \cdot T_{3(1-1)n-1}}. \quad (50)$$

Dysponując wartościami mas spalin w kanałach, można wyznaczyć temperatury dla spalin wypływających z cylindrów nr 2 i 3 w przekroju zaworu wylotowego cylindra nr 1.

Temperatura spalin z cylindra nr 2 wyrażana jest zależnością:

$$T_{2(1-1)n} = T_{cyl2_n} \cdot \left(\frac{p_{2(1-1)n}}{p_{cyl2_n}} \right)^{\frac{\chi_{2_n}-1}{\chi_{2_n}}}, \quad (51)$$

natomiast temperatura spalin z cylindra nr 3:

$$T_{3(1-1)n} = T_{cyl3n} \cdot \left(\frac{p_{3(1-1)n}}{p_{cyl3n}} \right)^{\frac{\chi_{3n}-1}{\chi_{3n}}} \quad (52)$$

Kolejną czynnością było wyznaczenie składowych ciśnień w przekroju 1-1 pochodzących z cylindrów nr 2 i 3.

Dla cylindra nr 2 składową ciśnienia wyznaczono z zależności:

$$p_{2(1-1)n} = \frac{m_{2(1-1)n} \cdot R_2 \cdot T_{2(1-1)n}}{V_{2-2}}, \quad (53)$$

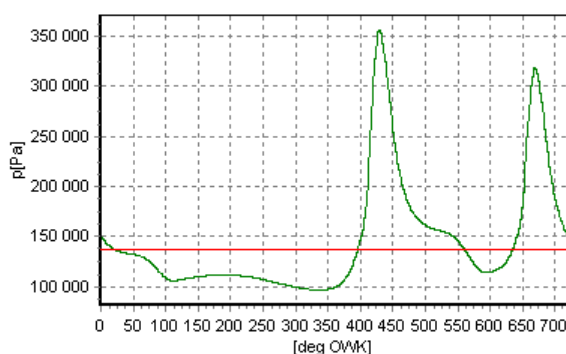
natomiast dla cylindra nr 3 wyznaczono z zależności:

$$p_{3(1-1)n} = \frac{m_{3(1-1)n} \cdot R_3 \cdot T_{3(1-1)n}}{V_{3-3}} \quad (54)$$

Ciśnienie przeciwdziałające wypływowi spalin z cylindra nr 1 określono jako:

$$p_{(1-1)n} = \frac{p_{2(1-1)n} + p_{3(1-1)n}}{2} \quad (55)$$

Na poniższym rysunku przedstawiono wykres ciśnienia przeciwdziałającego wypływowi spalin z cylindra nr 1 jako funkcji kąta OWK. Linią poziomą zaznaczono wartość ustalonego ciśnienia na wejściu do turbiny turbosprężarki.



Rys. 17. Wykres ciśnienia przeciwdziałającego wypływowi spalin z cylindra nr 1 jako funkcji kąta OWK

PODSUMOWANIE

1. Przedstawiony model matematyczny został opracowany na potrzeby aktualnie prowadzonego projektu badawczego nr T00B 021 29 pt. „Metoda diagnozowania silników okrętów wojennych o ograniczonej możliwości pomiaru ciśnień wewnątrzcyldrowych na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania”.
2. Na podstawie opracowanego modelu matematycznego powstał program komputerowy symulujący zjawiska pulsacyjne w kanale spalin wylotowych silnika SULZER typu 6AL 20/24.
3. W Instytucie Konstrukcji i Eksploatacji Okrętów Akademii Marynarki Wojennej prowadzone są badania eksperymentalne na obiektach rzeczywistych mające na celu weryfikację przedstawionego modelu matematycznego.
4. Aktualnie prowadzone są prace nad adaptacją opracowanego modelu matematycznego oraz programu komputerowego dla innych typów silników okrętowych eksploatowanych w Marynarce Wojennej.
5. Przewiduje się, że wykorzystanie modelu do symulowania znanych i rozpoznawalnych uszkodzeń powinno zaowocować powstaniem bazy danych relacji diagnostycznych: „zmiana stanu technicznego – symptom”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cannon R. H. jr., *Dynamika układów fizycznych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1973.
- [2] Dokumentacja techniczno-ruchowa SULZER 6AL 20/24.
- [3] Fuller E. J., *The practical realisation of an automated diagnostic system for diesel powered vehicles*, SAE, paper No 760838, 1976.
- [4] Griehl M., Dornseifer T., Neunhoeffler T., *Numerical simulation in fluid dynamics*, SIAM, 1998.
- [5] Korczewski Z., *Diagnozowanie okrętowego silnika spalinowego na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania*, „Zeszyty Naukowe” AMW, 2002, nr 3, s. 67 – 77.

- [6] Korczewski Z., *Metoda diagnozowania silników okrętowych z turbodoładowaniem na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie spalin wylotowych*, Diagnostyka, 2003, t. 28.
- [7] Korczewski Z., Zacharewicz M., *Animacja procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania okrętowego silnika czterosuwowego*, XXII Sympozjum Siłowni Okrętowych, Szczecin, 15 – 16.11.2001, s. 141 – 146.
- [8] Korczewski Z., *Zastosowanie analizy czasowej i widmowej do identyfikacji procesów gazodynamicznych w układzie spalin wylotowych silnika okrętowego z turbodoładowaniem*, 3rd International Congress on Technical Diagnostics, Poznań 2004.
- [9] Kordziński C., Środulski T., *Silniki spalinowe z turbodoładowaniem*, WNT, Warszawa 1970.
- [10] Kordziński C., Środulski T., *Układy dolotowe silników spalinowych*, WKiŁ, Warszawa 1968.
- [11] Kordziński C., *Układy wylotowe szybkoobrotowych silników spalinowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1964.
- [12] Kowalewicz A., *Doładowanie silników spalinowych*, Radom 1998.
- [13] Kowalewicz A., *Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych*, WKiŁ, Warszawa 1990.
- [14] Mitaniec W. Jaroszewski A., *Modele matematyczne procesów fizycznych w silnikach spalinowych małej mocy*, cz. 1, Przedsiębiorstwo Konstrukcyjno-Badawcze „PRO-MO”, 1993.
- [15] Niewiarowski K., *Tłokowe silniki spalinowe*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa 1963.
- [16] Pudlik W., *Termodynamika*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1998.
- [17] Sobieszkański M., *Modelowanie procesów zasilania w silnikach spalinowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000.
- [18] *Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego „Metoda diagnozowania silników okrętów wojennych o ograniczonej możliwości pomiaru ciśnień wewnętrznych cylindrowych na podstawie wyników badania procesów gazodynamicznych w układzie turbodoładowania”*, nr 0 T00B 021 29.
- [19] Wiśniewski S., *Obciążenia cieplne silników turbinowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1974.

ABSTRACT

The paper presents a mathematical model of gaso-dynamic processes occurring in an exhaust gas pass in a marine engine with turbo charging. The first part of the paper deals with methodology of diagnostic investigations carried out on a real object. It involves measuring instruments used for the investigations and the diagram of progress in investigations shows problems being currently under study. The later part describes the real object and a physical object based on it. The last part of the paper constitutes a description of the mathematical model of gaso-dynamic process occurring in the exhaust pass of the engine. The model can be used to determine selected parameters of state agent in any characteristic cross-section of the pass.

Recenzent prof. dr hab. inż. Stefan Szczeciński