



OCENA WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH SILNIKA Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM NA PODSTAWIE ZMIAN WARTOŚCI WSKAŹNIKA DZIAŁANIA

Jacek Rudnicki

*Gdansk University of Technology
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Poland
tel.: +48 58 3472973, fax: +48 58 3471981
e-mail: jacekrud@pg.edu.pl*

Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję metody pozwalającej na ocenę działania silnika pracującego na charakterystyce regulatorowej w nagłej zmiany obciążenia i związanej z tym akceleracji/deceleracji. Do analizy przebiegu zmian podstawowych własności użytkowych silnika w tym czasie wykorzystane zostało wartościujące (ilościowe) ujęcie działania interpretowanego jako pewna wielkość fizyczna. Podejście takie umożliwia jednocześnie uwzględnienie wykonywania określonej pracy (podejście energetyczne) oraz czasu, w którym ta praca jest wykonana.

Słowa kluczowe: *działanie, dynamika, silnik z zapłonem samoczynnym*

1. Wprowadzenie

Miarodajna i obiektywna ocena różnego rodzaju własności użytkowych każdego silnika (również silnika z zapłonem samoczynnym) wymusza wartościujące (ilościowe) podejście do tego zagadnienia i poszukiwanie takich miar, które w sposób wiarygodny i wieloaspektowy opisywałyby te cechy silnika.

W przypadku silników tłokowych z zapłonem samoczynnym (zwłaszcza okrętowych – średnio- i wolnoobrotowych) specyfika przebiegu procesów składowych obiegu roboczego oraz własności stosowanych paliw szczególną uwagę kierują w stronę własności dynamicznych tych silników.

Analizując ogólnodostępne publikacje dotyczące tego zakresu zagadnień można zauważyć zdecydowaną przewagę materiałów dotyczących zawężonej tematyki i konkretnych problemów w tym aspekcie np. związanych z emisją spalin. Dużo mniej jest prac traktujących zagadnienie w sposób bardziej ogólny, umożliwiający ocenę tych własności na gruncie szeroko rozumianych użytkowych wskaźników pracy [1, 11].

Dynamika każdego procesu określonej wielkości fizycznej wiąże się nierozdzielnie z warunkami, stanem pracy i czasem.

Tym samym szczególnie istotne staje się nie tylko to, jaka jest wartość energii, którą można dysponować użytkując np. okrętowy silnik napędu głównego, lecz także czas, w którym może być ona dostarczona.

Tym samym sensownym wydaje się rozpatrywanie działania silnika (jego układów funkcjonalnych) w takim ujęciu, aby mogło być ono określone jednocześnie przez energię i czas [4].

Działanie silnika w przedziale czasu $[0, t]$ może w tym przypadku być interpretowane jako

wielkość fizyczna określona iloczynem energii zmiennej w czasie $E = f(\tau)$ i czasu τ - tzw. wskaźnik działania $WD(\tau)$:

$$WD(\tau) = \int_0^{\tau} E(\tau) d\tau \quad (1)$$

lub konkretyzując w odniesieniu do silnika w przedziale czasu t_1 do t_2 :

$$WD = 2\pi \int_{t_1}^{t_2} M_0(t) n(t) t dt = \int_{t_1}^{t_2} P_e(t) t dt \quad (2)$$

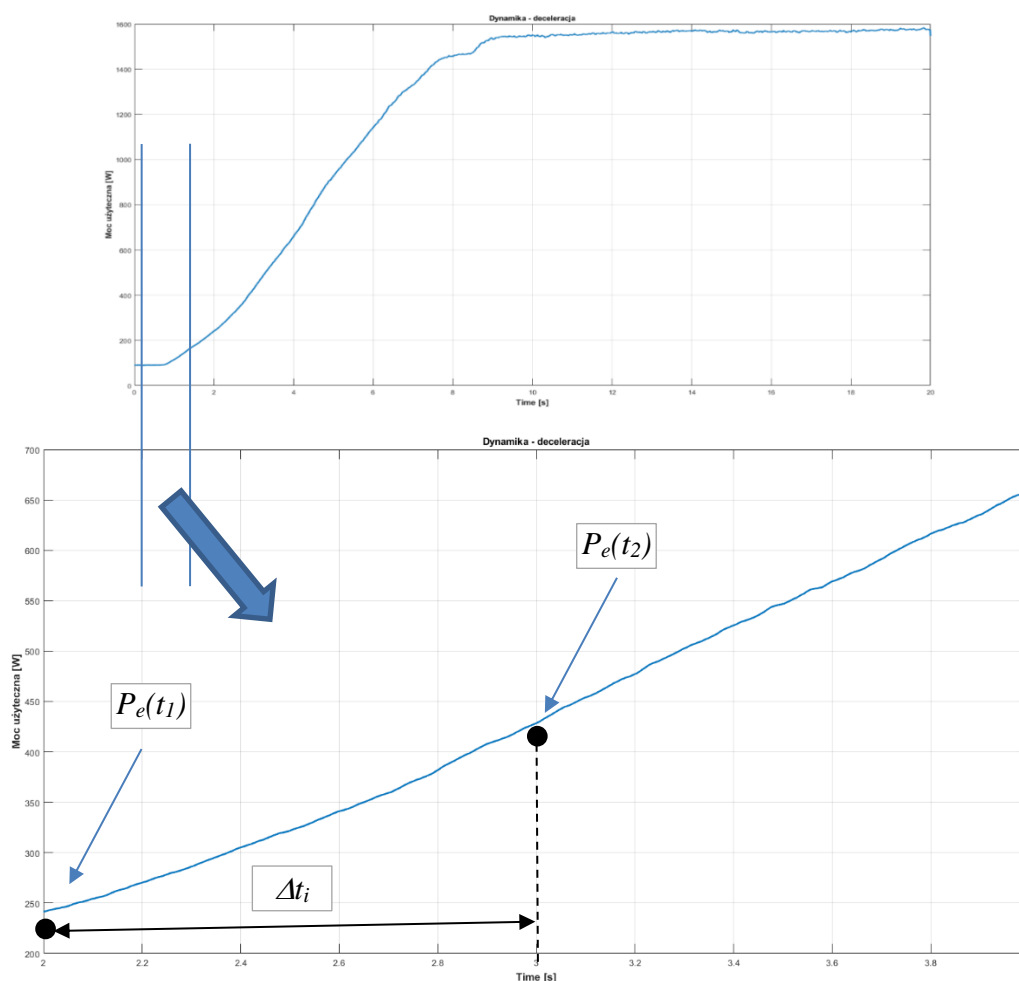
gdzie:

- M_0 – średni moment obrotowy silnika w przedziale czasu t_1 do t_2 ,
- n – średnia prędkość obrotowa silnika w przedziale czasu t_1 do t_2 ,
- P_e – moc użyteczna silnika w przedziale czasu t_1 do t_2

W związku z tym, że pojęcie działania stosowane jest również np. w mechanice teoretycznej, dla uniknięcia dyskusyjnych skojarzeń, wartość działania opisaną ogólnie zależnością (1) określono wielkością fizyczną, nazwaną wskaźnikiem działania - WD .

Analizując zarejestrowane podczas badań eksperymentalnych przebiegi zmian momentu obrotowego i prędkości obrotowej, czyli przebieg mocy użytecznej (przykład dla procesu deceleracji na rys.1) podczas akceleracji i deceleracji silnika można stwierdzić, że w odpowiednio krótkim okresie $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ można zmiany mocy użytecznej silnika przedstawić jako funkcję liniową w postaci:

$$P_e(t) = k \cdot t + l \quad (3)$$



Rys.1 Zmiany mocy użytecznej silnika Farymann Diesel D10 napędzającego prądnicę w czasie procesu deceleracji

Znając zatem wartość mocy użytecznej $P_e(t_i)$ i $P_e(t_{i+1})$ można bardzo prosto, w wystarczająco dokładny z praktycznego punktu widzenia przebieg zmian mocy w przedziale Δt_i przedstawić jako:

$$P_e(t) = \frac{P_e(t_{i+1}) - P_e(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \cdot t + \left(P_e(t_i) - \frac{P_e(t_{i+1}) - P_e(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \cdot t_i \right) =$$

$$= P_e(t_i) + t \cdot \frac{P_e(t_i) - P_e(t_{i+1})}{t_i - t_{i+1}} - t_i \cdot \frac{P_e(t_i) - P_e(t_{i+1})}{t_i - t_{i+1}}$$
(4)

zdefiniowany równaniem (2) współczynnik WD w przedziale Δt_i :

$$WD_{\Delta t_i} = \int_0^t \left[P_e(t_i) + t \cdot \frac{P_e(t_i) - P_e(t_{i+1})}{t_i - t_{i+1}} - t_i \cdot \frac{P_e(t_i) - P_e(t_{i+1})}{t_i - t_{i+1}} \right] t dt =$$

$$= t^2 \cdot \frac{2 \cdot [P_e(t_i) \cdot t - P_e(t_{i+1})] - 3 \cdot [P_e(t_i) \cdot t_{i+1} - P_e(t_{i+1}) \cdot t_i]}{6 \cdot (t_i - t_{i+1})}$$
(5)

zaś wartość WD_{Σ} rozpatrywaną od początku akceleracji (deceleracji) $t_{pocz} = 0$ do chwili t_{end} , (t_{end} – czas końca procesu akceleracji/deceleracji):

$$WD_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k WD_{\Delta t_i},$$
(6)

gdzie:

k – liczba wyodrębnionych podprzedziałów czasu w przedziale (t_{pocz}, t_{end}) .

Sposób rozpatrywania działania silnika w taki sposób przedstawiony został między innymi w pracach [2, 3, 6, 7, 9, 10].

Opis działania silnika w cytowanych pracach dotyczy skali czasu operacyjnego, co wynika z faktu, że czas realizacji zadań przyjmuje w transporcie morskim bardzo duże wartości a tym samym wartość całki oznaczonej (1), która dla przyjętych założeń jest miarą działania silnika, będzie również bardzo duża.

W pracy [8] dokonano, zatem próby odpowiedzi na pytanie, czy można rozpatrywany sposób oceny działania niejako „przenieść” w skalę „mikro” tzn. ograniczyć rozpatrywany czas – maksymalnie do czasu realizacji pojedynczego obiegu roboczego w silniku. Niniejsze opracowanie stanowi pewne rozwinięcie przedstawionych tam rozważań i analiz na podstawie wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym silnika z zapłonem samoczynnym w zakresie własności dynamicznych silnika.

2. Opis stanowiska badawczego oraz urządzeń pomiarowych

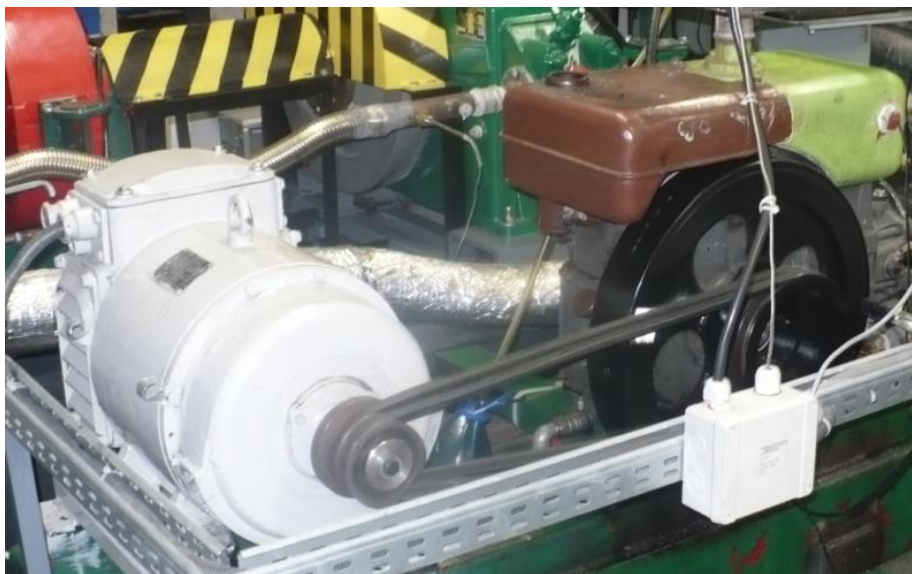
Badania zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym silnika „Farymann Diesel” typ D10, który napędza obcowzbudną prądnicę prądu stałego typu PKM0a44a/143 przez przekładnię pasową – rys. 2.

Nominalne wartości podstawowych parametrów silnika wynoszą odpowiednio: $P_{nom} = 5,9$ kW, $M_{nom} = 38$ N·m oraz $n_{nom} = 1500$ obr/min.

Podstawowe dane techniczne silnika:

- Moc nominalna silnika – 5,9 kW
- Prędkość obrotowa nominalna – 1500 min⁻¹
- Moment obrotowy nominalny – 38 N·m
- Liczba cylindrów – 1
- Średnica cylindra – 90 mm

- Skok tłoka – 120 mm
- Stopień sprężania – 22:1
- Pojemność skokowa – 765 cm³



Rys.2 Widok ogólny laboratoryjnego stanowiska badawczego jednocylindrowego silnika Farymann Diesel D10 napędzającego prądnicę prądu stałego oraz jego podstawowe dane techniczne

Realizacja pomiarów wartości niezbędnych parametrów oraz analiza uzyskanych rezultatów została zrealizowana z wykorzystaniem następującej aparatury pomiarowej i narzędzi programowych:

- Optyczny czujnik ciśnienia firmy Optrand Incorporated AutoPSI-TC Sensor, 0-200 Bar, 0.1 Hz to 20 kHz – do pomiaru ciśnienia w przestrzeni roboczej silnika [12];
- Moduł kontrolera ATmega328P - CH340 współpracujący z modułami pomiaru prądu ACS – 712 – 20 – do pomiaru napięcia na zaciskach oraz prądu obciążenia prądnicy [14];
- Czujnik indukcyjny zbliżeniowy położenia wału korbowego typu PNP NO 5mm
- Karta pomiarowa DT9816 firmy Data Translation – do jednoczesnej rejestracji wartości wszystkich parametrów (częstotliwość próbkowania 10kHz z rozdzielczością 16bit) [13];
- Pakiet oprogramowania QuickDAQ ver. 3.7.0.46 firmy Data Translation – do bezpośredniej akwizycji danych pomiarowych w trybie online [13];
- Pakiet oprogramowania MATLAB R2021 – do przetworzenia i analizy uzyskanych wyników.

Biorąc pod uwagę aspekt użytkowy opisywanego w artykule wskaźnika działania (*WD*) badania zostały zrealizowane z użyciem paliw o różnej liczbie cetanowej. Pomiarów, których wyniki zostały przedstawione i poddane analizie w dalszej części artykułu zrealizowano w III seriach liczących po 5 pomiarów dla każdego z rozpatrywanych paliw (czas trwania pojedynczego pomiaru - 20 s, częstotliwość próbkowania sygnału – 7 kHz), które zostały następnie uśrednione:

- I seria – olej napędowy VERVA ON gatunek B (<https://www.ornen.pl/pl/dla-biznesu/produkty/paliwa/oleje-napedowe/verva-on>)
- II seria – modyfikowany olej napędowy VERVA ON gatunek B, zastosowano uszlachetniacz do paliw Diesel Cetane Boost firmy AMSOIL (<https://www.amsoil.com/p/diesel-cetane-boost-acb/>) w proporcjach 1:500
- III seria – paliwo żeglugowe klasy DMX (wg normy ISO Fuel Standard 8217:2017 - <https://www.iso.org/standard/64247.html>)

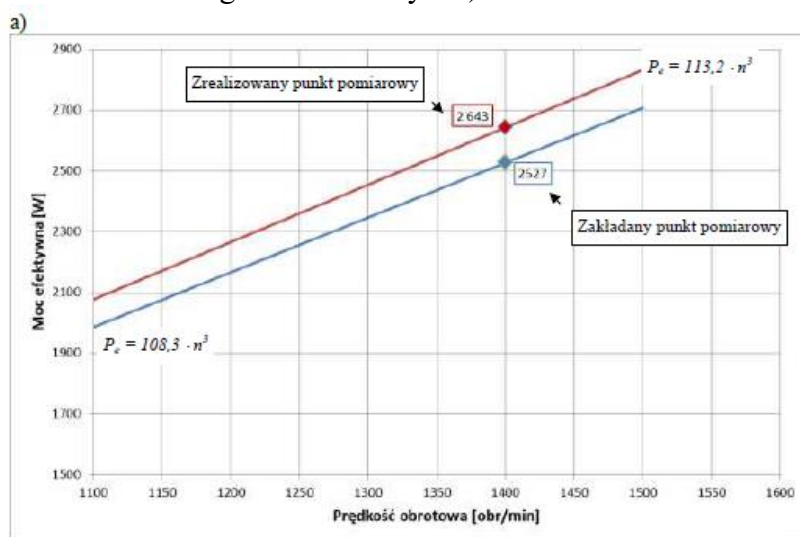
podczas pracy silnika w jednym punkcie na charakterystyce śrubowej o postaci ogólnej:

$$P_e = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_0 = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot a \cdot n^2 = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot n^3 \quad (7)$$

utrzymując względnie stałe wartości:

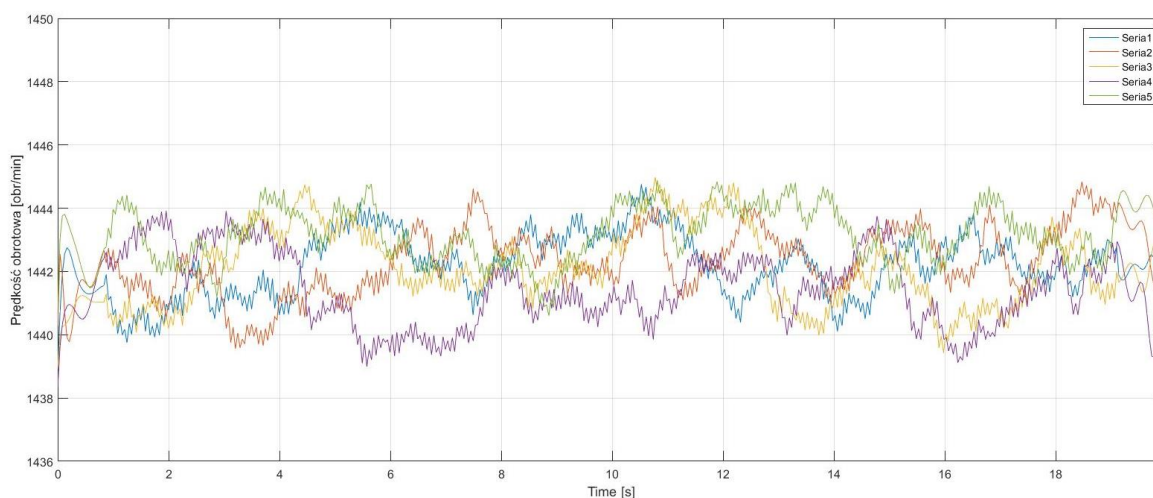
- prędkości obrotowej $n \approx 1440 \text{ obr/min} = 24 \text{ obr/s} (\pm 20 \text{ obr/min})$;
- prądu obciążenia prądnicy $I \approx 13 \text{ A}$;
- napięcia na zaciskach prądnicy $U \approx 200 \text{ V}$;

Przedstawione wyżej wartości parametrów pracy układu elektromechanicznego pozwoliły na wyznaczenie zakładanej wartości stałej a w równaniu (7) tzn. $a = 108,3 \text{ W} \cdot \text{s}$ oraz lokalizację realizowanego punktu pomiarowego w polu osiąarów silnika. Rzeczywisty przebieg badań i opracowanie jego wyników wykazało nieznaczne odstępstwa od wartości zakładanych $\pm 3\%$ (przykład dla paliwa VERVA ON gatunek B na rys. 3)



Rys.3 Lokalizacja zakładanego punktu pomiarowego w polu osiąarów dla silnika pracującego wg wybranej charakterystyki śrubowej oraz punktu zrealizowanego dla paliwa VERVA ON gatunek B

Różnice, które pojawiły się w stosunku do założeń wynikają z oczywistego braku możliwości utrzymania stałej wartości parametrów podlegających regulacji i przypadkowym zmianom tzn. n , I oraz U . Wpływ wielu czynników (często niemożliwych do określenia) powoduje chwilowe wahania wartości tych parametrów czego przykładem mogą być np. zarejestrowane w czasie badań zmiany wartości prędkości obrotowej silnika (rys. 4).



Rys.4 Chwilowe zmiany prędkości obrotowej silnika – wartość zadana $n = 1440 \text{ obr/min}$, paliwo MGO

3. Wyniki badań

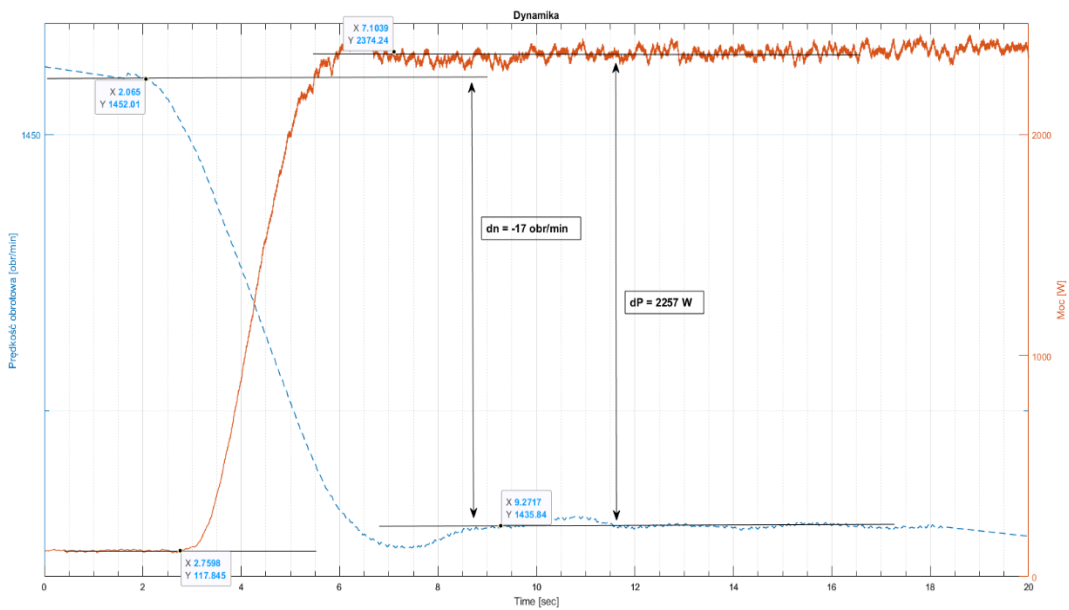
Badania procesów przejściowych przeprowadzono poprzez nagłą zmianę obciążenia zespołu elektromechanicznego (silnika + prądnicy) w dwóch etapach:

- Etap I (deceleracji) – zwiększenie obciążenia silnika (prądnicy) od mocy ok. 130 W do mocy ok. 2,5 kW zadany w czasie ok. 2 s,
- Etap II (akceleracja) – zmniejszenie obciążenia silnika (prądnicy) od mocy ok. 2,5 kW do mocy ok. 130 W zadany w czasie ok. 2 s,

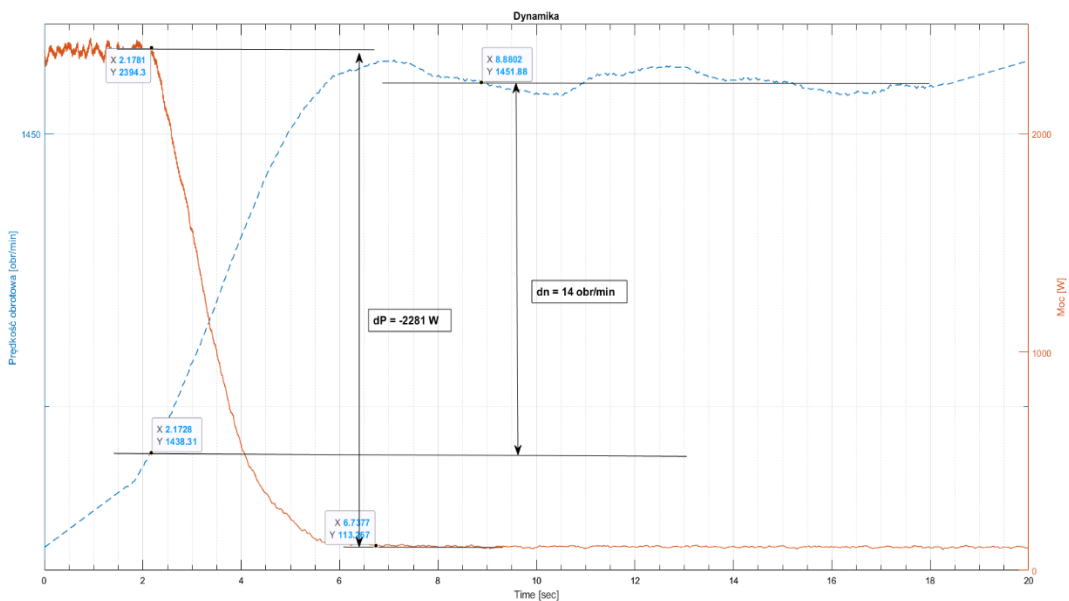
dla każdego z trzech rozpatrywanych paliw w punkcie pracy opisanym w części 2 niniejszego opracowania.

Zarejestrowany, rzeczywisty przebieg zmian mocy i prędkości obrotowej podczas obu etapów przedstawiono na rys. 5 - 7.

a)

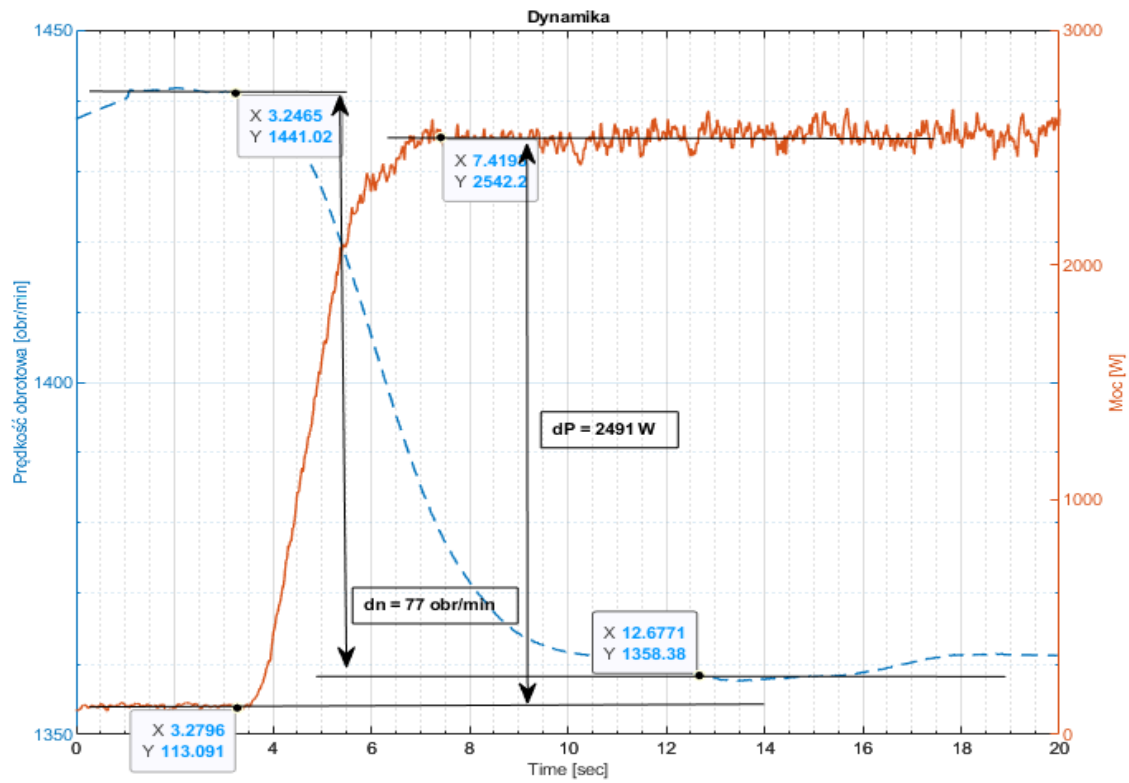


b)

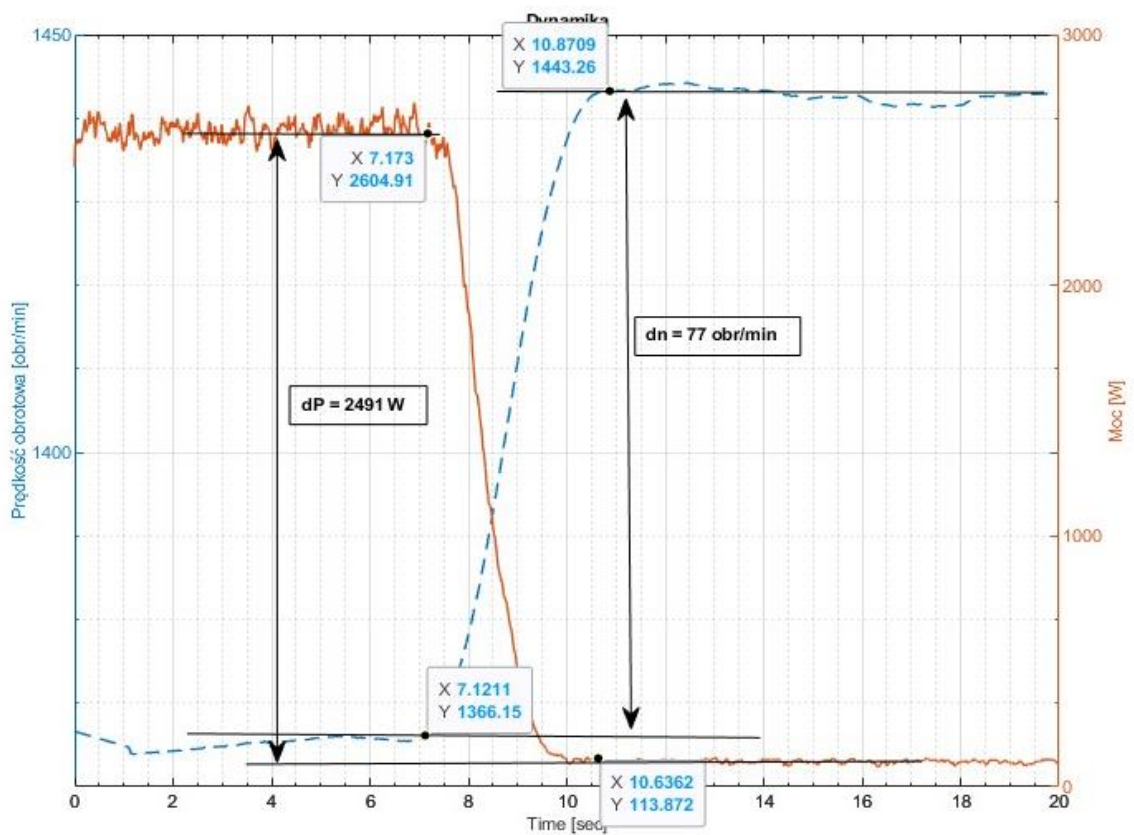


Rys. 5 Zmiany $P_e, n = f(t)$, olej napędowy VERVA ON gatunek B, a) etap I, b) etap II. (uśrednione wyniki pięciu serii pomiarowych)

a)

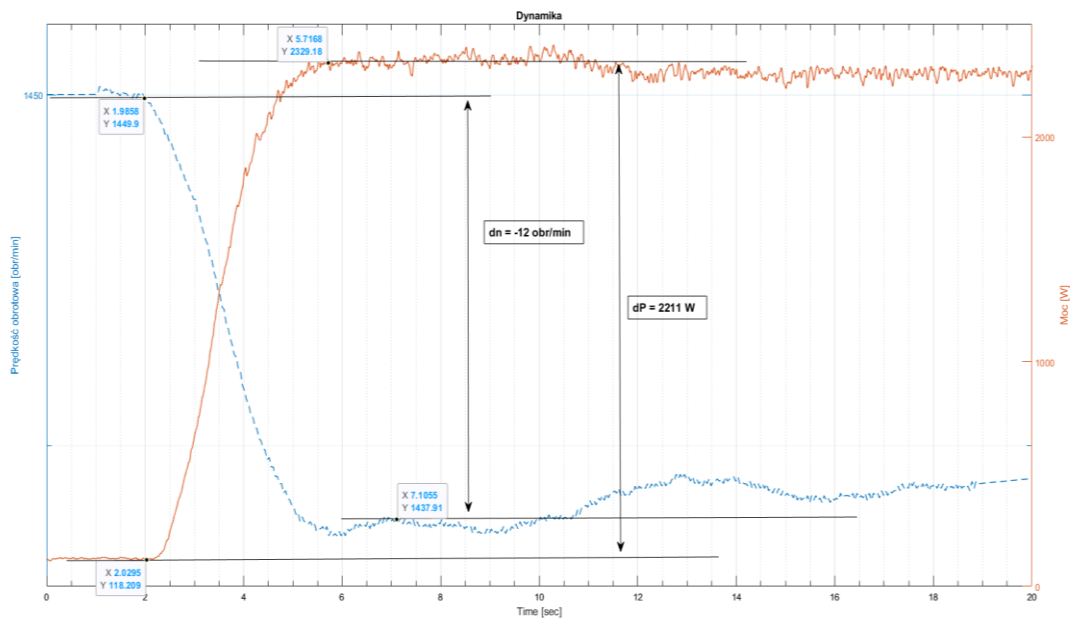


b)

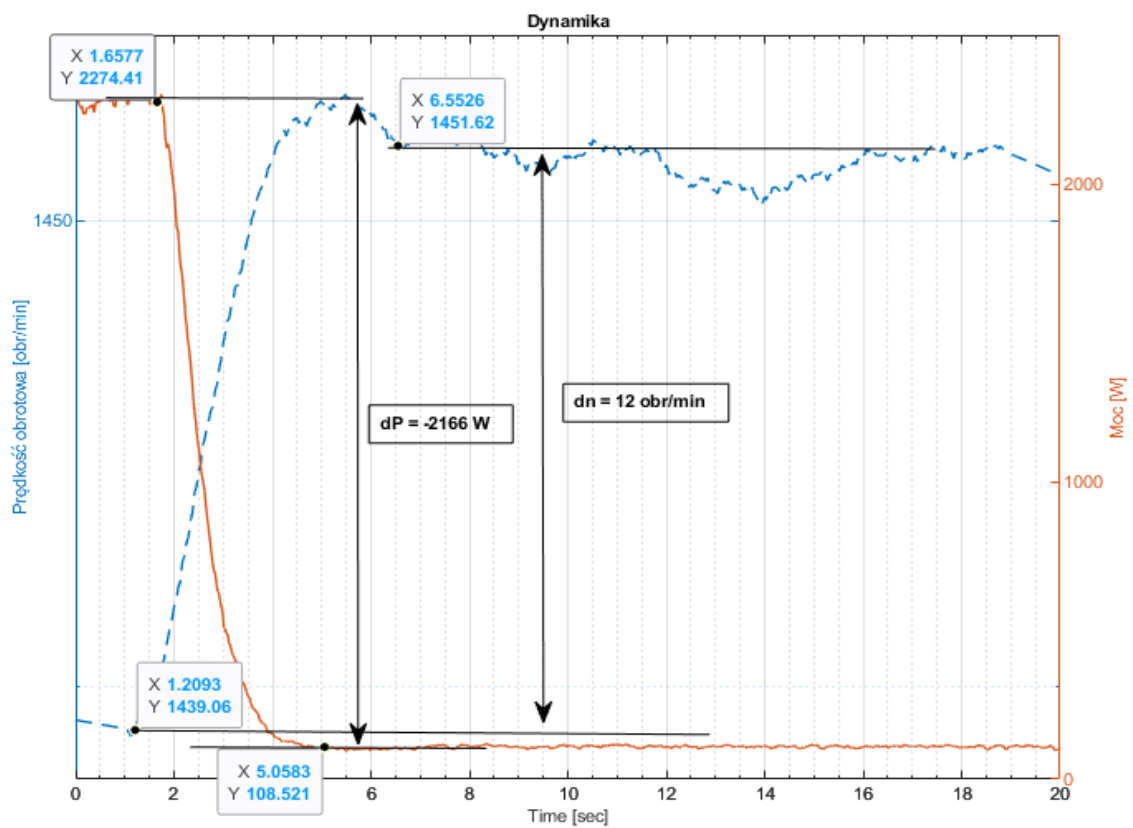


Rys. 6 Zmiany P_e , $n = f(t)$, olej napędowy VERVA ON gatunek B + uszlachetniacz do paliw Diesel Cetane Boos, a) etap I, b) etap II. (uśrednione wyniki pięciu serii pomiarowych)

a)



b)



Rys.7 Zmiany Pe , $n = f(t)$, paliwo żeglugowe klasy DMX, a) etap I, b) etap II. (uśrednione wyniki pięciu serii pomiarowych)

4. Ocena własności dynamicznych silnika z zastosowaniem wyników pomiarów hamownianych procesów akceleracji i deceleracji silnika oraz wskaźnika działania

Sygnalizowana wcześniej, ilościowa ocena działania silnika z zastosowaniem wskaźnika działania $WD(t)$ stwarza możliwość specyficznego rozpatrywania otrzymanych wyników badań

procesu akceleracji/deceleracji silnika.

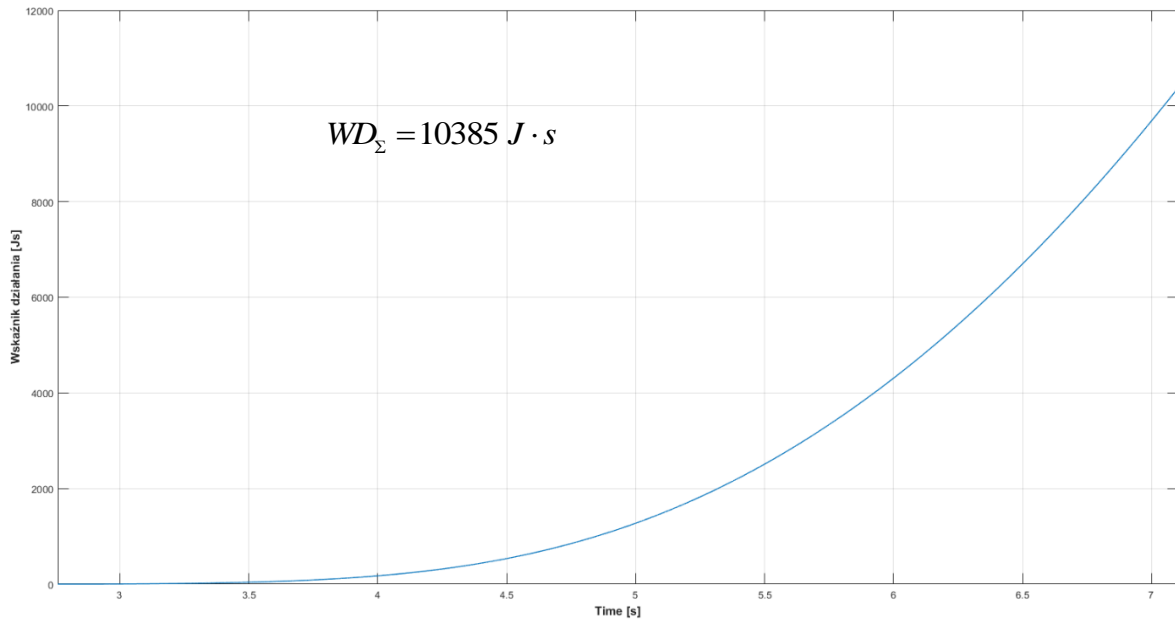
Ograniczając się tylko do procesów akceleracji i deceleracji analiza taka wymaga zmiany górnej granicy całkowania w równaniu (2) odpowiadające początkowi i końcowi rozpatrywanego procesu, odpowiednio:

- $t_{acc} = t_{acc2} - t_{acc1}$,
- $t_{dcc} = t_{dcc2} - t_{dcc1}$

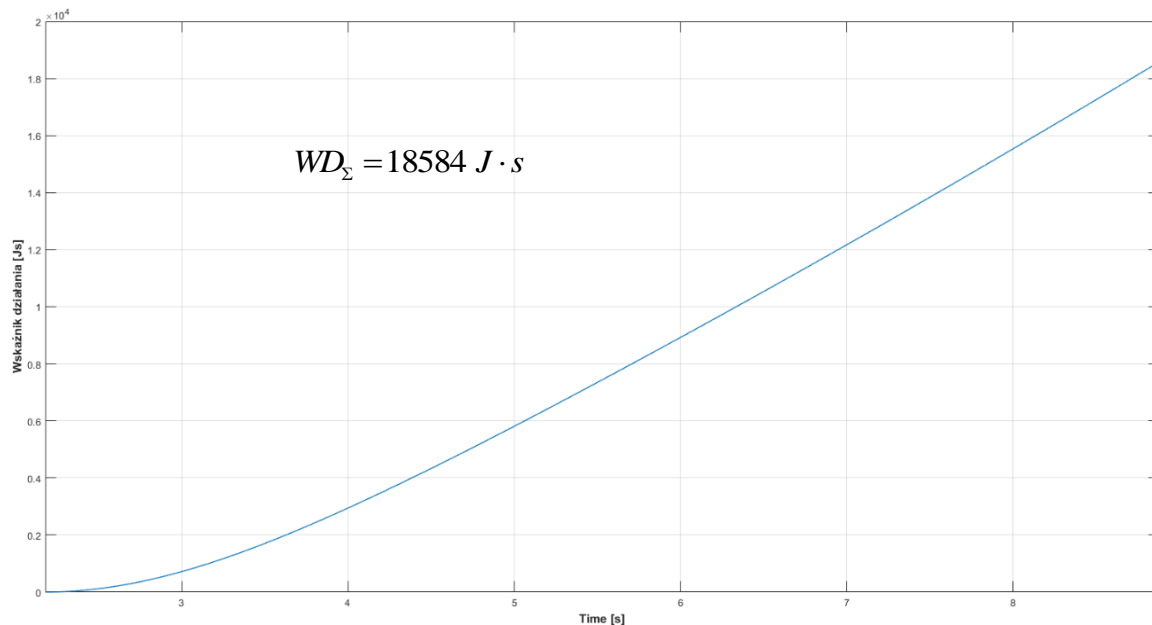
oraz wyznaczenia wartości $WD(t)$ i WD_{Σ} zgodnie z równaniami (2), (6).

Na podstawie zgromadzonych wyników badań silnika dokonano koniecznych obliczeń i w rezultacie uzyskano wartości przedstawione na rys. 8 – 10.

a)

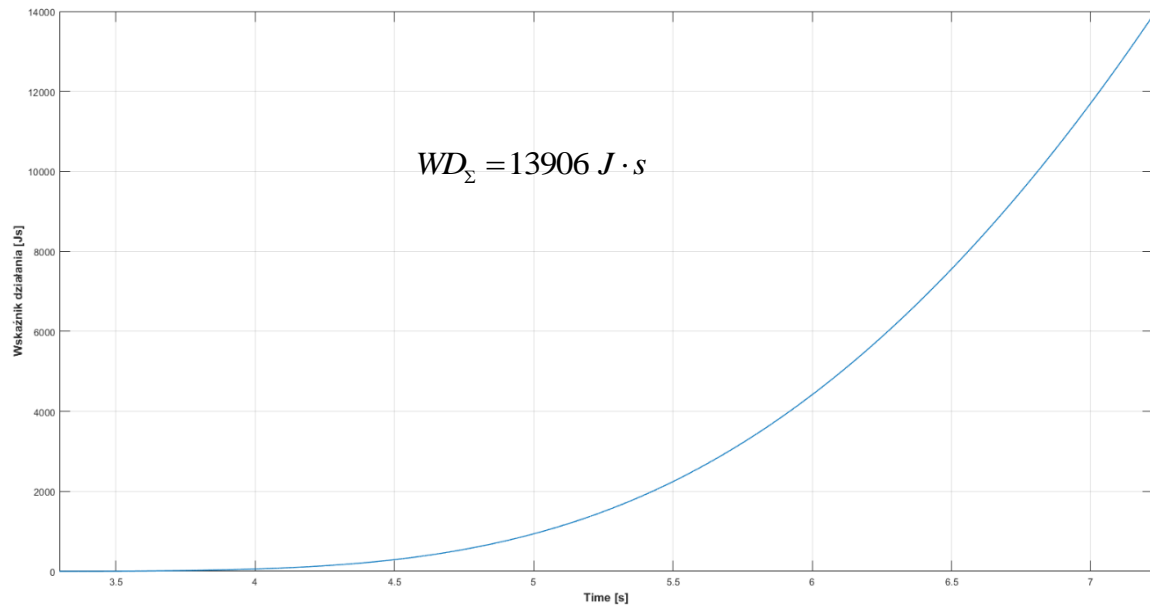


b)

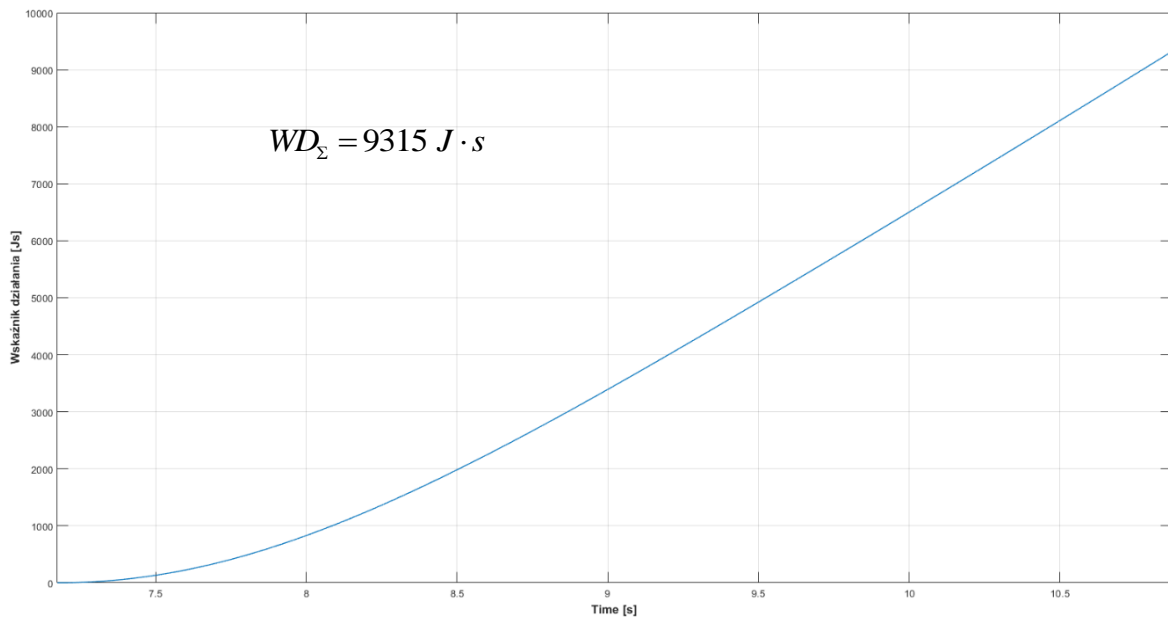


Rys.8 Zmiany $WD = f(t)$, olej napędowy VERVA ON gatunek B, a) etap I, b) etap II

a)

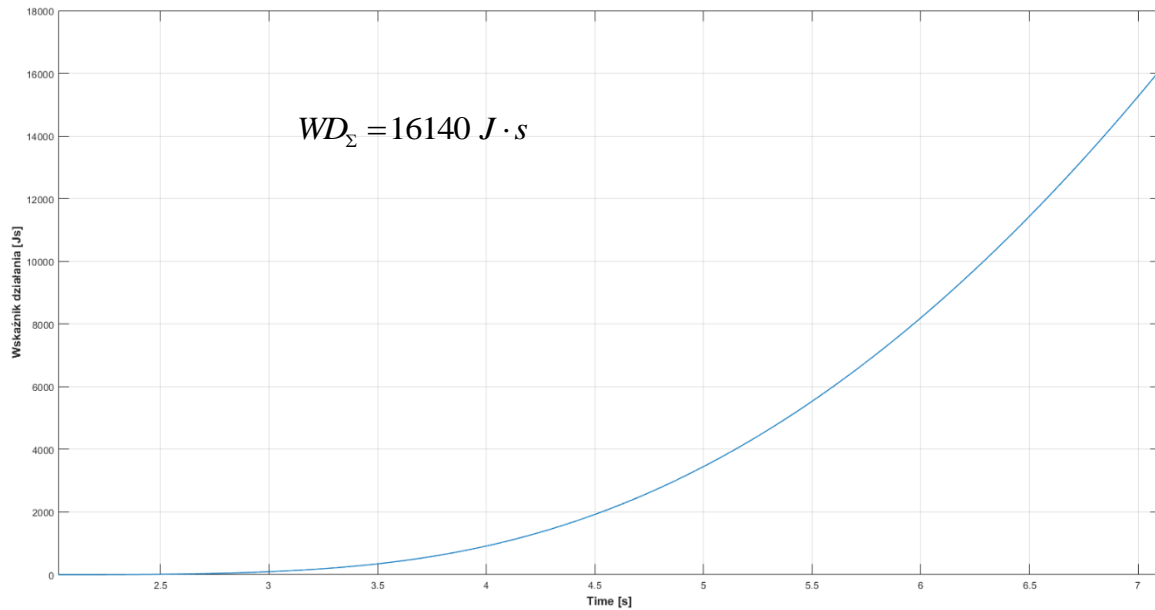


b)

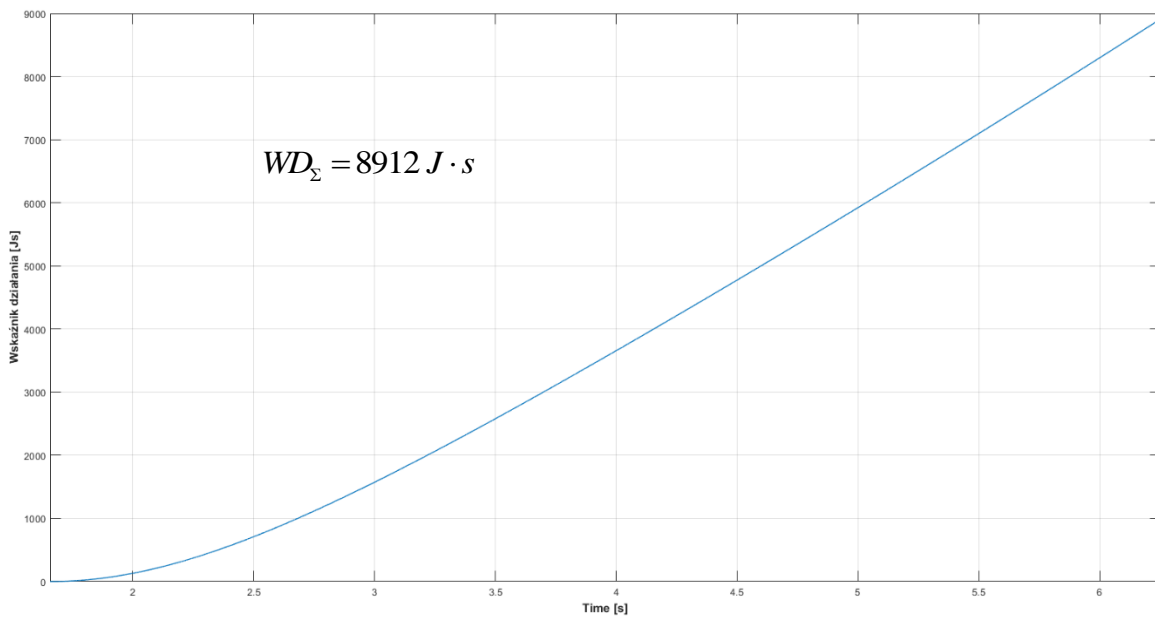


Rys.9 Zmiany $WD = f(t)$, olej napędowy VERVA ON gatunek B + uszlachetniacz do paliw Diesel Cetane Boos, a) etap I, b) etap II

a)



b)



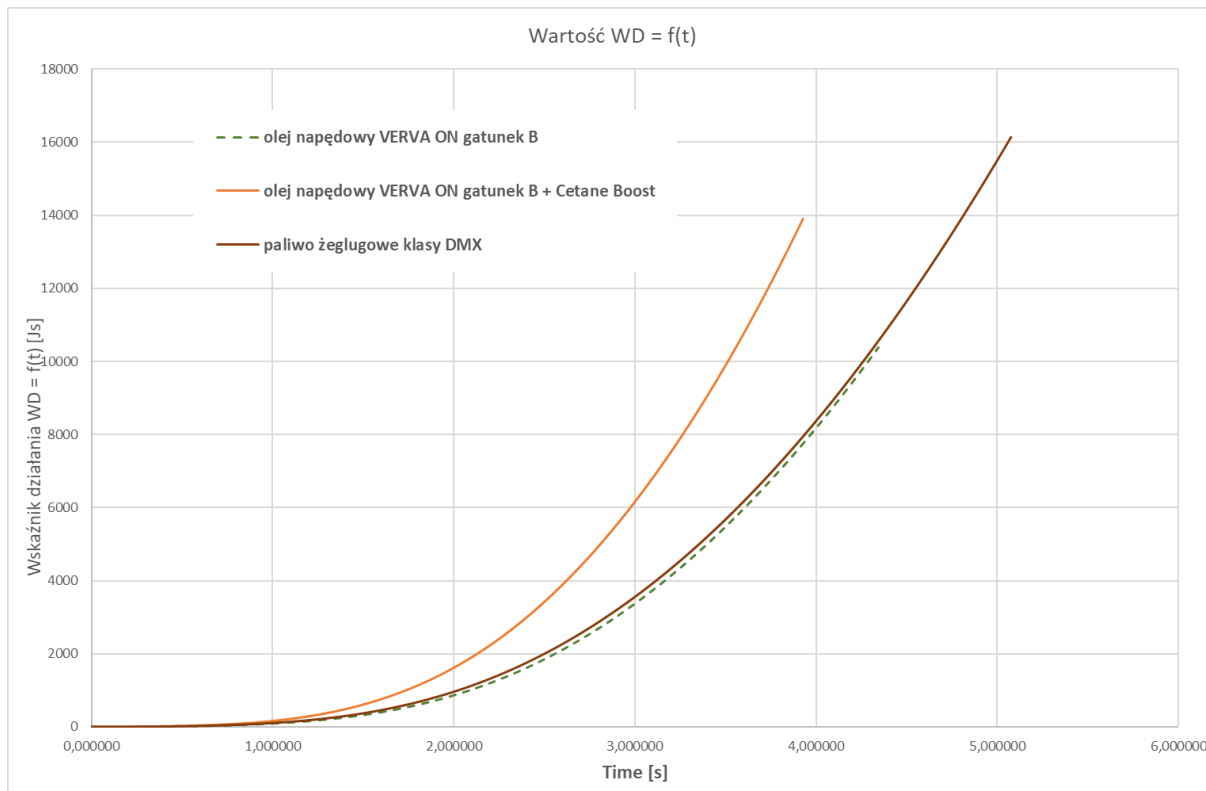
Rys.10 Zmiany $WD = f(t)$, paliwo żeglugowe klasy DMX, a) etap I, b) etap II

Zbiorcze zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono w tab. 1 i na rys. 11.

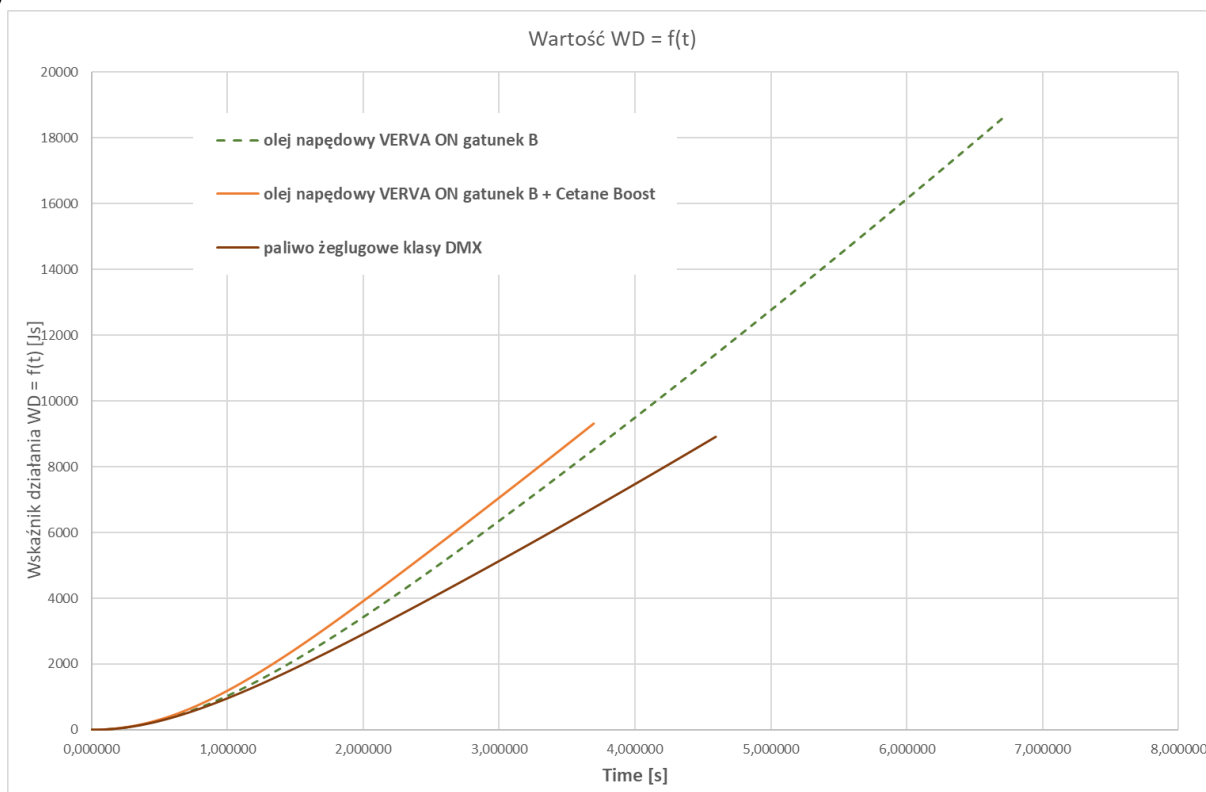
Tab.1 Zestawienie wartości wskaźnika WD_{Σ} uzyskanych podczas badań

Paliwo	Wartości wskaźnika WD_{Σ} [J·s]	
	Etap I - deceleracja	Etap II - akceleracja
olej napędowy VERVA ON gatunek B	~10400	~18600
olej napędowy VERVA ON gatunek B + uszlachetniacz do paliw Diesel Cetane Boost	~13900	~9300
paliwo żeglugowe klasy DMX	~16100	~8900
<i>Wartość średnia</i>	~13500	~12900

a)



b)



Rys.10 Zmiany $WD = f(t)$ – zestawienie zbiorcze. a) nagły wzrost obciążenia – deceleracja, b) nagły spadek obciążenia - akceleracja

Z analizy danych przedstawionych w tab. 1 oraz na rys. 8 – 11 wynikają następujące wnioski:

- Wartości WD_{Σ} oraz zmiany $WD = f(t)$ rozpatrywane w czasie nagłych zmian obciążenia silnika (praca na charakterystyce regulatorowej) istotnie różnią się dla analizowanych paliw zasilających silnik.
- W przypadku procesu deceleracji przebieg $WD = f(t)$ dla oleju napędowego VERVA ON gatunek B i paliwa żeglugowego klasy DMX jest bardzo zbliżony jednak wartości WD_{Σ} różnią się znacząco o ok. 60% ($WD_{\Sigma ON Verva B} < WD_{\Sigma DMX}$)
- W przypadku procesu akceleracji przebieg $WD = f(t)$ dla oleju napędowego VERVA ON gatunek B + uszlachetniacz do paliw Diesel Cetane Boost i paliwa żeglugowego klasy DMX jest istotnie różny, natomiast wartości WD_{Σ} różnią się nieznacznie (ok. 5% $WD_{\Sigma ON Verva B+C Boost} > WD_{\Sigma DMX}$). W odniesieniu do oleju napędowego VERVA ON gatunek B można stwierdzić bardzo dużą różnicę jeśli chodzi zarówno o $WD = f(t)$, jak i WD_{Σ} .

5. Podsumowanie

Prezentowana metoda stwarza dodatkowe (w stosunku do istniejących) kryteria łącznej oceny układu silnik + paliwo w prezentowanych stanach dynamicznych. Wydaje się być możliwym do zaakceptowania uzupełnieniem/ rozszerzeniem stosowanych do tej pory sposobów oceny własności dynamicznych silnika z zapłonem samoczynnym pracującym w określonych warunkach (np. w przypadku zasilania istotnie różnymi jakościowo paliwami [5]). Jej ewentualna użyteczność wymaga oczywiście przede wszystkim badań eksploatacyjnych oraz pogłębionej analizy interpretacyjno - teoretycznej. W związku jednak z tym, że sposób przeprowadzenia badań zarówno w warunkach hamownianych jak i eksploatacyjnych jest stosunkowo prosty, dostęp do wyników takich badań jest nie sprawia istotnych problemów, a tym samym sprzyja to rozwijaniu narzędzi prezentowanej metody oceny.

Podstawowa zaleta tej metody, to powiązanie oceny wykonywanej pracy z czasem, w którym jest realizowane zadanie - w tym przypadku podczas deceleracji/ akceleracji silnika w czasie gwałtownych zmian obciążenia.

Nie bez znaczenia jest również fakt, że wszystkie niezbędne obliczenia są stosunkowo proste i mogą być wykonane w zasadzie „od ręki”.

Praktyczna użyteczność i celowość uzyskiwanych wyników może w chwili obecnej budzić wątpliwości – jednak dalsze badania empiryczne i analiza interpretacyjna mogą doprowadzić do praktycznego zastosowania zaproponowanej metody w rozpatrywanym zakresie oceny działania silników.

6. Bibliografia

1. Chłopek Z., Szczepański T., *Aktualny stan wiedzy i prowadzone badania na temat dynamicznych stanów pracy silników spalinowych*, Instytut Transportu Samochodowego, XIII Konferencja Szkoleniowa „Badania Techniczne Pojazdów w Świetle Obowiązujących Przepisów–2012”, Wilkasy – Boszkowo - Ryto 2012.
2. Girtler J., Kuzmider S., Plewiński L., *Valuation Method for Operation of Crankshaft-Piston Assembly in Combustion Engines in Energy Approach*, Journal of Polish CIMAC, Vol. 6, No 1, Gdańsk 2011.
3. Girtler J., *A Method for Evaluating the Performance of a Marine Piston Internal Combustion Engine Used As the Main Engine on a Ship During Its Voyage in Different Sailing Conditions*, Polish Maritime Research, No 4(67), Vol. 17, Gdańsk 2010.

4. Girtler, J., Kuszmidler, S., Plewiński, L., *Wybrane zagadnienia eksploatacji statków morskich w aspekcie bezpieczeństwa żeglugi*, Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie, Szczecin 2003.
5. Korczewski Z., *Metodyka testowania paliw żeglugowych w rzeczywistych warunkach pracy silnika o zapłonie samoczynnym*. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2022.
6. Rudnicki J., *Działanie systemu energetycznego w ujęciu wartościującym z uwzględnieniem jego struktury niezawodnościowej oraz stopnia zużycia potencjału użytkowego. Praca wykonana w ramach projektu finansowanego przez MNiSW Nr N509 045 31/3500. Projekt badawczy pt., „Kształtowanie bezpieczeństwa działania systemów energetycznych środków transportowych na przykładzie systemów okrętowych”*, Gdańsk, 2008.
7. Rudnicki J., *Quantitative Assessment of Operation of Ship Main Diesel Engine*, International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, MARINE 2011 CIMNE, Lisbona 2011.
8. Rudnicki J., *Analysis and Evaluation of the Working Cycle of the Diesel Engine*, Journal of Polish CIMAC, Vol. 6, No 1, Gdańsk 2011.
9. Rudnicki, J., *Energy – Time Method for Assessment of Main Diesel Engine Operation*, Journal of KONES. Powertrain and Transport. - Vol. 14, nr 3 (2007), Warszawa 2007.
10. Rudnicki J., *Ocena działania siłowni okrętowej w aspekcie energetyczno - czasowym* XXVIII Sympozjum Siłowni Okrętowych Gdynia 15-16 listopada 2007, Wydawnictwo Akademii Morskiej Gdynia 2007.
11. Szczepański T., *Metoda oceny użytkowych własności silnika spalinowego w stanach dynamicznych*, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Pojazdów Roboczych, Warszawa 2015
12. <http://www.optrand.com/>
13. <https://www.mccdaq.com/Data-Translation>
14. <https://www.gotronic.pl/atmega328p-nano-30-ch340-usb-terminal-adapter-p-4025.html>