

UWAGA: treści przedstawione w tym dokumencie są objęte prawami autorskimi i stanowią własność firmy Horus-Energia Sp. z o.o.. Jakiegokolwiek użycie całości bądź fragmentu bez zgody właściciela jest zabronione.

RAPORT Z REALIZACJI ETAPU PROJEKTU

wyciąg

NR ETAPU 2

W RAMACH PROGRAMU OPERACYJNEGO INTELIGENTNY ROZWÓJ

Numer umowy POIR.01.01.01-00-0902/15-04

Tytuł projektu: *Agregat prądowórczy dużej mocy zasilany gazami odpadowymi niskiej jakości z modułowym układem oczyszczania gazów*

2. CEL I ZAKRES PRACY

Zgodnie z założeniami II etapu projektu, zasadniczy cel zrealizowanych prac dotyczył opracowania takich rozwiązań konstrukcyjnych silnika, które pozwalały na optymalizację wykorzystania opracowanego systemu zasilania paliwem gazowym HE-MUZG. Podstawowym kryterium prowadzonych prac optymalizacyjnych było uzyskanie jak największej sprawności ogólnej silnika oraz rozszerzenie możliwości zasilania silnika trudnymi gazami nienormatywnymi, przy spełnieniu warunków zachowania prawidłowego przebiegu procesu spalania (spalanie stukowe, wartość dopuszczalnej temperatury spalin, granica zapalności mieszanki).

Wszystkie pomiary dotyczące parametrów energetycznych zrealizowano przy stałej prędkości obrotowej silnika wynoszącej 1500 obr/min i różnej wartości obciążenia. Warunki te odpowiadają pracy silnika w agregacie prądowórczym.

Zgodnie z założeniami z II etapu projektu, badania prowadzono dla trzech różnych wartości stopnia sprężania. W wyniku wykonanych prac, nie licząc fabrycznego stopnia sprężania, który wynosi $\varepsilon = 11$ wykonano również badania dla stopni sprężania wynoszących $\varepsilon = 9,7$ i $\varepsilon = 8,7$ zmieniając tłoki silnika. Podstawowy program badań II etapu rozszerzono o kilka badań. Przeprowadzono testy działania układu:

- dla zmiennego ciśnienia gazu zasilającego wpływającego do mieszalnika
- dla zasilania dwoma różnymi gazami jednocześnie w tym dla sytuacji zmienności jednego z gazów
- dla zasilania nietypowym gazem jakim jest tlenek węgla

W badaniach stosowano następujące paliwa: gaz ziemny wysokometanowy (GZ50), mieszaninę gazu ziemnego i dwutlenku węgla, mieszaninę gazu ziemnego i azotu, propan techniczny, propan-butan (LPG) oraz tlenek węgla a także propen jako węglowodór nienasycony.

Dla wymienionych wartości stopnia sprężania oraz wymienionych paliw prowadzono badania w celu określenia m.in. następujących parametrów silnika:

- zużycie paliwa [Nm^3/h],
- sprawność ogólna obiegu η [-],
- współczynnik nadmiaru powietrza λ [-],
- stężenie tlenków azotu NO_x ,
- temperatura spalin T_{sp} [$^{\circ}\text{C}$].

Badania przeprowadzono na specjalistycznym stanowisku hamownianym firmy Horus – Energia, przeznaczonym do badania agregatorów prądowórczych.

3. PROGRAM BADAŃ

W ramach etapu II projektu badawczego zrealizowano następujący program badań:

l.p.	Temat zadania
1.	<p>Badanie wpływu ciśnienia doładowania na parametry robocze agregatu prądowórczego wyposażonego w system mieszalnikowego zasilania HE-MUZG.</p> <p>Celem badań było określenie wpływu wartości ciśnienia doładowania silnika na uzyskiwane parametry robocze agregatu prądowórczego, przy zachowaniu nastaw pozwalających na poprawną, stabilną pracę silnika, w szczególności</p> <ul style="list-style-type: none"> - nie przekraczanie granicy spalania stukowego, - nie występowanie zjawiska wypadających zapłonów - nie przekraczanie dopuszczalnej temperatury spalin wynoszącej 700°C przed turbiną turbosprężarki - uzyskiwanie założonej wartości stężenia tlenków azotu NO_x wynoszącej 500 mg/m³ (przy 5% O₂) <p>Część badań w której obniżano ciśnienie doładowania prowadzono podczas zasilania silnika paliwami wysokoenergetycznymi (wysokometanowy gaz ziemny, LPG , propan techniczny).</p> <p>Część badań, w której podnoszono ciśnienie doładowania, prowadzono dla gazów niskokalorycznych takich jak mieszaniny gazu ziemnego z dwutlenkiem węgla lub azotem.</p> <p>Parametry agregatu przewidziane do sprawdzenia i określenia, z uwzględnieniem zastosowanych rozwiązań:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. maksymalna moc elektryczna uzyskiwana stabilnie dla danego paliwa gazowego b. sprawność ogólna agregatu dla różnej wartości obciążenia: 100%, 90%, 75%, 50%, 25%, 0%, c. określenie cech dynamicznych agregatu przy zmianie obciążenia d. ilość ciepła wytwarzana w układzie chłodzenia silnika oraz w chłodnicy powietrza doładowującego (z zastrzeżeniem jak dla pkt. b)
2.	<p>Zbadanie wpływu stopnia sprężania silnika na możliwe do uzyskania parametry robocze agregatu prądowórczego.</p> <p>Zgodnie z założeniami realizacji II etapu projektu, badania prowadzono dla trzech różnych wartości stopnia sprężania silnika. Wartości te wynosiły odpowiednio:</p> <p>$\varepsilon = 11$ (fabryczny, część badań została przeprowadzona w etapie I), $\varepsilon = 9,7$ i $\varepsilon = 8,7$.</p> <p>Zaplanowane zostało badanie wpływu zmiany stopnia sprężania na właściwości robocze silnika zasilanego paliwami gazowymi o małej odporności na spalanie stukowe oraz paliwami niskoenergetycznymi.</p> <p>W badaniach przyjęto kryteria ograniczające pole pracy silnika, którymi były:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. granica spalania stukowego, 2. dopuszczalna wartość temperatury spalin wynosząca 700°C, 3. wartość stężenia tlenu azotu NO_x wynosząca 500 mg/m³ (przy 5% O₂). <p>Wstępne pomiary wykonano dla standardowej wartości stopnia sprężania, wynoszącej $\varepsilon = 11$ i przy zasilaniu silnika wysokometanowym gazem ziemnym, a wyniki przyjmowano jako wartości referencyjne (w etapie I).</p> <p>Następnie przeprowadzono serię badań przy każdym z wybranych stopni sprężania na różnego typu paliwach, takich jak:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Wysokometanowy gaz ziemny, 2. Mieszanina propan-butan, 3. Propan techniczny 4. Propen, 5. Mieszanina gazu ziemnego z dwutlenkiem węgla, 6. Mieszanina gazu ziemnego z azotem. <p>Parametry przewidziane do sprawdzenia i określenia:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. maksymalna moc elektryczna b. zużycie paliwa i sprawność dla różnych obciążeń: 100%, 90%, 75%, 50%, 25%, 0% c. określenie cech dynamicznych agregatu przy zmianie obciążenia d. ilość ciepła z układów chłodzenia płaszcza silnika oraz chłodzenia mieszanki (intercooler). <p>Dla mieszanin gazu ziemnego z CO₂ oraz azotem określeniu podlegały także minimalne wartości kaloryczne dla których agregat pracował stabilnie.</p>
3.	<p>W programie badań przewidziano także testy działania układu:</p> <ol style="list-style-type: none"> A. dla zasilania dwoma różnymi gazami jednocześnie, także dla sytuacji zmienności jednego z gazów Parametrem sprawdzanym była stabilność częstotliwości w czasie zmian składu gazu w jednej ze ścieżek (efektywność przejęcia funkcji dostarczenia paliwa przez drugą ścieżkę) B. dla zasilania nietypowym gazem jakim jest tlenek węgla. Parametrem sprawdzanym była stabilność pracy oraz moc maksymalna a także zużycie paliwa celem określenia uzyskiwanych sprawności agregatu

W związku z tym opracowano zestaw zmian konstrukcyjnych silnika wyposażonego w system zasilania paliwem gazowym HE-MUZG.

4. WYNIKI BADAŃ AGREGATU I ICH ANALIZA

4.1. Badanie wpływu ciśnienia doładowania silnika na możliwe do uzyskania parametry robocze agregatu prądotwórczego

4.1.1. Badania wpływu zmniejszenia ciśnienia doładowania.

W trakcie badań nie stwierdzono wpływu ciśnienia doładowania na granicę spalania stukowego.

4.1.2. Badania wpływu zwiększenia ciśnienia doładowania.

W trakcie przeprowadzonych badań stwierdzono pozytywny wpływ zwiększenia dyspozycyjnego ciśnienia doładowania na stabilność pracy silnika dla gazów niskokalorycznych, dla których określano granicę palności mieszanki. Uzyskano także możliwość pracy z określoną mocą dla nieznacznie uboższych mieszanek (o ok. 1 – 2% zawartości wysokometanowego gazu mniej).

4.2. Badanie wpływu stopnia sprężania silnika na możliwe do uzyskania parametry robocze agregatu prądotwórczego

W pierwszej kolejności wykonano ponownie badania silnika z oryginalnym stopniem sprężania ($\epsilon=11$). Powodem były poczynione na potrzeby tego etapu projektu znaczne modyfikacje układu dolotowego i wydechowego silnika. Wpływ tych modyfikacji na parametry pracy silnika mógłby zaburzyć obiektywną ocenę efektów zmiany stopnia sprężania, gdyby odnosić wyniki uzyskane w bieżącym etapie do tych z poprzedniego etapu.

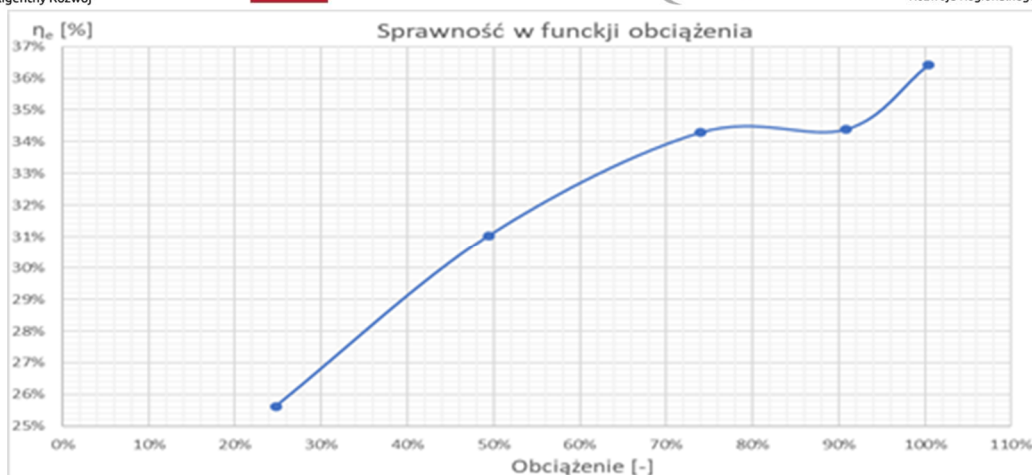
Następnie przeprowadzono badania dla obniżonego stopnia sprężania do wartości $\epsilon=9,7$ oraz $\epsilon=8,7$. Niższe stopnie sprężania uzyskano przez modyfikację oryginalnych tłoków; $\epsilon=9,7$ uzyskano poprzez obniżenie korony tłoka, a $\epsilon=8,7$ poprzez dodatkowe obniżenie korony tłoka oraz powiększenie komory spalania w tłoku.

4.2.1 Obniżony stopień sprężania ($\epsilon = 9,7$).

4.2.1.1 Badanie agregatu z gazem ziemnym z utrzymaniem emisji tlenków azotu poniżej 500mg/m³.

Przeprowadzono badanie silnika zasilanego czystym gazem ziemnym, utrzymując emisję NO_x w granicy 500mg/m³ (przy 5% O₂). Dokonano pomiarów sprawności elektrycznej i cieplowniczej agregatu dla następujących punktów pomiarowych: 0%, 25%, 49%, 74%, 91% oraz 100%.

LP	MOC elektryczna	Obciążenie	Sprawność elektryczna	Sprawność cieplownicza (obiegi HT i LT razem)
	kWe	%		
1	0	0%	0,00%	52,87%
2	49,5	25%	25,62%	31,54%
3	98,8	49%	31,03%	25,59%
4	147,9	74%	34,29%	23,13%
5	181,8	91%	34,39%	22,40%
6	200,7	100%	36,41%	25,90%



Wykres 4. Badanie sprawności elektrycznej agregatu z utrzymaniem emisji NO_x w granicy 500mg/m³ podczas zasilania silnika gazem ziemnym

4.2.1.2 Badanie agregatu z zasilanego mieszaniną CH₄ i CO₂ wraz z poszukiwaniem minimalnej wartości opałowej.

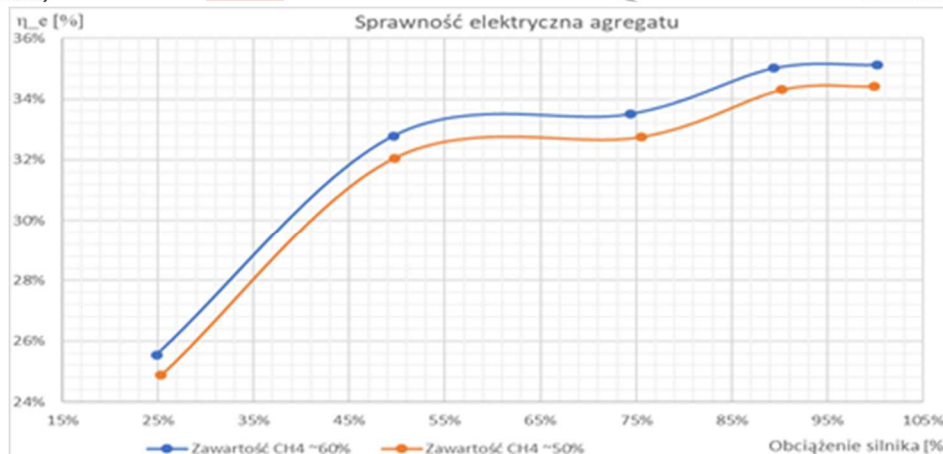
Dla mieszaniny gazu ziemnego z CO₂ przeprowadzono badania mające na celu wyznaczenie minimalnego stężenia metanu w paliwie pozwalającego na stabilną pracę agregatu. Dla mocy ~100kW osiągnięto 40,14% zawartości CH₄, a dla ~200kW osiągnięto ~45% zawartości CH₄ w mieszaninie z CO₂.

Następnie wykonano pełną charakterystykę dla gazu będącego mieszaniną 60% CH₄ i 40% CO₂, stosując kryterium utrzymania emisji NO_x w granicy 500mg/m³ (przy 5% O₂). Pomiary sprawności elektrycznej i cieplowniczej dokonano dla obciążeń: 0%, 25%, 50%, 74%, 89% oraz 100%.

Nadprogramowo, dla weryfikacji trendu, wykonano również analogiczną charakterystykę dla gazu będącego mieszaniną 50% CH₄ i 50% CO₂.

Zawartość CH ₄ 50%				
LP	MOC elektryczna	Obciążenie	Sprawność elektryczna	Sprawność cieplna (obiegi HT i LT razem)
	kWe			
1	0	0,0%	0,00%	0,00%
2	50,7	25,4%	24,88%	30,57%
3	99,4	49,7%	32,06%	27,16%
4	151	75,5%	32,75%	24,30%
5	180,5	90,3%	34,30%	23,62%
6	199,8	99,9%	34,41%	25,64%

Zawartość CH ₄ 60%				
LP	MOC elektryczna	Obciążenie	Sprawność elektryczna	Sprawność cieplna (obiegi HT i LT razem)
	kWe			
1	0	0,0%	0,00%	0,00%
2	49,7	24,9%	25,54%	31,30%
3	99,2	49,6%	32,78%	27,64%
4	148,7	74,4%	33,50%	24,08%
5	178,8	89,4%	35,01%	23,47%
6	200,4	100,2%	35,12%	25,00%



Wykres 5. Badanie sprawności elektrycznej agregatu z utrzymaniem emisji NOx w granicy 500mg/m³ podczas zasilania silnika gazem CH₄ + CO₂.

4.2.1.3 Badanie agregatu z paliwem będącym mieszaniną CH₄ i N₂ wraz z poszukiwaniem minimalnej wartości opałowej

Dla mieszaniny gazu ziemnego z N₂ przeprowadzono badania mające na celu wyznaczenie minimalnego stężenia metanu w paliwie pozwalającego na stabilną pracę agregatu. Dla mocy ~100kW osiągnięto 23% zawartości CH₄ w mieszaninie z N₂.

Wykonano pomiary sprawności dla gazu ~30% CH₄, ~70% N₂ z zachowaniem kryterium utrzymania NO_x w granicy 500mg/m³ (przy 5% O₂).

LP	MOC elektryczna	Obciążenie	%CO ₂	%CH ₄	Sprawność elektryczna
	kWe	%			
1	130,5	65%	69,10%	30,90%	32,03%
2	149	75%	68,28%	31,72%	32,99%

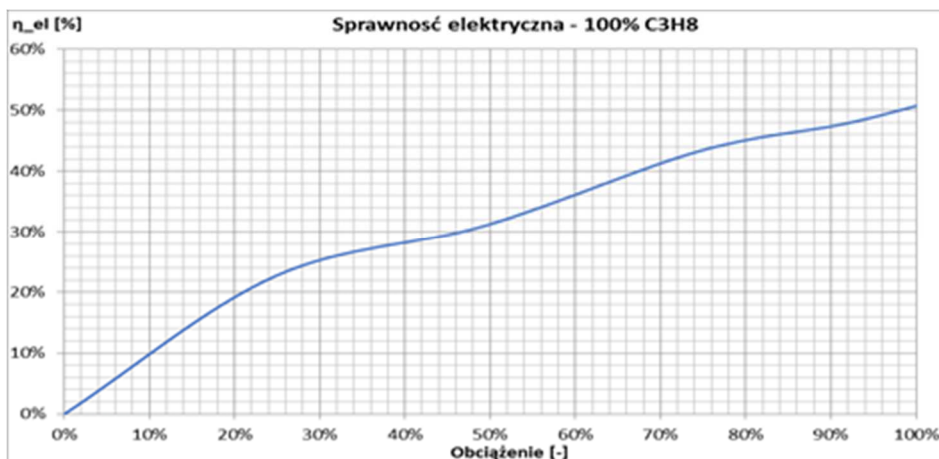
4.2.1.4 Badanie odpowiedzi agregatu na szybkie zmiany składu gazu będącego mieszaniną CH₄ i N₂.

Wykonano badanie szybkich zmian zawartości metanu w gazie ziemnym zaazotowanym z obciążeniem ~50%. Badano zakresy zmiany zawartości metanu 92% → 33,7% i 33,7% → 92%, co odpowiada zmianom wartości opałowej gazu pomiędzy 12 MJ/m³ i 33 MJ/m³. Najkrótszy czas zmniejszania kaloryczności gazu, jaki był akceptowalny przez silnik, to ~80s. Odpowiednio, dla zwiększania kaloryczności gazu uzyskano najkrótszy czas na poziomie ~55s.

4.2.1.5 Badanie agregatu zasilanego propanem

Przeprowadzono badania z wykorzystaniem propanu technicznego jako paliwa zasilającego silnik agregatu prądotwórczego. Podczas badania utrzymywano emisję NO_x na poziomie 500 mg/m³ (przy 5% O₂). Wykonano charakterystyki sprawności elektrycznej oraz cieplowniczej agregatu dla następujących obciążeń: 0%, 25%, 49%, 74%, 91% oraz 101%. Mimo zasilania gazem o niskiej liczbie metanowej, nawet dla obciążenia 100% wartości znamionowej, nie wystąpiło spalanie stukowe.

LP	MOC elektryczna	Obciążenie	Sprawność elektryczna	Sprawność cieplna (obieg HT i LT razem)
	kWe	%		
1	0	0%	0,00%	81,52%
2	49,45	25%	22,66%	27,96%
3	98,85	49%	31,09%	24,55%
4	148,8	74%	43,25%	29,21%
5	182,7	91%	47,70%	30,98%
6	201,2	101%	50,91%	30,20%

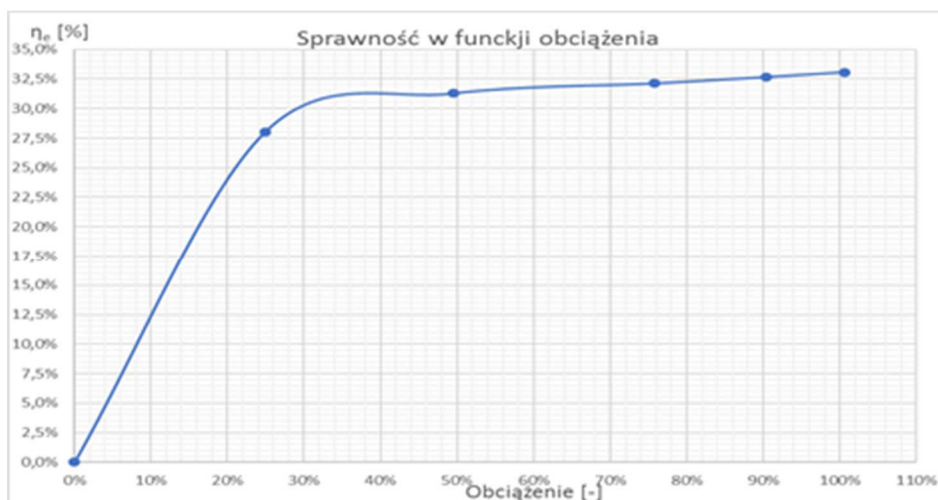


Wykres 6. Badanie sprawności elektrycznej agregatu dla propanu technicznego z emisją NO_x na poziomie 500mg/m³.

4.2.2 Obniżony stopień sprężania ($\epsilon = 8,7$).

4.2.2.1 Badanie agregatu zasilanego gazem ziemnym z emisją NO_x na poziomie 500mg/m³.

LP	Moc elektryczna	Obciążenie	Sprawność elektryczna	Sprawność cieplna (obiegi HT i LT razem)
	kWe	%		
1	0	0%	0,00%	47,91%
2	49,8	25%	28,02%	33,47%
3	99,15	50%	31,28%	24,77%
4	151,6	76%	32,13%	22,72%
5	180,7	90%	32,67%	21,91%
6	201,3	101%	33,07%	22,17%



Wykres 8. Badanie referencyjne sprawności elektrycznej agregatu dla gazu ziemnego z utrzymaniem emisji NO_x w granicy 500mg/m³

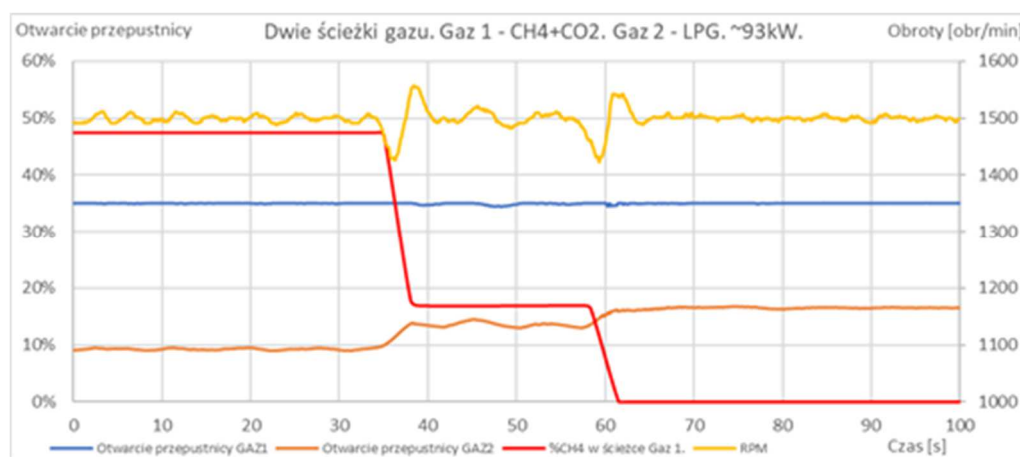
4.3. Dodatkowe badanie działania układu zasilania

4.3.2 Badanie pracy agregatu dla zasilania dwoma różnymi gazami jednocześnie w tym także dla sytuacji zmienności jednego z gazów

Wykonano badania zasilania silnika agregatu dwoma różnymi gazami jednocześnie. W czasie prób wykonano testy dla sytuacji, w której następuje zmienność jednego z gazów.

Parametrem sprawdzanym była stabilność częstotliwości w chwili, w której miała miejsce zmiana składu gazu w jednej ze ścieżek (efektywność przejścia funkcji dostarczania paliwa przez drugą ścieżkę).

Testy wykazały pełną zdolność do zasilania silnika dwoma gazami równocześnie. Jedna ze ścieżek pełniła rolę ścieżki głównej, druga zaś rolę ścieżki wspomagającej. W ścieżce głównej podawano gaz o różnych składach. Wykazano możliwość całkowitego przejścia zasilania przez ścieżkę uzupełniającą. Na wykresie 12 widać zmienność składu gazu głównego. Próbę robiono dla stopnia sprężania $\epsilon=8,7$ – bazując na wcześniejszych próbach, określono granicę zapalności jako ok. 41% zawartości metanu w mieszaninie z CO₂. Mimo to, w czasie zmniejszania zawartości metanu w gazie wysokometanowym, widać nadążające otwarcie przepustnicy ścieżki pomocniczej. Jako gaz pomocniczy celowo stosowano LPG, jako gaz o stosunkowo największej i najprostszej dostępności w dowolnym miejscu (w Polsce i Europie). Przebieg zmienności prędkości obrotowej mieści się w klasie G2 wg normy ISO-8528. Należy także odnotować, że układ MUZG wykazał odpowiednią odpowiedź na zadaną bardzo szybką zmianą składu gazu głównego. Zmiana o 30% nastąpiła w ciągu 3 s.



Wykres 12. Zmiana prędkości obrotowej oraz samoregulacja dawki gazu pomocniczego (GAZ2) przy znacznych zmianach właściwości gazu głównego (GAZ1)

4.3.3. Badanie pracy agregatu dla zasilania nietypowym gazem jakim jest tlenek węgla

Wykonano badania zasilania silnika agregatu tlenkiem węgla, czyli gazem innym niż węglowodorowy. Parametrem sprawdzanym była stabilność pracy oraz moc maksymalna a także zużycie paliwa celem określenia uzyskiwanych sprawności agregatu

Układ MUZG w pełni potwierdził swoje zdolności do akceptowania nietypowych gazów jako paliwo. Uzyskano moc maksymalną wynoszącą nieco ponad 100 kWe (101,5 kWe). Uzyskane sprawności elektryczne były o ok. 5 pkt procentowych niższe niż dla gazu wysokometanowego.

5. WNIOSKI

1. Energia spalin otrzymywana podczas zasilania silnika paliwami niskokalorycznymi stosowanymi w prowadzonych badaniach, jest wystarczająca do uzyskania odpowiedniego ciśnienia doładowania silnika. Dotyczy to standardowej turbosprężarki badanego silnika.

2. Zasadne jest zmniejszenie stopnia sprężania silnika podczas zasilania paliwami gazowymi o małej odporności na spalania stukowe. Wartość stosowanego stopnia sprężania powinna być dobierana indywidualnie do cech fizyko-chemicznych stosowanego paliwa.
3. Skuteczne działanie funkcji zasilania silnika dwoma różnymi gazami, w tym jeden jako gaz główny a drugi jako uzupełniający, umożliwia zasilanie agregatu gazami o dowolnie niskiej kaloryczności.
4. Potwierdzono określone w projekcie możliwości silnika agregatu do akceptacji zmiennych parametrów gazu zasilającego takich jak ciśnienie i kaloryczność. Potwierdzono możliwość wykorzystania do zasilania silnika gazów nietypowych poprzez wykorzystanie gazu niebędącego gazem węglowodorowym.