

Radosław Figura, Sebastian Sadowski, Paweł Religa

Poprawa sprawności energetycznej silnika spalinowego zasilanego paliwem gazowym

JEL: Q01 DOI: 10.24136/atest.2018.422

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W świetle postępującego wyczerpywania się zasobów tradycyjnych paliw płynnych prowadzone są prace nad możliwością uzupełnienia ich paliwami gazowymi. Jedną z takich propozycji jest biogaz. Biogaz może być przekształcany zarówno w energię elektryczną, jak i ciepło w silnika spalinowych. Pracy układu zasilania oraz samego silnika spalinowego towarzyszą straty energii na poziomie 60-65%. W celu poprawienia sprawności ogólnej takich układów przeprowadza się szereg prac i badań. W artykule poruszono zagadnienie strat energii kinetycznej paliwa gazowego wynikających z pracy regulatora ciśnienia paliwa. Zaproponowano zastąpienie tradycyjnego regulatora ciśnienia stacją turbinową zasilania elektrycznego. Wykazano, że układ taki umożliwi wykorzystanie energii redukcji ciśnienia gazu co wpływa korzystnie na poprawę całkowitej sprawności energetycznej silnika.

Słowa kluczowe: układ zasilania silnika spalinowego, regulator ciśnienia paliwa, sprawność, paliwa gazowe.

Wstęp

Silnik spalinowy poza elementami, które bezpośrednio przyczyniają się do przemiany energii na pracę mechaniczną zawiera szereg układów towarzyszących prawidłowej pracy całego systemu, są to m.in. układy: korbowy, zasilania, smarowania czy rozruchowy. Każdy z wymienionych układów podczas wykonywania swoich zadań generuje straty energii, co w wyniku przekłada się na sprawność ogólną silnika [2, 5]. Sprawność ogólna jest definiowana jako stopień wykorzystywania energii zawartej w pobieranym paliwie. Sprawnością ogólną można nazwać stosunek ilości ciepła użytecznego Q_e do ilości ciepła doprowadzonego Q_d .

$$\eta_e = \frac{Q_e}{Q_d} \quad (1)$$

Na sprawność ogólną składają się wszystkie straty powstałe w ciągu pracy silnika, zatem należy rozpatrywać ją jako iloczyn sprawności cieplnej η_c i mechanicznej η_m .

$$\eta_e = \eta_c * \eta_m \quad (2)$$

$$\eta_e = \frac{N_e}{G_e * W_u} \quad (3)$$

Sprawność η_e , zgodnie z równaniem jest zależna od mocy użytecznej wyrażonej w N_e wyrażonej w kW, zużycia paliwa G_e wyrażonego w kg/s lub m^3/s , a także wartości opałowej paliwa W_u wyrażonej

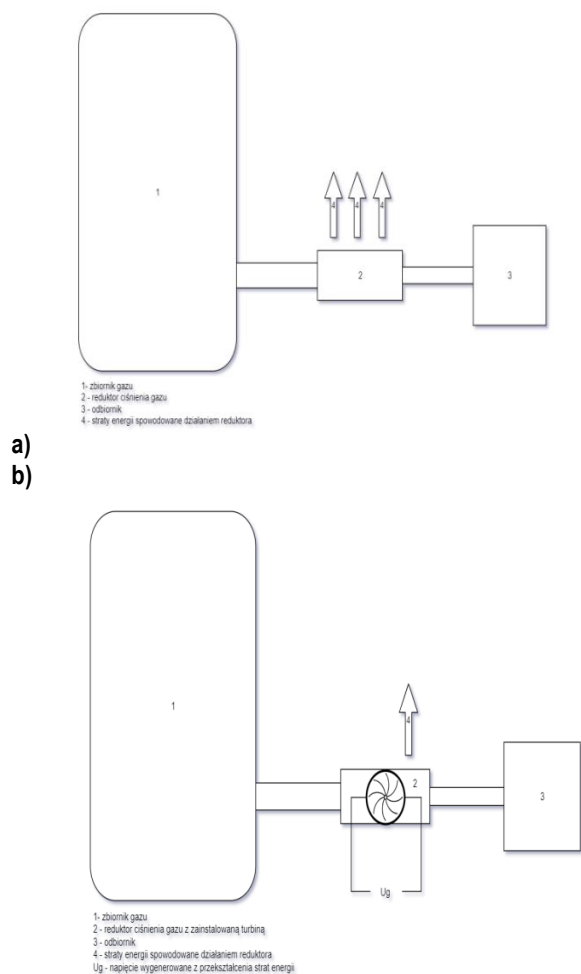
w kJ/kg lub kJ/m^3 [1, 2, 5]. W całym procesie pracy silnika zasilanego tradycyjnym paliwem, uwzględniając jego wszystkie elementy składowe (takie jak: systemy doprowadzania i kondycjonowania paliwa oraz urządzenia pomocnicze pracujące równolegle z silnikiem), sprawność ogólna sięga 35-40%. Straty sięgające nawet 65% należy rozróżnić pomiędzy stratami cieplnymi oraz stratami mechanicznymi. Do strat cieplnych zalicza się: ciepło zawarte w spalinach uchodzące na zewnątrz podczas wydechu, ciepło przenikające przez ścianki cylindra, które chłodzone jest czynnikiem chłodzącym (płyn, powietrze), ciepło rozpraszane w wyniku regulacji ciśnienia paliwa dopływającego do silnika. Do strat mechanicznych należy: tarcie pracującego układu tłokowo-korbowego, energia zużywana do napędu urządzeń pomocniczych niezbędnych do pracy silnika (pompa płynu chłodzącego, pompa oleju) [2, 5].

1 Paliwa gazowe

Paliwa gazowe znajdują bardzo szerokie zastosowanie w przemyśle, a także w codziennym życiu – wykorzystujemy je między innymi do wytwarzania energii cieplnej do ogrzewania budynków, w licznych procesach produkcyjnych oraz do napędzania aut. Paliwa gazowe przetwarzają się w energię w procesie ich spalania w silnikach spalinowych. Najczęściej stosowanymi paliwami gazowymi są: gaz skroplony (LPG) oraz gaz ziemny sprężony (CNG). Gaz skroplony jest mieszaniną propanu i butanu. Gaz ten odznacza się znaczną odpornością na spalanie stukowe, umożliwiającą stosowanie w silnikach z zapłonem iskrowym wysokich stopni sprężania. Wartość opałowa skroplonej mieszaniny propanu-butanu wynosi 46,1 MJ/kg również z gazu ziemnego. LPG znajduje bardzo szerokie zastosowanie w przemyśle, rolnictwie, chemii, gospodarstwach domowych, do napędu pojazdów samochodowych, jak i innych maszyn i urządzeń napędzanych silnikami spalinowymi. Gaz ziemny sprężony (CNG), którego głównym składnikiem jest metan, jego zawartość wynosi najczęściej od 90 do 97% (objętościowo). Wartość opałowa gazu ziemnego, w zależności od jego składu równa jest około 35,6 MJ/m³. Charakteryzuje się on również znaczną odpornością na spalanie stukowe. Zarówno skroplona mieszanina propanu i butanu, jak i gaz ziemny są paliwami pełnowartościowymi. Gaz ziemny, przed jego stosowaniem jako paliwo silnikowe nie wymaga żadnej dodatkowej obróbki technologicznej. Również silniki zasilane gazem ziemnym nie wymagają zasadniczych zmian, w porównaniu z oryginalną wersją. Do przechowywania paliw gazowych służą zbiorniki ciśnieniowe. Przed wprowadzeniem ich do silnika konieczna jest regulacja ciśnienia [9, 10].

2 Regulator ciśnienia

Regulator ciśnienia paliwa gazowego jest elementem układu zasilania, a swoje położenie znajduje za pompą paliwową oraz bezpośrednio przed listwą paliwową [2, 5].



Rys. 1 Schemat układu zasilania silnika paliwem gazowym: a) układ z regulatorem ciśnienia, b) układ z turbiną elektryczną.

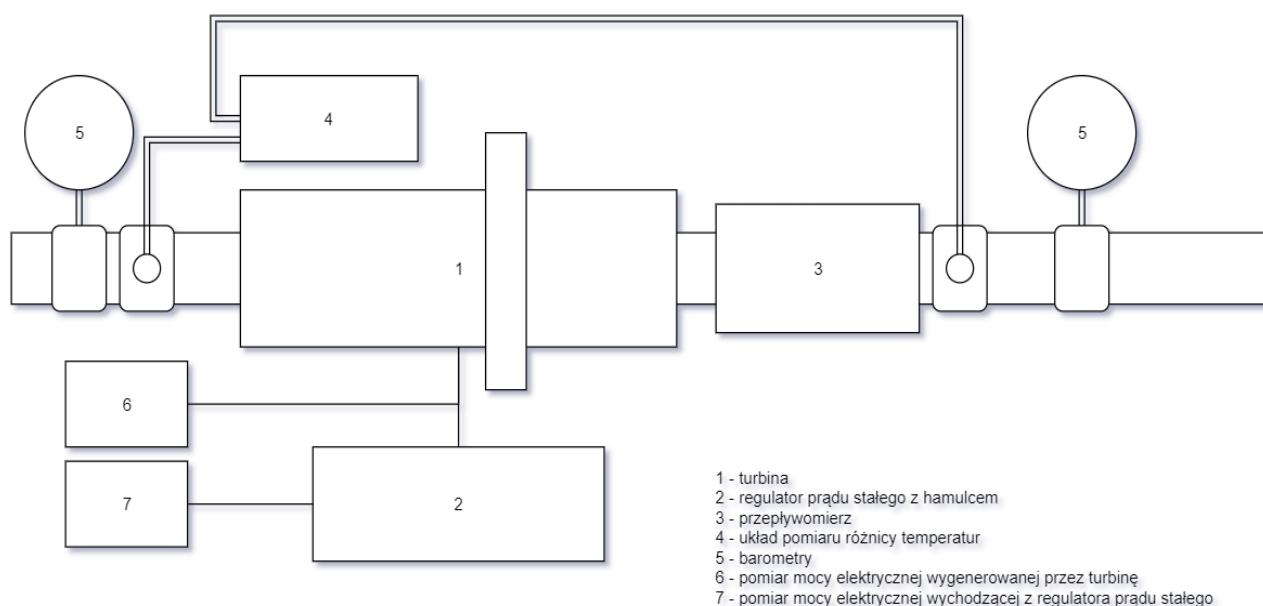
Swoim działaniem ustala ciśnienie medium energetycznego, które wytworzyła pompa w zależności od aktualnych potrzeb kolektora ssącego. Z racji na występujące tu różnice ciśnień, zauważalna jest strata energii kinetycznej przepływającego paliwa (Rys.1a).

3 Turbina jako regulator ciśnienia

W miejscu regulatora ciśnienia paliwa możliwym jest podłączenie turbiny (Rys.1b), która będzie redukować ciśnienie specjalnie ukształtowanymi łopatkami osadzonymi na tarczy sztywno połączonej z wałem. Gaz oddziałujący na łopatki spowoduje wygenerowanie siły, dzięki której na wale powstanie moment obrotowy. Dla zwiększenia efektu wzrostu momentu obrotowego turbiny można zastosować kierownice, których łopatki tworzą zwężające się kanały przyspieszające [6, 7, 8]. Odpowiednią konstrukcją kierownicy może okazać się odpowiednim rozwiązaniem dla regulatora, który będzie czynnie zmieniał ciśnienie paliwa podawanego na listwę paliwową. Z racji na różne spadki ciśnień, które będą panowały w turbinie, prędkość obrotowa wirnika będzie się zmieniać. Prędkość obrotowa turbiny, w zależności od jej konstrukcji i zastosowania może osiągać prędkości równe kilkunastu tysiącom obrotów na minutę. Warunki takie pozwolą na stosowanie turbiny, poza redukcją ciśnienia gazu, do generowania energii elektrycznej poprzez wykorzystanie hamulców w postaci dodatkowego obciążenia rezystancyjnego w celu ograniczenia obrotów wału wirnika [4, 6]. Turbina posiada stosunkowo dużą moc względem jej niewielkiej masy i rozmiaru, tak więc, można wnioskować, że jest elementem wszechstronnego użytku, a umieszczenie jej jako dodatkowego elementu odzysku energii nie wpłynie na pogorszenie pracy silnika [4, 7, 8, 9].

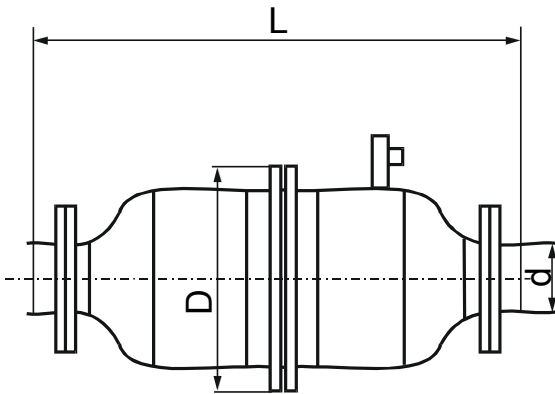
4 Konstrukcja i montaż stacji turbinowej zasilania elektrycznego

Stacja turbinowa (Rys.2) przeznaczona jest do przetwarzania nadwyżki energii transportowanego gazu w regulowany prąd stały zapewniający zasilanie elektryczne. W skład stacji turbinowej wchodzi takie elementy jak: obudowa, turbina, reduktor, generator prądu zmiennego z wbudowanym prostownikiem, zaciski ciśnieniowe do podłączenia kabla obciążenia. Omawiana stacja turbinowa została



Rys. 2 Schemat poglądowy stanowiska badawczego.

przebadana pod kątem zdolności generacji energii elektrycznej pod wpływem działania przepływu powietrza.



Rys. 3 Charakterystyczne wymiary turbiny.

Obudowa stacji turbinowej wykonana z rury gazowej z kolnierzami do podłączenia stacji do układu osprzętu gazowego, pozwala na szersze zastosowanie stacji i kompatybilność z wieloma systemami zasilania (Rys.3). W obudowie umieszczona jest wysokoobrotowa turbina z kierownicą, a wyjściowy wał reduktora podłączony jest z generatorem prądu zmiennego z kotwicą na trwałych magnesach. Wielofazowe zmienne napięcie generatora prostowane jest za pomocą wbudowanych diod. Napięcie prądu stałego wyprowadzane jest z obudowy stacji przy pomocy specjalnych zacisków ciśnieniowych, do których z zewnątrz podłącza się kabel obciążenia. W dolnej części obudowy znajduje się zamknięty otwór technologiczny służący do zlewu cieczy z obudowy stacji turbinowej. Obudowa stacji została elektrycznie podłączona z rurociągiem doprowadzającym i odprowadzającym. Stacja turbinowa została zamontowana poziomo w stosunku do powierzchni ziemi, z przechyleniem w stronę otworu drenazowego w granicach 2-5 stopni.

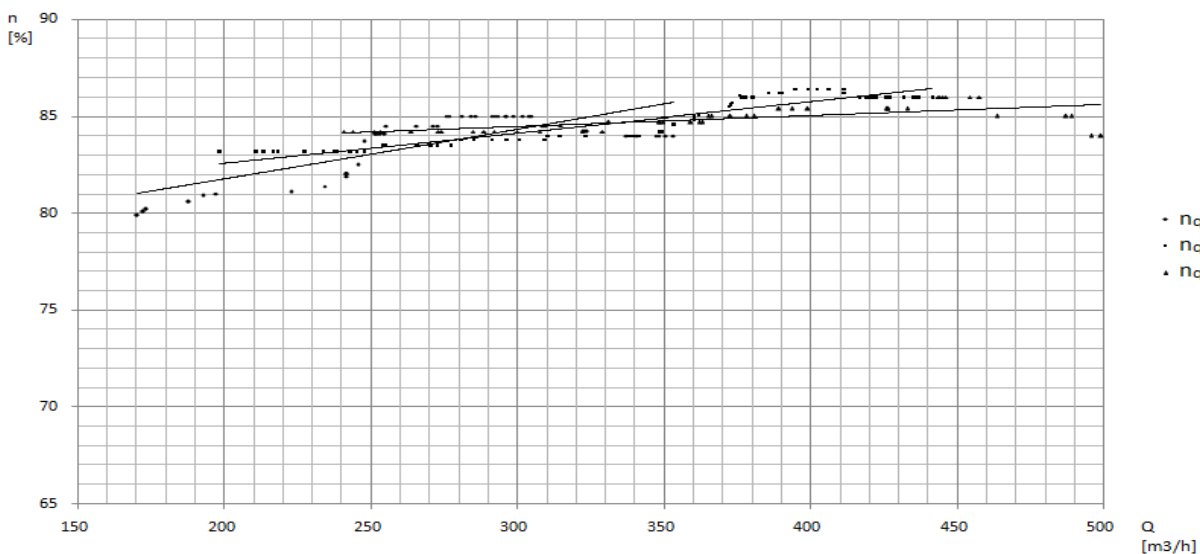
4.1 Regulator prądu zmiennego

Energia otrzymana z generatora ma postać nieregularnej, zakłóconej i niezbędnym jest odpowiednie kondycjonowanie jej przed chęcią dalszego użytku. Rolę kondycjonera spełnia regulator, który w swoim działaniu potrafi wygenerować na swoim wyjściu energię o stałym napięciu, zatem umożliwi on odpowiedni dobór obciążenia.

Parametrami opisującymi pracę regulatora są m. in.: moc obciążenia P_{OUT} oraz I_{OUT} , które wzajemnie korelują i na podstawie, których obliczona została sprawność układu stacji turbinowej. Podłączenie obwodu zewnętrznego dokonuje się w układzie hamowania regulatora, na którym znajduje się płytka stykowa z uwidocznionymi czterema stykami do których podłączony jest generator oraz odbiornik. maksymalnych obrotów wału turbiny zostaje załączone zabezpieczenie chroniące układ przed efektami zbyt wysokiego napięcia U_g . Zabezpieczenie wykonane jest w postaci dodatkowego balastu, który skutecznie odbiera nadwyżkę produkowanej, niebezpiecznej energii. Maksymalną wartość generowanej mocy należy uzależniać od wysokości ciśnienia gazu oraz od poziomu ciśnienia na jaki ma odbywać się redukcja. Regulator swoją konstrukcją winien powodować jak najmniejsze straty, a sam obwód mocy powinien być jak najprostszy.

5 Wyniki badań wstępnych

Podczas serii eksperymentów badano parametry gazu oddziałującego na wirnik turbiny oraz parametry wytwarzanej energii. W celu wyznaczenia poziomu spadku ciśnienia umieszczono barometry przed oraz za turbiną. Bezpośrednio za turbiną umieszczony został przepływomierz, który umożliwił nadzór pomiarów pod kątem stabilności przepływającego medium energetycznego. Do wyznaczenia parametrów elektrycznych układu zastosowano cztery multimetry badające parametry mocy generowanej bezpośrednio przez turbinę oraz parametry mocy oddawanej na zaciskach wyjściowych regulatora napięcia stałego. Powietrze, które przepływało przez wirnik układu stacji turbinowej doprowadzone zostało z zbiorników o łącznej pojemności $9m^3$ i posiadało maksymalne ciśnienie wysokości 8 barów. W celu regulacji przepływu na końcu badanego układu zastosowany został zawór kulowy. Przeprowadzono szereg eksperymentów dla trzech pozycji zaworu, a wyniki pozwoliły na wykreślenie charakterystyki sprawności (Rys.4). W przeprowadzonym badaniu medium energetycznym było powietrze, którego gęstość w warunkach standardowych wynosi $1,225 kg/m^3$. Badana stacja turbinowa o danych rozmiarach zdolna jest do generacji mocy chwilowej o wartości 250W, jednak poprzez modernizację oraz odpowiedni dobór regulatora możliwym jest uzyskanie wyższej mocy przy zastosowaniu maszyn o takich samych gabarytach. Maksymalna ilość energii jaką udało się przekazać odbiornikowi sprawiła, że sprawność urządzenia generującego w zależności od ustawionego przepływu objętości-



Rys. 4 Charakterystyka prezentująca sprawność elektryczną regulatora w funkcji przepływu wyznaczona dla trzech różnych pozycji zaworu kulowego, otrzymana z przeprowadzonych badań.

wego gazu w toku badań nie spadła poniżej 80%. Przy samym podłączeniu niezwykle ważna jest odpowiednia biegunowość regulatora, w przeciwnym wypadku urządzenie może nie zadziałać prawidłowo.

6 Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań zauważono raczej stosowania turbiny w miejscu występowania reduktora. Wyniki badań prezentują obiecujące prognozy dotyczące skuteczności odzysku energii kinetycznej wytracanej na skutek pracy regulatora ciśnienia paliwa. Elastyczność parametrów turbiny pozwala na dobór zoptymalizowanej maszyny pod każdy reduktor zasilany różnym paliwem. Zaproponowane rozwiązanie łączy w sobie aspekt ekologiczny związany z zastąpieniem paliw ciekłych gazowymi oraz poprawę sprawności silnika dzięki lepszemu wykorzystaniu energii paliwa.

Bibliografia:

1. <http://zss.lublin.eu/wp-content/uploads/2016/09/4.6-Sprawnoscsilnika.pdf>
2. Olszowiec P. Rozdział 3. Efektywność pracy silnika spalinowego. Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu. Radom.
3. Chmielniak T., Rusin A., Czwiertnia K., Turbiny gazowe. Maszyny przepływowe tom 25, Zakład Narodowy im. Ossolińskich Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk. Wrocław 2001
4. Perycz S., Turbiny parowe i gazowe. Maszyny przepływowe tom 10, Zakład Narodowy im. Ossolińskich Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk. Wrocław 1992.
5. Ambroziak A., Podstawy teorii tłokowych silników spalinowych. Politechnika Warszawska. Warszawa 2012.
6. Gundlach W.R. : Podstawy maszyn przepływowych i ich systemów energetycznych, WNT, Warszawa 2008
7. Krylowicz W., Kantyka K., Małe turbiny parowe dla energetyki rozproszonej – uwarunkowania techniczno-ekonomiczne.
8. Chrzanowski W., Turbiny Parowe, Politechnika Warszawska.
9. <http://pogp.pl/pl/lpg/>
10. http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/spalanie_wyklad_mechanika/PALIWA/2_Paliwa_gazowe.pdf

Increasing the efficiency of the gas fueled combustion engine

Paper The operation of the power system and the internal combustion engine itself is accompanied by energy losses of 60-65%. The article introduce the issue of loss of kinetic energy of gas fuel resulting from the operation of the fuel pressure regulator. It was proposed to replace the traditional pressure regulator with an electric turbine station. It has been shown that such a system enables the use of energy to reduce gas pressure which has a positive effect on improving the overall energy efficiency of the engine.

Keywords: combustion engine, efficiency increasing, gas turbine, gas fuel, pressure regulator.

Autorzy:

dr inż. **Radosław Figura** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu. Wydział Transportu i Elektrotechniki, r.figura@uthrad.pl

Sebastian Sadowski – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu. Wydział Transportu i Elektrotechniki, sebastiansadowski95@gmail.com

dr hab. inż. **Paweł Religa** prof. UTH Radom - Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu. Wydział Materiałoznawstwa, Technologii i Wzornictwa, p.reluga@uthrad.pl