

## DIAGNOSTYKA TECHNICZNA USZKODZEŃ CZTEROSUWOWEGO MORSKIEGO SILNIKA SULZER 3AL 25/30 Z WYKORZYSTANIEM ZMIAN STOSUNKU ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA SPRĘŻANIA DO ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA DOŁĄDOWANIA

### TECHNICAL DIAGNOSTICS OF DAMAGES OF FOUR-STROKE MARINE ENGINE SULZER 3AL 25/30 USING RATIO CHANGES IN THE ABSOLUTE PRESSURE OF COMPRESSION TO ABSOLUTE PRESSURE OF BOOST

**Sebastian Drawing**

Uniwersytet Morski w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Mechaniczny,  
Katedra Siłowni Okrętowych, e-mail: s.drawing@wm.am.gdynia.pl,  
ORCID 0000-0002-2388-4342

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu wprowadzanych uszkodzeń (układu wtryskowego umiejscowionego w środkowym cylindrze silnika (cylindrze nr 2) lub w obrębie układu zasilania powietrzem silnika dla wszystkich cylindrów) czterosuwowego morskiego silnika Sulzer 3AL 25/30 na zmianę stosunku absolutnego ciśnienia sprężania do absolutnego ciśnienia doładowania, nazywanego współczynnikiem  $\beta_p$ .

**Słowa kluczowe:** diagnostyka techniczna, stosunek absolutnego ciśnienia sprężania do absolutnego ciśnienia doładowania, współczynnik  $\beta_p$ .

**Abstract:** This paper presents research results regarding influence of damages (injection system located in the central engine cylinder (cylinder no. 2) or within the engine air supply system for all cylinders) of four-stroke marine engine Sulzer 3AL 25/30 on ratio changes in the absolute pressure of compression to absolute pressure of boost (denominated  $\beta_p$  ratio).

**Keywords:** Optimization, pressure of compression, pressure of boost,  $\beta_p$  ratio.

## 1. WSTĘP

Diagnostyka techniczna stanowi dział nauki zajmujący się zespołem przedsięwzięć (metod i środków), zmierzających do identyfikacji stanu technicznego eksploatowanych urządzeń, nazywanych obiektami diagnostyki [Kluj 2000]. Dla praktyki eksploatacyjnej ważne jest, aby za pomocą dostępnych na jednostce pływającej urządzeń i mierników w sposób ciągły kontrolować zgodność parametrów pracy

urządzenia z wartościami zawartymi w instrukcji producenta, a co więcej, identyfikować przyczyny uszkodzeń. Praktyka eksploatacyjna wskazuje, że dla danego silnika, w dużym zakresie obciążeń eksploatacyjnych, stosunek absolutnego ciśnienia sprężania ( $p_k$ ) do absolutnego ciśnienia doładowania ( $p_d$ ) jest w przybliżeniu wielkością stałą:

$$\beta_p = \frac{p_k}{p_d}. \quad (1)$$

Typowy zakres współczynnika  $\beta_p$  dla różnych silników zawiera się w przedziale pomiędzy 30–40 [Piotrowski i Witkowski 2012]. Znając zatem wartość współczynnika  $\beta_p$  dla silnika zdatnego, można za pomocą odchyłki tego parametru od wartości wyjściowej określić prawdopodobną przyczynę uszkodzenia silnika.

Celem przeprowadzonego badania było określenie wartości tych odchyłek w zależności od wprowadzanych uszkodzeń. W morskim silniku Sulzer 3AL 25/30 doładowanym turbosprężarką VTR160N, zamontowanym w Laboratorium Siłowni Okrętowych, istnieje możliwość symulowania wybranych uszkodzeń w układzie wtryskowym oraz w układzie powietrza doładowania silnika. Na potrzeby badania wprowadzono uszkodzenia takich elementów silnika, jak:

- pompa wtryskowa;
- sprężarka turbosprężarki;
- filtr powietrza;
- wtryskiwacz.

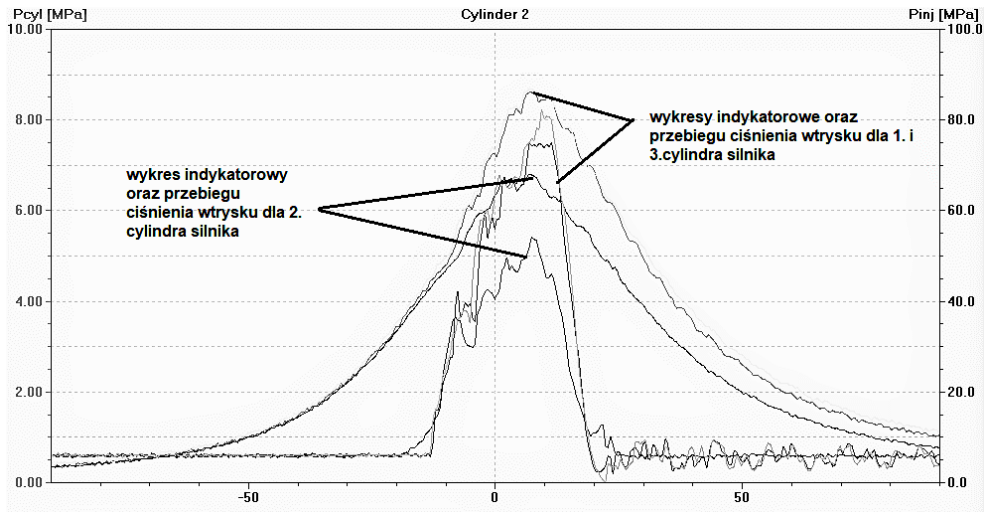
Eksperyment polegał na mierzeniu wartości niezbędnych do wyliczenia współczynnika  $\beta_p$  (ciśnienia sprężania z rozdzielczością równą 0,5 stopnia obrotu wału korbowego, doładowania i otoczenia z dokładnością  $\pm 0,3\%$ ) przy takich samych zadanych obciążeniach silnika (20; 30; 45; 60; 75% mocy znamionowej silnika). Badania składały się z pomiarów wspomnianych wyżej parametrów pracy silnika laboratoryjnego, uznanego za sprawny (bez zdiagnozowanych uszkodzeń) oraz pomiarów z wprowadzonymi uszkodzeniami układu wtryskowego, umiejscowionymi w środkowym cylindrze silnika (cylindrze nr 2), lub w obrębie układu zasilania powietrzem silnika dla wszystkich cylindrów.

## **2. ZMIANA WARTOŚCI STOSUNKU ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA SPRĘŻANIA DO ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA DOŁADOWANIA DLA SILNIKA Z USZKODZONĄ POMPĄ WTRYSKOWĄ**

W celu wprowadzenia uszkodzenia pompy wtryskowej z pokrętnym tłokiem zasilającej drugi cylinder silnika, poluzowano zawór odciążający, łącząc przestrzeń sprężania pompy wtryskowej z przelewową. W ten sposób zasymulowano zużytą parę precyzyjną tłok-cylinderek. Użyta metoda symulowania nieszczelności pary

precyzyjnej nie pozwala na określenie wielkości przecieku paliwa do kanału przelewowego.

Wielkość wprowadzonego przecieku dla obciążenia 70% przy wykorzystaniu wartości ciśnienia wtrysku obrazuje rysunek 1. Z wykresu można odczytać, że dla 2. cylindra nastąpił spadek maksymalnej wartości ciśnienia wtrysku o około 25 [MPa].

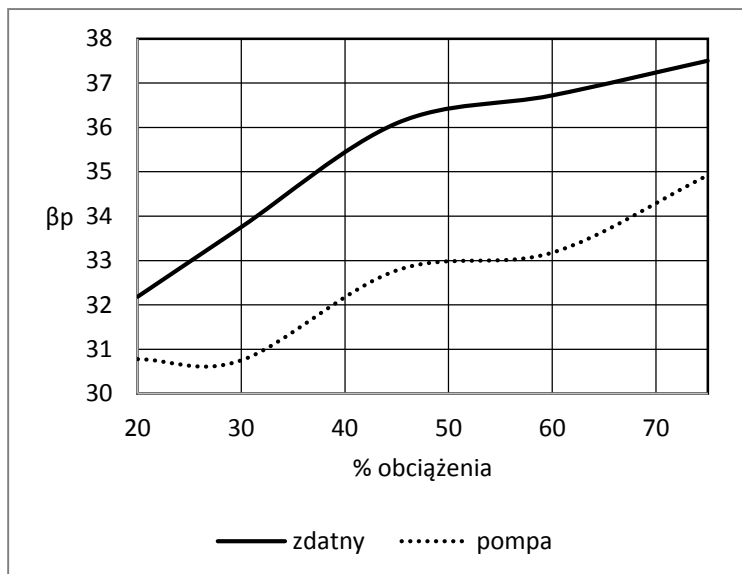


**Rys. 1.** Wykres indykatorowy rozwinięty wraz z przebiegiem ciśnienia wtrysku dla obciążenia 70%

**Fig. 1.** Indicator diagram with the course of the injection pressure for a load of 70%

Dla tak zasymulowanego uszkodzenia w celu wyznaczenia współczynnika  $\beta_p$  dokonano pomiarów wartości ciśnień (sprężania, doładowania i otoczenia) dla obciążeń stanowiących 20; 30; 45; 60; 75% mocy znamionowej silnika. W wyniku przeprowadzonego doświadczenia uzyskano przebiegi współczynnika  $\beta_p$  w funkcji mocy ( $\beta_p = f(N)$ ) dla 2. cylindra silnika zdatnego i z uszkodzeniem jak na rysunku 2.

W wyniku wprowadzonego uszkodzenia pompy wtryskowej można zaobserwować wyraźny spadek wartości współczynnika  $\beta_p$  w całym zakresie obciążeń w stosunku do jego przebiegu dla cylindra bez uszkodzenia. Wynika to z mniejszych wartości ciśnienia sprężania, a co za tym idzie, również ciśnienia spalania dla cylindra z uszkodzoną pompą wtryskową (patrz rys. 1). W celu utrzymania zadanej mocy elektrycznej prądnicy cylindry bez uszkodzeń pokrywały zapotrzebowanie na moc elektryczną (generując wyższe ciśnienia spalania).



**Rys. 2.** Zmiany wartości współczynnika  $\beta_p = f(N)$  (od 20 do 70% N) dla drugiego cylindra z uszkodzoną pompą wtryskową drugiego cylindra

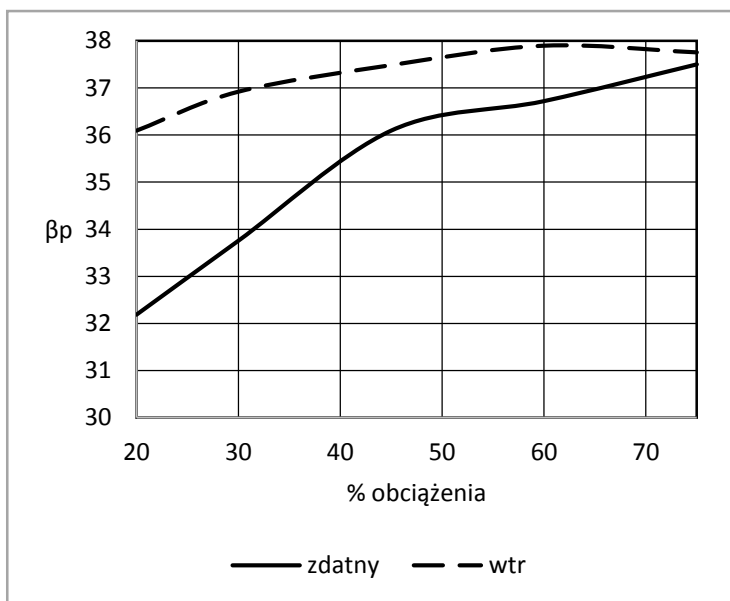
**Fig. 2.** Changes  $\beta_p = f(N)$  (from 20 to 70% N) for second cylinder with defective high pressure fuel pump

### 3. ZMIANA WARTOŚCI STOSUNKU ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA SPRĘŻANIA DO ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA DOŁADOWANIA DLA SILNIKA Z USZKODZONYM WTRYSKIWACZEM

W celu zasymulowania uszkodzenia wtryskiwacza zasilającego drugi cylinder silnika zmniejszono jego ciśnienie otwarcia z instrukcyjnych 25 MPa do 15 MPa (obniżono napięcie sprężyny). W wyniku przeprowadzonego doświadczenia uzyskano przebiegi współczynnika  $\beta_p = f(N)$  dla 2. cylindra silnika zdatnego i z uszkodzeniem jak na rysunku 3.

Zgodnie z rysunkiem 3 uszkodzenie wtryskiwacza spowodowało wyraźny wzrost wartości współczynnika  $\beta_p$  w zakresie niskich obciążeń w stosunku do jego przebiegu dla cylindra bez uszkodzenia. Dla wyższych obciążeń wartości współczynnika  $\beta_p$  zarówno dla cylindra z uszkodzeniem, jak i bez, są podobne. Obniżone ciśnienie otwarcia wtryskiwacza powoduje wtrysnięcie większej części dawki paliwa (wcześniejszy wtrysk) podczas końca suwu sprężania oraz podniesienie wartości ciśnienia sprężania. Zmniejszenie ciśnienia otwarcia wtryskiwacza powoduje, że maksymalne ciśnienie wtrysku występuje w końcowej fazie procesu wtrysku w całym rozpatrywanym zakresie obciążeń silnika. Zauważono również

wzrost maksymalnego ciśnienia wtrysku podczas pracy silnika z dużym obciążeniem oraz nieznaczne wydłużenie procesu wtrysku. Należy zauważyć, że w przypadku pracy silnika uznanego za sprawny z małym obciążeniem maksymalne ciśnienie paliwa jest obserwowane w początkowej fazie wtrysku paliwa [Kowalski 2015]. Wraz ze wzrostem obciążenia stosunek ciśnienia spalania do ciśnienia sprężania maleje, co powoduje wraz ze wzrostem obciążenia zbliżenie krzywych przebiegu wartości współczynnika  $\beta_p$ .



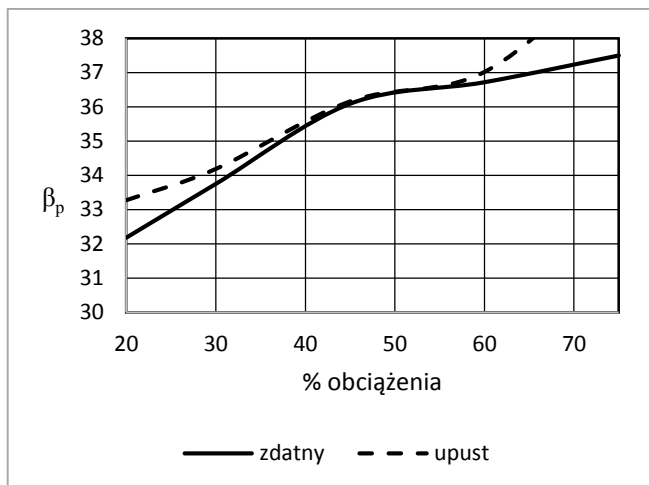
**Rys. 3.** Zmiany wartości współczynnika  $\beta_p = f(N)$  (od 20 do 70% N) dla drugiego cylindra z uszkodzonym wtryskiwaczem drugiego cylindra

**Fig. 3.** Changes  $\beta_p = f(N)$  (from 20 to 70% N) for second cylinder with defective injector

#### 4. ZMIANA WARTOŚCI STOSUNKU ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA SPRĘŻANIA DO ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA DOŁADOWANIA DLA SILNIKA Z USZKODZONĄ SPRĘŻARKĄ TURBOSPRĘŻARKI

W celu zasymulowania uszkodzenia sprężarki turbosprężarki wykorzystano upust części powietrza doładowującego do atmosfery (za pomocą całkowicie otwartego zaworu upustowego zamontowanego przed chłodnicą powietrza doładowującego). Tym samym symulowano zabrudzenie wirnika lub nieszczelność sprężarki turbosprężarki. W wyniku przeprowadzonego doświadczenia uzyskano przebiegi współ-

czynnika  $\beta_p = f(N)$  dla 2. cylindra silnika zdatnego i z uszkodzeniem co pokazano na rysunku 4.



**Rys. 4.** Zmiany wartości współczynnika  $\beta_p = f(N)$  (od 20 do 70% N) dla drugiego cylindra z uszkodzoną sprężarką turbosprężarki

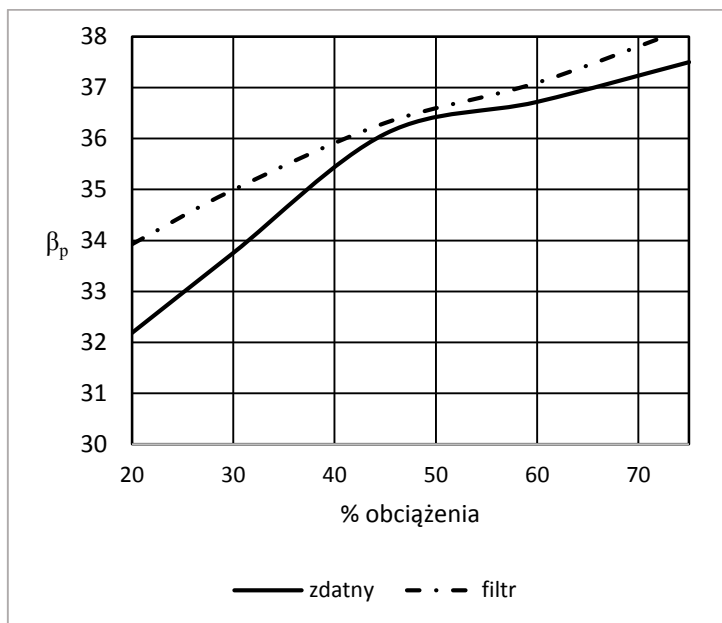
**Fig. 4.** Changes  $\beta_p = f(N)$  (from 20 to 70% N) for second cylinder with defective compressor of booster

W wyniku wprowadzonego uszkodzenia sprężarki turbosprężarki można zaobserwować wyraźny wzrost wartości współczynnika  $\beta_p = f(N)$  w zakresie niskich i wysokich obciążeń w stosunku do jego przebiegu dla cylindra bez uszkodzenia. Dla średnich obciążeń 40–55% wartości współczynnika  $\beta_p$  zarówno dla cylindra uszkodzeniem, jak i bez, przyjmują wartości podobne. Przebieg krzywej prawdopodobnie związany jest ze zmianą współczynnika nadmiaru powietrza. Dla silnika bez uszkodzeń wartość współczynnika nadmiaru powietrza wynosi od 2,4 (dla obciążenia maksymalnego) do 3,7 (dla obciążenia minimalnego). Wprowadzone uszkodzenie powoduje wraz ze wzrostem obciążenia spadek wartości współczynnika nadmiaru powietrza od około 2 do 9% [Kowalski 2015].

## 5. ZMIANA WARTOŚCI STOSUNKU ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA SPRĘŻANIA DO ABSOLUTNEGO CIŚNIENIA DOŁADOWANIA DLA SILNIKA Z ZANIECZYSZCZONYM FILTREM POWIETRZA

W celu zasymulowania uszkodzenia zanieczyszczonego filtra powietrza (zmniejszenie jego przekroju czynnego) zastosowano dławienie kanału dolotowego, polegające na założeniu przegrody ograniczającej przekrój poprzeczny o 60%. Montaż płyty dławiącej pole przekroju kanału dolotowego o 60% powoduje ograniczenie natężenia przepływu powietrza średnio o 7,5% [Kowalski 2015].

W wyniku przeprowadzonego doświadczenia uzyskano przebiegi współczynnika  $\beta_p = f(N)$  dla 2. cylindra silnika zdatnego i z uszkodzeniem, jak na rysunku 5.



**Rys. 5.** Zmiany wartości współczynnika  $\beta_p = f(N)$  (od 20 do 70% N) dla drugiego cylindra z zanieczyszczonym filtrem powietrza

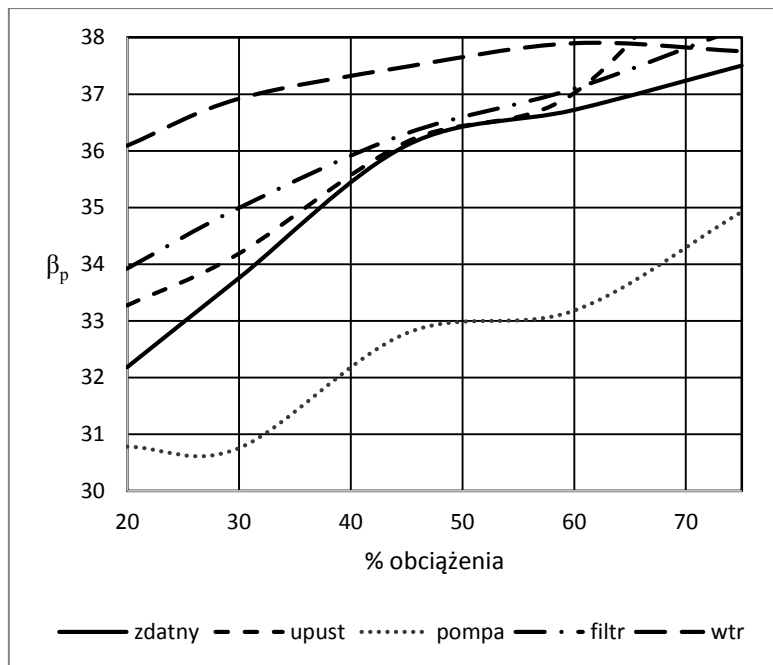
**Fig. 5.** Changes  $\beta_p = f(N)$  (from 20 to 70% N) for second cylinder with unclean air filter

W wyniku wprowadzonego dławienia można zaobserwować wyraźny wzrost wartości współczynnika  $\beta_p = f(N)$  w zakresie niskich i wysokich obciążeń w stosunku do jego przebiegu dla cylindra bez uszkodzenia. Dla średnich obciążeń 40–55% wartości współczynnika  $\beta_p$  zarówno dla cylindra z uszkodzeniem, jak i bez, przyjmują wartości podobne. Występują tu bardzo podobne korelacje jak dla silnika z uszkodzoną turbosprężarką.

Na rysunku 6 pokazano, w formie zbiorczej na jednym wykresie, zmiany współczynnika  $\beta_p = f(N)$ , dla silnika zdatnego i ze symulowanymi uszkodzeniami.

Otrzymane w wyniku badania przebiegi krzywych współczynnika  $\beta_p = f(N)$  (od 20 do 70% N) pozwalają identyfikować uszkodzenia w układzie wtryskowym oraz w układzie zasilania powietrzem.

Dla uszkodzeń związanych z zasilaniem powietrzem krzywe stosunku  $\beta_p = f(N)$  (od 20 do 70% N) silnika mają bardzo specyficzny przebieg, tj. w zakresie niskich obciążeń przewyższa przebieg krzywej wzorcowej (dla silnika zdatnego), następnie w zakresie średnich obciążeń przyjmuje przebieg bardzo podobny do krzywej wzorcowej i ponownie w zakresie wysokich obciążeń następuje jej przewyższenie w stosunku do wzorca.



**Rys. 6.** Zmiany wartości współczynnika  $\beta_p = f(N)$  (od 20 do 70% N) dla drugiego cylindra ze wszystkimi opisanymi niesprawnościami

**Fig. 6.** Changes  $\beta_p = f(N)$  (from 20 to 70% N) for second cylinder with all presented defectives

Dla uszkodzeń związanych z uszkodzeniem wtryskiwacza krzywa stosunku  $\beta_p$  wraz ze wzrostem obciążenia przybliża się do wartości wzorcowych. Natomiast dla uszkodzeń pompy wtryskowej krzywa stosunku  $\beta_p$  przebiega w całym zakresie znacznie poniżej krzywej wzorcowej.

## 6. PODSUMOWANIE

W badaniach własnych wykazano, że współczynnik  $\beta_p$ , będący stosunkiem absolutnego ciśnienia sprężania ( $p_k$ ) do absolutnego ciśnienia doładowania ( $p_a$ ), może być wykorzystany do celów diagnostycznych.

Wartość tego współczynnika zależy nie tylko od obciążenia silnika, ale także od jego stanu technicznego.

Wykazano, że dla symulowanych w badaniach uszkodzeń elementów układu wtryskowego (uszkodzenie pompy wtryskowej i wtryskiwacza) zmiany  $\beta_p$  w stosunku do jego wartości wzorcowych (silnik uznawany za zdalny) są jednoznaczne i różniące się w zależności od uszkodzenia. Pozwala to przyjąć przydatność  $\beta_p$  do celów diagnostycznych układów wtryskowych.



W odróżnieniu od symulowanych uszkodzeń w układzie doładowania (uszkodzeń filtra powietrza i sprężarki) wykazano zmiany wartości  $\beta_p$  w reakcji na uszkodzenie, ale charakter tych zmian dla obu uszkodzeń jest podobny. Powyższe powoduje, że w tym przypadku występują trudności w identyfikacji danego uszkodzenia na skutek zauważonej zmiany wartości  $\beta_p$ .

Jeżeli dalsze badania własne wykażą podobne zmiany  $\beta_p$  na uszkodzenia występujące w układach doładowania, to wówczas jego diagnostyczna przydatność będzie w tym przypadku ograniczona. Zmiana wartości  $\beta_p$  w stosunku do wzorcowej będzie wskazywać na występujące w układzie doładowania uszkodzenie, jednak bez możliwości precyzyjnej jego lokalizacji.

Dodatkowo w silniku, w następstwie przedmuchiów gazów przez pierścienie tłokowe, następują straty ładunku, narastające w miarę zużywania się silnika. Mogą także wystąpić przedmuchi powodowane przez niesprawności. W wyniku zużycia elementów wzrasta objętość komory sprężania, która może nie tylko wzrastać, lecz zostać obniżona, co spotyka się w praktyce eksploatacyjnej silników okrętowych jako wynik niepoprawnego montażu. Zużycie elementów, błędy montażowe i poziom przedmuchiów gazów są przedmiotem zainteresowania diagnostyki technicznej silników okrętowych, a ich znajomość umożliwia ocenę stanu technicznego elementów zespołu komory sprężania [Polanowski 2005].

Wykorzystanie w praktyce eksploatacyjnej do celów diagnostycznych współczynnika  $\beta_p$  będzie przede wszystkim możliwe, jeżeli w danej siłowni okrętowej stosuje się indykator typu elektronicznego, co umożliwi szybkie i dokładne wyznaczenie wartości ciśnienia sprężania ( $p_k$ ).

## LITERATURA

- Kluj, S., 2000, *Diagnostyka urządzeń okrętowych*, Studium Doskonalenia Kadr WSM w Gdyni, Gdynia.
- Kowalski, J., 2015, *Wykorzystanie składu spalin w diagnostyce czterosurowych silników okrętowych*, Monografie, Biblioteka Problemów Eksploatacji – Studia i Rozprawy, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom.
- Piotrowski, I., Witkowski, K., 2012, *Eksploatacja okrętowych silników spalinowych*, Baltic Surveyors Group Ltd. Sp. z o.o., Gdynia.
- Polanowski, S., 2005, *Wieloparametrowy model przebiegu ciśnienia sprężania w cylindrze silnika okrętowego*, Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, R. XLVI, nr 1(160).