

prof. dr hab. inż. Marek Brzeżański, Politechnika Krakowska

# Koncepcje wykorzystania odpadowych gazów poprodukcyjnych do celów energetycznych

W artykule przedstawiono rezultaty prac koncepcyjnych silników spalinowych przystosowanych do zasilania różnego typu paliwami gazowymi, w tym palnymi gazami poprodukcyjnymi, będącymi odpadami energetycznymi. Zaprezentowano także wstępne wyniki badań eksploatacyjnych agregatów prądotwórczych zasilanych różnego typu paliwami gazowymi, przeprowadzonych wspólnie z firmą HORUS-Energia.

Racjonalizacja wykorzystania energii wymaga na każdym etapie procesów produkcyjnych oraz czynności eksploatacyjnych ponoszenia najmniejszych strat. Dotyczy to także procesów produkcyjnych, w których znajdują zastosowanie różnego typu gazy, w tym również takie, które stanowią nośniki energii. Tego typu gazy stosuje się na dużą skalę m.in. w procesach technologicznych prowadzonych w przemyśle chemicznym, gdzie znacząca ich część, po wykorzystaniu w różnego typu procesach chemicznych, stanowi odpad poprodukcyjny. W wielu wypadkach stwarza to problemy natury środowiskowej, ponieważ odpadowe gazy mają często bardzo zróżnicowany i zmienny w czasie skład chemiczny. Te cechy nie pozwalają na ich dalszą przeróbkę lub wykorzystanie w standardowych systemach spalania urządzeń grzewczych. Tylko w nielicznych przypadkach możliwe jest ich wykorzystanie w niektórych systemach energetycznych, poprzez mieszanie i współspalanie tych gazowych odpadów np. z gazem ziemnym. Z tych powodów odpadowe gazy poprodukcyjne podlegają zwykle utyli-

zacji poprzez ich wypalanie na pochodniach, co wiąże się nie tylko ze stratami energii, ale często również z opłatami na rzecz ochrony środowiska za emisję ciepła i spalin.

Zespół naukowców z Instytutu Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej opracował innowacyjne koncepcje umożliwiające wykorzystanie różnego typu gazów poprodukcyjnych o zmiennym składzie chemicznym, jako paliwa do stacjonarnych, tłokowych silników spalinowych, służących głównie do napędu generatorów prądu.

W konwencjonalnych systemach zasilania silników tłokowych paliwem gazowym, nagła zmiana składu chemicznego paliwa, czemu towarzyszy zwykle również zmiana wartości opałowej doprowadzanej mieszanki, oznacza utratę kontroli nad systemem stabilizacji prędkości obrotowej i powoduje włączenie procedury zatrzymania pracy silnika. Są to główne przyczyny, z powodu których producenci silników przemysłowych, zasilanych paliwem gazowym, nie przewidują możliwości stosowania

paliw, których skład chemiczny ulega znaczącej zmianie w krótkim przedziale czasu. Problem stanowi także stosowanie paliw o małej wartości opałowej, w stosunku do konwencjonalnych paliw gazowych, takich jak np. gaz ziemny, ponieważ uzyskanie zamierzonych parametrów roboczych silnika wymaga zwykle stosowania jednostek o dużej objętości skokowej i większej liczbie cylindrów. Wynika z tego większy koszt inwestycji oraz mniejsza sprawność ogólna systemu energetycznego, ze względu na większy udział mocy strat mechanicznych silnika, w stosunku do jego mocy efektywnej. Innymi problemami, warunkującymi możliwość zasilania silnika gazami poprodukcyjnymi są m.in. parametry termodynamiczne paliwa, takie jak: ciśnienie, temperatura, wilgotność, a także zawartość składników agresywnych chemicznie oraz odporność na spalanie stukowe. Dotyczy to szczególnie gazów pochodzących z niektórych procesów technologicznych, w których występują dość duże zmiany ciśnienia i temperatury reagentów, co ma istotny wpływ na stan termodynamiczny odpa-



Rys. 1. Obiekty wzniesione na terenie Zakładów Azotowych ZAK Kędzierzyn-Koźle na potrzeby instalacji pilotażowej wykorzystującej gazy poprodukcyjne dla potrzeb energetycznych

dów gazowych, z których część może np. ulec wykraplaniu.

Wszystkie wymienione cechy, charakteryzujące gazy poprodukcyjne, stanowią istotną barierę do ich stosowania jako paliwa do tłokowych silników spalinowych. Wielu uznanych producentów silników zasilanych paliwami gazowymi wyklucza możliwość ich eksploatacji na tego typu paliwach, a stawiane wymagania zwykle na pierwszym miejscu stawiają warunek niezmienności parametrów składu chemicznego i stanu termodynamicznego zasilającego paliwa.

Z tego względu opracowane w Politechnice Krakowskiej koncepcje systemów zasilania odpadowymi paliwami poprodukcyjnymi, które zostały sprawdzone w badaniach laboratoryjnych i zastosowaniach przemysłowych, można uznać za nowatorskie.

### ■ Charakterystyka systemów zasilania silników spalinowych gazami poprodukcyjnymi

Standardowym paliwem gazowym, stosowanym do zasilania tłokowych silników spalinowych jest zwykle gaz ziemny. Wiele firm oferuje na rynku tego typu silniki przemysłowe oraz trakcyjne. Opracowane w Politechnice Krakowskiej koncepcje nowoczesnych systemów za-

silania silników paliwami poprodukcyjnymi otwierają nowy obszar wykorzystania tych paliw do celów energetycznych. Uwzględniają one wszystkie wymienione cechy tych paliw, w tym głównie zmienność ich parametrów, a szczególnie: składu chemicznego w krótkich przedziałach czasu, stanu termodynamicznego oraz odporności na spalanie stukowe.

Pierwszy z systemów powstał w ramach projektu badawczego dla firmy SKOTAN SA, zrealizowanego i wdrożonego w Zakładach Azotowych ZAK Kędzierzyn-Koźle.

System został opracowany dla przemysłowych gazów poprodukcyjnych z instalacji chemicznych, które są dostępne

pod ciśnieniem większym niż 3 bary. Dla tego typu przypadków opracowano wtryskowy system zasilania paliwem gazowym. Składa się na to nowatorski system sterowania układem zasilania i układem zapłonowym, który uwzględnia zarówno rodzaj paliwa, jak i zmienność jego podstawowych parametrów. Powyższy system został stworzony i poddany badaniom laboratoryjnym w Politechnice Krakowskiej, a następnie został zweryfikowany w badaniach przemysłowych, prowadzonych w pilotażowej instalacji energetycznej, zlokalizowanej w Zakładach Azotowych ZAK Kędzierzyn-Koźle.

Badania przemysłowe, prowadzone podczas zasilania silników poprodukcyjnymi gazami odpadowymi z procesów chemicznych, zawierających duży udział wodoru, zostały rozpoczęte w marcu 2014 r., i w trybie ciągłym są nadal prowadzone. Opracowany system został opatentowany pod nazwą: „Sposób sterowania parametrami regulacyjnymi w silniku spalinowym o zapłonie iskrowym”, Patent: PL 222462 B1 - WUP 07/16, z dnia 29.07.2016.

Drugi z systemów, znajdujący się jeszcze w fazie badań laboratoryjnych, został opracowany dla firmy HORUS-Energia, specjalizującej się w produkcji agregatów prądotwórczych. Ten system przeznaczony jest do zasilania tłokowych silników spalinowych paliwami gazowymi, które dostępne są pod ciśnieniem zbliżo-



Rys. 2. Agregat prądotwórczy z silnikiem przystosowanym do zasilania paliwami gazowymi na stanowisku laboratoryjnym firmy Horus Energia

nym do ciśnienia otoczenia. Do tej grupy zaliczają się liczne gazy palne pochodzące z procesów przemysłowych lub procesów biologicznego rozkładu substancji organicznych. Wśród nich można wymienić np.: biogaz, gazy fermentacyjne, tlenek węgla, gazy kopalniane, hutniczy gaz wielopieczowy, czy też gaz koksowniczy. Opracowany system może być przystosowany do zasilania jednym z paliw lub też mieszaniną gazów, komponowaną w dowolnych proporcjach.

Sprawność ogólna silników wyposażonych w opracowane systemy sterowania w dużym stopniu zależy od wartości opałowej stosowanego paliwa oraz jego odporności na spalanie stukowe. Wynika to m.in. z udziału strat mechanicznych w silniku, w stosunku do rozwijanych parametrów roboczych na danym rodzaju paliwa.

Oba systemy zostały dostosowane do silników współpracujących z generatorami prądu elektrycznego, gdzie niezwykle ważnymi parametrami jest zachowanie stałej prędkości obrotowej oraz odpowiednio szybka reakcja systemu na zmianę obciążenia. Parametry te są ujęte w odpowiednich normach branżowych, a ich spełnienie jest warunkiem dopuszczenia agregatów prądotwórczych

do eksploatacji. Opracowane systemy sterowania spełniają powyższe wymagania, także w przypadku wystąpienia istotnych zmian parametrów doprowadzanego paliwa, m.in. takich jak: skład chemiczny, wartość opałowa, czy też odporność na spalanie stukowe. W tym zakresie opracowane systemy stanowią nowatorskie rozwiązania, które dotychczas nie były stosowane w produktach renomowanych firm produkujących agregaty prądotwórcze.

### ■ Ogólne założenia koncepcji wtryskowego układu zasilania silników gazami poprodukcyjnymi

Pierwszym, zrealizowanym zadaniem związanym z zasilaniem silników spaliniowych gazami poprodukcyjnymi o zmieniających się parametrach, było opracowanie systemu, pozwalającego na wykorzystanie różnego typu gazowych substancji palnych, będących produktami odpadowymi z procesów chemicznych realizowanych w instalacji butanoli, izooktanolu i aldehydów w Zakładach Azotowych ZAK Kędzierzyn-Koźle. Zgodnie z fabryczną specyfikacją głównym skład-

nikiem palnym w oferowanych gazach był wodór przemysłowy, którego udział objętościowy wynosił średnio od 60 do 90%, następnie lotne węglowodory, tlenek węgla i metan, a całość dostępna była w formie mieszaniny z innymi składnikami. W praktyce skład chemiczny oferowanych gazów podlegał szybkim i znaczącym zmianom, a udział objętościowy wodoru niejednokrotnie przekraczał 90%.

Celem badań naukowych było opracowanie systemu zasilania i sterowania silnika z wykorzystaniem tego typu paliw i dopasowanie go do wymagań, wynikających z przepisów dopuszczających agregaty prądotwórcze do eksploatacji i zapewnienia im najkorzystniejszych warunków pracy. Z tego powodu konieczne stało się rozpoznanie nowych problemów związanych ze współpracą silnika z generatorem prądu, a także osiągnięcie w badaniach możliwie korzystnych wskaźników roboczych i ekologicznych silnika. Badania dotyczyły określenia najkorzystniejszych parametrów energetycznych i emisji toksycznych składników spalin, dla silnika pracującego ze stałą prędkością obrotową wynoszącą 1500 1/min i zmienianym obciążeniem. Tego typu warunki odpowiadają pracy silnika spaliniowego w agregacie prądotwórczym.

Spośród parametrów regulacyjnych badanego silnika, które musiały zostać dopasowywane do rodzaju badanego paliwa należały przede wszystkim: kąt wyprzedzenia zapłonu i współczynnik nadmiaru powietrza. Oba te parametry mają bardzo istotny wpływ na przebieg procesu spalania w cylindrze silnika, z czego wynika następnie zarówno wartość uzyskiwanych parametrów energetycznych jak i emisji toksycznych składników spalin. Ponadto oddziałują intensywnie na wartość temperatury spalin - wprost poprzez temperaturę spalania oraz pośrednio, ze względu na przebieg procesu spalania. Istotnym jest tu miejsce i czas wydzielania ciepła ze spalnego paliwa. W przypadku prowadzonych badań ma to kluczowe znaczenie ze względu na postawione przez producenta silnika kryterium mak-



Rys. 3. Silnik MAN E2876 LE302 na stanowisku laboratoryjnym Politechniki Krakowskiej

symalnej temperatury spalin. W przypadku badanego silnika temperatura spalin nie może przekroczyć wartości 700°C ze względu na wytrzymałość termiczną turbosprężarki (turbiny), co jest istotne przy ustalaniu maksymalnej mocy silnika zasilanego danym typem paliwa. Dodatkowo, zarówno wartość współczynnika nadmiaru powietrza, jak i szczególnie wartość kąta wyprzedzenia zapłonu mają ścisły związek z pojawiającym się zjawiskiem spalania stukowego. Z tego powodu dla badanego paliwa i dla każdego punktu pracy silnika (obciążenia), oba te parametry regulacyjne ustawiane były indywidualnie.

W prowadzonych analizach przyjęto trzy kryteria doboru wymienionych parametrów regulacyjnych silnika, dla których dobierano wartość obciążenia silnika przy zasilaniu określonym paliwem.

- max. temperatura spalin silnika nie może przekroczyć 700°C;
- nie może występować anomalia spalania w postaci spalania stukowego;
- nie może zachodzić zjawisko cofania się płomienia do kolektora dolotowego.

W trakcie badań laboratoryjnych badano i rejestrowano wartość stężenia: tlenku węgla CO, węglowodorów THC, tlenku azotu NO i dwutlenku węgla CO<sub>2</sub> i tlenu O<sub>2</sub>. Ponadto badano i rejestrowano wpływ badanego paliwa na pozostałe parametry silnika takie jak: moment obrotowy i moc, zużycie paliwa, sprawność ogólna obiegu, współczynnik nadmiaru powietrza i temperatura spalin.

### ■ Obiekt badań

Jako obiekt badań laboratoryjnych wybrano 6-cylindrowy, doładowany silnik typu MAN E2876 LE302 o objętości skokowej  $V_s = 12,82 \text{ dm}^3$ , którego dostawcą była firma HORUS-Energia, fabrycznie przystosowany do zasilania gazem ziemnym. W konfiguracji fabrycznej zasilany jest mieszalnikowo gazem ziemnym, rozwija moc efektywną 200 kW i przeznaczony do napędu generatora prądu. Badania laboratoryjne silnika zasilanego wodorem przeprowadzono



Rys. 4. Agregat prądowłórczy w trakcie uzbrajania w elementy elektronicznie sterowanego systemu zasilania poprodukcyjnymi paliwami gazowymi przed budynkiem Laboratorium Silników Politechniki Krakowskiej



Rys. 5. Układ zapłonowy i układ zasilania gazami poprodukcyjnymi silnika 6-cylindrowego

na specjalnym stanowisku badawczym w Laboratorium Zakładu Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej.

Wybór tej jednostki wynikał głównie z faktu oferowania przez firmę MAN silnika 12-cylindrowego o takich samych wymiarach geometrycznych cylindra.

Ponieważ założenia programu badań przewidywały opracowanie koncepcji systemu przetwarzania energii w pojedynczym cylindrze, z możliwością jego powielania, modułowa budowa silnika 6 i 12-cylindrowego spełniała postawiony warunek. Dostawcą wszystkich silni-

ków, maszyn elektrycznych oraz obudów była firma HORUS-Energia, natomiast wszystkie elementy opracowanej koncepcji systemu wtrysku gazów poprodukcyjnych, jak również sam system elektronicznego sterowania wykonano w Politechnice Krakowskiej. Tu również dokonano uzbrojenia agregatów prądotwórczych, dostarczonych przez firmę Horus-Energia, we wszystkie opracowane i wykonane elementy systemu zasilania i sterowania. Po wykonaniu tych czynności agregaty zostały przewiezione do specjalnie wybudowanego obiektu na terenie Zakładów Azotowych ZAK w Kędzierzynie-Koźlu. Na rys. 4 przedstawiono agregaty w obudowach w trakcie uzbrajania w elementy systemu przed budynkiem Laboratorium Silników Politechniki Krakowskiej.

### ■ System sterowania wtryskowego układu zasilania gazami poprodukcyjnymi

Praktyczna realizacja postawionych zadań wymagała skonstruowania i zbudowania specjalnej instalacji paliwowej o modułowej konfiguracji, zbliżonej do systemu zasilania typu Common Rail. System zasilania paliwem gazowym składa się z szyny paliwowej podzielonej na segmenty odpowiadające liczbie cylindrów. Każdy z segmentów wyposażony został w dwa elektromagnetycznie sterowane wtryskiwacze, co ułatwia precyzyjne sterowanie dawką paliwa w zależności od obciążenia silnika. Wykorzystano standardowe, dostępne w handlu wtryskiwacze gazu ziemnego, stosowane w samochodowych instalacjach zasilania. Dla celów projektu dokonano ich modyfikacji, polegającej na zwiększeniu wydatku paliwa gazowego oraz wykonano odpowiednią ich kalibrację. Każdy z wtryskiwaczy był indywidualnie sterowany sygnałem z systemu sterowania, dzięki czemu powstała możliwość indywidualnej regulacji współczynnika nadmiaru powietrza w każdym z cylindrów. Istotnie zmodyfikowano układ zapłonowy,



Rys. 6. Układ zasilania gazami poprodukcyjnymi silnika 12-cylindrowego

wprowadzając możliwość indywidualnej regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu w każdym z cylindrów silnika. Wartość kąta wyprzedzenia zapłonu była zależna od sygnałów pochodzących z czujników spalania stukowego, w które również wyposażono każdy z cylindrów.

Oryginalne świece zapłonowe, zalecane przez firmę MAN podczas zasilania gazem ziemnym, podczas zasilania badanymi paliwami zastąpiono świecami, w których kanał iskrowy był bardziej wysunięty z głąb komory spalania. Zmiana ta została przeprowadzona na podstawie badań doświadczalnych i przyniosła istotną poprawę inicjacji zapłonu badanych mieszanek paliw. Zmiana ta miała szczególnie istotne znaczenie podczas zasilania silnika mieszaną bardzo ubogą.

W Politechnice Krakowskiej zaprojektowano i wykonano specjalny sterownik do sterowania najważniejszymi parametrami regulacyjnymi silnika, takimi jak: wartością dawki paliwa gazowego, wartością kąta wyprzedzeniem zapłonu, stopniem otwarcia przepustnicy oraz wartością współczynnika nadmiaru powietrza. Jest to programowalny sterownik silnika, opracowany w środowisku LabView. Modułowy charakter systemu zasilania i zapłonowego umożliwiał nadzorowanie przebiegu procesu spalania w każdym z cylindrów. Było to realizowane na podstawie pomiaru temperatury spalin, mierzonej indywi-

dualnie przez termopary, umieszczone w kanale wylotowym każdego z cylindrów, bezpośrednio przy wylocie spalin z głowicy. Mierzona indywidualnie temperatura spalin jednoznacznie określała ilość ciepła wydzielana w każdym z cylindrów, a ponadto stanowiła narzędzie diagnostyczne, informujące o zaburzeniach w przebiegu procesu spalania, takich, jak np. spalanie przewlekłe spowodowane zbyt ubogą mieszaną lub wypadanie zapłonów. Ponadto sterownik, w trybie adaptacyjnym, stale współpracował z czujnikami spalania stukowego, dzięki czemu jednoznacznie wyznaczał granicę stuku dla każdego z cylindrów, we wszystkich analizowanych warunkach pracy silnika. Tego typu nadzór i regulacja pozwoliła na osiągnięcie dużej sprawności przetwarzania energii w każdym z cylindrów silnika. Do opracowanego systemu sterowania zbudowano odpowiedni panel sterowania, którego widok zewnętrzny obrazuje rys. 7.

### ■ Przemysłowe badania eksploatacyjne

Na podstawie opracowanej koncepcji wtryskowego zasilania silników poprodukcyjnymi paliwami gazowymi, w Politechnice Krakowskiej sporządzono projekt, wykonano elementy składowe systemu oraz wyposażono w nie trzy silniki: jeden, 6-cylindrowy o nomi-

nalnej mocy 200 kW oraz dwa silniki 12-cylindrowe o nominalnej mocy 400 kW. Łączna moc nominalna trzech silników przygotowanych do badań eksploatacyjnych wynosiła 1 MW, przy założeniu zasilania gazem ziemnym, natomiast podczas zasilania gazami o innym składzie chemicznym osiągnięta moc była odpowiednio mniejsza. Silniki, po wyposażeniu w opracowany układ zasilania paliwami poprodukcyjnymi, zostały połączone z generatorami prądu i umieszczone w zabudowie przygotowanej przez firmę HORUS-Energia. W takiej formie agregaty, oznaczone symbolami AK-1, AK-2 i AK-3, wdrożono do eksploatacji w lutym 2014 r. w obiekcie znajdującym się na terenie Zakładów Azotowych Kędzierzyn-Koźle. Do chwili obecnej silniki pracują w trybie ciągłym, zależnym od dostaw gazowego paliwa poprodukcyjnego, wytwarzając energię elektryczną. Podczas eksploatacji przeprowadzono szereg badań, których efekty potwierdziły wstępne założenia opracowanej koncepcji. Na rys. 8 przedstawiono agregaty pracujące w specjalnie wybudowanym obiekcie na terenie Zakładów Azotowych w Kędzierzynie-Koźlu.

Pomiary wykonane podczas badań eksploatacyjnych agregatu AK-3 z silnikiem 6-cylindrowym wykazały, że w przypadku zasilania odpadowym paliwem gazowym o zawartości wodoru ok. 60%, możliwe jest uzyskanie 167 kW mocy pozornej. W odniesieniu do silnika spalinowego tego agregatu, uzyskano zatem prognozowaną moc z cylindra, wynoszącą ok. 30 kW. Odpowiadające temu obciążeniu jednostkowe zużycie paliwa wynosiło ok. 1 Nm<sup>3</sup>/kWh. Jak wykazały badania eksploatacyjne taki poziom wydajności z cylindra jest możliwy do uzyskania jedynie, w przypadku silnika spalinowego agregatu AK3. Jednak w standardowych warunkach pracy ciągłej, agregat ten ze względu na ograniczenia urządzeń peryferyjnych można było bezpiecznie eksploatować z obciążeniem wynoszącym 140 kW. W przypadku agregatów AK1 i AK2 z silnika-

mi 12-cylindrowymi w porównywalnych warunkach eksploatacji jak dla agregatu AK3, uzyskano 260 kW mocy pozornej. Podobnie jednak jak w przypadku agregatu AK3, w standardowych warunkach pracy ciągłej, agregat ten ze względu na ograniczenia urządzeń peryferyjnych, można było bezpiecznie obciążać do wartości ok. 230 kW. W tab. 1

bilans pracy agregatów podczas badań eksploatacyjnych, prowadzonych w okresie wybranych 8 miesięcy.

Dane te obejmują cały okres eksploatacji, stąd wyliczone uśrednione obciążenie poszczególnych agregatów, jest poniżej wartości znamionowej, uzyskiwanej aktualnie podczas pracy ciągłej.



Rys. 7. Widok ogólny panelu sterowania programowalnego sterownika



Rys. 8. Agregaty z elektronicznie sterowanym systemem wtrysku gazowych paliw poprodukcyjnych w obiekcie na terenie Zakładów Azotowych w Kędzierzynie-Koźlu

**Tab. 1. Bilans pracy agregatów zasilanych gazami poprodukcyjnymi w okresie 8 miesięcy badań eksploatacyjnych**

Nazwa agregatu	Czas pracy	Energia wytworzona	średnie obciążenie
AK1	3992 h	816 MWh	204 kW
AK2	3490 h	668 MWh	191 kW
AK3	3938 h	470 MWh	119 kW

Ważnym efektem zastosowania odpadowego paliwa gazowego o dużym udziale wodoru było uzyskanie praktycznie zerowej emisji toksycznych składników spalin. Pomiary kontrolne wykonane podczas pracy agregatu AK3 z silnikiem 6-cylindrowym, w zmiennym polu obciążeń, w pełni potwierdziły proekologiczną przydatność tego rodzaju paliw odpadowych. W punkcie pracy silnika, który odpowiadał w danych warunkach eksploatacyjnych, wartości maksymalnej wynoszącej 167 kW, w spalinach ujawniono jedynie 0,3% v/v CO<sub>2</sub> oraz 59 ppm NO<sub>x</sub>. Na uzyskanie takiego rezultatu złożyły się zarówno cechy chemiczne zastosowanego paliwa jak i sposób regulacji składu mieszanki i mocy silnika. Moc nominalna trzech agregatów 1 MW określona była przy zasilaniu gazem ziemnym, a więc paliwem o dużej odporności na spalanie stukowe i wartości opałowej ok. 36 MJ/Nm<sup>3</sup>. Parametry robocze osiągnięte przez silnik zależą w oczywisty sposób od właściwości paliwa, którym zasilany

jest silnik. Paliwo gazowe o udziale objętościowym wodoru ok. 94% (według analizy chromatograficznej) ma wartość opałową ok. 11 MJ/Nm<sup>3</sup>. Przy zasilaniu agregatu AK3 o mocy nominalnej 200 kW tym paliwem uzyskano moc pozorną 167 kW i moc czynną 162 kW, przy zużyciu gazu 44,6 m<sup>3</sup>/h, co daje 165,5 Nm<sup>3</sup>/h. Strumień energii w tym paliwie to 506 kW. Zatem sprawność wytwarzania energii elektrycznej wynosi 0,33.

Oczywistym efektem jest także uzyskanie niezwykle małej wartości emisji dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>, przypadającej na jednostkę wytwarzanej energii. Średnio, w okresie nadzorowanej eksploatacji agregatów uzyskano wartość wynoszącą nieco ponad 25 kg CO<sub>2</sub> na 1 MWh wytworzonej energii, co jest nieporównywalnie mniejszą wartością emisji w stosunku do wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach węglowych, gdzie wskaźnik ten może wynosić nawet do 1000 kg CO<sub>2</sub> na 1 MWh. Ten niezwykle korzystny efekt wynika z zasilania agregatów paliwem o dużym

udziale wodoru i bardzo małym udziale węgla, co było charakterystyczną cechą stosowanych poprodukcyjnych paliw.

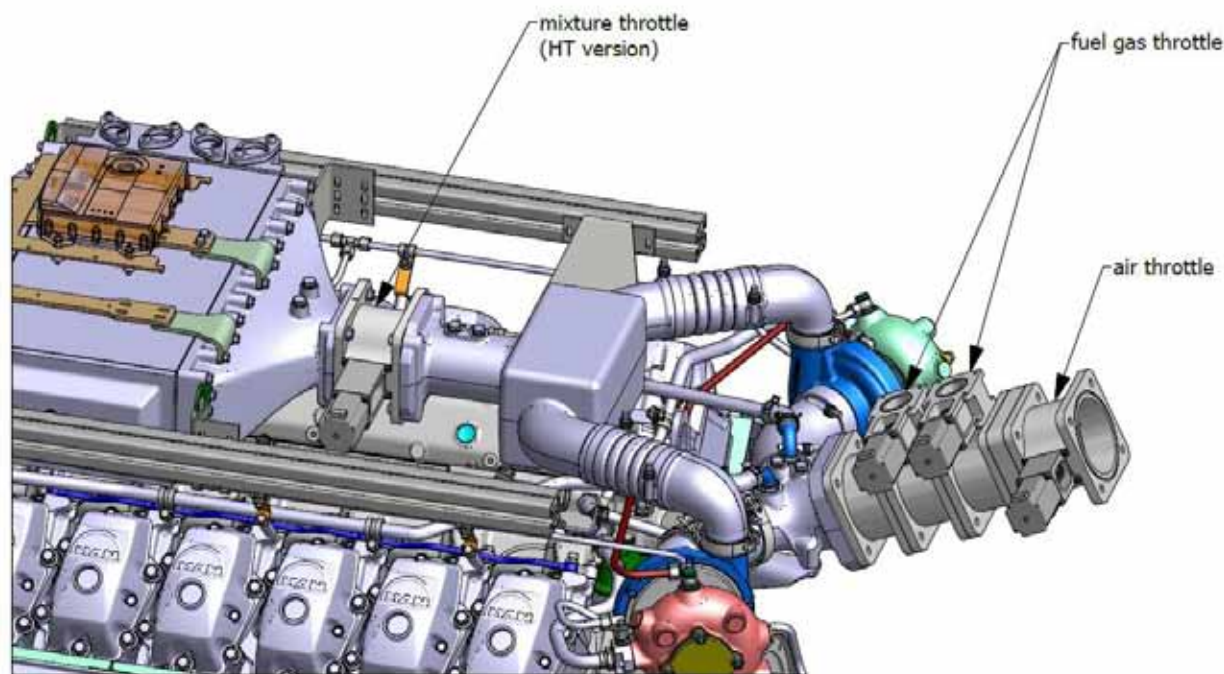
Uzyskane wskaźniki robocze silnika uznać należy za duże osiągnięcie w skali naukowej, technicznej i ekonomicznej, jeśli weźmie się pod uwagę właściwości paliwa. System ten jak dotąd pracuje poprawnie przy bardzo dużej zmienności składu paliwa i nie stwarza problemów natury eksploatacyjnej, co pozwala pozytywnie rokować dla jego dalszych przemysłowych zastosowań.

### ■ Badania eksploatacyjne podczas zasilania gazem koksowniczym

Dodatkowym elementem weryfikacji nowatorskiej koncepcji systemu zasilania silników paliwami gazowymi, w której parametry silnika dostosowują się do własności paliwa, było przeprowadzenie badań podczas zasilania gazem koksowniczym. Jest to paliwo gazowe, o ograniczonym zakresie stosowania do zasilania silników głównie ze względu na własności fizyko-chemiczne oraz stałe zanieczyszczenia. W prowadzonych badaniach na terenie Zakładów Azotowych ZAK Kędzierzyn-Koźle gaz koksowniczy był czerpany z sieci zakładowej, przy czym przed doprowadzeniem do silnika był suszony i oczyszczany w instalacji opracowanej przez firmę WT&T z Opola.

**Tab. 2. Wybrane wartości stężenia składników spalin podczas zasilania silnika gazem koksowniczym**

Lp	Moc pozorną [kW]	Moc czynną [kW]	CO [%]	CO <sub>2</sub> [%]	HC [ppm]	O <sub>2</sub> [%]	NO <sub>x</sub> [ppm]	Współczynnik nadmiaru powietrza
1.	200	196	0,02	4,4	6	9,2	139	1,70
2.	183	181	0,02	4,4	6	9,0	137	1,70
3.	162	160	0,02	4,4	7	9,1	130	1,70
4.	145	142	0,02	4,4	7	9,1	123	1,70
5.	124	122	0,02	4,4	7	9,1	138	1,70
6.	103	102	0,03	4,3	8	9,2	134	1,70



Rys. 9. Koncepcja elektronicznie sterowanego, mieszalnikowego zasilania silników paliwami gazowymi

Pomiary wykonane na agregacie AK-3 wyposażonym w silnik 6-cylindrowy. Podczas zasilania silnika gazem koksowniczym o zawartości wodoru 50-60% możliwe było uzyskanie mocy pozornej do 202 kVA, co odpowiadało projektowanej mocy z cylindra na poziomie 35 kW. Odpowiadające temu obciążeniu jednostkowe zużycia paliwa wynosiło ok.  $0,6 \text{ Nm}^3/\text{kWh}$ , co odpowiada sprawność wytwarzania energii elektrycznej wynoszącej 33%. Wykonano badania eksploatacyjne w okresie 100 godzin, przy czym podczas pracy ciągłej agregat był obciążany w ok. 50% wartości maksymalnej uzyskanej w pomiarach, co wynikało z ograniczeń systemów współpracujących z silnikiem. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i wyników wcześniejszych prac można prognozować, że w standardowych warunkach pracy ciągłej, agregat ten ze względu na ograniczenia urządzeń peryferyjnych można będzie bezpiecznie obciążać do wartości ok. 140 kW.

Istotnym efektem zastosowania gazu koksowniczego jest bardzo mała emisja toksycznych składników spalin (tab. 2).

Pomiary kontrolne wykonane podczas pracy agregatu AK3 w zmiennym

polu obciążeń w pełni potwierdziły proekologiczną przydatność tego rodzaju paliwa. W punkcie pracy silnika, który odpowiadał w danych warunkach eksploatacyjnych, wartości maksymalnej wynoszącej 200 kW, w spalinach ujawniono jedynie: 0,02% v/v CO, 4,4% v/v CO<sub>2</sub>, 6 ppm HC oraz 139 ppm NO<sub>x</sub>. Niemal identyczne wyniki zarejestrowano podczas pracy silnika w 100-godzinnym cyklu eksploatacyjnym. Na uzyskanie takiego rezultatu złożyły się zarówno cechy chemiczne zastosowanego paliwa jak i sposób regulacji składu mieszanki i mocy silnika.

Przeprowadzone badania wykazały również, że zastosowanie gazu koksowniczego jako paliwa do wytwarzania energii elektrycznej przynosi bardzo dobre rezultaty w zakresie zmniejszenia emisji dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>, przypadającej na jednostkę wytworzonej energii. W tym zakresie uzyskano wartość 677 kg CO<sub>2</sub> na 1 MWh wytworzonej energii, podczas gdy wartość tego wskaźnika dla elektrowni węglowych może wynosić nawet do 1000 kg CO<sub>2</sub> na 1 MWh.

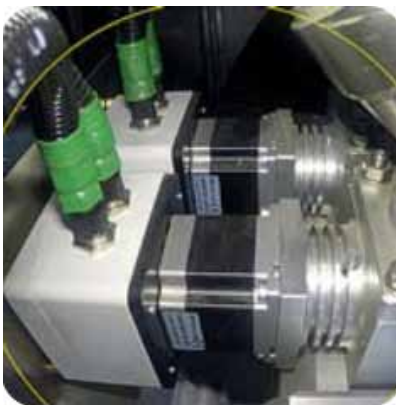
Przeprowadzone badania weryfikacyjne w pełni potwierdziły założone

cechy konstrukcyjne i eksploatacyjne opracowanej koncepcji zasilania i sterowania, zwłaszcza biorąc pod uwagę zagadnienie „paliwowej elastyczności” agregatu prądotwórczego, który z równym powodzeniem może być zasilany gazem ziemnym, gazem koksowniczym i gazem postprocesorowym. Uzyskane wskaźniki dla badanego agregatu zasilanego gazem koksowniczym uznaje się za znaczące osiągnięcie.

### ■ Koncepcja mieszalnikowego systemu zasilania gazowymi paliwami poprodukcyjnymi

W gospodarce dostępna jest duża liczba palnych gazów, dostępnych pod ciśnieniem zbliżonym do ciśnienia otoczenia. Przygotowanie tych gazów do zastosowania w opisanym wyżej wtryskowym układzie zasilania wymaga ich sprężenia do wymaganego ciśnienia ok. 3 bary, co z punktu widzenia sprawności całego systemu energetycznego nie jest optymalne i racjonalnie uzasadnione. W związku z tym w Politechnice Krakowskiej we współpracy z firmą





Rys. 10. Prototyp elektronicznie sterowanego, mieszalnikowego zasilania silników paliwami gazowymi, przeznaczony do zasilania silnika dwoma różnymi paliwami gazowymi

HORUS-Energia powstał nowatorski, elektronicznie sterowany system mieszalnikowego zasilania tłokowych silników spalinowych różnego typu paliwami gazowymi. Ten system znajduje się obecnie w fazie badań laboratoryjnych, a sama koncepcja przygotowywana jest do opatentowania.

Badania przeprowadzono na tym samym typie silnika 6-cylindrowego, który był poddany szerokim badaniom laboratoryjnym przy opracowywaniu opisanej powyżej koncepcji zasilania wtryskowego. Daje to możliwość porównania obu koncepcji systemów zasilania i sterowania istotnymi parametrami silnika.

Opracowany system elektronicznie sterowanego mieszalnika ma podobne walory użytkowe oraz dysponuje podobnym układem sterowania, jak wspomniany system zasilania wtryskowego. Ponadto dysponuje on możliwością jednoczesnego zasilania silnika paliwami o różnych cechach fizykochemicznych i pochodzącymi z różnych źródeł. Bardzo istotną jest tu możliwość dołączenia do układu zasilania kolejnego paliwa o innych własnościach, bez konieczności zatrzymania silnika. Opracowana koncepcja (rys. 9) została dostosowana do silników współpracujących z generatorami prądu elektrycznego, w których należy zachować warunek

utrzymania stałej prędkości obrotowej oraz odpowiednio szybka reakcja systemu na zmianę obciążenia. Parametry te są ujęte w odpowiednich normach branżowych, a ich spełnienie jest warunkiem dopuszczenia agregatów prądowców do eksploatacji.

W wyborze paliw do zasilania silników tłokowych problem stanowi często zbyt mała wartość opałowa paliwa, ponieważ w takich przypadkach duży udział mocy strat mechanicznych silnika, w stosunku do jego mocy efektywnej powoduje zmniejszenie możliwości do uzyskania sprawności ogólnej całego systemu energetycznego. W związku z tym podczas opracowywania koncepcji systemu przewidziano możliwość współzasilania i współspalania paliwa o bardzo różnych wartościach opałowych lub o bardzo różnej odporności na spalanie stukowe. W tym zakresie zrealizowano badanie opracowanej koncepcji w zakresie zbadania akceptowalnych, skrajnych wartości opałowych gazu zasilającego, przy których silnik agregatu prądowcowego jest w stanie poprawnie pracować.

W badaniach laboratoryjnych stosowano następujące mieszanki paliw gazowych o bardzo różnych, często skrajnych właściwościach, z punktu widzenia pracy silnika spalinowego:

- gaz ziemny z dwutlenkiem węgla;
- gaz ziemny z azotem;
- gaz ziemny z propanem;
- propan z acetylenem.

W pierwszej fazie badań laboratoryjnych określono minimalną wartość opałową gazu, która gwarantuje stabilną pracę silnika. Badania zostały przeprowadzone dla mieszanin gazu ziemnego z dwutlenkiem węgla o różnym udziale wymienionych komponentów, dzięki czemu uzyskano różne wartości opałowe paliwa. Zbadano zdolność systemu sterowania do dopasowania w trakcie pracy silnika jego parametrów regulacyjnych do zmieniającej się wartości opałowej. Na rys. 10 przedstawiono wykonany prototyp mieszalnikowego systemu zasilania silników różnymi paliwami gazowymi.

Następna faza badań dotyczyła tzw. gazów wysokokalorycznych, komponentowanych dla celów badawczych w różnych proporcjach z gazem ziemnym i propanem. Ta część badań miała na celu zbadanie ograniczeń związanych z obciążeniem cieplnym elementów konstrukcyjnych silnika, w tym głównie turbosprężarki.

Została także zbadana reakcja agregatu na zasilanie paliwami gazowymi o różnych skłonnościach do spalania stukowego. W tym etapie badań użyto mieszaniny propanu technicznego z acetylenem, tj. węglowodorem nienasyconym o bardzo dużej skłonności do spalania stukowego. W tym przypadku badania zostały przeprowadzone podczas zasilania silnika mieszanką tych gazów o różnym udziale acetyleny w celu określenia reakcji opracowanego systemu sterowania na zmianę liczby oktanowej (metanowej) stosowanego paliwa.

Głównym celem opisanych badań laboratoryjnych było określenie granicznych wartości parametrów stosowanych paliw, które zostaną zaakceptowane przez opracowany system elektronicznego sterowania, a także spełniają wszystkie warunki pozwalające na dopuszczenie paliwa do zasilania tłokowego silnika spalinowego.

Dla określenia cech dynamicznych agregatu przy zmianie obciążenia, które to badanie jest jednym z głównych parametrów oceny jakości układu zasilania w paliwo, przy zasilaniu silnika spalinowego metanem dokonano rejestracji przebiegu napięcia generatora. Podczas gwałtownego wzrostu obciążenia generatora w krótkim czasie po wystąpieniu zmiany obciążenia podstawowe parametry elektryczne agregatu wróciły do nominalnych wartości. W związku z tym można ocenić, że opracowana koncepcja spełnia wymagania stawiane tego typu agregatom prądowcowym. Wykonano wiele typu charakterystyk, sporządzonych podczas zmiany (wzrostu lub spadku) obciążenia, a także podczas zmiany takich parametrów paliwa, jak: wartość opałowa, liczba

oktanowa (metanowa) lub zmiana parametrów termodynamicznych. Wyniki tego typu pomiarów w pełni potwierdziły przydatność opracowanej koncepcji elektronicznie sterowanego systemu mieszalnikowego zasilania tłokowych silników spalinowych różnego typu paliwami gazowymi.

Opracowana koncepcja może być przeznaczona do zasilania tłokowych silników spalinowych wszystkimi rodzajami paliw gazowych, które dostępne są pod ciśnieniem zbliżonym do ciśnienia otoczenia. W praktyce do tej grupy zaliczają się liczne gazy palne pochodzące z procesów przemysłowych lub procesów biologicznego rozkładu substancji organicznych. Wśród nich można wymienić np.: biogaz, gazy fermentacyjne, tlenek węgla, gazy kopalniane, hutniczy gaz wielkopiecowy, czy też gaz koksowniczy. Istotnym walorem opracowanej koncepcji jest również możliwość zasilania silnika jednym z wymienionych paliw lub też mieszaniną gazów, komponowaną w dowolnych proporcjach.

## ■ Wnioski

Opracowane w Politechnice Krakowskiej i w firmie HORUS-Energia koncepcje nowatorskich systemów zasilania i sterowania tłokowych silników spalinowych przeznaczonych do pracy na różnego typu paliwach gazowych zostały wykonane i wdrożone do eksploatacji. Doświadczenia zdobyte podczas badań laboratoryjnych oraz weryfikacyjnych badań przemysłowych tych koncepcji pozwalają na sformułowanie następujących najistotniejszych wniosków:

1. Przeprowadzone badania laboratoryjne oraz weryfikacyjne badania przemysłowe wykazały przydatność opracowanych koncepcji systemów zasilania i sterowania tłokowych silników spalinowych przeznaczonych do pracy na różnego typu paliwach gazowych dla potrzeb energetyki.
2. Opracowane koncepcje charakteryzują się dużą elastycznością w sto-

sunku do stosowanych paliw, a jednocześnie gwarantują ich najlepsze wykorzystanie energetyczne, dzięki systemowi bieżącej analizy i optymalizacji najbardziej istotnych parametrów silnika. Zastosowane do tego nowoczesne narzędzia techniczne i programowe tworzą nową jakość w dyscyplinie związanej z konstrukcją i eksploatacją silników spalinowych.

3. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych wykazały, że jest możliwe znaczące rozszerzenie rodzajów i typów paliw gazowych, które z powodzeniem mogą być stosowane do zasilania tłokowych silników spalinowych.
4. Poprawna praca tłokowych silników na różnego typu paliwach gazowych jest efektem przyjęcia i zastosowania rozwiązań technicznych generacyjnie znacznie nowocześniejszych, niż stosowane dotąd systemy zasilania i sterowania.
5. Wiele uwagi poświęcono doborowi parametrów regulacyjnych, m.in. takich jak kąt wyprzedzenia zapłonu i współczynnik składu mieszanki, dzięki czemu uzyskano korzystne wskaźniki robocze i ekologiczne silnika podczas zasilania różnymi paliwami.
6. Wyniki badań pozwoliły na określenie strategii zasilania i sterowania parametrami silnika, wyznaczając graniczne wartości cech fizyko-chemicznych stosowanych paliw, które mogą zostać zaakceptowane z punktu widzenia prawidłowości pracy silnika i wartości parametrów ekologicznych.
7. Uzyskane efekty naukowe i poznawcze, a także pozytywne efekty przemysłowych badań weryfikacyjnych wskazują na istniejący potencjał rozwojowy i konieczność poszukiwania nowych koncepcji prac rozwojowych w dziedzinie energetyki. Tego typu prace wychodzą naprzeciw postulatom stosowania zrównoważonego rozwoju, który w sektorze energetyki doty-

czy głównie racjonalizacji zużycia energii poprzez zmniejszanie strat. W przypadku prowadzonych prac najważniejszym efektem jest energetyczne wykorzystanie różnego typu źródeł energii, w postaci gazowych paliw poprodukcyjnych, które dotychczas w dużej części były bezproduktywnie tracone. □

## Bibliografia:

1. BRZEŻAŃSKI M., MARECZEK M., PAPUGA T. *Conception of utilization of the heat from cooling system to increase of the work and ecological parameters of the combustion engine*, PTNSS Congress 2011 - SC - 113.
2. BRZEŻAŃSKI M., MARECZEK M., MAREK W., PAPUGA T. *Zastosowanie odpadowych produktów przemysłu chemicznego w energetyce*, III Konferencja Naukowo-Techniczna, Współczesne Technologie i Urządzenia Energetyczne, Kraków 2013.
3. BRZEŻAŃSKI M., MARECZEK M., MAREK W., PAPUGA T. *Określanie parametrów ekologicznych stacjonarnego silnika spalinowego zasilanego różnymi paliwami*, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Warszawa 2014.
4. BRZEŻAŃSKI M., MARECZEK M., MAREK W., PAPUGA T., *Determination of operating parameters of industrial engine fuelled with post processing gases with high hydrogen content*, IOP Conference Series, KONMOT 2016, Kraków 2016.
5. BRZEŻAŃSKI M., MARECZEK M., MAREK W., PAPUGA T., *Sposób sterowania parametrów regulacyjnych w silniku spalinowym o zapłonie iskrowym*, Opis Patentowy nr PL 222 462 B1. WUP 07/16
6. *Materiały fabryczne i reklamowe firmy HORUS-Energia*.