

## ROLA ŹRÓDEŁ GENERACJI ROZPROSZONEJ W EKONOMICZNYM ASPEKTCIE PRACY GENERATORA ENERGII ZASILANEGO PALIWEM

Konrad ZUCHORA

Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
tel.: 510643982 e-mail: zuchorakonrad@gmail.com

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano wypracowane doświadczenia oraz poglądy na temat wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE) w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). Poglądy te uwzględniają potrzebę współpracy różnych źródeł i sposobów wytwarzania energii oraz wyróżniają potrzeby organizacyjne, które przystosowują funkcjonowanie generacji rozproszonej do aktualnych systemowych standardów. Efektami wykonanej pracy są stworzone charakterystyki kosztów wytwarzania energii w modelowym generatorze. W referacie odwołano się do funkcji i sposobów funkcjonowania kogeneracji i OZE w energetyce rozproszonej.

**Słowa kluczowe:** kogeneracja, energetyka rozproszona, regulacja mocy.

### 1. WSTĘP

Używanie odnawialnych źródeł energii w systemie elektroenergetycznym wywoła potrzebę wykorzystania pośrednich technik wytwarzania energii, łączących zalety źródeł odnawialnych i paliw kopalnych. Spodziewane rezultaty zespołowej współpracy energetyki ze źródłami generacji rozproszonej dają nadzieję korzystnego wpływu wzajemnych zalet na funkcjonowanie KSE i gospodarki [1, 2]. Aktualnie techniczne problemy dotyczące rosnącej liczby jednostek generacji rozproszonej i systematycznie gromadzone doświadczenia uzasadniają opinię, że wytwarzanie energii w instalacjach, które mogą konkurować z krajowym systemem elektroenergetycznym ceną i efektywnością, jest szczególnym problemem dotyczącym wytwarzania energii w skali mikro energetycznej.

W związku z technicznymi problemami, które wynikają z korzystania z OZE, konsekwentne instalowanie w strukturach krajowych systemów elektroenergetycznych odnawialnych rozproszonych źródeł energii jest pod wieloma względami programem wielowymiarowym [3, 4].

Istotna, w aspektach dotyczących wytwarzania energii i regulacji mocy, jest cena paliwa, obecnie głównie cena węgla kamiennego i gazu ziemnego, którymi można zasilać systemy elektroenergetyczne różnej konfiguracji. Istotne są również koszty transportowania oraz magazynowania gazu.

Na forum międzynarodowym wyrażany jest obecnie pogląd, że używanie paliw kopalnych do wytwarzania energii ma negatywny wpływ na środowisko i zdrowie ludzi. W konsekwencji tej opinii obserwujemy społeczne uznanie dla źródeł odnawialnych, co sprzyja systematycznemu

zastępowaniu w energetyce paliw kopalnych odnawialnymi źródłami energii.

### 2. ROLA KOGENERACJI W ENERGETYCE ROZPROSZONEJ

Kogeneracja to skojarzenie wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Główną zaletą kogeneracji jest wyższa sprawność w przemianie energii zawartej w paliwie na sumę energii elektrycznej i ciepła.

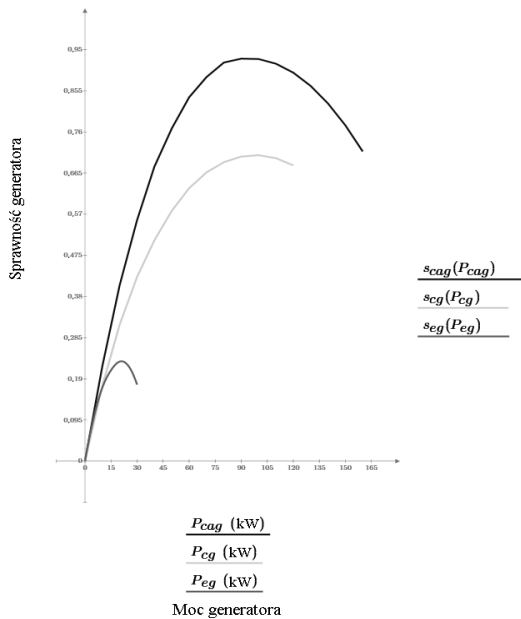
Jedną z zalet rozproszonych systemów energetycznych jest możliwość transportu i akumulowania w sieci ciepłej nadmiaru ciepła wytworzonego z agregatów pracujących w kogeneracji. Sieci ciepłe w elektroenergetycznej infrastrukturze, oprócz funkcji przesyłowej, mogą pełnić funkcję zasobnika lub bufora energii, który jednocześnie może być ładowany i rozładowywany energią. Gdy w systemie ciepłym w ciągu roku warunki pogodowe powodują, że temperatura wody sieciowej nie spełnia normy i jest za niska, kogeneracja rozproszona może w sieci ciepłej pełnić funkcję regulującą, która podwyższa temperaturę wody sieciowej.

W mikrosystemach, które używają agregatów kogeneracyjnych i pracują w generacji rozproszonej, warunki pracy sieci ciepłej wpływają na ilość energii elektrycznej transportowanej z agregatów do sieci elektroenergetycznej. Zarządzana infrastruktura generacji rozproszonej, która w pompach ciepła wytwarza ciepło z energii elektrycznej, może przekierowywać nadmiar energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej do sieci ciepłej, gdy w sieci elektroenergetycznej zaistnieje zjawisko wzrostu napięcia [5], którego pierwotnym źródłem mogą być niekontrolowane źródła energii odnawialnej.

Kryterialne zarządzanie zasobami energii odnawialnej z użyciem zasobników oraz zintegrowane użycie technik skojarzonego wytwarzania energii stwarza podstawy do efektywnego wykorzystania pierwotnych źródeł energii w strukturach krajowych systemów elektroenergetycznych [6, 7,]. Proporcjonalnie rosnąca ilość energii wytwarzanej w kogeneracji z udziałem odnawialnych źródeł sprawi, że aktualnie pasywne infrastruktury energetyki rozproszonej w nieodległej przyszłości zostaną uznane za infrastruktury aktywne, biorące czynny udział w procesach dystrybucji, produkcji energii i regulacji mocy w KSE.

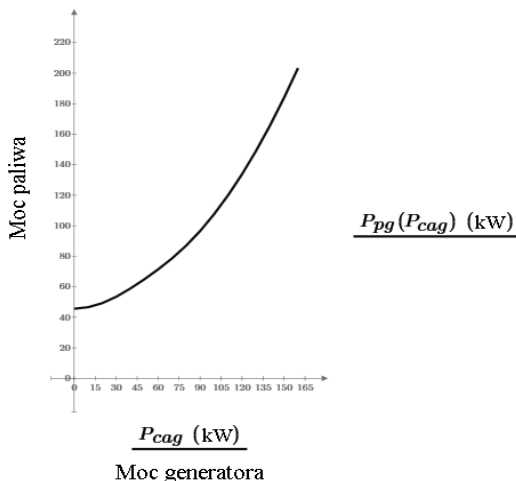
### 3. METODA OBLICZEŃ

Obliczenia wykonano na podstawie modelowych cząstkowych charakterystyk sprawności (rys. 1), sporządzonych dla silnika cieplnego, który wytwarza ciepło i energię elektryczną, pracując w kogeneracji.



Rys. 1. Modelowe sprawności cząstkowe silnika cieplnego

Modelowa funkcja mocy paliwa  $P_{pg}(P_{cag})$  uwzględnia wewnętrzne początkowe straty energii w silniku i reprezentuje energię doprowadzoną do silnika wraz z paliwem. W artykule funkcja  $P_{pg}(P_{cag})$  na skutek podzielenia energii zawartej w paliwie przez czas została przekształcona do funkcji mocy paliwa. Argumentem funkcji  $P_{pg}(P_{cag})$  jest całkowita użyteczna moc wyjściowa, którą w pracy osiąga modelowy silnik cieplny.



Rys. 2. Funkcja mocy doprowadzonej do modelowego silnika wraz z paliwem

Ceny paliwa w rachunkach ustalono w zakresie od 0,4 zł/m<sup>3</sup> dla  $c_{pa0}$  do 2 zł/m<sup>3</sup> dla  $c_{pa4}$ . Charakterystyki (rys. 3) zostały sporządzone dla wartości opałowej paliwa 34 MJ/m<sup>3</sup>

i dla równych odstępów między pięcioma różnymi cenami paliwa.

Moc całkowita modelowego generatora wytwarzającego energię jest sumą mocy elektrycznej i mocy cieplnej:

$$P_{cag} = P_{eg} + P_{cg} \quad (1)$$

gdzie:  $P_{eg}$  – moc elektryczna,  $P_{cg}$  – moc cieplna.

Sprawność całkowitą silnika można obliczyć z następującego równania:

$$s_{cag}(P_{cag}) = \frac{P_{cag}}{P_{pg}(P_{cag})} \quad (2)$$

gdzie:  $P_{pg}(P_{cag})$  – moc doprowadzona do silnika wraz z paliwem

Funkcje od  $C_{Eca0}(P_{cag})$  do  $C_{Eca4}(P_{cag})$  (rys. 3) odwzorowują ceny energii całkowitej, wytwarzanej w silniku cieplnym, dla różnych cen paliwa. Przywołane funkcje w modelowych rachunkach uwzględniają sprawność całkowitą silnika cieplnego.

$$C_{Eca0}(P_{cag}) = c_{pa0} \cdot (2 - s_{cag}(P_{cag})) \quad (3)$$

gdzie:  $c_{pa0}$  – cena paliwa równa 0,4 zł/m<sup>3</sup>.

Referencyjna funkcja  $C_{Eca5}(P_{cag})$  jest stała dla całego zakresu regulacji mocy generatora i co do wartości przyjmuje liczbę odpowiadającą cenie paliwa  $c_{pa0}$ .

Referencyjne koszty wytworzenia energii całkowitej w modelowym silniku reprezentuje poniższa funkcja. Referencyjna funkcja uwzględnia tylko cenę i zużycie paliwa.

$$K_{Eca5}(P_{cag}) = c_{pa4} \cdot P_{pg}(P_{cag}) \cdot h \quad (4)$$

gdzie:  $h$  – oznacza 3600 sekund.

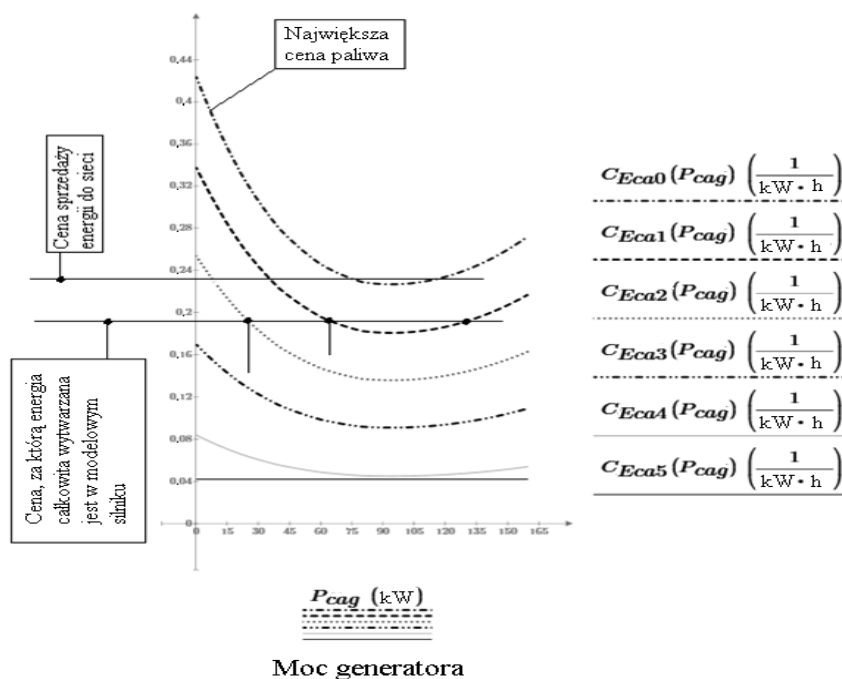
Koszty wytworzenia energii, które uwzględniają straty energii w modelowym silniku, reprezentują funkcje znajdujące się na (rys. 3). Model kosztów wytworzenia energii całkowitej, który uwzględnia sprawność całkowitą, reprezentują równania (5) i (6).

$$K_{Eca0}(P_{cag}) = c_{pa0} \cdot (2 - s_{cag}(P_{cag})) \cdot P_{pg}(P_{cag}) \cdot h \quad (5)$$

$$K_{Eca4}(P_{cag}) = c_{pa4} \cdot (2 - s_{cag}(P_{cag})) \cdot P_{pg}(P_{cag}) \cdot h \quad (6)$$

### 4. WYNIKI BADAŃ

Rysunek 3, dla różnych cen paliwa, reprezentuje rodzinę charakterystyk cen wytwarzanej w silniku energii całkowitej. Najniższa cena paliwa na (rys. 3) jest reprezentowana przez funkcję bliższą kartezyjańskiemu układowi współrzędnych.



Rys. 3. Wpływ ceny paliwa i mocy całkowitej na zakres regulacji mocy i cenę energii całkowitej, wytwarzanej w modelowym silniku cieplnym

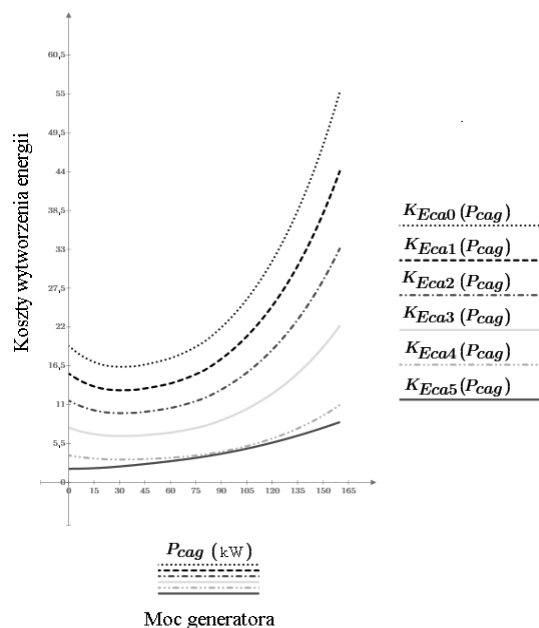
Różnica pomiędzy ceną sprzedaży energii do sieci a ceną wytwarzanej energii całkowitej w silniku (rys. 3), jest ekonomicznym zyskiem dla właściciela generatora.

Z (rys. 3) wynika, że dla stałej wartości ceny wytwarzanej energii im niższa cena paliwa, tym silnik ma większy zakres regulacji mocy przy cenie produkcji energii niższej od ceny sprzedaży.

Z (rys. 3) wynika również, że silnik ma tym większy zakres regulacji mocy, im większa jest cena sprzedaży energii do sieci przy stałej cenie paliwa i stałych zyskach. Obniżenie lub podwyższenie mocy całkowitej maszyny i przekroczenie poziomu ceny sprzedaży energii do sieci dla właściciela silnika skutkuje nieekonomicznym stanem pracy generatora.

Wpływ pracy silnika z małą mocą na cenę wytwarzanej energii jest szczególnie widoczny na rysunku 3. Funkcja  $C_{Eca0}(P_{cag})$  dla małych mocy jest bardziej nieliniowa niż funkcja  $C_{Eca4}(P_{cag})$ . Całkowite koszty wytworzenia energii bazujące na modelu silnika ciepłego zużywającego energię zawartą w paliwie i modelu cen wytworzenia energii ilustruje (rys. 4).

Dla mocy elektrycznej maszyny 90 kW oraz ceny paliwa 2 zł/m<sup>3</sup> koszty wynikające z zużycia paliwa i uwzględnienia sprawności całkowitej generatora osiągają wartość 22 zł a cena energii całkowitej wytwarzanej w maszynie osiąga wartość 6,3·10<sup>-8</sup> zł/J, ta wartość w zaokrągleniu jest równoważna cenie 0,23 zł/kWh, za którą suma energii elektrycznej i ciepła jest wytwarzana w modelowym generatorze. Na rysunku 4 jednostką całkowitych kosztów wytworzenia energii jest polski złoty.



Rys. 4. Koszt wytworzenia energii całkowitej, który wynika z zużycia paliwa i sprawności modelowego silnika

Z (rys. 4) wynika, że funkcje całkowitych kosztów od  $K_{Eca0}(P_{cag})$  do  $K_{Eca4}(P_{cag})$  mają minima. Wyjątek stanowi funkcja  $K_{Eca5}(P_{cag})$ , która nie uwzględnia strat energii wynikających ze sprawności generatora.

## 5. PODSUMOWANIE

Proporcje między ceną paliwa i ceną wytworzonej energii oraz ceną sprzedaży (rys. 3), wpływają na ekonomicznie opłacalny zakres regulacji mocy generatora. Z przeprowadzonych analiz wynika, że im większy zysk

ekonomiczny osiąga właściciel generatora energii, tym generator dysponuje w pracy mniejszym zakresem regulacji mocy.

Dla właściciela generatora energii funkcje (rys. 3) wynikają z ekonomicznej opłacalności uwzględnienia w cenie wytwarzanej energii kosztów zakupu paliwa i strat energii, uzależnionych od sprawności generatora. W wykonanej analizie wykazano, że minima i maksima techniczne pracy generatorów dotyczące mocy są zależne od cen paliwa zasilającego generator oraz od zysków i ceny sprzedaży wytwarzanej w generatorze energii.

Rozwiązaniem problemu regulacji mocy ograniczonej cenami energii w mikrosystemach elektroenergetycznych jest użycie zasobników energii ładowanych energią pochodzącą z odnawialnych źródeł przy założeniu, że OZE wytwarzają energię tańszą niż modelowy generator i mogą wytwarzać energię dla odbiorów w tych stanach pracy, w których praca generatora zużywającego paliwo jest ekonomicznie nieopłacalna.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Dvořák P. i in., Renewable energy investment and job creation; a cross-sectoral assessment for the Czech Republic with reference to EU benchmarks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017, Vol. 69, s. 360–368.
2. Connolly D., Lund H., Mathiesen B.V., *Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016, Vol. 60, s. 1634–1653.
3. Zuchora K., Miller P., *Wybrane aspekty optymalizacji mikrosystemu elektroenergetycznego wykorzystującego odnawialne źródła energii i technologie kogeneracji*, *Zarządzanie Energią i Telekomunikacja. Materiały i studia ZET* 2016, s. 83–93.
4. Skoczkowski T., Bielecki S., Rafał K., *Rozwój zasobów rozproszonych energii – desygnat pojęcia i problematyka krajowa*, *Przegląd Elektrotechniczny* 2016, nr 92/6, s. 190–195.
5. Kowalak R., *Zmiany poziomów napięć w sieci niskiego napięcia z przyłączonymi źródłami generacji rozproszonej*, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* 2017, nr 53, s. 179–182.
6. Marnay C. i in., *Optimal Technology Selection and Operation of Commercial-Building Microgrids*, *IEEE Transactions on Power Systems* 2008, Vol. 23, No. 3, s. 975–982.
7. Pfeiffer R., Verstege J., *Committing and dispatching power units and storage devices in cogeneration systems with renewable energy sources*, *Fourth International Conference on Power System Control and Management (Conf. Publ. No. 421)*, London, 1996, s. 21–25.

## THE ROLE OF DISTRIBUTED GENERATION SOURCES IN THE ECONOMIC ASPECT OF THE FUEL POWERED GENERATOR

The article addresses the impact of energy prices on the economic range of power regulation in the fuel powered generator. The effect of the sale prices of energy generated in the model on the economic work of the generator is included in the results. The result of the work done in the article are families of price characteristics produced in the model. The article resorts to the use of renewable energy sources as a complement to the generator consuming fossil fuel. The calculated families of energy price characteristics take into account the overall efficiency of the model generator. The use of renewable energy sources in the national power system is considered. The characteristics obtained in the article are based on a simplified model of a thermal engine operating in combined heat and power generation. Energy costs and prices including energy losses and energy costs without losses in the generator are compared. The publication also discusses the role of cogeneration in distributed power generation and considers different possibilities of using cogeneration. In the summary, the article gives a way of calculating the costs of energy production, with allowance for energy losses resulting from total efficiency in the engine.

**Keywords:** cogeneration, distributed power generation, power regulation.