

dr inż. Piotr Jakliński  
Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych  
Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny  
ul. Nadbystrzycka 36,  
20-816 Lublin, Polska  
E-mail: p.jaklinski@pollub.pl

## **„Analiza działania dublowanego systemu sterowania w stanach awaryjnych”**

### **„Analysis of the dual control system operation during failure conditions”**

#### Słowa kluczowe

Silnik lotniczy, certyfikacja, badania stanowiskowe, CS-E

#### Keywords

Aircraft engine, certification process, bench testing, CS-E

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę działania dublowanego systemu sterowania silnika lotniczego ASz-62IR-16E w stanach awaryjnych. Opisano badania stanowiące fragment próby dowodowej zgodnej z normą CS-E. Silnik wyposażony był w prototypowy, elektroniczny układ sterowania wtryskiem paliwa. Próby wykonano na stoisku hamownianym silników lotniczych tłokowych ASz-62IR w WSK „PZL-Kalisz” S.A. Badano odporność układu na pojedyncze awarie czujników oraz oceniano skutki tych awarii. Wykonano próby, w których symulowano awarie czujników prędkości obrotowej, ciśnienia powietrza w kolektorze dolotowym i temperatury silnika. Wyniki tych prób opisano i przedstawiono na wykresach przebiegów czasowych oraz przeprowadzono ich analizę. Artykuł zakończono podsumowaniem.

#### Abstract

The paper presents an analysis of the ASz-62IR-16E aircraft engine dual control system during failure conditions. The studies which are part of the certification tests in accordance with CS-E are described. The engine was equipped with a prototype electronic fuel injection control system. The experiments were conducted on the ASz-62IR-series piston aircraft engine test stand located in WSK "PZL-Kalisz" S.A. Robustness of the electronic control system has been studied for a single sensor failures and the effects of these failures have been evaluated. The tests included simulated failures of engine speed, manifold air pressure and engine temperature sensors. The results of these tests were described and presented on the time-domain charts. The paper concludes with an analysis and a summary.

## 1. Wprowadzenie

Najważniejszym wymaganiem stawianym przed konstrukcjami silników lotniczych jest bezpieczeństwo. Silniki muszą spełniać normy koncentrujące się przede wszystkim na ich niezawodności oraz odporności na powstanie awarii. Wymagania te zawarte są w przepisach Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego pt.: „*Specyfikacje certyfikacyjne dla silników CS-E*”. W przypadku układu sterowania silnikami lotniczymi jednym z najważniejszych elementów analizowanych przez normę jest ich odporność na wystąpienie pojedynczej awarii. Systemy te mają być nie tylko tak zaprojektowane aby zminimalizować możliwość jej wystąpienia, ale także muszą być zabezpieczone przed jej skutkami [1, 7, 13].

Jedną z często stosowanych praktyk spełnienia tych wymagań jest zastosowanie systemów podwójnych. Systemy te mogą działać równolegle lub zastępować się nawzajem. Budowa takich systemów jest jednak bardzo trudna i wymaga przeprowadzania szeregu prób funkcjonalnych. Jest wiele różnych metod i sposobów oceny niezawodności systemu czy prognozowania trwałości [6, 8, 11, 12, 14]. Tu jednak ostatecznym dowodem prawidłowej pracy systemu jest próba funkcjonalna przy wywołaniu awarii [9, 10].

W 2011 roku sukcesem zakończył się projekt celowy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 04305/C.ZR6-6/2008 pt.: „*Wielopaliwowy system zasilania silnika ASz-62IR*”. W wyniku jego realizacji powstał elektronicznie sterowany układ zasilania wtryskiem benzyny do silnika ASz-62IR. Wersja z elektronicznym układem wtrysku benzyny została oznaczona ASz-62IR-16E i zgłoszona do certyfikacji w 2010 roku. Wymagania procesu certyfikacji oraz przygotowania do uruchomienia produkcji wymagały przeprowadzenia dużych serii badań niezawodnościowych i trwałościowych, które w jednoznaczny sposób miały wykazać wrażliwość na awarie poszczególnych podzespołów silnika z elektronicznym systemem wtrysku benzyny.

Silnik lotniczy ASz-62IR-16E jest 9-cio cylindrowym, tłokowym silnikiem w układzie pojedynczej gwiazdy o pojemności skokowej 29,87 dm<sup>3</sup>. Silnik ten z licznymi zmianami konstrukcyjnymi i technologicznymi produkowany jest nieprzerwanie od 1961 roku. Silnik chłodzony jest powietrzem, posiada dwa zawory oraz dwie świece zapłonowe na cylinder. Silnik zasilany jest benzyną lotniczą 100 LL. Układ zapłonowy stanowią dwa niezależne iskrowniki – po jednym na komplet świec zapłonowych. Podstawowe dane techniczne silnika umieszczono w tabeli 1.

**Tabela 1. Dane techniczne silnika ASz-62IR**

Nazwa	Wartość
Średnica silnika	1380 mm
Długość	1130 mm
Masa suchego silnika	567 kg (±2%)
Średnica cylindra	155,5 mm
Skok tłoka	174,5 mm
Pojemność silnika	29,911 dm <sup>3</sup>
Stopień sprężania	6,4±0,1
Moc max przy 2200 obr/min i Pk=1050	1000 KM (735 kW)
Moc nominalna przy 2100 obr/min i Pk=900	820 KM (603 kW)
Moc nominalna na h=1500 m	840 KM (618 kW)
Moc (2030 obr/min i Pk=830)	738 KM (543 kW)
Moc (1930 obr/min i Pk=745)	615 KM (452 kW)

Moc (1770 obr/min i Pk=665)	492 KM (362 kW)
Zużycie paliwa średnie	ok. 200 dm <sup>3</sup> /h
Zużycie paliwa maksymalne	ok. 330 dm <sup>3</sup> /h
Obciążenie mocy	0,57 kg/KM (0,42 kg/kW)
Obciążenie objętości	33,43 KM/dm <sup>3</sup> (24,58 kW/dm <sup>3</sup> )

Opracowany elektroniczny układ sterowania wtryskiem paliwa oparty jest na wielopunktowym wtrysku pośrednim znanym z motoryzacji, jednak sterowanie pracą silnika odbywa się w torze otwartym. Paliwo ze zbiornika rozchodowego pobierane jest przez mechaniczną pompę paliwa, następnie filtrowane i wprowadzane pod odpowiednim ciśnieniem do kolektora paliwowego. Z kolektora paliwo doprowadzane jest do poszczególnych wtryskiwaczy umieszczonych w rurach dolotowych poszczególnych cylindrów. Ciśnienia paliwa regulowane jest przez regulator ciśnienia, a nadmiar wraca przewodem powrotnym do zbiornika [4, 5].

Ze względów bezpieczeństwa układ sterowania zbudowano jako dublowany. Posiada dwa podsystemy sterujące oraz dwa komplety czujników pracujących na elementy wykonawcze – wtryskiwacze paliwa. Założeniem konstrukcyjnym było, że pojedyncza awaria (awaria jednego czujnika czy elementu w układzie sterowania) nie wpłynie, lub jej wpływ będzie znikomy, na pracę silnika. Założenia takie są zgodne z wymaganiami zawartymi w Prawie Lotniczym Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego pt.: „*Specyfikacje certyfikacyjne dla silników CS-E*”. Wymagania dla układu sterowania zasilaniem silnika lotniczego określa punkt 50 w/w normy [1].

Proces certyfikacji (nowego) typu silnika ASz-62IR-16E wymagał wykonania analiz teoretycznych oraz prób dowodowych, w których przeprowadza się opracowane i uzgodnione wcześniej z organem nadzorczym EASA (European Aviation Safety Agency) badania silnika w stanach pracy normalnej oraz w stanach awaryjnych. Spełnia to wymagania stawiane w w/w przepisach.

## 2. Cel i zakres badań

Celem badań była analiza działania dublowanego systemu sterowania w stanach awaryjnych wybranych czujników. Badania te miały potwierdzić spełnienie wybranych punktów przepisów Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego pt.: „*Specyfikacje certyfikacyjne dla silników CS-E 50 – „Układ Sterowania Silnikiem”* [1], ze szczególnym naciskiem na punkty:

*Punkt (b) – 1 i 2: „Musi zostać wykazane, że kiedy w wyniku Awarii lub Usterki następuje przejście z jednego Trybu Sterowania do innego, lub jednego kanału do innego lub z Układu Podstawowego do Układu Zapasowego, zmiana następuje w taki sposób, by:*

- (1) Nie zostały przekroczone jakiejkolwiek ograniczenia użytkowania Silnika,*
- (2) W silniku nie nastąpił pompaż, oderwanie, zgaśnięcie, bądź nie został on poddany niedopuszczalnym zmianom lub wahaniom ciągu lub innym niedopuszczalnym zjawiskom ...”*

*Punkt (c): „Awarie Układu Sterowania Silnikiem. Układ Sterowania Silnikiem musi być zaprojektowany i zbudowany w taki sposób, by:*

- (1) Było możliwe osiągnięcie częstości zdarzeń utraty Sterowania Siłą Ciągu (lub Mocą) (LOTC/LOPC), zgodnych z założeniami w zakresie bezpieczeństwa dla przewidzianego użytkowania statku powietrznego.*

- (2) W Konfiguracji Pełnej Sprawności układ był zasadniczo odporny na pojedynczą usterkę elektryczną lub elektroniczną w odniesieniu do zdarzeń LOTC/LOPC.
- (3) Pojedyncze Awarie elementów składowych Układu Sterowania Silnikiem nie skutkowały Niebezpiecznym Stanem Silnika,
- (4) Przewidywane Awarie lub niesprawności prowadzące do lokalnych zdarzeń przy założonej zabudowie na statku powietrznym takich, jak pożar, przegrzanie, lub Awarie prowadzące do uszkodzenia elementów składowych Układu Sterowania Silnikiem, nie skutkowały Niebezpiecznym Stanem Silnika w wyniku Awarii lub niesprawności Układu Sterowania Silnikiem.

Zakres badań obejmował przeprowadzenie prób dowodowych opisanych w programie roboczym próby, obejmujących wykazanie odporności systemu na pojedyncze awarie „próby stanów awaryjnych – awaria pojedynczego czujnika” oraz ocenę skutków pojedynczych awarii. Czujniki poddane badaniom przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2. Czujniki systemu sterowania silnika lotniczego ASz-62IR-16E**

Nazwa	Oznaczenie	Typ	Producent
Czujnik ciśnienia powietrza	MAP	ATM.1ST - 0,22 – szt.2	STS Sensor Technik Sirnach AG
Czujnik ciśnienia paliwa	FP	ATM.1ST - 0,8 – szt. 2	STS Sensor Technik Sirnach AG
Czujnik temperatury powietrza	MAT	TP - 371 K-4-22-1000-M2x1.5-SPEC – szt. 2 TP-952-2-2T-SPEC 2x45+120°C/4-20mA (przetwornik pomiarowy) – szt. 2	CZAKI Thermo-Product
Czujnik temperatury paliwa	FT	TP - 371 K-4-22-1000-M2x1.5-SPEC – szt. 2	CZAKI Thermo-Product
Czujnik temperatury silnika	ET	TP - 373 K-1.0-118-SPEC - szt. 2 TP-952-SPEC 2x45+300°C/4-20mA (przetwornik pomiarowy) – szt. 2	CZAKI Thermo-Product
Czujnik prędkości obrotowej	RPM	1GT101DC – szt. 2	Honeywell International, Inc.
Czujnik położenia przepustnicy	TPS	9851 (prawoskrętny) – szt. 1 9852 (lewoskrętny) – szt. 1	BEI Sensors

### 3. Stanowisko i metodyka badań

Badania przeprowadzono na stanowisku hamownianym prób silnika ASz-62IR-16E w WSK „PZL Kalisz” S.A. Stanowisko to wyposażone jest w układy pomiarowe pozwalające na badanie silnika zgodnie z wytycznymi zawartymi w CS-E. Dodatkowo, tak jak jest to praktykowane przez innych autorów [2, 3, 9], stanowisko wyposażono w autorskie urządzenia pomiarowe:

1. Układ diagnostyki układu sterowania silnika pozwalający na pobieranie i zapisywanie informacji o stanie pracy układu sterowania w czasie jego pracy z częstotliwością 10 razy na sekundę;
2. Układ umożliwiający wywołanie awarii poszczególnych podzespołów w czasie pracy silnika – przerywacz sygnału (rys. 1)

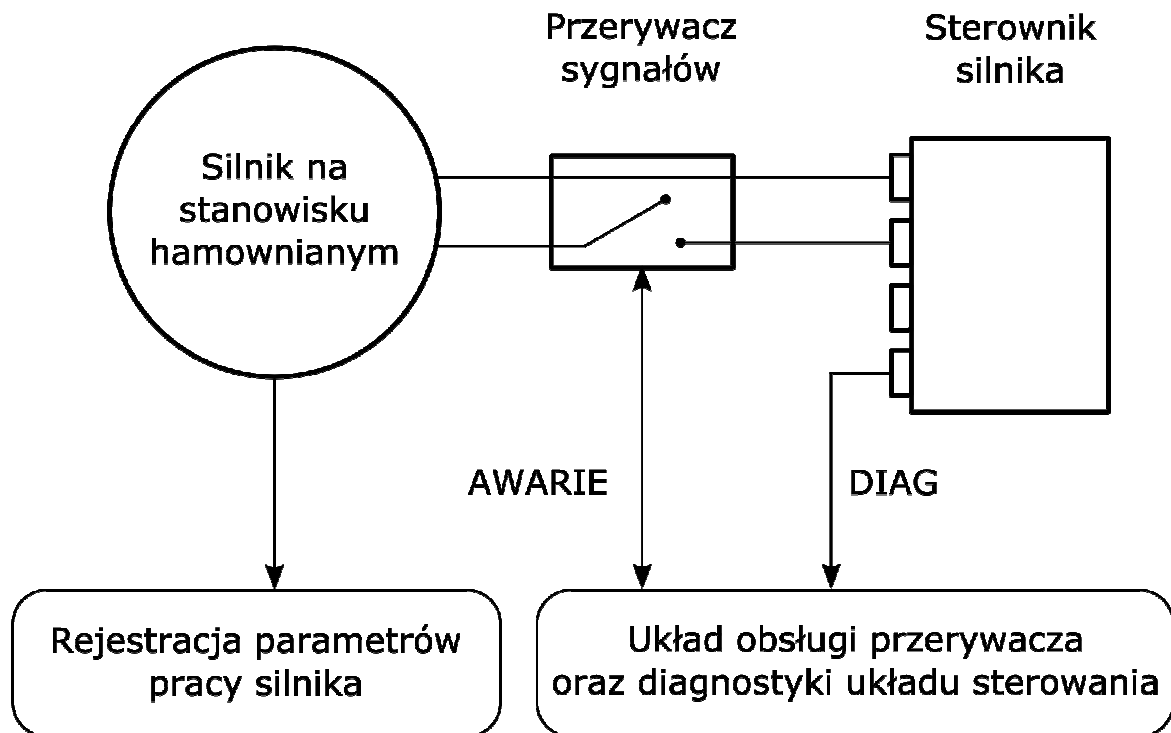
Przerywacz sygnału jest elementem znajdującym się między silnikiem a sterownikiem. Jego zadaniem jest fizyczne rozłączenie połączenia elektrycznego między silnikiem (czujnikami i układami wykonawczymi silnika) a sterownikiem.

W czasie prób z poziomu komputera badawczego odpowiednio sterowano przekaźnikami znajdującymi się w linii połączenia między silnikiem (wiązką silnikową) a sterownikiem. Przełącznik podłączony jest tak, że w stanie wyłączonym (nieaktywnym) utrzymuje linię w stanie połączonym, zaś w przypadku jego włączenia (aktywności) następuje fizyczne rozłączenie linii. Tak symulowano awarie poszczególnych czujników układu sterowania.

Przerywacz sygnału oraz układ diagnostyki obsługiwano z systemu nadzorującego w postaci komputera PC ze specjalnym oprogramowaniem pozwalającym na wywoływanie zakładanych awarii (program *AWARIE*) oraz rejestrację informacji przesyłanych przez sterownik (rejestrację wyników badań - pracy silnika) (program *DIAG*). Pozwalało to na prowadzenie poszczególnych prób oraz zapis wyników:

*DIAG* – umożliwia rejestrację pracy silnika poprzez monitorowanie wartości pomiarowych, współczynników obliczeniowych algorytmu sterowania oraz generowanych czasów wtrysku z jednostki sterującej,

*AWARIE* – umożliwia wywołanie przerwania w obwodzie połączenia elektrycznego każdego z czujników systemu sterowania poprzez fizyczną zmianę stanu przełącznika w przerywaczu sygnału oraz rejestrację tego stanu.



Rysunek 1. Schemat układu badawczego

Drugą, niezależną rejestrację wyników badań (pracy silnika) prowadzono z wykorzystaniem układów wyposażenia technicznego stanowiska hamownianego, gdzie rejestrowano wartości przedstawione w tabeli 3:

Tabela 3. Wielkości rejestrowane podczas badań

Oznaczenie	Nazwa
$t_o$	temperatura otoczenia ( $^{\circ}\text{C}$ )
$B$	ciśnienie barometryczne (mmHg)
$\Delta B$	wilgotność bezwzględna (mmHg)
$t_{pg}$	temperatura powietrza na wlocie do przepustnicy ( $^{\circ}\text{C}$ )

$P_{01}, P_{02}, P_{03}$	ciśnienie oleju w pompie oleju, w pokrywie tylnej i w reduktorze (kg/cm <sup>2</sup> )
$P_p$	ciśnienie paliwa (kg/cm <sup>2</sup> )
$t_1$	temperatura oleju wchodzącego do silnika (°C)
$t_2$	temperatura oleju wychodzącego z silnika (°C)
$t_{gt}$	temperatura głowic cylindrów (°C)
$W$	przepływ oleju przez silnik (kg/min)
$Q$	ilość ciepła odprowadzana przez olej z silnika (kcal/min)
$n$	obroty wału korbowego (1/min)
$P_k$	ciśnienie ładowania (mmHg)
$N_{eo}$	moc (KM)
$C_e$	jednostkowe zużycie paliwa (g/KMh)
$t_{wtr}$	czas wtrysku paliwa (ms)
$k_{ch}$	poprawka chłodzenia głowicy (%)
$t_{pal}$	temperatura paliwa (°C)
$t_{pow}$	temperatura powietrza w kolektorze dolotowym (°C)
$\alpha_{TPS}$	kąt otwarcia przepustnicy (°)

Druga niezależna forma rejestracji wyników pomiarów jest wymagana w normie CS-E w przypadku prób dowodowych.

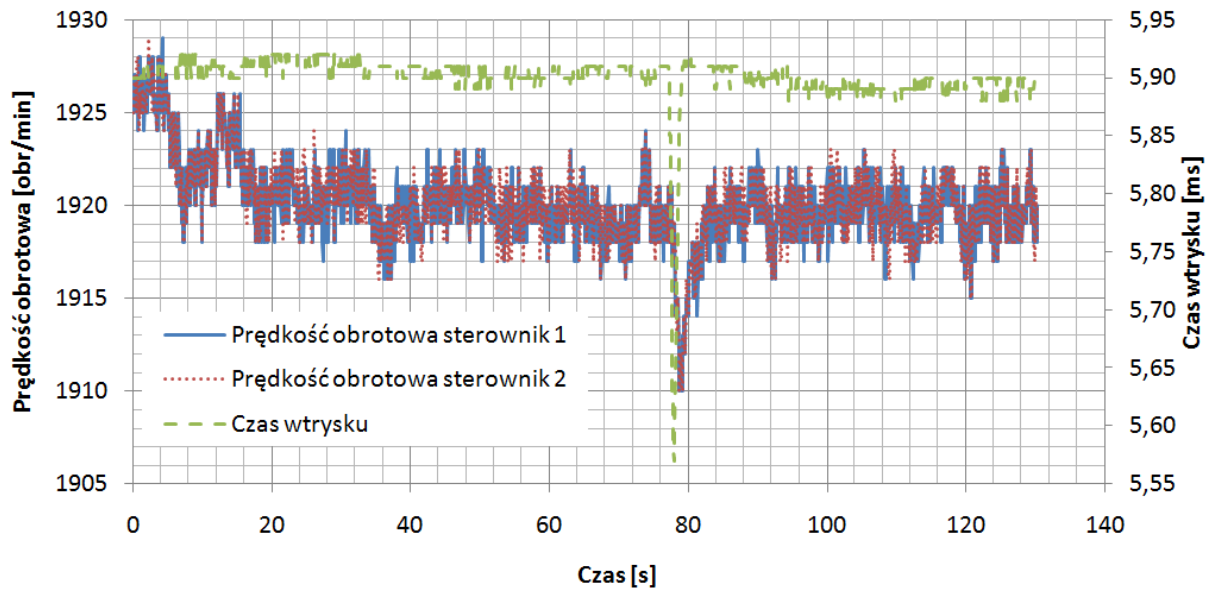
Wszystkie próby obejmowały porównanie działania silnika bez awarii i z pojedynczą awarią analizowanego czujnika podczas pracy silnika na 75% mocy nominalnej określonym przez prędkości obrotową  $n=1910$  obr/min i ciśnienie w rurach dolotowych  $P_k=745\pm 15$  mmHg (99,325±2 kPa). W czasie próby prowadzono ciągłą rejestrację parametrów pracy silnika. Ocenie podlegała zmiana czasu wtrysku w czasie aktywnej awarii oraz zmiana generowanej mocy, zużycia paliwa oraz temperatury głowic. Wartości zmierzone w czasie awarii porównywano do tych uzyskanych w czasie pracy sprawnego układu. Próba określała także ewentualny spadek mocy w czasie awarii. Zasymulowano awarię każdego z czujników silnika.

Zgodnie z założeniami działania układu sterowania wyłączenie pojedynczego czujnika spowoduje automatyczne wykrycie awarii i przełączenie sterowania w tryb wykorzystania jedynie jednego sprawnego czujnika. Może to spowodować chwilową zmianę czasu wtrysku jednak nie większą niż 3% w stanie ustalonym pracy silnika i nie więcej niż 7% w stanach dynamicznych. Nie przewidywane są zmiany osiągow silnika (generowanej mocy, zużycia paliwa i temperatur głowic) większe niż 5%.

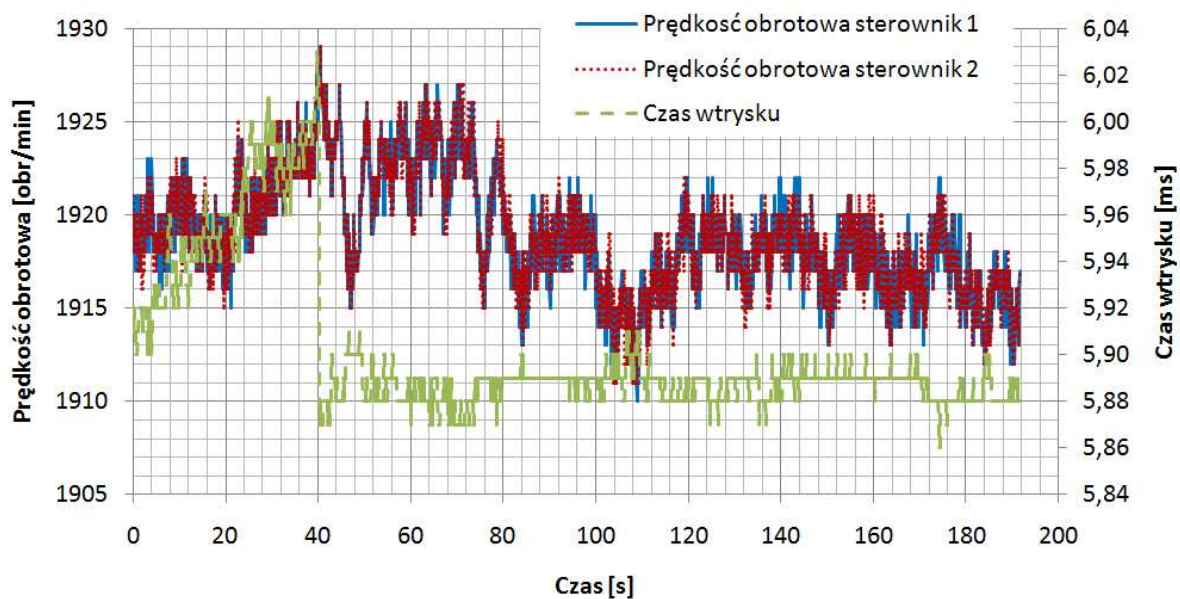
#### 4. Próby dowodowe

##### 4.1. Awaria czujnika prędkości obrotowej

Na poniższym rysunku przedstawiono przebiegi czasu wtrysku i prędkości obrotowej mierzone przez pierwszy i drugi podsystem sterujący podczas symulacji awarii czujnika RPM nr 1 (rys. 2) oraz RPM nr 2 (rys. 3). Wyłączenie czujnika RPM nr 1 nastąpiło w 78 sekundzie pracy układu. Wyłączenie czujnika RPM nr 2 nastąpiło w 40 sekundzie pracy układu.

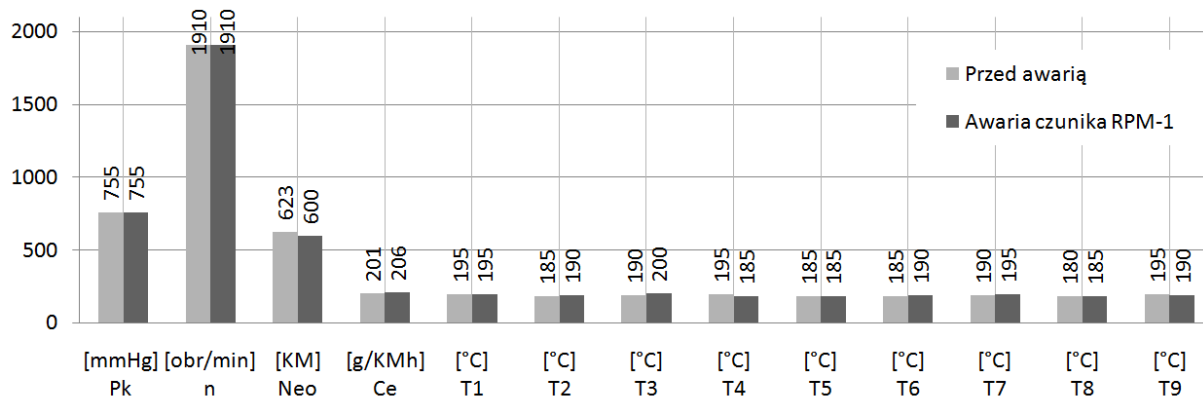


Rysunek 2. Przebieg czasowy czasu wtrysku i prędkości obrotowej podczas symulacji awarii czujnika RPM nr 1

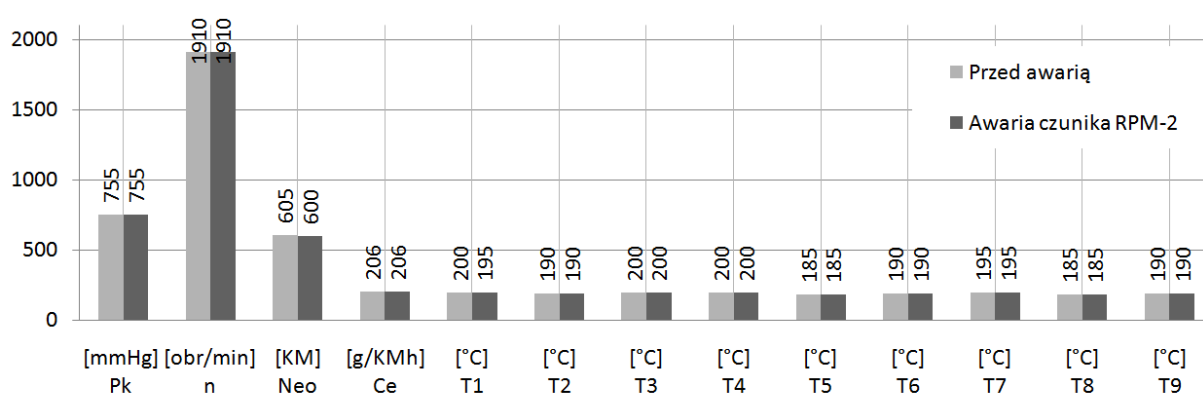


Rysunek 3. Przebieg czasowy czasu wtrysku i prędkości obrotowej podczas symulacji awarii czujnika RPM nr 2

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów parametrów pracy silnika w przypadku awarii czujników RPM nr 1 (rys. 4) i RPM nr 2 (rys. 5) uzyskane w czasie awarii jak i w czasie pełnej sprawności systemu.



Rysunek 4. Wyniki pomiarów wybranych parametrów pracy silnika w przypadku awarii czunika RPM nr 1



Rysunek 5. Wyniki pomiarów wybranych parametrów pracy silnika w przypadku awarii czunika RPM nr 2

W systemie sterowania oba czujniki prędkości obrotowej wykrywają ten sam ząb koła impulsowego. Oba czujniki podłączone są jednocześnie do obu podsystemów sterujących. Ze względu na dokładności wykonania zabudowy sygnały z czujników przychodzą do jednostki sterującej z niewielkim przesunięciem w czasie względem siebie. Do algorytmu obliczeniowego używa się tego sygnału, który nadejdzie wcześniej. Takie rozwiązanie stosowane jest wyłącznie dla czujników prędkości obrotowej.

Analizując przebieg działania układu sterowania podczas awarii czunika RPM nr 1 widoczne jest, że awaria czunika powoduje chwilowe zmniejszenie prędkości obrotowej o 10 obr/min oraz zmniejszenie czasu wtrysku o 0,3 ms (co stanowi 5% zmiany czasu wtrysku). Stan ten trwa 2 sekundy, a następnie układ powraca do swojej normalnej pracy. Potwierdzają to wyniki pomiaru parametrów pracy silnika. Wywołanie awarii powoduje zmniejszenie mocy (3,5%) oraz zwiększenie jednostkowego zużycia paliwa (2,5%). Temperatury głowic praktycznie pozostały na stałym poziomie, a ich zmiana nie przekracza 5°C. Jest to jednak normalny rozrzut pomiarów temperatury na stanowisku badawczym dla tego silnika.

Analizując przebieg działania układu sterowania podczas awarii czunika RPM nr 2 widoczne jest, że awaria czunika powoduje chwilowe zwiększenie prędkości obrotowej o 5 obr/min oraz zwiększenie czasu wtrysku o 0,1 ms (co stanowi 2% zmiany czasu wtrysku). Zmiana ta trwa krótko - ok. 2 s., a czas wtrysku stabilizuje się natychmiast po awarii. Potwierdza to pomiar parametrów pracy silnika. Wywołanie awarii powoduje minimalny spadek mocy (0,8%) bez zmiany jednostkowego zużycia paliwa. Temperatury głowic

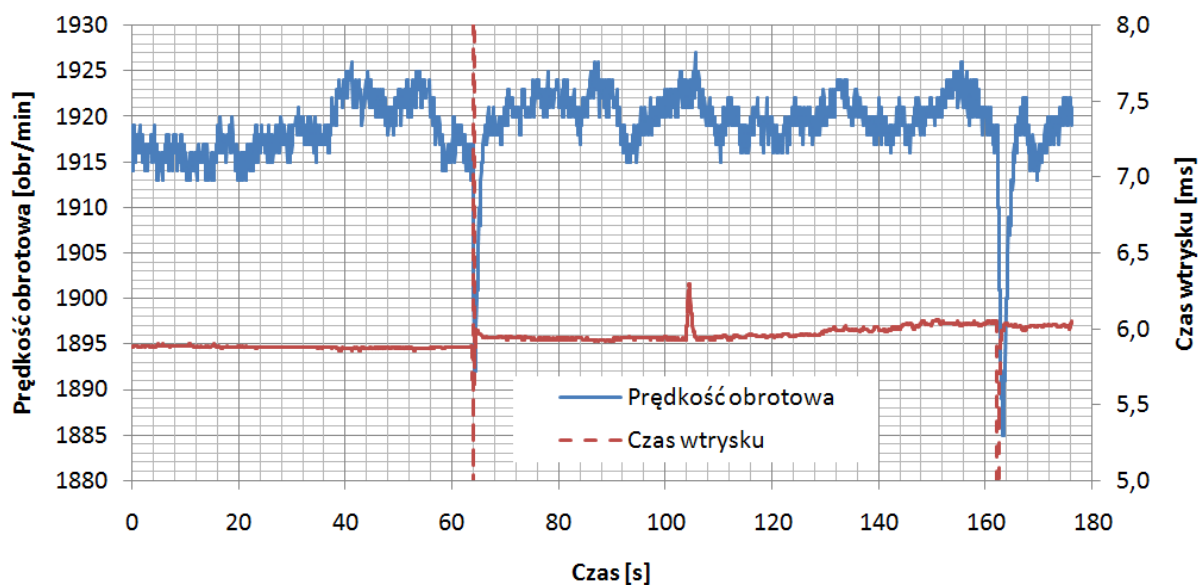


praktycznie pozostały na stałym poziomie. Ich zmiana nie przekracza 5°C. Jest to jednak normalny rozrzut pomiarów na stanowisku badawczym dla tego silnika.

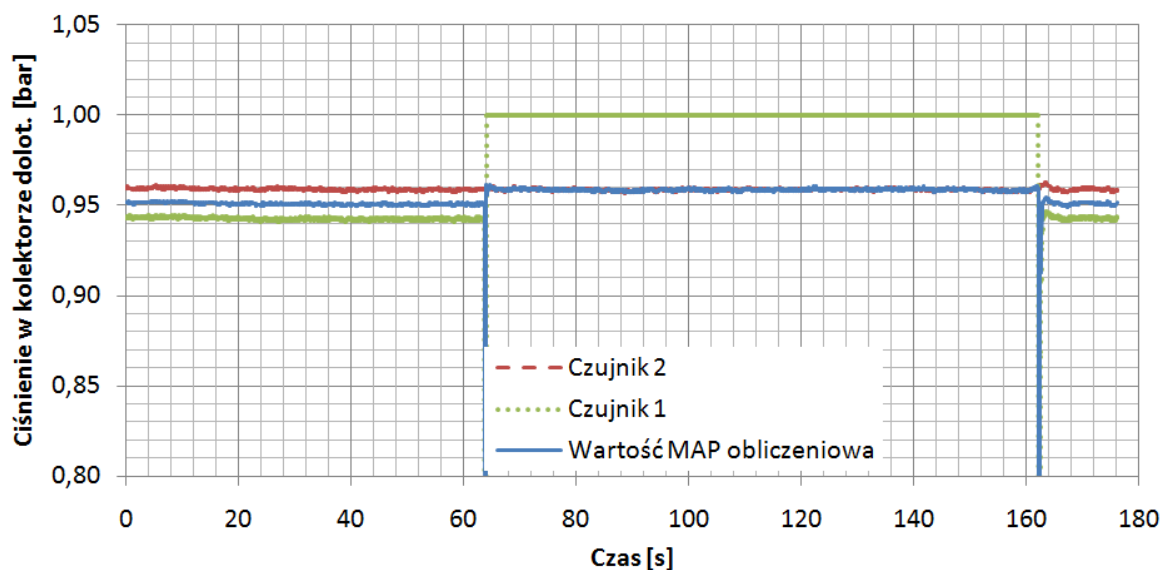
#### 4.2. Awaria czujnika ciśnienia powietrza

W systemie sterowania oba czujniki ciśnienia powietrza w rurach dolotowych mierzą to samo ciśnienie. Każdy podsystem sterujący obsługuje swój własny czujnik. Informację o ciśnieniu z drugiego czujnika otrzymywana jest z drugiego podsystemu za pośrednictwem transmisji danych. Do algorytmu obliczeniowego używa się średniej arytmetycznej z obu odczytów, oceniając najpierw czy oba czujniki (wskazania) są prawidłowe. W przypadku wykrycia wartości nieprawidłowej (wykraczającej poza dopuszczalne wskazania) jednostka używa do obliczeń jedynie wartości poprawnej. Takie rozwiązanie stosowane jest również dla czujników temperatury i ciśnienia paliwa oraz położenia przepustnic.

Na rysunku 6. przedstawiono prędkość obrotową oraz czas wtrysku, zaś na rysunku 7. sygnały z obu czujników MAP oraz wartości obliczeniowej stosowanej do wyznaczania czasu wtrysku podczas symulowania awarii czujnika MAP nr 1. Awaria została aktywowana w 62 sekundzie pracy zaś dezaktywowana w 162 sekundzie.

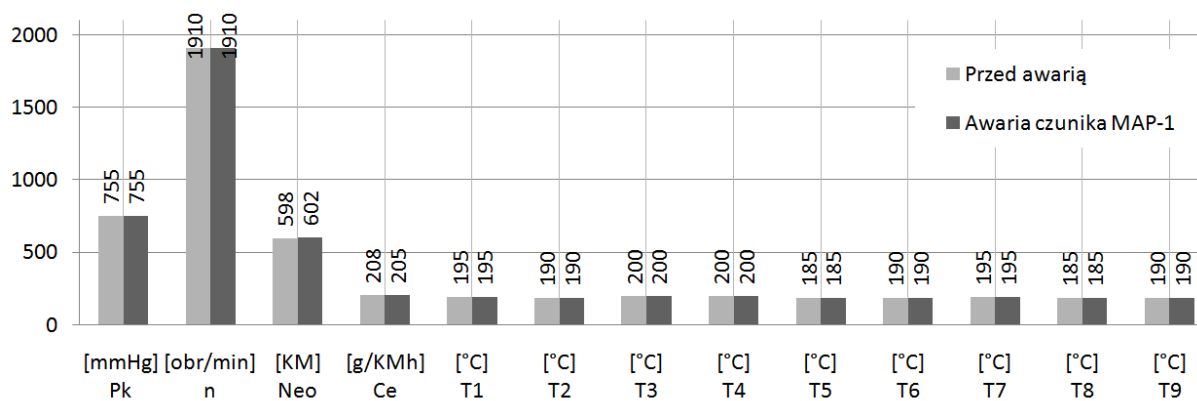


Rysunek 6. Przebieg czasowy czasu wtrysku i prędkości obrotowej podczas symulacji awarii czujnika MAP nr 1



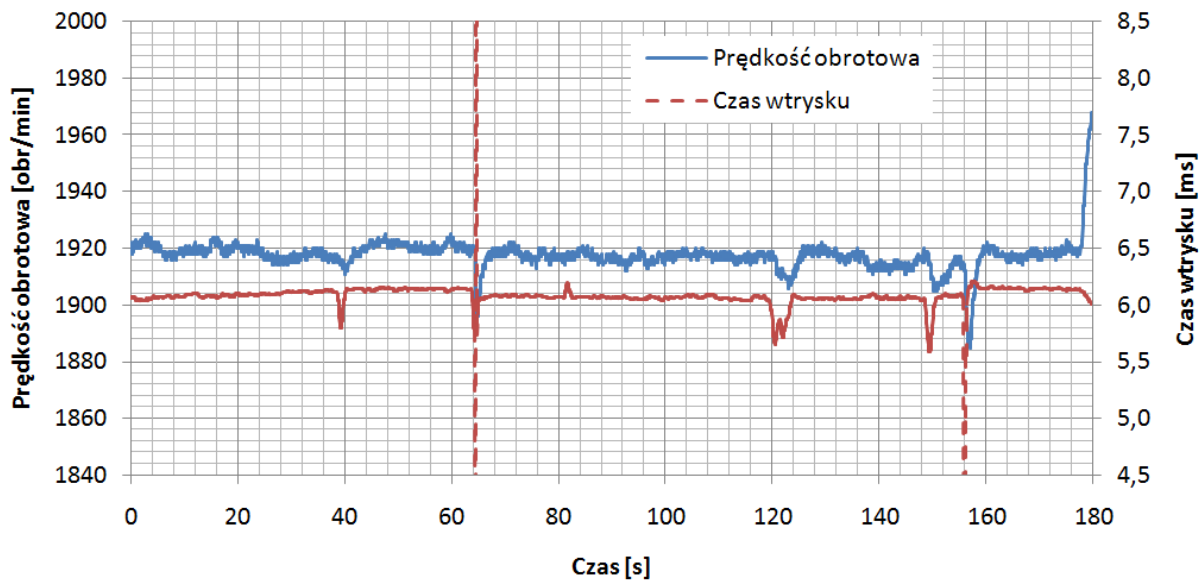
Rysunek 7. Przebieg czasowy sygnałów z obu czujników MAP oraz wartości obliczeniowej MAP podczas symulacji awarii czujnika MAP nr 1

Wyniki badań parametrów pracy silnika podczas awarii czujnika MAP nr 1 oraz w czasie pełnej sprawności systemu przedstawiono na rysunku 8.

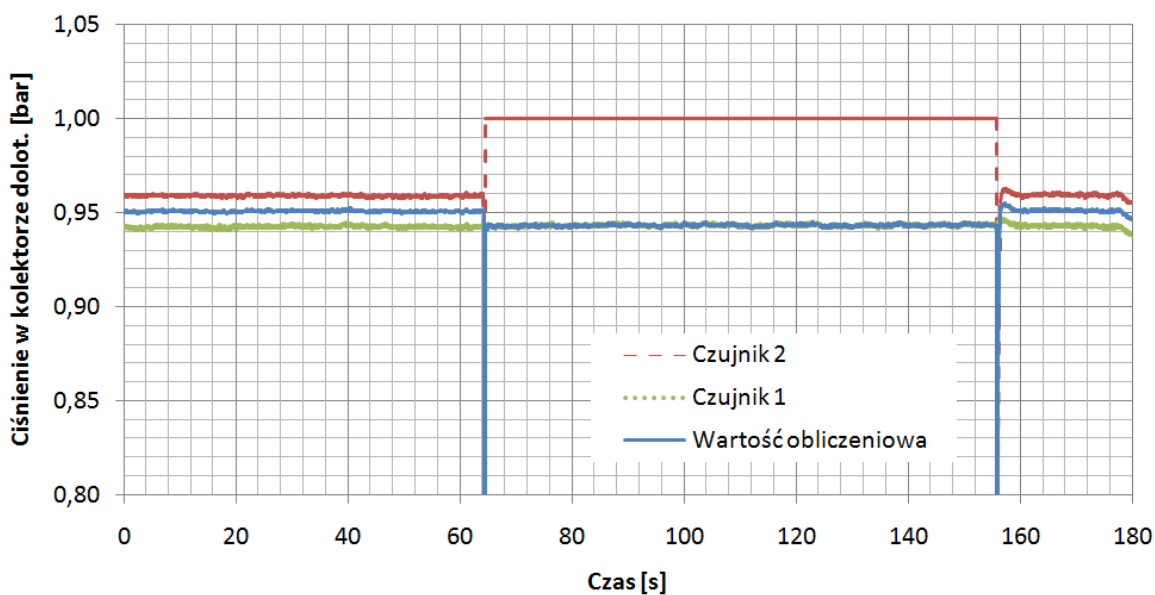


Rysunek 8. Wyniki pomiarów wybranych parametrów pracy silnika w przypadku awarii czujnika MAP nr 1

Na rysunku 9. przedstawiono prędkość obrotową oraz czas wtrysku, a na rysunku 10. sygnały z obu czujników MAP oraz wartości obliczeniowej stosowanej do wyznaczania czasu wtrysku podczas symulowania awarii czujnika MAP nr 2. Awaria została aktywowana w 62 sekundzie pracy zaś dezaktywowana w 158 sekundzie.

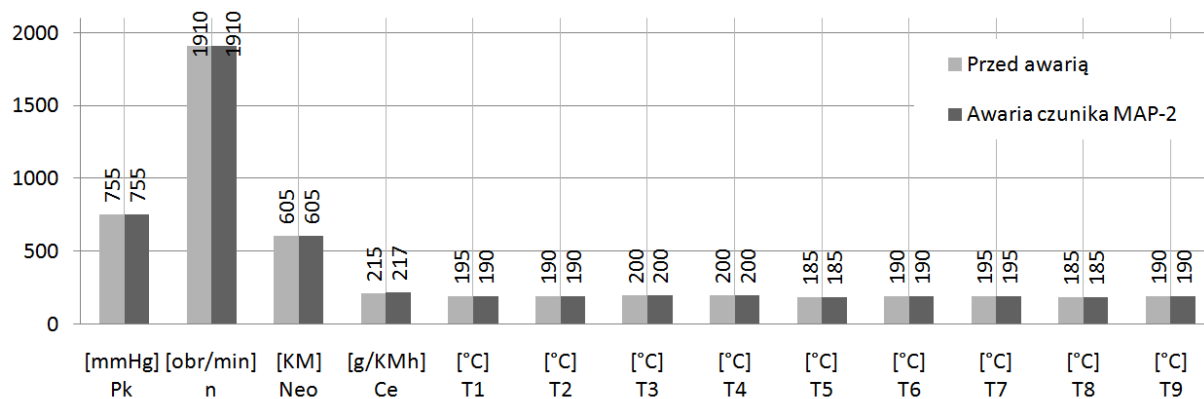


Rysunek 9. Przebieg czasowy czasu wtrysku i prędkości obrotowej podczas symulacji awarii czujnika MAP nr 2



Rysunek 10. Przebieg czasowy sygnałów z obu czujników MAP oraz wartości obliczeniowej MAP podczas symulacji awarii czujnika MAP nr 2

Wyniki badań parametrów pracy silnika podczas awarii MAP nr 2 oraz w czasie pełnej sprawności systemu przedstawiono na rysunku 11.



Rysunek 11. Wyniki pomiarów wybranych parametrów pracy silnika w przypadku awarii czujnika MAP nr 2

Awaria czujnika MAP nr 1 powoduje zanik jego sygnału, co automatycznie wywołuje ustawienie jego wartości w sterowniku na wartość awaryjną wynoszącą 1 bar oraz wyłączenie tej wielkości z obliczania wartości obliczeniowej wykorzystywanej do wyznaczenia czasu wtrysku. Widoczne jest to w przełączeniu wartości obliczeniowej na równą wartości prawidłowo działającego czujnika. Przełączenie to powoduje chwilowy błąd obliczania czasu wtrysku wynikający z uśredniania wartości pomiarowych. Tak gwałtowna zmiana ciśnienia wpływa na wyliczenie poprawki dynamicznej czasu wtrysku co powoduje chwilowe zwiększenie czasu wtrysku do wartości 12 ms i następnie zmniejszenie w kolejnym cyklu na 0 ms. Takie zachowanie jest zgodne z założeniami działania algorytmu sterującego. Skutkuje to chwilowym zmniejszeniem prędkości obrotowej o 20 obr/min przez okres ok. 1 sekundy.

W czasie działania awarii czas wtrysku jest zwiększony o 0,1 ms (czyli 1,5%). Prędkość obrotowa utrzymywana jest na stałym poziomie równym normalnej prędkości pracy silnika.

Dezaktywacja awarii powoduje ponowne włączenie do algorytmu obliczeniowego czujnika i wykorzystywanie obu sygnałów co prowadzi do minimalnego zmniejszenia wartości obliczeniowej. Powoduje to również ponowne zadziałanie poprawki dynamicznej skutkującej wyłączeniem wtrysku na 1 cykl obliczeniowy (1 wtrysk). Jest to także zachowanie zgodne z założeniami algorytmu sterującego.

Awaria czujnika MAP nr 1 powoduje niewielkie zwiększenie mocy silnika (0,5%) oraz zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa (1,4%). Temperatury głowic praktycznie nie zmieniły się.

Awaria czujnika MAP nr 2 powoduje identyczne zachowanie jak opisane powyżej. Przełączenie powoduje chwilowy błąd obliczania czasu wtrysku. Tak gwałtowna zmiana ciśnienia wpływa na wyliczenie poprawki dynamicznej czasu wtrysku co powoduje chwilowe zwieszenie czasu wtrysku do wartości 12 ms i następnie zmniejszenie w kolejnym cyklu na 0 ms. Takie zachowanie jest zgodne z założeniami działania algorytmu sterującego. Skutkuje to chwilowym zmniejszeniem prędkości obrotowej o 15 obr/min przez okres 1 sekundy.

W czasie działania awarii czas wtrysku jest zmniejszony o 0,1 ms (czyli 1,5%). Prędkość obrotowa utrzymywana jest na stałym poziomie zgodnym z tym w przy pracy bez awarii.

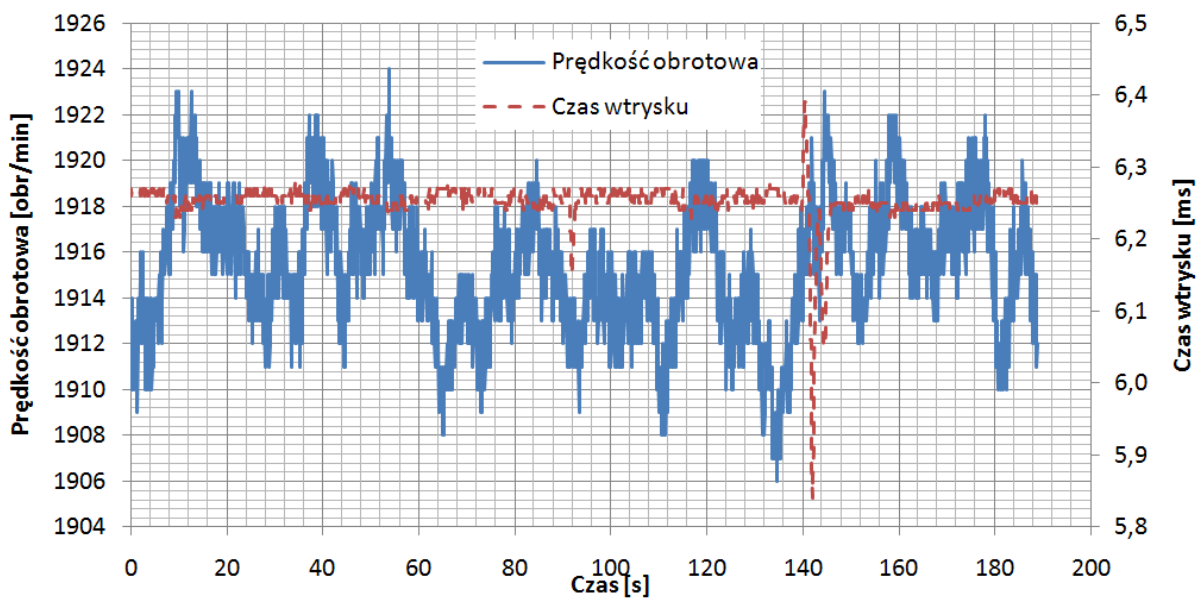
Dezaktywacja awarii powoduje ponowne włączenie do algorytmu obliczeniowego czujnika i wykorzystywanie obu sygnałów co prowadzi do minimalnego zmniejszenia wartości obliczeniowej. Powoduje to również ponowne zadziałanie poprawki dynamicznej i wyłączenie wtrysku na 1 cykl obliczeniowy (1 wtrysk). Jest to także zachowanie zgodne z założeniami algorytmu sterującego.

Awaria czujnika MAP nr 2 nie spowodowała mierzalnej zmiany mocy silnika. Temperatury głowic oraz jednostkowe zużycie paliwa również praktycznie się nie zmieniły.

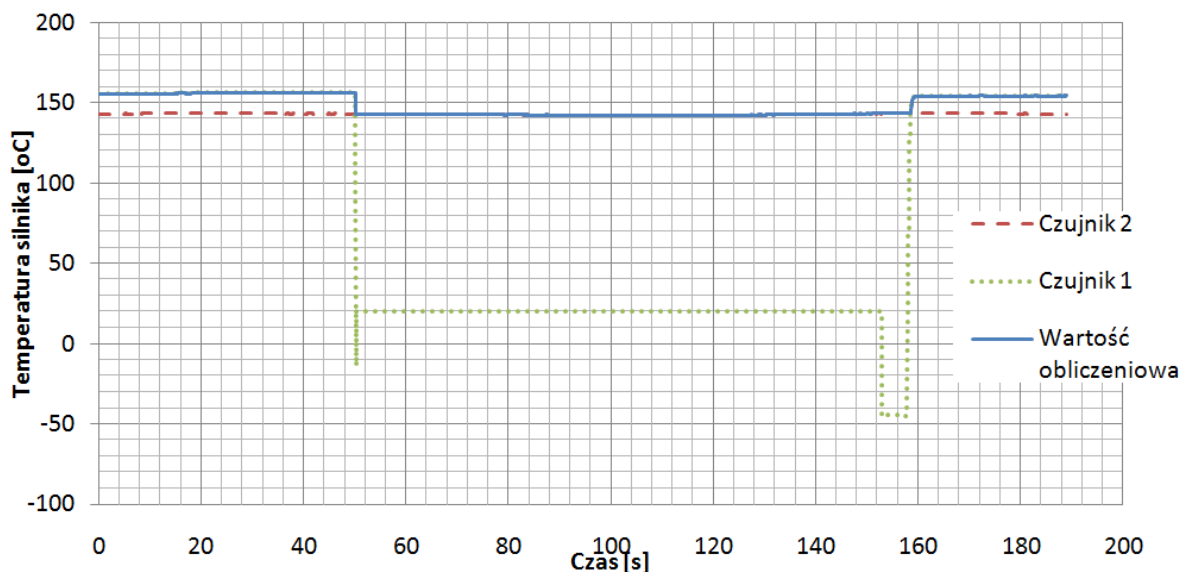
### 4.3. Awaria czujnika ET

W systemie sterowania czujnik temperatury silnika ET 1 mierzy temperaturę drugiego cylindra, natomiast ET 2 - siódmego cylindra. Sygnały z czujników są wprowadzane do zewnętrznych przetworników temperatury i dopiero tak przetworzone sygnały trafiają do jednostki sterującej. Wartości tych sygnałów są różne. Do algorytmu obliczeniowego używa się większej z nich.

Na rysunku 12. przedstawiono prędkość obrotową oraz czas wtrysku, zaś na rysunku 13. sygnały z obu czujników ET oraz wartości obliczeniowej stosowanej do wyznaczania czasu wtrysku podczas symulowania awarii czujnika ET nr 1. Awaria została aktywowana w 50 sekundzie pracy zaś dezaktywowana w 152 sekundzie.

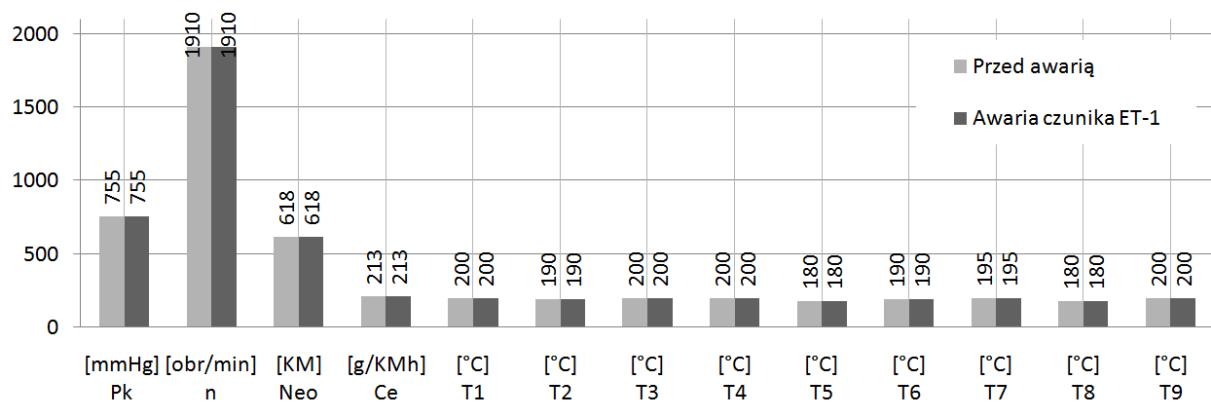


Rysunek 12. Przebieg czasowy czasu wtrysku i prędkości obrotowej podczas symulacji awarii czujnika ET nr 1



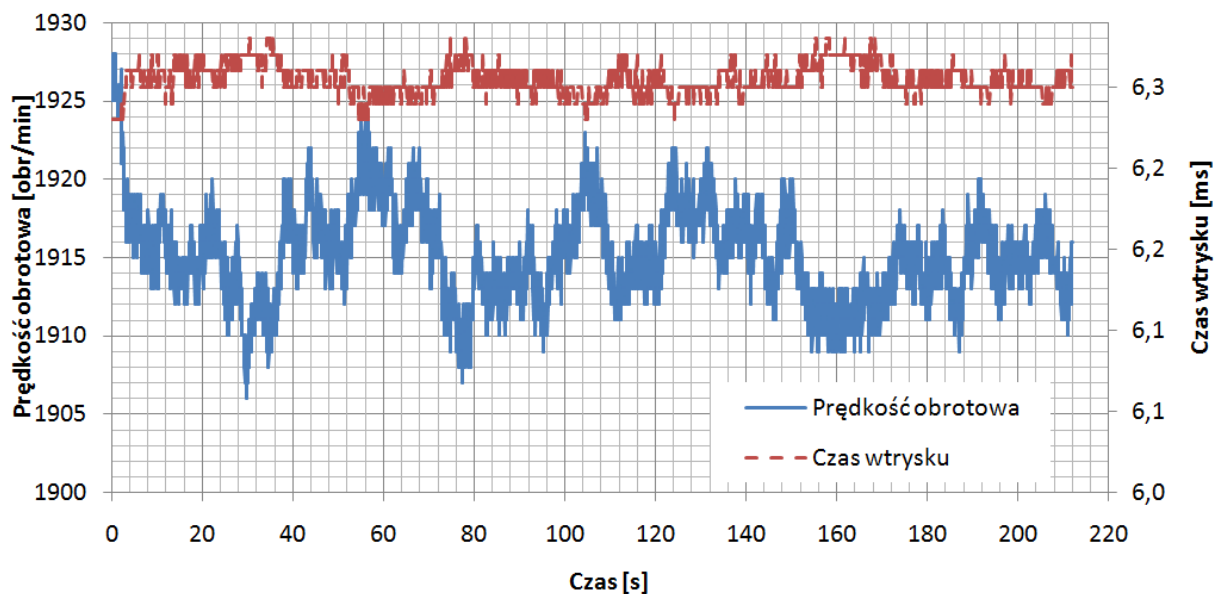
Rysunek 13. Przebieg czasowy sygnałów z obu czujników ET oraz wartości obliczeniowej ET podczas symulacji awarii czujnika ET nr 1

Na rysunku 14. przedstawiono wyniki badań parametrów pracy silnika podczas awarii czujnika ET nr 1 oraz w czasie pełnej sprawności systemu.

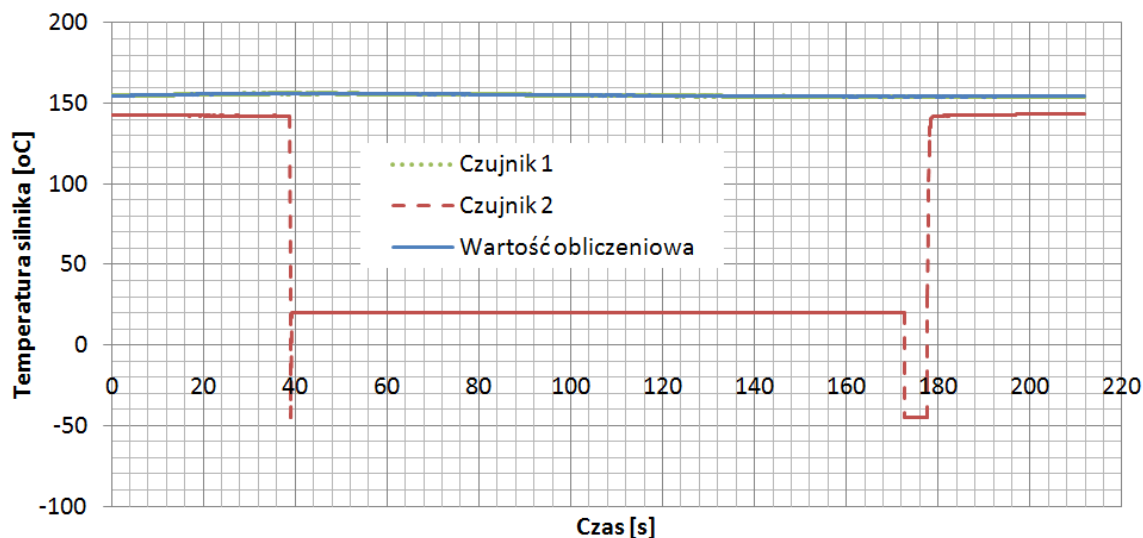


Rysunek 14. Wyniki pomiarów wybranych parametrów pracy silnika w przypadku awarii czujnika ET nr 1

Na rysunku 15. przedstawiono prędkość obrotową oraz czas wtrysku, zaś na rysunku 16. sygnały z obu czujników ET oraz wartości obliczeniowej stosowanej do wyznaczania czasu wtrysku podczas symulowania awarii czujnika ET nr 2. Awaria została aktywowana w 39 sekundzie pracy zaś dezaktywowana w 172 sekundzie.

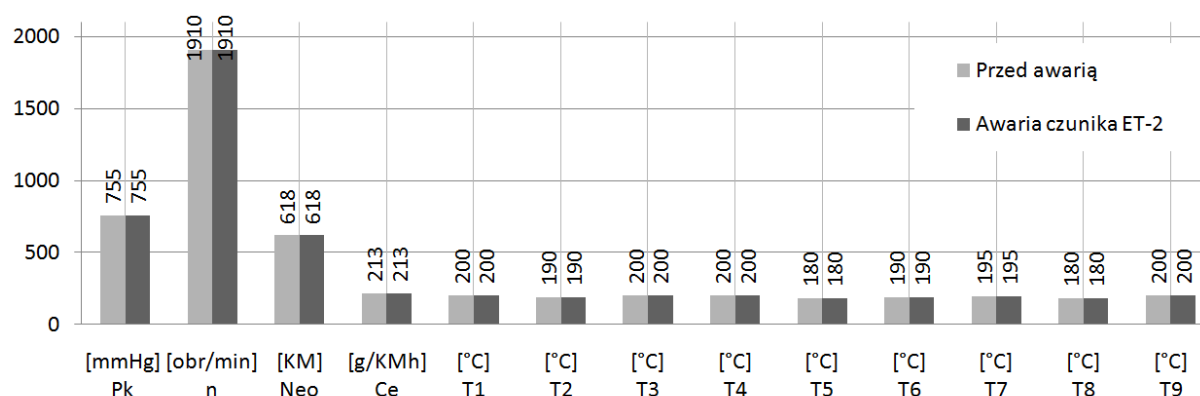


Rysunek 15. Przebieg czasowy czasu wtrysku i prędkości obrotowej podczas symulacji awarii czujnika ET nr 2



Rysunek 16. Przebieg czasowy sygnałów z obu czujników ET oraz wartości obliczeniowej ET podczas symulacji awarii czujnika ET nr 2

Na rysunku 17. przedstawiono wyniki badań parametrów pracy silnika podczas awarii czujnika ET nr 2 oraz w czasie pełnej sprawności systemu.



Rysunek 17. Wyniki pomiarów wybranych parametrów pracy silnika w przypadku awarii czujnika ET nr 2

Awaria czujnika temperatury głowic może powodować zmianę wartości obliczeniowej, wyznaczonej normalnie jako wartość największa z obu czujników. Ze względu na charakter pracy przetwornika temperatury spadek sygnału nie następuje gwałtownie, a trwa około 0,5 sekundy. Powoduje to opóźnienie reakcji systemu sterowania na awarię do chwili uzyskania przez sygnał podawany z przetwornika wartości poza obszarem normalnych wskazań. Ze względu na fakt, że temperatura ta wykorzystywana jest w algorytmie chłodzenia silnika, zmiana czasu wtrysku będzie występować jedynie w przypadku przekroczenia przez sygnał obliczeniowy wartości progowej. W analizowanym przypadku nie przekroczono tej wartości. Nie zmieniło się zatem sterowanie czasem wtrysku.

W czasie pracy silnika w stanie awaryjnym układ pracuje poprawnie, a czas wtrysku jest zgodny z czasem wtrysku przy pracy w pełni sprawnego systemu.

Dezaktywacja awarii i ponowne włączenie czujnika powoduje większy błąd wyznaczania temperatury z powodu czasu potrzebnego na uruchomienie przetwornika

temperatury. Okres ten trwa 7 sekund i w badanym punkcie pracy nie miał wpływu na czas wtrysku.

Awaria nie wpłynęła na osiągi silnika. Nie zanotowano zmiany mocy ani zużycia paliwa. Temperatury głowic pozostały niezmiennione.

Ze względu na fakt, że sygnał czujnika ET nr 2 był mniejszy niż ET nr 1, przy awarii ET nr 2 nie wystąpiła zmiana wartości obliczeniowej, a przez to także działanie silnika nie uległo zmianie.

## 5. Podsumowanie

Pomimo, że każdy z opisanych czujników był innego typu oraz inaczej były wykorzystywane w algorytmie sterowania, pojedyncza awaria każdego z nich nie wpływa w sposób znaczący (istotny) na pracę silnika.

Badania przeprowadzone wykazały, że pojedyncze awarie czujników nie powodują utraty sprawności działania silnika. Silnik i układ sterowania działały normalnie bez przekroczenia jakichkolwiek ograniczeń użytkowania silnika, ani jego wyłączenia. W większości przypadków nie wystąpiła zmiana parametrów pracy silnika o więcej niż 5% i nie wystąpiły wahania mocy przekraczające dopuszczalne granice.

Powyższe próby wykazały spełnienie wymagań punktu CS-E 50 b (1) i (2). W czasie awarii nie wystąpiło przekroczenie jakichkolwiek ograniczeń użytkowania silnika (co spełnia punkt CS-E 50 b (1)) oraz nie wystąpiło zgaśnięcie, niedopuszczalne wahania lub inne niedopuszczalne zjawiska (co spełnia punkt CS-E 50 b (2)).

Jak wykazały próby dowodowe, opracowana konstrukcja jest w pełni odporna na pojedynczą awarię czujnika. We wszystkich przebadanych przypadkach wystąpienie pojedynczej awarii nie spowodowało utraty Sterowania Mocą co spełnia punkt CS-E 50 c (2).

Jednocześnie w żadnym z analizowanych przypadków nie spowodowało pojawienia się lub nie wskazywały na możliwość wystąpienia Niebezpiecznego Stanu Silnika. Spełnia to wymagania punktów CS-E 50 c (3) i (4).

Oznacza to, że opracowana konstrukcja oraz algorytm sterowania odporny jest na awarię pojedynczego czujnika.

## Literatura

1. Europejska Agencja Bezpieczeństwa Lotniczego, Specyfikacje Certyfikacyjne dla Silników CS-E, Aneks do Decyzji Dyrektora Wykonawczego 2010/015/R, Zmiana 3, 23 grudnia 2010.
2. Gęca M., Wendeker M., Czarnigowski J., Jakliński P., Nazarewicz A., Pietrykowski K., Barański G. Stanowisko laboratoryjne do badania samolotowego układu wtryskowego. P07-C149, PTNSS Kongres 2007.
3. Gronostajski Z., Hawryluk M., Kaszuba M., Sadowski P., Walczak S., Jabłoński D. Systemy kontrolno-pomiarowe w przemysłowych procesach kucia matrycowego. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2011; 3(51).
4. Jakliński P., Wendeker M., Czarnigowski J., Duk M., Zyska T., Klimkiewicz J. The Indicated Pressure Analyses of Aircraft Radial Piston Engine Fuelled by 100LL and ES95 Gasoline. PTNSS-2009-SC-065, Combustion Engines, Silniki Spalinowe, Special Series 2009-SC2:162-170.
5. Jakliński P., Wendeker M., Czarnigowski J., Duk M., Zyska T., Klimkiewicz J. The Comparison of the Operating Parameters in an Aircraft Radial Piston Engine Fuelled by



- 100LL and ES95 Gasoline. PTNSS-2009-SS1-C064, Combustion Engines, Silniki Spalinowe 1/2009: 52-59.
6. Kowalczyk M., Czmochowski J., Rusiński E. Budowa modelu diagnozowania stanów awaryjnych organów roboczych koparki wieloczerpakowej. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 2(42): 17-24.
  7. Lewitowicz J., Kustron K., Podstawy eksploatacji statków powietrznych cz.1. Warszawa: Wydawnictwo ITWL, 2001.
  8. Li Y., Huang H., Liu Y., Xiao N., Li H. Nowa metoda analizy drzewa uszkodzeń; rozmyta analiza dynamicznego drzewa uszkodzeń. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (3); 208-214.
  9. Lingaitis L. P., Mjamlin S., Baranovsky D., Jastremskas V. Badania eksperymentalne operacyjnej niezawodności eksploatacyjnej silników diesel dla spalinowozów. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (1): 6-11.
  10. Olearczuk E., Sikorski M., Tomaszek H.: *Eksploatacja samolotów (elementy teorii)*. Warszawa: Wydawnictwo MON, 1978.
  11. Pang Y., Huang H., Xiao N., Liu Y., Li Y. Posybilistyczna analiza niezawodnościowa systemu naprawialnego z pominiętym lub opóźnionym efektem uszkodzenia. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (3): 195-202.
  12. Wang Z., Huang H., Du X. Projektowanie niezawodnościowe z wykorzystaniem kilku strategii utrzymania. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 4(44): 37-44.
  13. Yu T., Cui W., Song B., Wang S. Ocena wzrostu niezawodności w bezzałogowym statku latającym podczas kolejnych faz badania w locie. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2010; 2(46): 43.
  14. Zhou Y., Ma L., Mathew J., Sun Y., Wolff R. Prognozowanie trwałości środków technicznych z wykorzystaniem wielu wskaźników degradacji i zdarzeń awaryjnych w ujęciu modelu ciągłej przestrzeni stanów. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 4(44): 72-81.