

## BADANIA KOGENERATORA MAŁEJ MOCY

Mirosław WŁAS<sup>1</sup>, Jacek JAWORSKI<sup>2</sup>, Marek GACKOWSKI<sup>3</sup>, Wojciech KOLBUSZ<sup>4</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel: +48583472337 fax: +48583410880 e-mail: m.wlas@ely.pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
e-mail: jjaworski@ely.pg.gda.pl
3. Energy Management Systems Sp. z o.o., ul. Trzy Lipy 3, 80-172 Gdańsk  
e-mail: mgackowski@ems.gda.pl
4. Energy Management Systems Sp. z o.o., ul. Trzy Lipy 3, 80-172 Gdańsk  
e-mail: wkolbusz@ems.gda.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono proces projektowania i implementacji systemu sterowania źródłem energii elektrycznej i ciepłej – bazującym na kogeneracji wysokosprawnej, wykorzystującej zmodyfikowany kogenerator firmy TOTEM z dodatkowym przekształtnikiem energoelektronicznym. Jego istotną częścią jest 4-suwowy silnik benzynowy o zapłonie iskrowym, dostosowany do spalania gazu ziemnego. W celu osiągnięcia maksymalnej sprawności układu, wykorzystano sterowanie prędkością obrotową jednostki spalinowej. Opracowanie "pagórka" sprawności maszyny umożliwia poruszanie się po trajektorii zapewniającej poziom sprawności uzasadniający poniesione nakłady inwestycyjne, m.in.: zakup dwukierunkowego przekształtnika energii.

**Słowa kluczowe:** Kogeneracja, silnik benzynowy, osiągnięcie wysokiej sprawności

### 1. WPROWADZENIE

Kogeneracja (*ang. Combined Heat and Power - CHP*) jest metodą jednoczesnego, skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Charakteryzuje się bardzo wysoką sprawnością konwersji energii oraz niewielką emisją zanieczyszczeń. Najczęstszą postacią układu kogeneracyjnego jest połączenie na wspólnym wale prądnicy i silnika spalinowego. Silnik jest najczęściej jednostką wysokoprężną lub benzynową, dostosowaną do spalania gazu ziemnego. Współczesna generacja silników wykorzystujących gaz ziemny zapewnia niskie koszty instalacyjne, szybki i łatwy rozruch, wysoki współczynnik odzysku ciepła oraz dużą niezawodność (przy właściwym użytkowaniu). Z tego względu są one najpopularniejszymi jednostkami generacyjnymi w układach CHP [1].

Powszechnie wiadomo [1,2,3], że wykorzystanie skojarzonego wytwarzania energii i ciepła skutkuje znacznym zmniejszeniem zużycia energii z paliw kopalnych. Dodatkowo, wysoki poziom redukcji emisji CO<sub>2</sub> staje się coraz bardziej istotny wraz z pojawianiem się coraz bardziej restrykcyjnych norm i dyrektyw, np.: [4,5]. Dyrektywa 2004/8/EC wprowadziła indeks PES (*ang. Primary Energy*

*Saving*), który stał się wyznacznikiem, czy dany system spełnia wymagania stawiane kogeneracji.

$$PES = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{el\_CHP}}{\eta_{el}} + \frac{\eta_{t\_CHP}}{\eta_t}} \quad (1)$$

gdzie:  $\eta_{el\_CHP}$  – średnia roczna sprawność elektryczna CHP,  $\eta_{t\_CHP}$  – średnia roczna sprawność cieplna CHP,  $\eta_{el}$  – referencyjna sprawność elektryczna,  $\eta_t$  – referencyjna sprawność cieplna

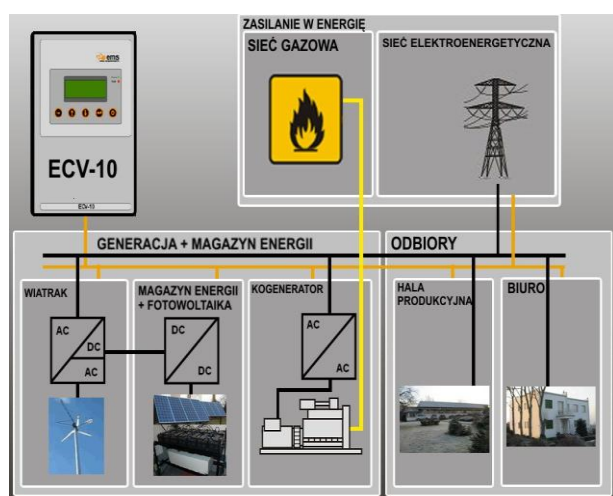
### 2. BUDOWA STANOWISKA

#### 2.1. Kogenerator małej mocy

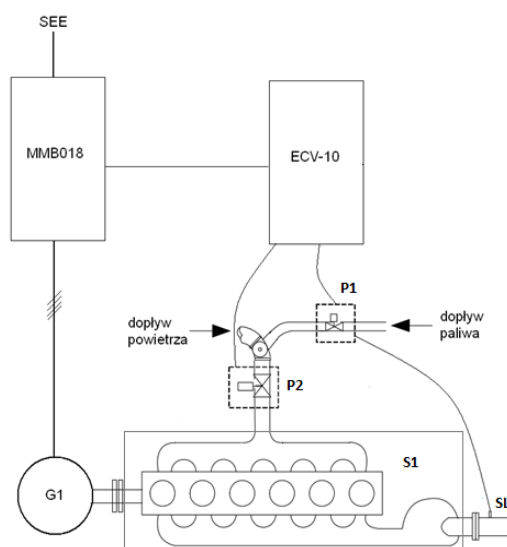
Jak już wspomniano, jednostka napędowa kogeneratora składa się z 4-suwowego silnika benzynowego, o pojemności skokowej 903 cm<sup>3</sup> z zapłonem iskrowym, przystosowanego do spalania gazu ziemnego (S1 na rys.3). Jednostka napędowa została uzupełniona o szereg wymienników ciepła, których łączna moc wynosi 30kW. Do produkcji energii elektrycznej wykorzystany został generator asynchroniczny klatkowy o mocy znamionowej 15kW (G1), który sprzężony jest z siecią elektroenergetyczną (SEE) za pośrednictwem dwukierunkowego przekształtnika energii (MMB018). Stanowisko to jest częścią laboratorium generacji rozproszonej Politechniki Gdańskiej, znajdujący się w Niestępowie k/Gdańsk. Kogenerator, wspomagany przez zestaw paneli fotowoltaicznych i elektrownię wiatrową, zaopatruje w energię elektryczną zakład produkcyjny oraz część biurową zakładu. Schemat laboratorium został zaprezentowany na rys. 1.

Pierwotna wersja kogeneratora firmy TOTEM™ umożliwia wyłącznie pracę na sieć elektroenergetyczną, przy stałej prędkości kątowej wału i stałej mocy oddawanej do sieci. Nowy układ sterowania ma za zadanie umożliwić pracę maszyny także na sieć wydzieloną, co skutkuje zmiennym zapotrzebowaniem na moc elektryczną. W zależności od rozpatrywanego trybu pracy, wartością

referencyjną jest wartość mocy elektrycznej, bądź cieplnej. By zapewnić maksymalną sprawność urządzenia, konieczne jest odpowiednie sterowanie prędkością wału. Odpowiedzialnymi za to członami wykonawczymi są dwie przepustnice, z których pierwsza (P1) reguluje wartość współczynnika A/F, z wykorzystaniem sondy lambda (SL), zaś druga (P2) pełni funkcję regulatora prędkości kątowej dozując ilość mieszanki paliwowej w kolektorze dolotowym. Funkcję nadrzędnego układu regulacji pełni sterownik główny (ECV-10). Z pomocą pomiarów różnych wielkości fizycznych, określana jest zadana wartość prędkości kątowej wału maszyny, przy jednoczesnym spełnieniu wymagań związanych z zapotrzebowaniem na moc elektryczną i ciepłą. Proces ten prowadzony jest przy zapewnieniu maksymalnej sprawności kogeneracji, z wykorzystaniem pagórka sprawności uzyskanego dla układu po przeprowadzeniu badań całego obszaru pracy silnika spalinowego. Struktura układu sterowania została przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 1. Schemat laboratorium generacji rozproszonej



Rys. 2. Struktura układu sterowania prędkością kątową wału silnika

### 3. ANALIZA SPRAWNOŚCI URZĄDZENIA

#### 3.1 Pagórek sprawności

Stanowisko laboratoryjne (rys. 3 i rys. 4), opisane w rozdziale 2, zostało poddane badaniom sprawności. Wstępnym etapem tych badań był pomiar energii elektrycznej i cieplnej, generowanej przez określony przedział czasu, przy pomiarze wielkości zużycia surowca energetycznego – gazu ziemnego (NG), dla każdego punktu pracy urządzenia. Na podstawie pomiarów wyznaczono sprawność urządzenia, dla określonego punktu płaszczyzny reprezentującej prędkość wału napędowego w funkcji moc elektrycznej generowanej do sieci. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane na rys. 5.

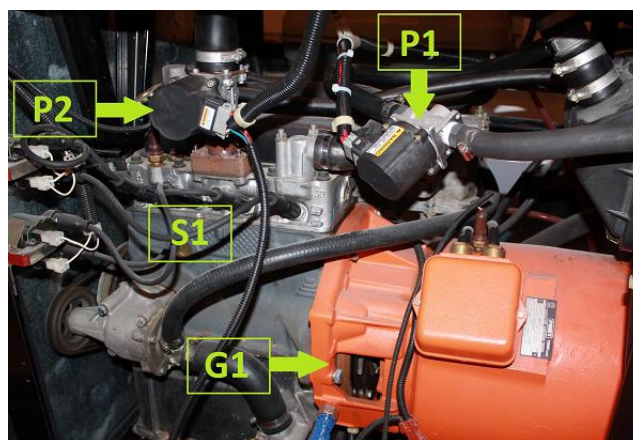
#### 3.2 Wyznaczona trajektoria pracy urządzenia

Analiza sprawności kogeneratora, przedstawiona na rysunku 8, służy do wytypowania wartości prędkości obrotowej, dla każdej kolejnej wartości mocy czynnej obciążenia. Tym samym powstały w rozważanej przestrzeni zbiór punktów (prędkość, moc) służy jako baza do znalezienia funkcji aproksymującej optymalną trajektorię pracy (wg kryterium minimalizacji kosztów). Wyniki aproksymacji zostały przedstawione na rys. 5. Podczas poszukiwania współczynników funkcji zastosowano metodę najmniejszych kwadratów, minimalizującą wskaźnik:

$$\min J = \min \frac{1}{2} e^T e \quad (2)$$

gdzie:  $J$  – reprezentuje funkcję celu,  $e$  – wektor błędów resztkowych

Wynik aproksymacji, przedstawiony na rysunku 5, wiąże nieliniowo jedynie dwie, z trzech wielkości wyjściowych rozważanego układu. Do pełnego obrazu pracy urządzenia, potrzebna jest jeszcze analiza zależności między rozważanymi wielkościami, a energią cieplną, generowaną przez wymienniki ciepła. W tym celu, dla wszystkich punktów pracy, przedstawionych na rysunku 5, wyznaczono wartość mocy cieplnej, uśrednionej za pewien okres (czas 10 minut). Aproksymacja tych zależności została dokonana wg wzoru (2) i przedstawiona na rys. 6.



Rys. 3. Część mechaniczna stanowiska

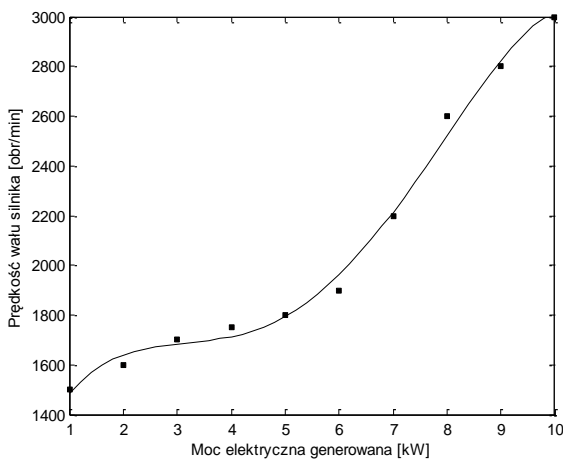


Rys. 4. Część elektryczna stanowiska z przekształtnikiem sieciowym kogeneratora MMB018 i systemem ECV-10

## 4. RODZAJE PRACY URZĄDZENIA

### 4.1 Praca wyspowa

Możliwość pracy wyspowej rozważanego układu jest bardzo istotna z punktu widzenia potencjalnego inwestora. Nadzrędnym celem staje się wówczas zbilansowanie mocy generowanej i pobieranej w wydzielonym układzie. Tym samym, wartość mocy generowanej determinuje prędkość wału silnika, by sprawność wytwarzania skojarzonego była możliwie jak największa. Do tego celu wystarcza znajomość charakterystyki przedstawionej na rys. 5. Warto podkreślić, że jednostka spalinowa nie jest w stanie zapewnić odpowiedniej dynamiki zmian mocy generowanej na zaciskach generatora, ze względu na dużą inercję układu spalinowego. Układ kogeneratora jest wspierany przez magazyny energii wpięte do sieci poprzez obwód DC i przekształtnik DC/AC elektrowni wiatrowej (rys. 1.).

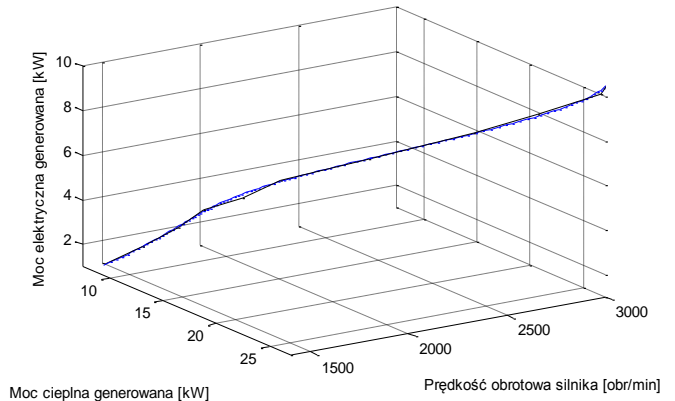


Rys. 5. Wyniki aproksymacji trajektorii pracy układu

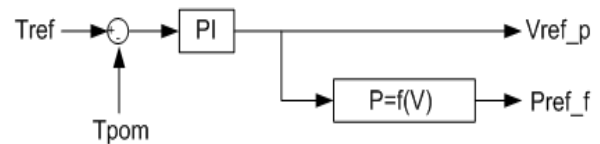
### 4.2 Praca na sieć elektroenergetyczną

Szczególnie istotnym trybem pracy jest praca na sieć elektroenergetyczną, podczas której najważniejszym zadaniem jest zapewnienie odpowiedniego poziomu komfortu cieplnego. Wykładnią tego poziomu jest ilość mocy cieplnej wydzielanej przez główny wymiennik ciepła kogeneratora regulowanej pomiarem temperatury  $T_{pom}$ , mierzoną na wejściu do wewnętrznego wymiennika kogeneratora. W rozpatrywanym trybie pracy, produkowana energia elektryczna jest dodatkowym produktem generacji, znacznie powiększającym stopę zwrotu inwestycji określonej przez wzór (1). Wartość zadana temperatury w wymienniku kogeneratora  $T_{ref}$  determinuje nam odpowiedni

punkt na trajektorii pracy urządzenia. Punkt ten jest wykładnikiem dla poszukiwanych wartości dwóch wielkości zadanych: prędkości obrotowej silnika spalinowego  $V_{ref\_p}$ , oraz mocy elektrycznej przekształtnika  $P_{ref\_f}$ . Do tego celu można posłużyć się charakterystyką, przedstawioną na rys. 6, będącą zależnością mocy cieplnej wymiennika, od prędkości silnika oraz mocy elektrycznej pobieranej przez przekształtnik sieciowy. Proces sterowania tymi wielkościami jest realizowany przez wewnętrzny algorytm, przedstawiony na rys. 7, zaszyty w sterowniku ECV-10.



Rys. 6. Wyniki aproksymacji trajektorii cieplnej

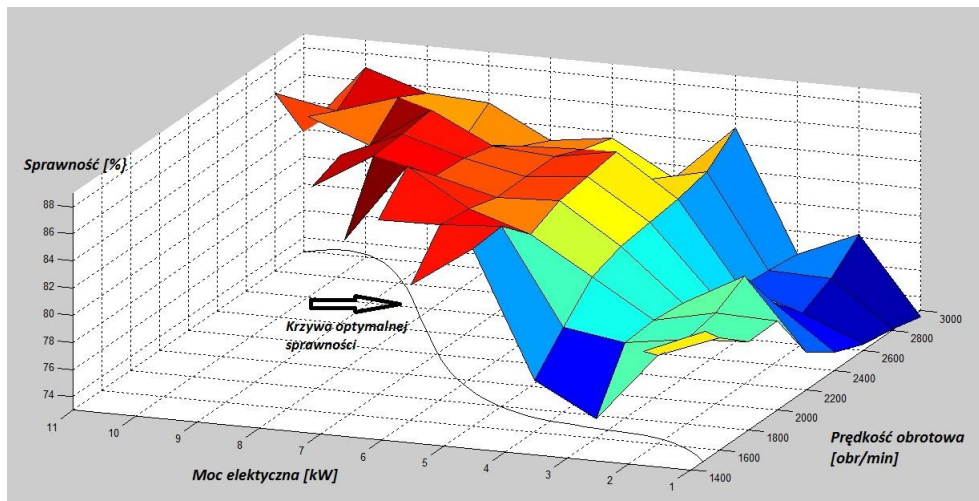


Rys. 7. Układ sterowania temperatury przez sterownik główny

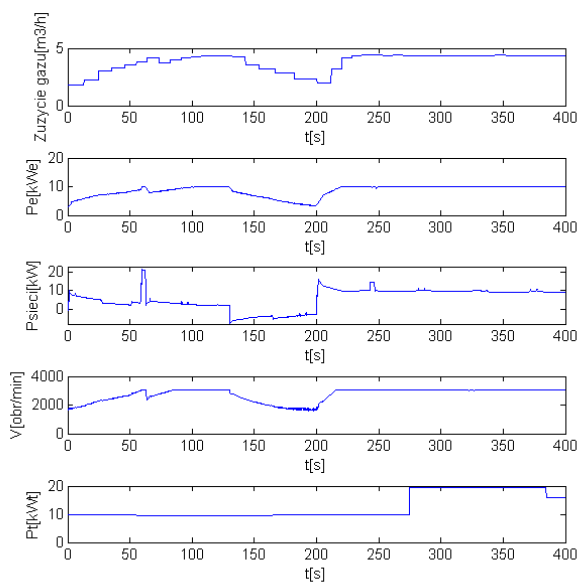
Liniowy regulator PI przedstawiony na rys. 7 został odpowiednio dostrojony, w celu zapewnienia stabilnej regulacji prędkości silnika spalinowego i mocy oddanej przez przekształtnik sieciowy, w możliwie najszerszym zakresie charakterystyki przedstawionej na rysunku 5.

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi przy dodaniu dodatkowego regulatora PI, który bazował na pomiarach mocy pobieranej przez odbiory i wyregulowywał moc zadaną na kogenerator w taki sposób, aby moc oddawana do sieci wynosiła 0W. Zarejestrowane szybkie zmiany mocy pobieranej z sieci związane są pracą spawarek transformatorowych. Układ regulacji ma duże stałe czasowe (rzędu 60 s) i powoli dopasowuje się do mocy obciążenia. Na rys. 8 przedstawiono wyniki badań sprawności kogeneratora dla różnej mocy elektrycznej i termicznej.

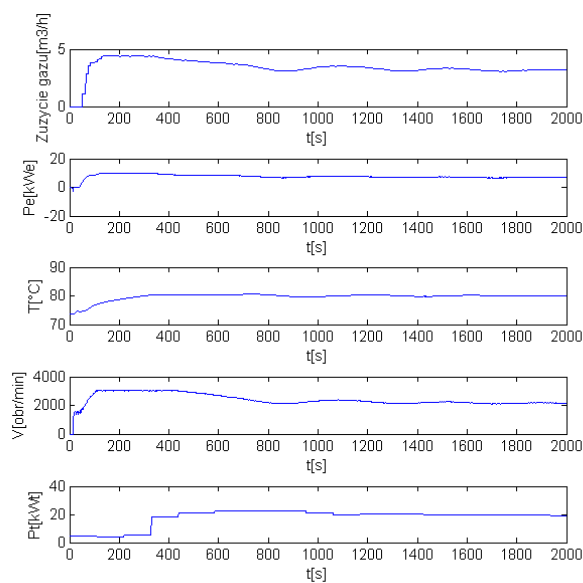
Przykładowy przebieg regulacji temperatury na wlocie wymiennika układu kogeneracyjnego został przedstawiony na rysunku 10. Na początku rejestracji, ustanowiono wartość zadaną temperatury wynoszącą 80°C. Około 10 sekundy rejestracji nastąpił rozruch silnika spalinowego. Następnie, układ regulacji wydosował prędkość obrotową silnika na poziomie 3000 obr/min, co zapewniło szybki wzrost temperatury wymiennika ciepła. Ustabilizowanie temperatury nastąpiło po około 300 sekundach od chwili rozpoczęcia rejestracji (uchyb poniżej 1%).



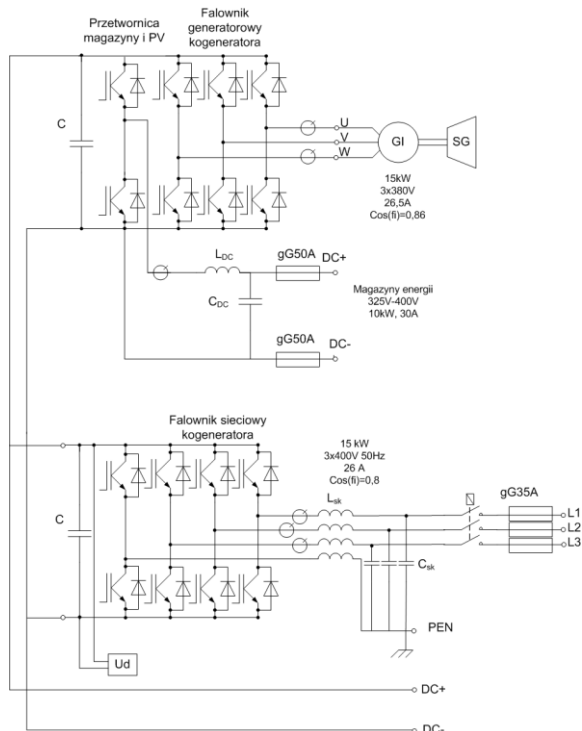
Rys. 8. Analiza sprawności kogeneratora dla różnych punktów pracy urządzenia



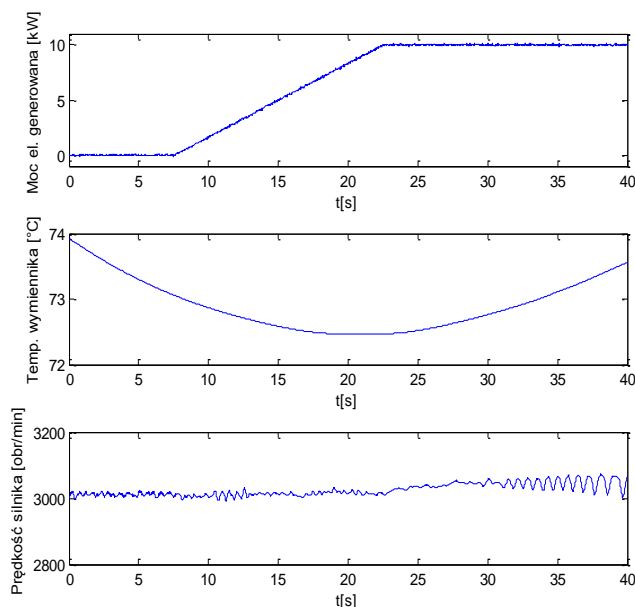
Rys. 9. Przebiegi przy próbie utrzymywania zerowej mocy z sieci



Rys. 10. Przebieg regulacji temperatury wymiennika ciepła



Rys. 11. Schemat przekształtnika MMB018



Rys. 12. Przebieg odpowiedzi na skokową zmianę obciążenia

W celu uzupełnienia analizy jakości sterowania, przeprowadzono badanie odpowiedzi skokowej układu regulacji na zmianę mocy zadanej ( $P_{ref\_f}$ ) oddawanej do sieci. W celu ograniczenia "gwałtownej" zmiany momentu mechanicznego występującego na wale silnika gazowego, (co mogłoby doprowadzić do zdławienia silnika), wprowadzono zmianę linową zadanej mocy czynnej w przekształtniku sieciowym kogeneratora (0,667 kW/s).

Przykładową odpowiedź układu regulacji na skokową zmianę wartości obciążenia przedstawiono na rysunku 12. W 8 sekundzie rejestracji następuje skokowa zmiana mocy zadanej podawanej na przekształtnik sieciowy kogeneratora. Moc na wyjściu przekształtnika sieciowego jest zwiększana jednostajnie 0,667 kW/s do chwili uzyskania mocy zadanej 10 kW. Co ciekawe w pierwszym momencie na skutek zwiększonego przepływu czynnika chłodzącego temperatura spada by po chwili wzrosnąć, aż do kolejnego punktu równowagi.

### 4.3 Budowa przekształtnika

Na rys. 3 przedstawiono zdjęcie przekształtnika kogeneratora z system zarządzania energią ECV-10. Schemat przekształtnika został przedstawiony na rys. 11. Podłączenie do magazynów energii umożliwia rozruch agregatu przy braku napięcia w sieci elektroenergetycznej. Charakterystyka przekształtnika MMB018:

- moc znamionowa – czynna 15 kW, pozorna 18 kVA,
- prąd znamionowy – 26 A,

- napięcie znamionowe – 3x400V 50Hz,
- współczynnik mocy - 0,96,
- WSP. odkształcenia prądu THDI = 3%,
- przeciążalność 10% przez 60s.

Przekształtnik wyposażono ponad to w: zabezpieczenia przeciwprzepięciowe, zwarceniowe, przeciążeniowe, nadczęstotliwościowe, podczęstotliwościowe, od zaniku fazy, nad i pod napięciowe. Urządzenia zbudowane jest z tranzystorów IGBT pracujących z częstotliwością modulacji 10kHz.

## 5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono proces sterowania prędkością wału i obciążeniem kogeneratora TOTEM™, które zapewnia efektywną pracę na sieć wydzieloną i elektroenergetyczną.

Zmienna prędkość obrotowa skutkuje w tym przypadku znacznym obniżeniem kosztów pracy urządzenia, co uzasadnia nakłady finansowe związane z zakupem dodatkowej aparatury (przekształtnika, przepustnic, sterownika głównego). Dodatkowo, sposób sterowania przyczynia się do znacznego zmniejszenia prognozowanej emisji szkodliwych gazów, co jest istotne z racji znacznego zaostrzenia przepisów i norm dotyczących ochrony środowiska naturalnego.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Badami M., Casetti A., Campanile P., Anzioso F.: *Performance of an innovative 120kWe natural gas cogeneration system*, Energy 32 (2007), s. 823-833
2. Panora M., Gehret J., Piagi P.: *Design and Testing of an Inverter-Based Combined Heat and Power Module for Special Application in a Microgrid*, Power Engineering Society General Meeting 2007 IEEE, June 2007, s. 1-8, ISBN 1-4244-1296-X
3. Mahat P., Chen Z., Bak-Jensen B.: *Control strategies for gas turbine generators for grid connected and islanding operations*, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, ISBN 978-1-4244-6546-0
4. Dyrektywa 2004/8/EC. *On the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market*, Parlament i Rada Europejska, 11 luty 2004
5. Standardy Emisji Silników Stacjonarnych — Niemcy: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), <http://www.dieselnet.com/standards/de/taluft.php>

## SMALL POWER COGENERATOR TEST

**Key-words:** Cogeneration, internal-combustion engine, iso-efficiency curves

In this paper, designing and control system implementation of combined heat and power TOTEM™ system was presented. The crucial part of that is 4-stroke internal combustion engine, natural gas has been adapted. Because of the maximization of efficiency, variable speed control has been implemented. The iso-efficiency curves allow to operate on minimum operation cost trajectory, makes high installation cost worth profitable.

