



KLASYFIKACJA STANU TECHNICZNEGO UKŁADU WTRYSKOWEGO SILNIKA Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM NA PODSTAWIE POMIARU SKŁADU SPALIN

Jacek Rudnicki
Jakub Bujczenko

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Zakład Silowni Okrętowych
u. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: jacekrud@pg.edu.pl

Streszczenie

Artykuł przedstawia wyniki empirycznej weryfikacji hipotezy pozwalającej na opracowanie sprzętowo – programowego klasyfikatora stanu technicznego układu wtryskowego silnika z zapłonem samoczynnym. Pozytywna weryfikacja wspomnianej hipotezy, która wiąże przebieg procesu spalania, skład chemiczny spalin oraz wybrane stany niesprawności technicznej układu wtryskowego pozwoliła na przedstawienie koncepcji klasyfikatora w rozpatrywanym zbiorze klas stanu układu wtryskowego.

Słowa kluczowe: *diagnostyka techniczna, toksyczne składniki spalin, silnik z zapłonem samoczynnym, układ wtryskowy*

• Wprowadzenie

Pomiędzy stanem technicznym silnika, a przebiegiem procesu spalania istnieje oczywiste i wielokrotnie weryfikowane empirycznie [5, 7, 9, 15, 16, 17, 19, 20] sprzężenie zwrotne. Rozwijając ten tok rozumowania można zatem stwierdzić, że skład spalin zależy od przebiegu spalania. Naturalną konsekwencją będzie zatem kolejne stwierdzenie, że skład spalin zależy od stanu technicznego silnika. Ponieważ jednym z efektów spalania jest emisja do atmosfery określonej mieszaniny substancji chemicznych a praktyka eksploatacyjna wskazuje, że określenie ilościowe jej składu nie następuje istotnych trudności technicznych, można zatem wykorzystać wspomniane zależności do oceny stanu technicznego wybranych węzłów konstrukcyjnych silnika.

Niewątpliwie do takich podsystemów zaliczyć można układ wtryskowy, którego regulacja i stan techniczny w decydującej mierze determinuje przebieg wtrysku paliwa. Sam przebieg tego procesu ma fundamentalne znaczenie w tzw. „osiągach” czyli wartościach wskaźników pracy silnika charakteryzujących jego własności użytkowe, ekologiczne, ergonomiczne itp.

Od czasu pojawienia się pierwszych silników o zapłonem samoczynnym układ wtryskowy

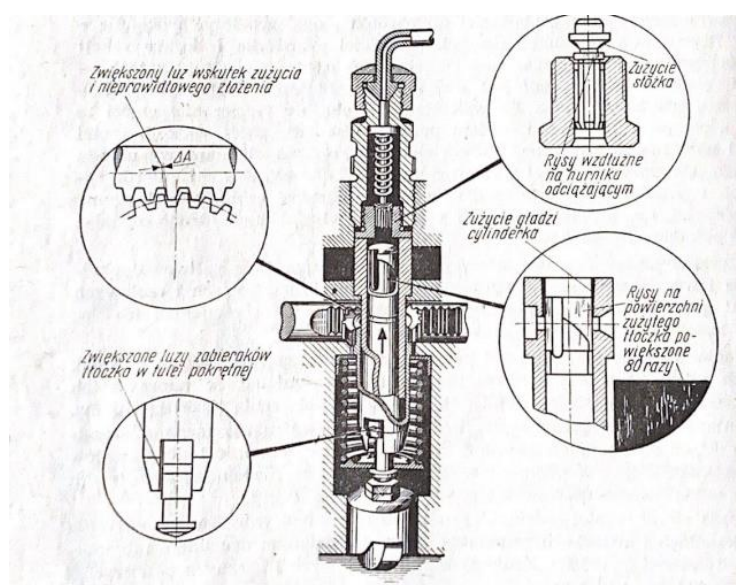
cały czas ewoluował [10, 11]. Pojawiały się różne koncepcje i projekty układów wtryskowych, których zadaniem była realizacja procesu wtrysku w założony sposób. Cechą wspólną wszystkich układów jest jednak z reguły konieczność wytworzenia bardzo wysokiego ciśnienia paliwa (10 -200 MPa) stwarzającego skomplikowany rozkład obciążeń mechanicznych elementów układu oraz odpowiedniego pasowania elementów ruchomych. Równorzędnie dodatkowym czynnikiem wpływającym na funkcjonowanie układu są wymuszenia ciepło – chemiczne w odniesieniu do wtryskiwacza paliwa [2, 6, 13, 14].

Sytuacja ta powoduje, że niezależnie od tego z jakim rozwiązaniem układu mamy do czynienia tzn.: tzw. „konwencjonalnym” (mechaniczno – hydrauliczne sterowanie wtryskiem) czy też żargonowo określanym jako „wtrysk elektroniczny”, jego elementy należą do najbardziej zawodnych zarówno w odniesieniu do silników przemysłowych, jak i stosowanych powszechnie np. w motoryzacji.

- **Ocena stanu technicznego silnika i układu wtryskowego**

Elementy układu wtryskowego to często mechanizmy precyzyjne, wykonane z jakościowo bardzo dobrych materiałów oraz przy wykorzystaniu zaawansowanych technologii obróbki mechanicznej i ciepło – chemicznej. Długotrwale jednak narażone na niekorzystne oddziaływania i ewentualne nieprawidłowości związane np. z zanieczyszczeniami w paliwie uszkadzają się na wiele różnych sposobów [6].

Uszkodzenia jakie mogą pojawić się na elementach napędowych, tłoczących czy przepływowych skutkują zakłóceniami w procesie wtrysku np. zmniejszonym ciśnieniem wtrysku paliwa i odstępstwami od założonego przebiegu spalania, co w efekcie wpływa oczywiście również na skład spalin. Przykładowe uszkodzenia pompy wtryskowej znacząco wpływające na jej pracę przedstawiono na rys. 1

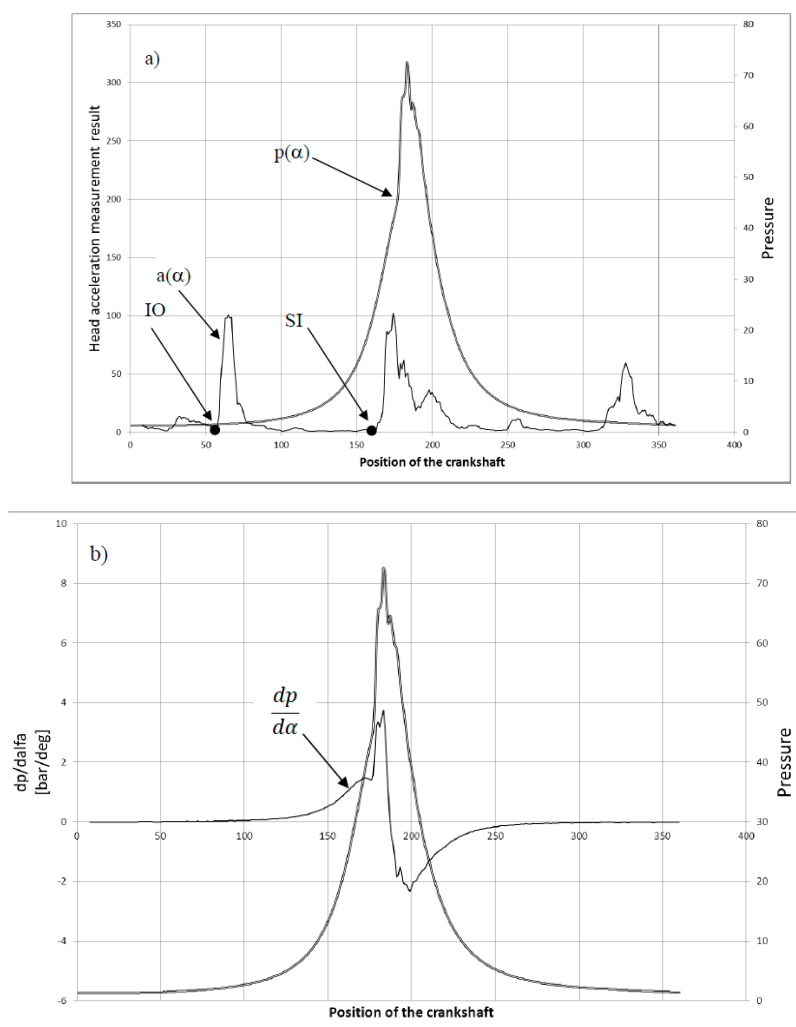


Rys.1. Przykładowe uszkodzenia pompy wtryskowej w silniku o zapłonie samoczynnym [23].

Obiektywna ocena niezawodności każdego urządzenia (w tym również silnika spalinowego) wymusza wartościujące (ilościowe) podejście do tego zagadnienia i poszukiwanie takich miar, które w sposób najbardziej wiarygodny opisywałyby tę cechę.

W odniesieniu do silników przemysłowych (np. okrętowych) w badaniach naukowych dotyczących ich działania, jak również w czasie ich eksploatacji, kluczową rolę w ocenie realizacji obiegu roboczego (a więc również stanu technicznego silnika i jego układów funkcjonalnych) odgrywają wykresy indykatorowe i ich analiza.

Informacje zobrazowane na wykresie indykatorowym (rys. 2) pozwalają w sposób kompleksowy dokonać oceny jakości realizacji zamiany energii chemicznej paliwa na energię mechaniczną. Dodatkowe pomiary w czasie indykowania cylindra (np. drgań w rejonie głowicy cylindrowej - rys. 2a) umożliwiają jednocześnie uzupełnienie tej oceny o szereg innych spostrzeżeń np. bieżących wartości faz rozrządu i „twardości” pracy silnika (rys. 2b).



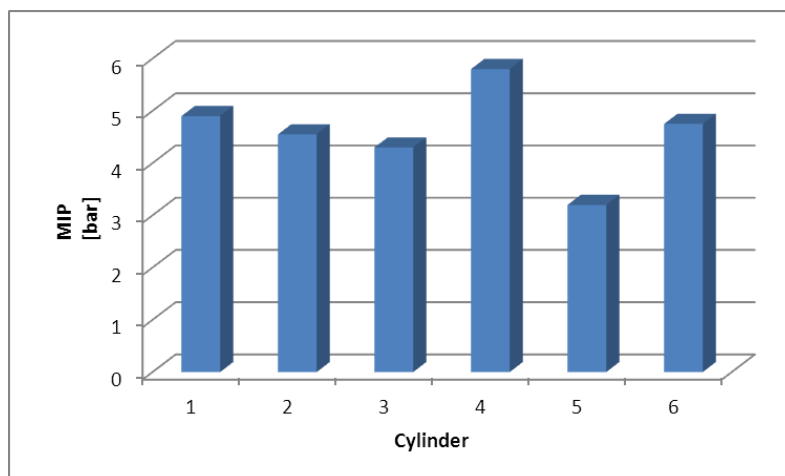
Rys.2 Rozwinięty wykres indykatorowy silnika. $p(\alpha)$ – ciśnienie jako funkcja obrotu wału korbowego, $a(\alpha)$ – przyspieszenia głowicy w rejonie zaworu dolotowego, SI – początek wtrysku paliwa, IO – początek otwarcia zaworu dolotowego

Przetworzenie uzyskanych w czasie pomiarów danych umożliwia dodatkowo uzyskanie wartości innych istotnych wskaźników działania jak np. średniego ciśnienia indykowanego - p_i

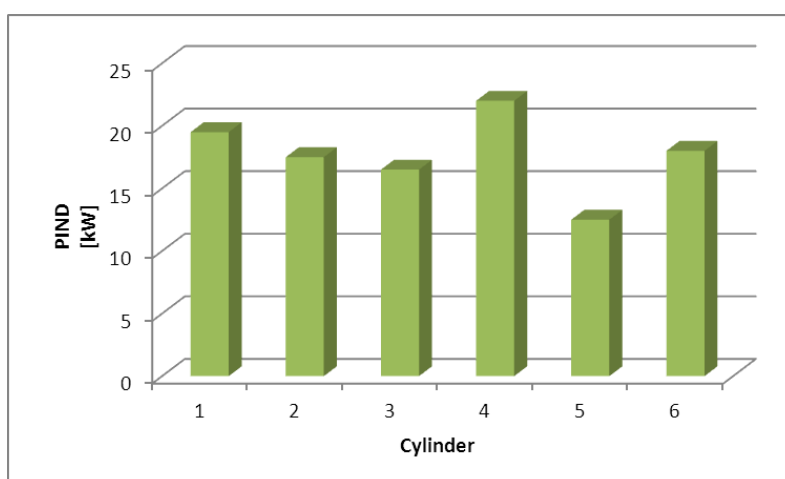


(rys. 3a) i mocy indykowanej - P_i (rys. 3b) odniesionych do wszystkich cylindrów silnika.

a)



b)



Rys.3 Wartości średniego ciśnienia indykowanego (MIP) oraz mocy indykowanej (PIND) dla poszczególnych cylindrów silnika 6 – cylindrowego.

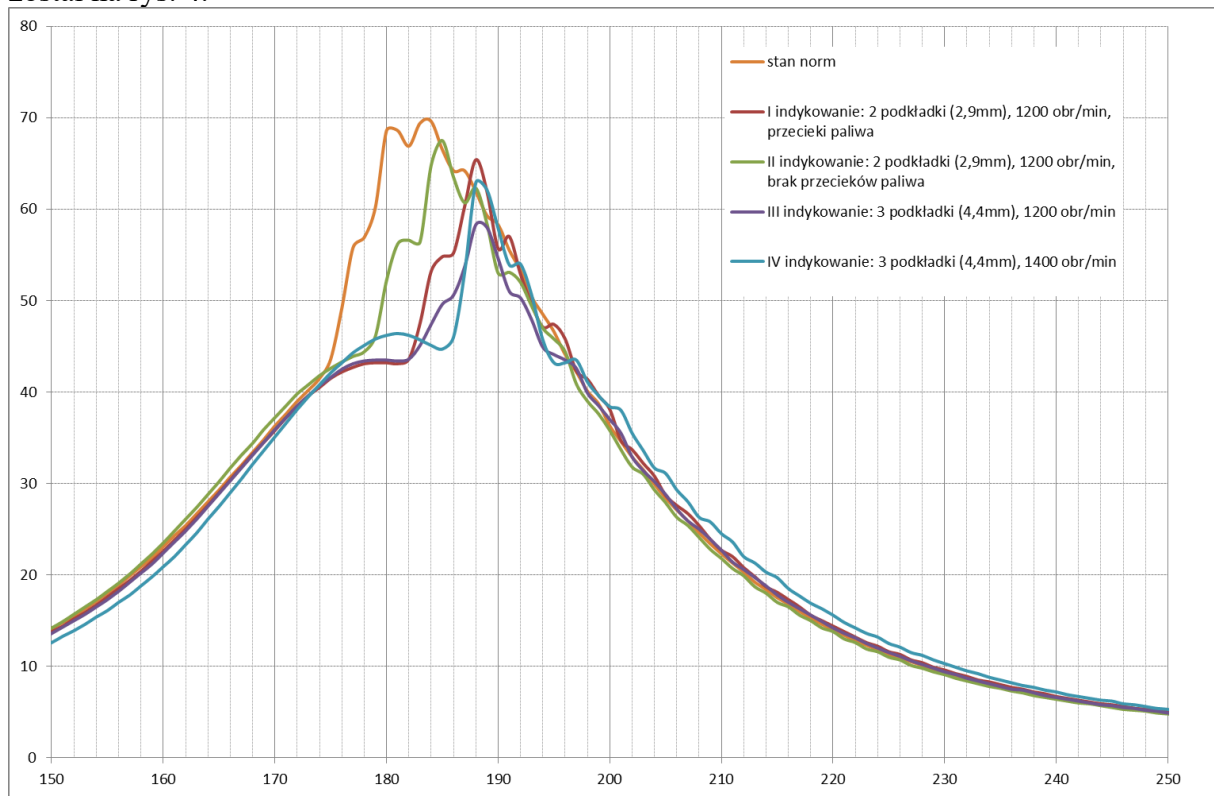
Analiza wartości i odchyłeń od wartości średniej tych, i innych (np. maksymalnego ciśnienia spalania) wielkości pozwala dość dobrze wypowiedzieć się np. na temat jakości realizacji wtrysku i stanu technicznego układu wtryskowego wg znanej zasady: „*typowe uszkodzenia prowadzą do typowych deformacji wykresu indykatorowego*”.

Wnioskowanie na podstawie informacji zawartych na wykresie indykatorowym opiera się więc przede wszystkim na odniesieniu otrzymanych wartości do wartości wzorcowych oraz doświadczeniu osoby wykonującej pomiary i opracowującej ekspertyzę diagnostyczną.

W przypadku typowych nieprawidłowości podczas realizacji procesu ich symptomy są powtarzalne i zbliżone, co w dużym stopniu ułatwia opracowanie diagnozy a także umożliwia w pewnym stopniu automatyzację generowanych wniosków.

Bazując na regułowym zapisie wiedzy można, bowiem zaimplementować przypadki typowe w ekspertowy system wiedzy wspomagający eksploatatora – zwłaszcza takiego, którego doświadczenie w tym zakresie jest niewielkie.

Procedurę postępowania można opisać na podstawie jednego, wybranego przypadku nieprawidłowości np. zbyt późnego rozpoczęcia wtrysku paliwa. W zależności od stopnia degradacji stanu technicznego aparatury wtryskowej i (lub) stopnia rozregulowania silnika typowy przebieg ciśnienia wewnątrzcyldrowego w rozpatrywanym przypadku przedstawiony został na rys. 4.



Rys. 4 Fragment rozwiniętego wykresu indykatorowego (suw sprężania i rozprężania) silnika czterosuwowego w 4 przypadkach (I – IV) opóźnionego wtrysku paliwa

Uzupełniając informacje uzyskane na podstawie wykresu indykatorowego o dodatkowe wielkości otrzymane np. w wyniku odczytu standardowego wyposażenia kontrolno – pomiarowego silnika np. w tym przypadku temperaturę spalin za cylindrem - T_{spal} można werbalnie (symbolicznie) opisać symptomy występującej nieprawidłowości np. w formie tabelarycznej (tab. 1).

Tab.1 Symptomy zbyt późnego wtrysku paliwa

| p_{GMP} | $dp/d\alpha$ | T_{spal} | α_{pmax} | P_{exh} | zbyt późny wtrysk |
|-----------|--------------|------------|-----------------|-----------|-------------------|
| normalne | normalne | normalne | normalne | normalne | - ¹ |
| niskie | normalne | normalne | normalne | normalne | - |
| niskie | wysokie | wysoka | normalne | normalne | ? ² |
| normalne | wysokie | wysoka | normalne | normalne | ? |
| niskie | wysokie | wysoka | duży | wysokie | + ³ |
| niskie | wysokie | wysoka | duży | normalne | + |
| niskie | wysokie | normalne | duży | wysokie | ? |
| niskie | wysokie | wysoka | normalne | wysokie | ? |
| normalne | normalne | wysoka | normalne | normalne | - |
| normalne | wysokie | wysoka | normalne | normalne | + |

Wydaje się zatem, że być może nie ma zbyt wielkiej potrzeby swego rodzaju „urozmaicenia” sposobów wnioskowania diagnostycznego w odniesieniu do rozpatrywanych elementów, jeżeli dotychczasowe, sprawdzone istnieją.

Problem, który pojawia się jednak coraz częściej to brak przysposobienia silników przemysłowych do pomiarów ciśnień wewnątrzcyldrowych za pomocą mobilnych systemów pomiarowych (brak zaworów/kurków indykatorowych) oraz systemowy brak takiej możliwości w silnikach szybkoobrotowych. Można zatem (i jest to czynione), szczególnie w stosunku do tak mocno powiązanego z procesem spalania układu, jakim jest układ wtryskowy wprowadzać inne, ocenowe wskaźniki stanu technicznego (jakościowe i ilościowe), które pozwoliłyby na opracowanie diagnozy technicznej [10].

¹ - symbol „-”, należy interpretować jako: nie dotyczy.

² - symbol „?”, należy interpretować jako: trudno określić.

³ - symbol „+”, należy interpretować jako: ma miejsce (dotyczy, występuje z dużym prawdopodobieństwem itp.)

Dodatkowo również w odniesieniu do silników przysposobionych do tzw. indykowania nic nie stoi na przeszkodzie w ich zastosowaniu, gdyż każda ocena i analiza, która bazuje na większej liczbie zmiennych jest pełniejsza i prowadzi do właściwszych ekspertyz i wynikających z nich decyzji.

- **Koncepcja „szybkiego” klasyfikatora stanu technicznego układu wtryskowego**

Mając na uwadze brak istotnych problemów technicznych w odniesieniu do prawie każdego silnika w zakresie przeprowadzenia pomiarów i pozyskania wyników odnoszących się do składu spalin w różnych stanach obciążenia silnika można dokonać empirycznej weryfikacji następującej hipotezy - **H**: „*identyfikacja stanu technicznego układu wtryskowego silnika jest możliwa na podstawie analizy składu spalin dlatego, ponieważ w różnych klasach stanów technicznych ich skład jest znacząco różny*”.

Jedną z konsekwencji - **K** tej hipotezy, jest zatem nie budzący logicznej wątpliwości fakt, polegający na tym, że lokalizacja zbioru wskaźników **W** opracowanym na podstawie pomiarów składu spalin, zobrazowana w n – wymiarowej przestrzeni (n – moc zbioru **W**) będzie istotnie różna dla wyodrębnionych podzbiorów - **S_i** klas stanów technicznych układu wtryskowego.

W I etapie można zatem przedstawioną konsekwencję - **K** wykorzystać do empirycznego sprawdzenia prawdziwości przedstawionej hipotezy - **H**, czyli do jej weryfikacji w celu zaakceptowania lub sfalsyfikowania. Weryfikacja taka polega na eksperymentalnym badaniu prawdziwości konsekwencji - **K**, i jest możliwa według następującego schematu [1]:

$$[(H \Rightarrow K) \wedge K] \Rightarrow H \quad (1)$$

Logiczna interpretacja tego schematu wnioskowania przedstawia się następująco : jeżeli sprawdzenie doświadczalne konsekwencji - **K** potwierdziło jej słuszność, to jeśli prawdziwa jest implikacja :

$$H \Rightarrow K \quad (2)$$

to hipoteza - **H** jest także prawdziwa i może być zaakceptowana.

Przedstawiony tok postępowania wymaga na etapie wstępnym co najmniej jakościowej analizy składu spalin silnika pozwalającej na jednoznaczne stwierdzenie jego niepowtarzalności w przypadku różnych klas – stanów układu wtryskowego z uwzględnieniem stanu obciążenia silnika.

Analiza taka jest możliwa poprzez wykorzystanie wyników pomiaru składu spalin uporządkowanych jako:

$$C_i(x) = f(n, M_o) \quad (3)$$

gdzie:

$C_i(x)$ – stężenie w spalinach rozpatrywanego ich składnika x (np. CO) w i – tej klasie stanów technicznych;

n – prędkość obrotowa silnika [obr/min];

M_o – moment obrotowy obciążenia [Nm];

i – liczba wyróżnionych klas stanów technicznych układu wtryskowego;

i ich przedstawienie graficznie, jako interpolowane powierzchnie w trójwymiarowym układzie współrzędnych XYZ ($X \rightarrow n$, $Y \rightarrow M_o$ i $Z \rightarrow C_i$).

Stosowna interpolacja zrealizowana może być z wykorzystaniem odpowiednich pakietów obliczeniowych (np. MATLAB MathWorks). W uzyskaniu przedstawionych, w dalszej części artykułu wynikach wykorzystane zostało środowisko Grapher Golden Software Inc. w wersji testowej (<https://www.goldensoftware.com/products/grapher>).

Wizualizacja taka umożliwi wstępną, jakościową ocenę różnic dotyczących stężeń poszczególnych składników w wyodrębnionych klasach stanów technicznych i niezawodnościowych, czyli akceptację hipotezy **H** zgodnie ze schematem wnioskowania (1).

Zaobserwowane różnice położenia interpolowanych powierzchni $C_i(x) = f(n, M_o)$, będące skutkiem różnych wartości wyników pomiarów stężenia określonych składników spalin w różnych klasach stanu technicznego, umożliwiają wygenerowanie odpowiednich wektorów tzw. residuów, które stanowią przyczynę do opracowania odpowiedniego klasyfikatora diagnostycznego [8].

Generacja powyższego wektora polegać może na porównaniu wartości stężenia wybranych składników spalin w stanie referencyjnym (np. klasa stanów S_0) oraz odpowiadających im wartości w analizowanych klasach stanów wg następujących zależności:

$$res_{ix}(n, M_o) = [C_i(x)]_{stan S_0} - [C_i(x)]_{stan S_i} \quad (4)$$

gdzie: $C_i(x)$ – stężenie w spalinach rozpatrywanego ich składnika – x w i – tej klasie stanów technicznych;

Wyznaczone residua można traktować jako miarę niezgodności pomiędzy stężeniami rozpatrywanych składników spalin w referencyjnym stanie technicznym układu wtryskowego a pozostałymi klasami jego stanów będących przedmiotem analizy.

Pozytywna weryfikacja postanowionej hipotezy oraz wyniki badań doświadczalnych umożliwiają w kolejnym etapie opracowanie ilościowego wskaźnika obserwowanych różnic, który może być przyczynkiem (oczywiście pod warunkiem dysponowania odpowiednią liczbą danych empirycznych) stworzenia klasyfikatora stanu.

Dla opracowania takiego uproszczonego klasyfikatora dokonać można interpretacji uzyskanych wcześniej wektorów residuów (4) jako wektorów w przestrzeni k – wymiarowej, charakteryzujących się określoną długością i położeniem w tej przestrzeni. Wymiar rozpatrywanej przestrzeni - k zależy oczywiście od liczby przeprowadzonych pomiarów. Długość każdego z analizowanych wektorów określić można wg zależności [22]:

$$|res_{i1}| = \sum_{l=1}^k (|[C_i(x)]_{stan S_0} - [C_i(x)]_{stan S_i}|)_l \quad (5)$$

zaś jego położenie np. jako kąt w odniesieniu do przyjętego wektora umownego. Takim wektorem może być np. wektor \vec{j} o tym samym wymiarze oraz wszystkich współrzędnych, których wartość wynosi 1.

Kąt między wektorami można wyznaczyć z zależności [22]:

$$\cos \alpha = \frac{\vec{j} \cdot \vec{res}_i}{|\vec{j}| \cdot |\vec{res}_i|} \quad (6)$$

gdzie:

$\vec{j} \cdot \vec{res}_i$ – iloczyn skalarny wektorów \vec{j} i \vec{res}_i ;
 $|\vec{j}|, |\vec{res}_i|$ – długość wektorów $|\vec{j}|$ i $|\vec{res}_i|$

Przeprowadzenie wg powyższych zasad postępowanie pozwala na określenie wspomnianych wskaźników ilościowych a tym samym klasyfikatora stanu.

• **Badania empiryczne i ich wyniki**

Badania (w ramach pracy [3]) przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym silnika Andoria S-320. Jest to wolnossący jednocylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym. Wtrysk paliwa realizowany jest do wstępnej komory wirowej, chłodzenie podzespołów odbywa się poprzez odparowywanie wody ze zbiornika chłodzącego. Stanowisko badawcze przedstawia rys. 5. Obciążenie silnika realizowane jest poprzez hamulec wirowy połączony z silnikiem poprzez wał transmisyjny.



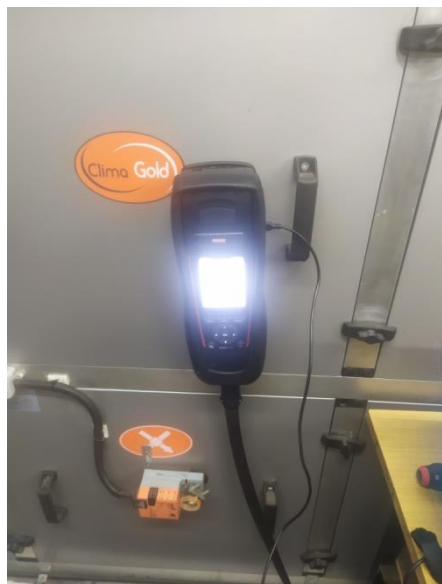
Rys.5 Stanowisko badawcze silnika spalinowego.

[źródło: opracowanie własne]

Pomiar stężenia związków toksycznych w spalinach silnika zmierzono przy pomocy analizatora elektrochemicznego typu KIGAZ 310PRO. Sondę pomiarową umieszczono w przewodzie spalin wylotowych w sposób przedstawiony na rys. 6b. Analizator spalin użyty w badaniach przedstawiono na rys. 6a. Rys. 6c. przedstawia tabelaryczne zestawienie charakterystyki pomiarowej omawianego analizatora.



a)



b)



c)



| Parametr: | Zakres pomiarowy: | Rozdzielczość: |
|---------------------|-------------------|----------------|
| NO | 0 - 5000 ppm | 1 ppm |
| NO ₂ | 0 - 1000 ppm | 1 ppm |
| CO | 0 - 8000 ppm | 1 ppm |
| Nadmiar powietrza λ | 1 - 9.99 | 0,01 |
| Temp. spalin | -100 - 1250°C | 0,1°C |
| Różnica ciśnień | -200 - 200 hPa | 1 Pa |

Rys.6. a) analizator spalin, b) umiejscowienie sondy analizatora spalin w przewodzie wylotowym silnika, c) dane analizatora spalin KIGAZ 310PRO

Badania laboratoryjne pozwoliły na uzyskanie wyników pomiaru składu spalin dla przyjętych, określonych klas stanów technicznych badanego silnika. Biorąc pod uwagę możliwości prezentowanego stanowiska i możliwe do realizacji stany badania przeprowadzono dla:

- Klasy stanów „0” – (w skrócie: stan 0 – s₀) stan referencyjny wtryskiwacz silnika po przeparowaniu ok. 300 h, bez ingerencji w jego strukturę konstrukcyjną;
- Klasy stanów „1” – (w skrócie: stan 1 – s₁) stan niesprawności technicznej oraz częściowej zdatności wtryskiwacza – obniżone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza;



- Klasy stanów „2” – (w skrócie: stan 2 – s₂) stan niesprawności technicznej oraz częściowej zdadności wtryskiwacza – podwyższone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza;
- Klasy stanów „3” – (w skrócie: stan 3 – s₃) para precyzyjna: dysza rozpylacza + iglica wymieniona na nową (stan sprawności technicznej i pełnej zdadności)

Analizie poddano następujące składniki spalin:

- CO
- CO₂
- NO_x
- O₂

W czasie realizacji badań założono prace silnika na charakterystyce śrubowej. Pracę silnika na tej charakterystyce można przedstawić następującym wzorem [19]:

$$N_e = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_0 = 2 \cdot \pi \cdot n^3 \cdot c$$

gdzie:

$$c = \frac{M_{ozn}}{n_{zn}} = 0,1344$$

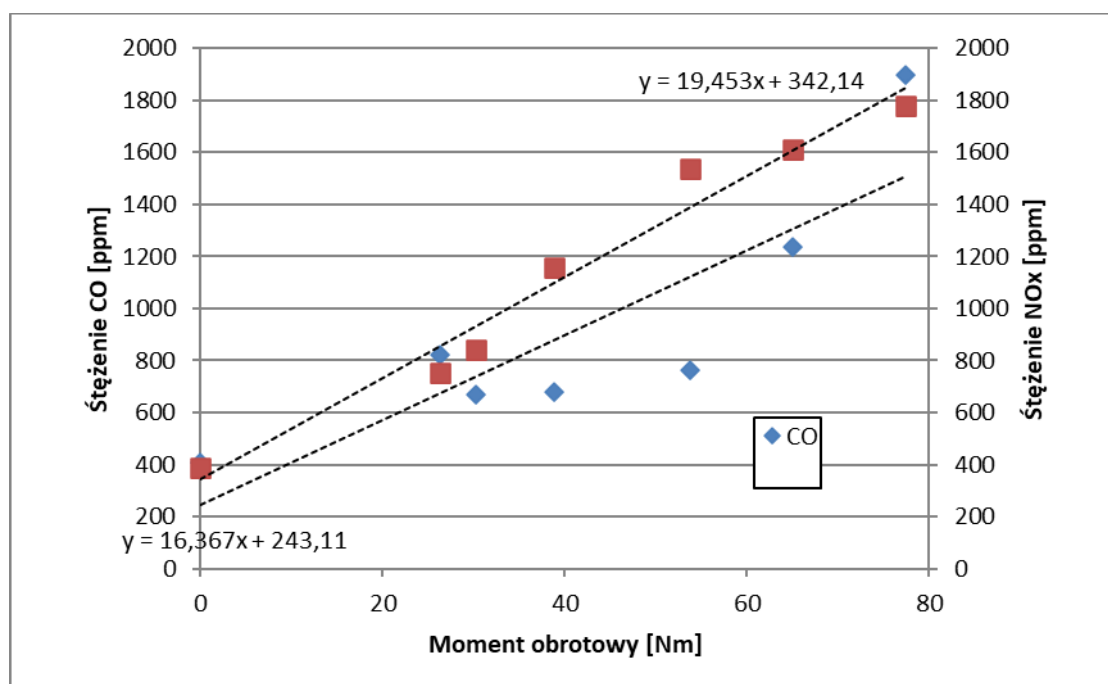
gdzie:

N_e - moc użyteczna

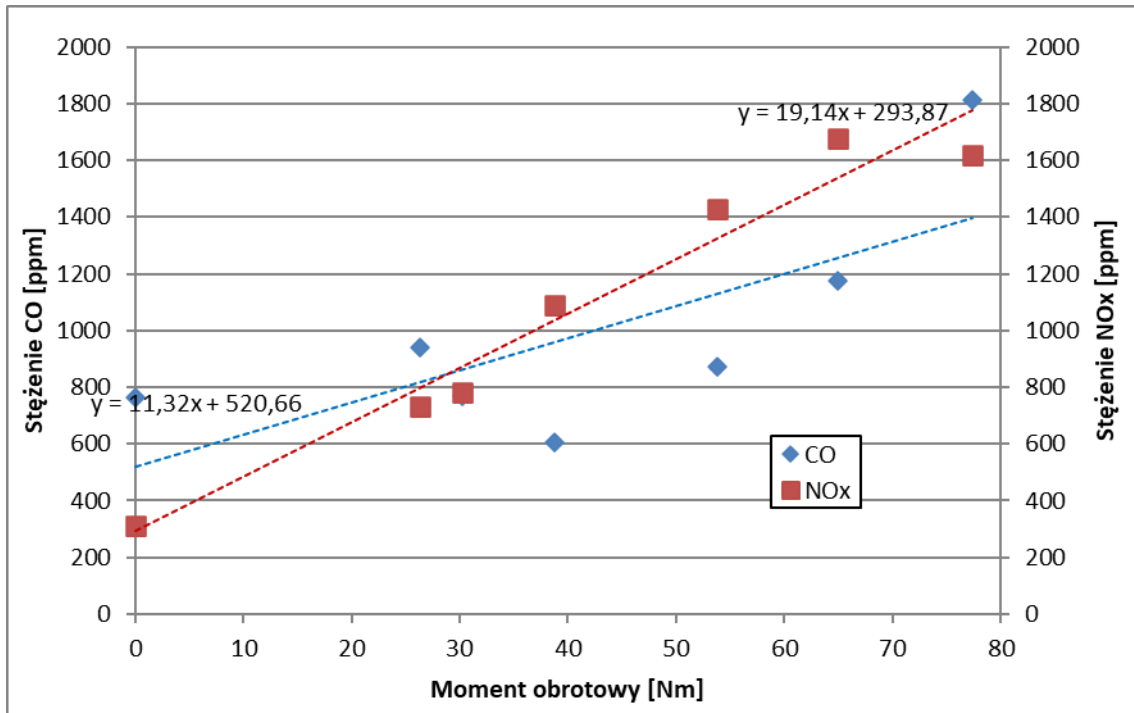
M_0 - moment obrotowy

n - prędkość obrotowa

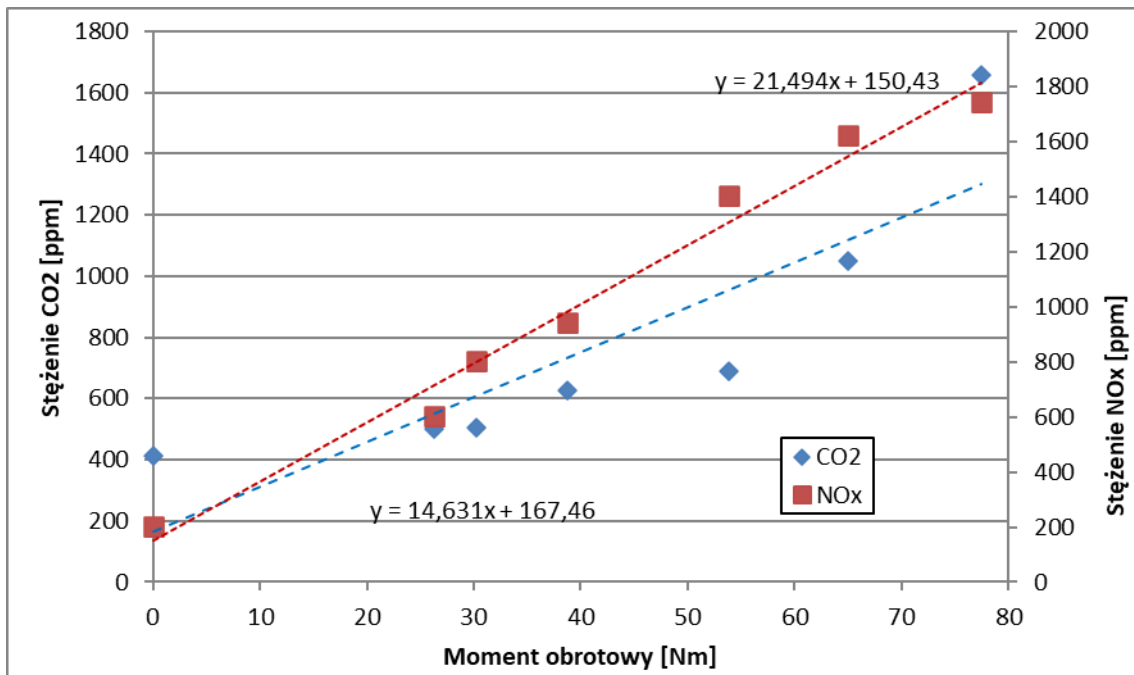
Przykładowe, reprezentatywne wyniki przedstawiono na rys. 7 – 10.



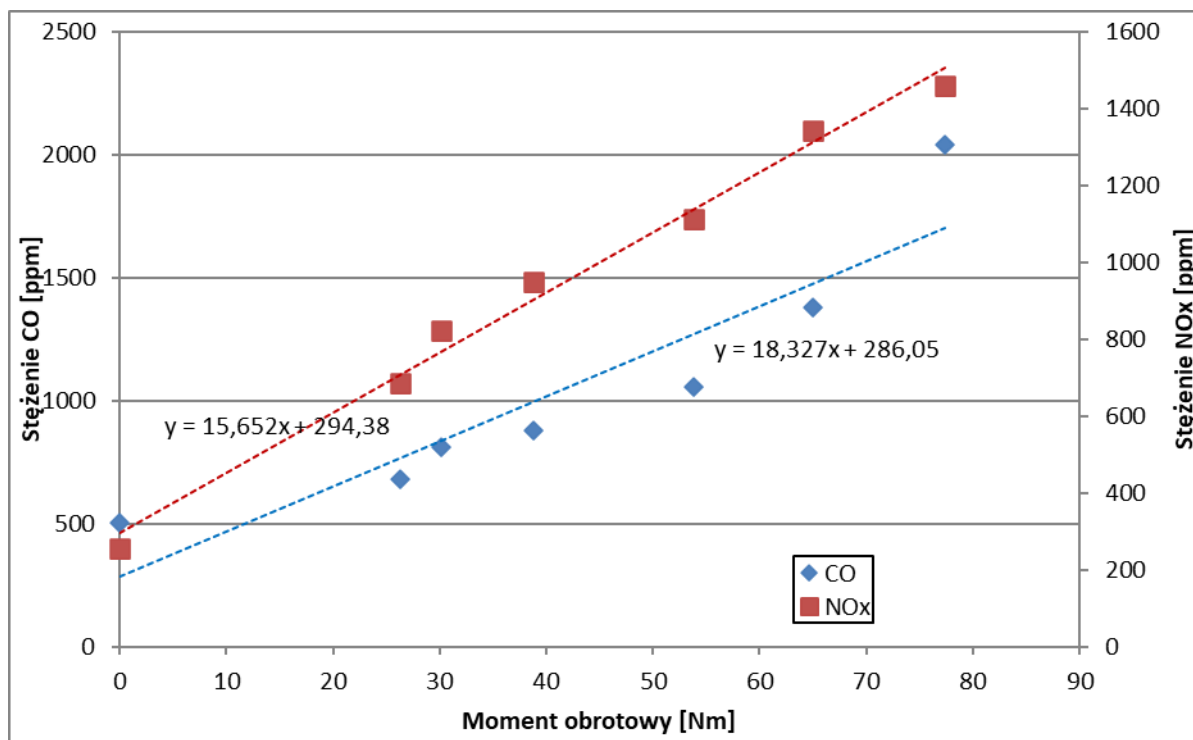
Rys.7 Stężenie CO i NOx jako funkcja momentu obrotowego silnika; stan 0 – stan referencyjny: wtryskiwacz silnika po przepracowaniu ok. 300 h, bez ingerencji w jego strukturę konstrukcyjną.



Rys.8 Stężenie CO i NOx jako funkcja momentu obrotowego silnika; stan 1 – stan niesprawności technicznej oraz częściowej zdadności wtryskiwacza – obniżone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza.



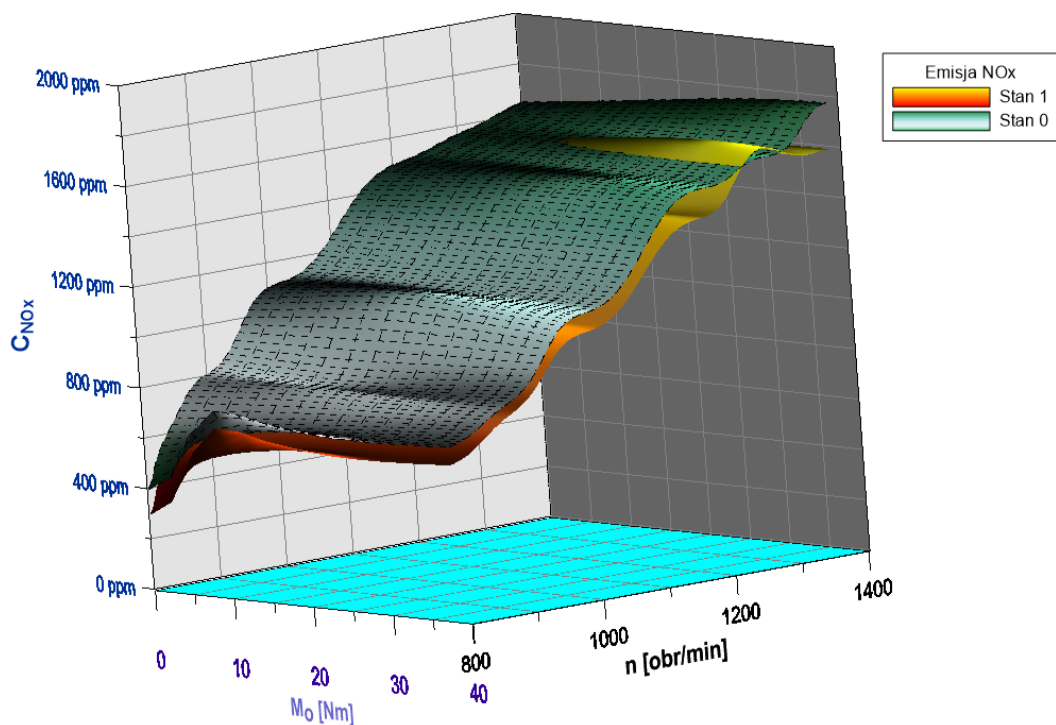
Rys.9 Stężenie CO i NOx jako funkcja momentu obrotowego silnika; stan 2 – stan niesprawności technicznej oraz częściowej zdadności wtryskiwacza – podwyższone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza



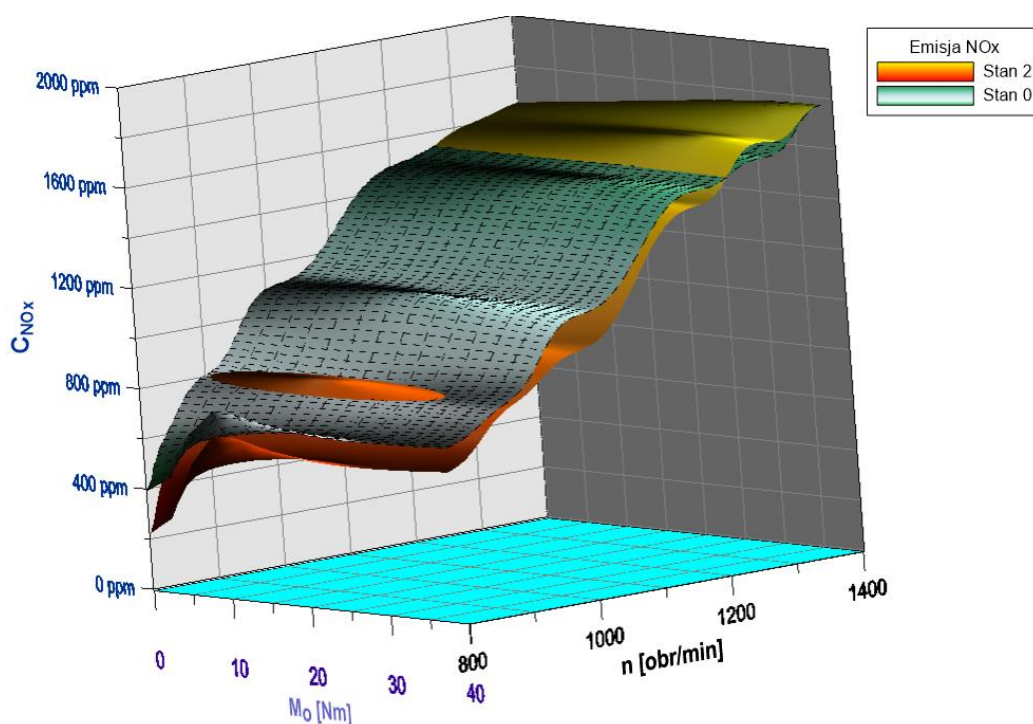
Rys.10 Stężenie CO i NOx jako funkcja momentu obrotowego silnika; stan 3 – para precyzyjna: dysza rozpylacza + iglica wymieniona na nową (stan sprawności technicznej i pełnej zdatności)

W I etapie analizy, zgodnie z przyjętymi założeniami dokonano wizualizacji uzyskanych danych. Wizualizacja taka umożliwia wstępną, jakościową ocenę różnic dotyczących stężeń poszczególnych składników w wyodrębnionych klasach stanów technicznych i niezawodnościowych.

Przykładowe efekty uzyskane w ten sposób, gdzie klasy stanów 1 i 2 zestawiono ze stanem referencyjnym – klasą stanów 0 dla stężenia NO_x, przedstawiono na rys. 11 – 12.



Rys.11 Stężenie NO_x jako funkcja $NO_x = f(n, M_o)$ – stan 0 i stan 1.



Rys.12 Stężenie NO_x jako funkcja $NO_x = f(n, M_o)$ – stan 0 i stan 2.

Na podstawie jakościowej analizy wstępnej stwierdzono, że w żadnym z przypadków uzyskane rezultaty w postaci interpolowanych powierzchni $C_i(x) = f(n, M_o)$ (gdzie: C_i – stężenie w spalinach rozpatrywanego ich składnika - NO_x, CO lub CO₂) dla rozpatrywanych klas stanów nie pokrywają się a zatem można stwierdzić, że brak jest podstaw do odrzucenia weryfikowanej hipotezy.

Zaobserwowane różnice położenia interpolowanych powierzchni $C_i(x) = f(n, M_o)$, będące skutkiem różnych wartości wyników pomiarów stężenia określonych składników spalin w różnych klasach stanu technicznego, umożliwiają wygenerowanie odpowiednich wektorów tzw. residuów, które stanowią przyczynę do opracowania odpowiedniego klasyfikatora diagnostycznego [9].

Generacja powyższego wektora polegać może na porównaniu wartości stężenia wybranych składników spalin w stanie referencyjnym (stan 0) oraz odpowiadających im wartości w analizowanych klasach stanów wg następujących zależności:

$$\begin{aligned} res_{i1}(n, M_o) &= [C_i(n, M_o)]_{stan\ 0} - [C_i(n, M_o)]_{stan\ 1} \\ res_{i2}(n, M_o) &= [C_i(n, M_o)]_{stan\ 0} - [C_i(n, M_o)]_{stan\ 2} \\ res_{i3}(n, M_o) &= [C_i(n, M_o)]_{stan\ 0} - [C_i(n, M_o)]_{stan\ 3} \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: C_i – stężenie w spalinach rozpatrywanego ich składnika - NO_x , CO lub CO_2 .

Dla zachowania porównywalności skali otrzymane wektory residuów poddano standaryzacji wg wzoru [22]:

$$x_{st} = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

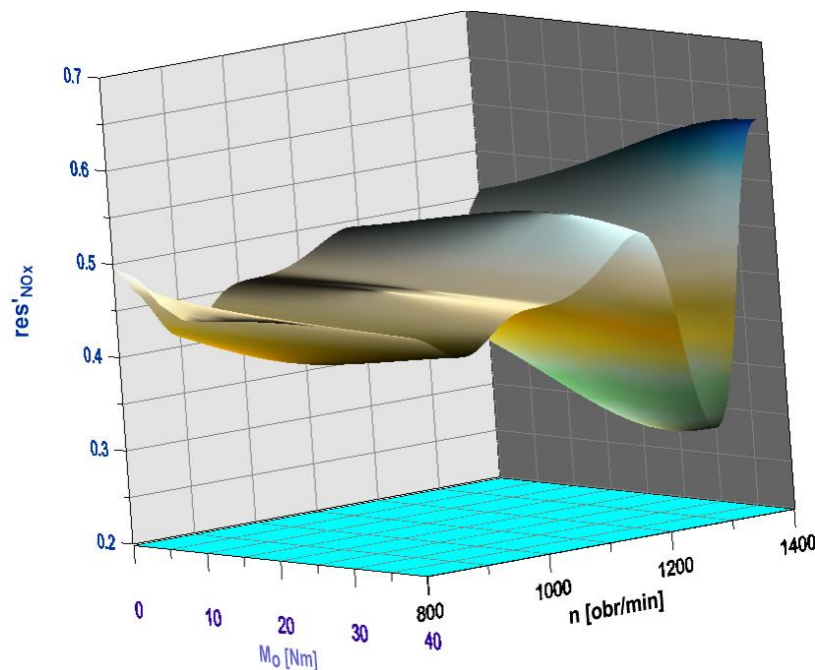
gdzie: x_{st} – wartość standaryzowana,

μ - wartość średnia próbki,

σ - odchylenie standaryzowane próbki.

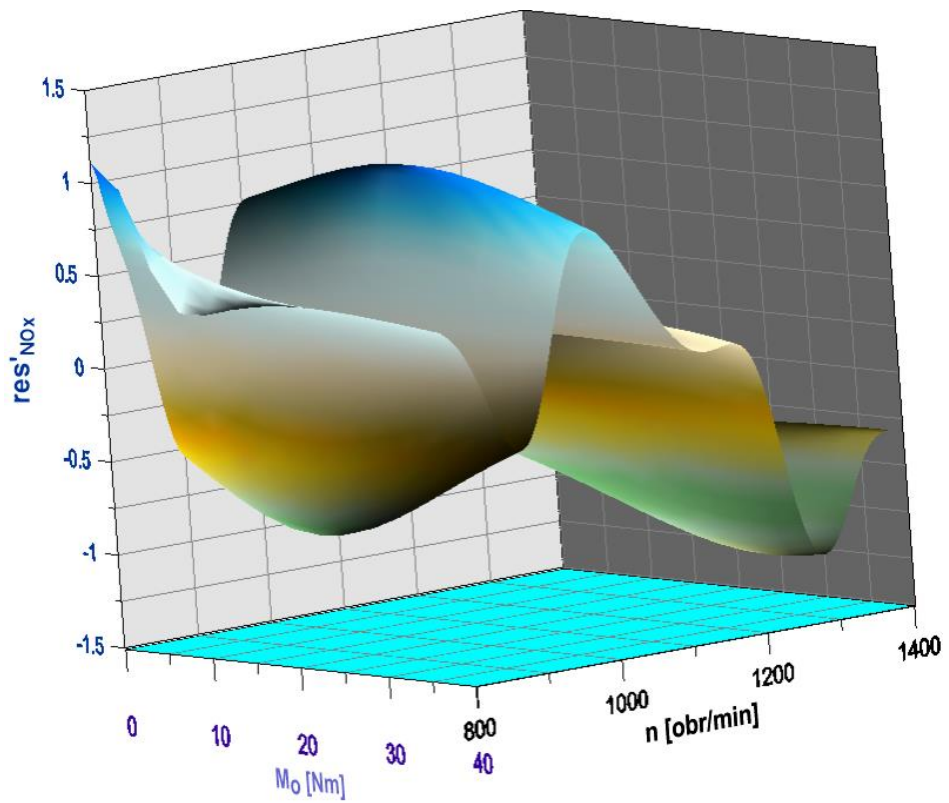
Uzyskane, przykładowe rezultaty przedstawiono na rys. 13 – 15.

- stan 0 ↔ stan 1



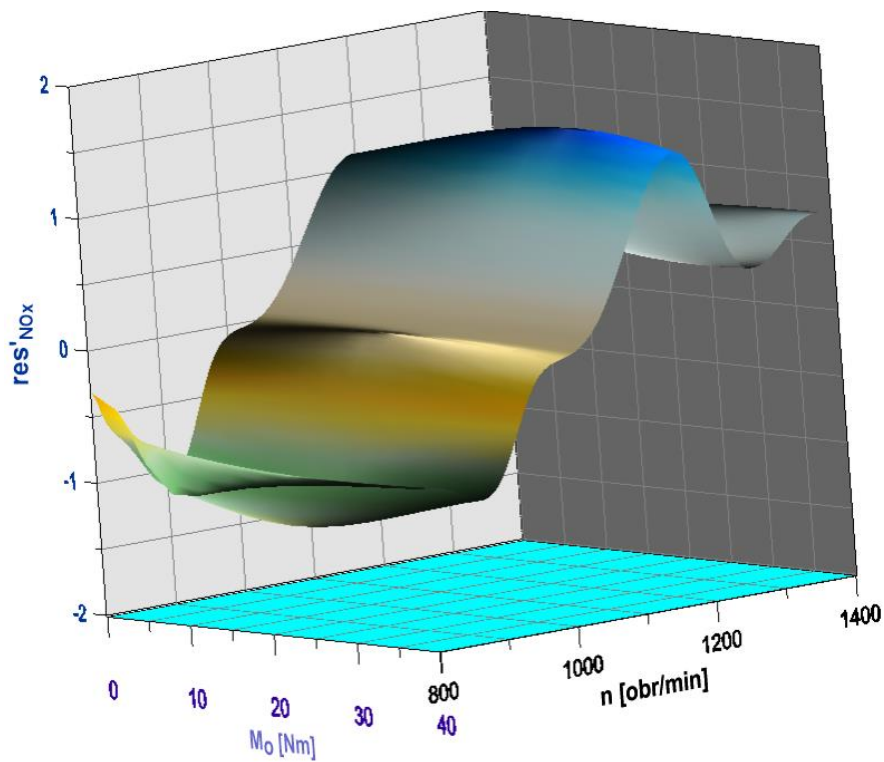
Rys. 13 Standaryzowany wektor residuów res'_{NOx1}

- stan 0 ↔ stan 2



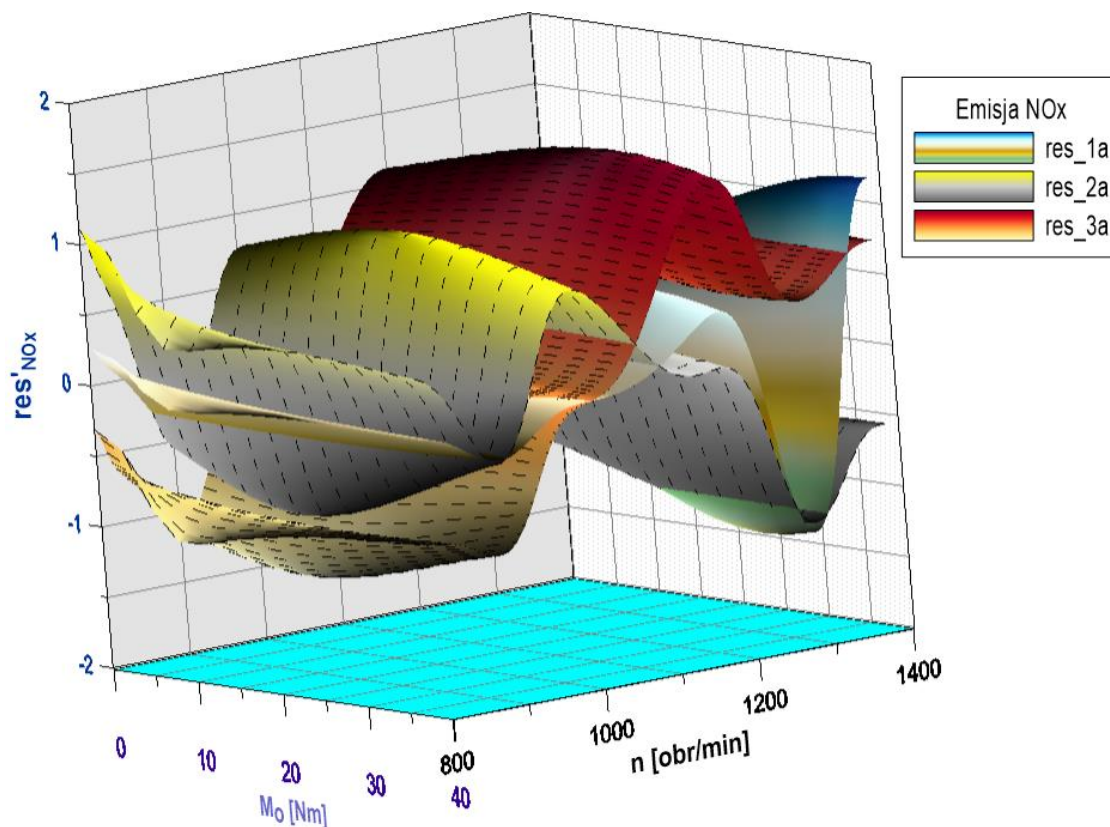
Rys. 14 Standaryzowany wektor residuów res'_{NOx2}

- stan 0 ↔ stan 3



Rys. 15. Standaryzowany wektor residuów res'_{NOx3}

W celu jakościowego sprawdzenia, czy uzyskane w poszczególnych przypadkach wektory residuów (standaryzowane) nie są identyczne, dodatkowo zestawiono je dla każdego ze składników spalin – przykład dla stężenia NO_x przedstawiono na rys. 16.



Rys.16. Standaryzowane wektory residuów stężenia NO_x interpretowane jako interpolowana powierzchnia w układzie współrzędnych $\text{res}'_{\text{NO}_x} = f(n, M_o)$ obliczone w odniesieniu do stanu referencyjnego dla: res_1a - stanu 1, res_2a - stanu 2, res_3a - stanu 3

Przeprowadzona analiza pozwoliła w każdym z rozpatrywanych przypadków potwierdzić konsekwencje weryfikowanej hipotezy tzn. oprócz tego, że przynależność stanu technicznego układu wtryskowego badanego silnika do jednej z wyróżnionych klas stanów skutkuje obserwowalnymi różnicami stężenia NO_x , CO i CO_2 , to w rozpatrywanej przestrzeni stanów różnice te są unikalne.

Pozytywna weryfikacja postanowionej hipotezy oraz wyniki badań doświadczalnych umożliwiły tym samym opracowanie ilościowego wskaźnika obserwowanych różnic wg. zależności (5) i (6).

Wskaźnik ten, stał się przyczynkiem stworzenia klasyfikatora stanu opartego o tzw. diagnostykę obrazową [4, 7, 8] realizowaną w oparciu o zasadę: „typowym stanom technicznym towarzyszą charakterystyczne rejony (obszary) wartości rozpatrywanych wskaźników pracy silnika np. stężenia wybranych składników spalin”.

Zgodnie z założeniami dokonano interpretacji uzyskanych wcześniej wektorów residuów (7) jako wektorów w przestrzeni $k = 480$ – wymiarowej ($k = 480$ – liczba

przeprowadzonych pomiarów), charakteryzujących się określoną długością – wg zależności (5) i położeniem w tej przestrzeni opisanym przez kąt α - wyznaczony wg zależności (6).

Uzyskane wyniki zestawiono w tab. 2

Tab. 2 Zestawienie wielkości opisujących położenie wektorów residuów w przestrzeni k - wymiarowej

| | Klasa stanów S_1 | | | |
|--------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| | res_{NOx1} [ppm] | res_{CO1} [ppm] | res_{CO21} [%] | Uwagi |
| Długość wektora | 2592,28 | 3465,25 | 4,18 | $ \vec{j} = 480$ |
| Kąt α [deg] | 50,03 | 108,39 | 78,9 | - |
| | Klasa stanów S_2 | | | |
| | res_{NOx2} [ppm] | res_{CO2} [ppm] | res_{CO22} [%] | Uwagi |
| Długość wektora | 2392,59 | 3739,1 | 82,7 | $ \vec{j} = 480$ |
| Kąt α [deg] | 60,84 | 46,98 | 20,4 | - |
| | Klasa stanów S_3 | | | |
| | res_{NOx3} [ppm] | res_{CO3} [ppm] | res_{CO23} [%] | Uwagi |
| Długość wektora | 4917,94 | 4920,49 | 5,69 | $ \vec{j} = 480$ |
| Kąt α [deg] | 43,08 | 135,7 | 43,23 | - |

Jak widać, na podstawie wyników zawartych w tab. 2 można wstępnie założyć, że opracowany w opisany sposób wskaźnik ilościowy wskazuje specyficzne zorientowanie poszczególnych wektorów w przestrzeni n – wymiarowej a zatem najprawdopodobniej może on zostać wykorzystany do opracowania wspomnianego klasyfikatora stanu np. z zastosowaniem systemu ekspertowego, pod warunkiem dysponowania odpowiednio licznym zbiorem wyników badań empirycznych dedykowanych konkretnemu typowi silnika.

• Podsumowanie

Jak można było spodziewać się, wyniki badań doświadczalnych pozwoliły sformułować

wniosek o braku podstaw do odrzucenia przedstawionej na wstępie hipotezy roboczej. Stwarza to duże, utylitarne możliwości wykorzystania stosunkowo łatwych (z uwagi na względy techniczne) do zrealizowania pomiarów składu spalin do oceny i ewentualnej klasyfikacji stanu technicznego rozpatrywanego w tym przypadku układu wtryskowego.

Ilościowe mierniki klasyfikacji (np. zaproponowane) stwarzają dodatkowe możliwości w zakresie wspomagania procesu wnioskowania diagnostycznego np. z wykorzystaniem systemu ekspertowego lub odpowiednio wytrenowanej sztucznej sieci neuronowej.

Literatura

1. Benjamin J.R., Cornell C.A.: Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla Inżynierów. WNT, Warszawa 1977
2. Brun R.: Szybkobieżne silniki wysokoprężne. WKiŁ, Warszawa 1973
3. Bujczenko J.: Analiza możliwości wykorzystania wyników pomiaru składu spalin w diagnostyce procesu wtrysku paliwa. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa. Gdańsk 2021.
4. Cempel C., Tomaszewski F.: Diagnostyka maszyn. Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom 1992
5. Chybowski L.: Diagnostowanie silników okrętowych z zapłonem samoczynnym w oparciu o analizę procesów wtrysku i spalania paliwa. Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie, Szczecin 2019
6. Falkowski H.: Aparatura wtryskowa silników wysokoprężnych. WKiŁ, Warszawa 1976
7. Hubertus G.: Diagnostowanie silników wysokoprężnych. WKiŁ, Warszawa 2004
8. Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: Diagnostyka procesów. WNT, Warszawa 2002
9. Kordos, P., Sarnowski, C., Drożdziel, P.: Wpływ regulacji i stanu technicznego aparatury wtryskowej silnika wysokoprężnego na zadymienie spalin. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów. Politechnika Warszawska 2008, z. 2/69, s. 41-48
10. Kowalewicz A.: Systemy spalania szybkoobrotowych tłokowych silników spalinowych. WKiŁ, Warszawa 1980
11. Listewnik J., Marcinkowski J.: Rozwój konstrukcji okrętowych wolnoobrotowych silników spalinowych. Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie. Szczecin 2000.
12. Merkisz J., Piaseczny L., Kniaziewicz T.: Zagadnienia emisji spalin silników okrętowych. Wyd. Politechnika Poznańska, Poznań 2016

13. Piotrowski I.: Okrętowe silniki spalinowe Zasady budowy i działania. Wyd. Morskie, Gdańsk 1983
14. Piotrowski I., Witkowski K.: Okrętowe silniki spalinowe. TRADEMAR, Gdynia 1996
15. Rudnicki J., Zadrąg R.: Problems of modelling toxic compounds emitted by a marine internal combustion engine in unsteady states. Polish Maritime Research. Vol. 21, nr 4(84) (2014), s.57-65, ISSN 1233-2585
16. Rudnicki J., Zadrąg R.: Technical State Assessment of Charge Exchange System of Self-Ignition Engine, Based on The Exhaust Gas Composition Testing. Polish Maritime Research. nr S1(93) (2017), s.203 - 212, ISSN 1233-2585.
17. Rudnicki J., Zadrąg R.: Problems of modelling toxic compounds emitted by a marine internal combustion engine for the evaluation of its structure parameters. Combustion Engines / Silniki Spalinowe. -, iss. 3 (2015), s.432-441
18. Wajand J. A.: Silniki o zapłonie samoczynnym. WNT Warszawa 1988
19. Witkowski K.: Badania wpływu wybranych uszkodzeń silników okrętowych na parametry pracy silnika i skład spalin. Autobusy : technika, eksploatacja, systemy transportowe. R.17, nr 4, s. 95-101, Radom 2016.
20. Zadrąg R., Zellma M.: Modelling of toxic compounds emission in marine diesel engine during transient states at variable pressure of fuel injection. Journal of Polish CIMAC, Vol. 9, No 1, Gdańsk 2014.
21. Zabłocki M.: Wtrysk i spalanie paliwa w silnikach wysokoprężnych. WKiŁ, Warszawa 1976
22. Żakowski W.: Analiza matematyczna. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2007
23. Stawiszyński F. (1983) Poradnik mechanika samochodowego. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa