

## EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA I EKONOMICZNA PERSPEKTYWICZNYCH DLA POLSKIEJ ELEKTROENERGETYKI TECHNOLOGII WYTWÓRCZYCH

Bolesław ZAPOROWSKI

Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki  
tel.: 724 246 365 e-mail: boleslaw.zaporowski@put.poznan.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę efektywności energetycznej i ekonomicznej perspektywicznych dla polskiej elektroenergetyki technologii wytwórczych. Analiza została wykonana dla 21 technologii. Jako wielkości charakteryzujące ich efektywność energetyczną zostały wyznaczone sprawność wytwarzania energii elektrycznej, dla elektrowni systemowych, a sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu, sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu oraz oszczędność energii pierwotnej, dla elektrociepłowni dużej, średniej i małej mocy. Dla technologii wykorzystujących paliwa kopalne została wyznaczona również jednostkowa emisja CO<sub>2</sub>. Jako kryterium oceny efektywności ekonomicznej, dla wszystkich analizowanych technologii wytwórczych, zostały wyznaczone jednostkowe, zdyskontowane na 2019 rok, koszty wytwarzania energii elektrycznej.

**Słowa kluczowe:** wytwórcze technologie energetyczne, efektywność energetyczna, efektywność ekonomiczna.

### 1.WPROWADZENIE

Ministerstwo Energii 23 listopada 2018 roku opublikowało dokument Polityka energetyczna Polski do 2040 roku. Aby móc odnieść się do zawartych w tym dokumencie kierunków rozwoju polskiej energetyki do 2040 roku, a szczególnie do prognoz struktury mocy i struktury produkcji energii elektrycznej, zawartych w załączniku 1, jest niezbędna, między innymi, znajomość prognoz jednostkowych kosztów wytwarzania energii elektrycznej [zł/MWh], z uwzględnieniem zawartych w nich kosztów uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> [zł/MgCO<sub>2</sub>], dla perspektywicznych dla polskiej elektroenergetyki technologii wytwórczych. Znajomość jednostkowych kosztów wytwarzania energii elektrycznej jest również konieczna do oceny, przeprowadzanych aukcji na sprzedaż energii elektrycznej, wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii (OZE). Powyższe aktualne, praktyczne problemy polskiej elektroenergetyki były powodem podjęcia i wykonania, przez autora, badań w zakresie efektywności ekonomicznej perspektywicznych dla polskiej elektroenergetyki technologii wytwórczych. Głównym celem wykonanych badań były jednostkowe, zdyskontowane na 2019 rok, koszty wytwarzania energii elektrycznej. Aby móc ten cel osiągnąć było niezbędne wykonanie również badań efektywności energetycznej, perspektywicznych technologii wytwórczych, oraz jednostkowej emisji CO<sub>2</sub> [kgCO<sub>2</sub>/kWh], dla technologii wykorzystujących paliwa kopalne.

### 2.PERSPEKTYWICZNE TECHNOLOGIE WYTWÓRCZE DLA POLSKIEJ ELEKTROENERGETYKI

Biorąc pod uwagę bezpieczeństwo pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) oraz obecną w nim strukturę źródeł wytwórczych [2,3] założono, że dalszy ich rozwój powinien odbywać się w następujących trzech grupach:

- elektrowni systemowych,
- elektrociepłowni dużej i średniej mocy, pracujących w miejskich oraz przemysłowych systemach ciepłowniczych,
- elektrowni i elektrociepłowni małej mocy (źródeł rozproszonych).

Do analizy wybrano 21 technologii wytwarzania energii elektrycznej, przypisanych do wyżej wymienionych trzech grup źródeł wytwórczych. W grupie elektrowni systemowych (jednostek wytwórczych centralnie dysponowanych, JWCD) analizie poddano cztery technologie, wykorzystujące jako paliwo: węgiel kamienny i brunatny, gaz ziemny oraz paliwo jądrowe. Dla elektrowni opalanych węglem kamiennym i brunatnym przyjęto technologię stosowaną w blokach parowych na parametry nadkrytyczne (ultranadkrytyczne), która obecnie jest jedyną w pełni komercyjnie dojrzałą technologią wytwarzania energii elektrycznej z węgla, charakteryzującą się wysoką efektywnością energetyczną i ekonomiczną. Dla elektrowni opalanych gazem ziemnym wybrano technologię stosowaną w blokach gazowo-parowych, z 3-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym i międzystopniowym przegrzewaniem pary, z turbiną gazową czwartej generacji. Dla elektrowni opalanych paliwem jądrowym wybrano technologię, stosowaną w blokach jądrowych z ciśnieniowymi reaktorami wodnymi generacji trzeciej plus.

W grupie elektrociepłowni dużej, średniej i małej mocy do analizy wybrano 12 technologii kogeneracyjnych, które mogą być stosowane w ciepłowniczych blokach o mocy cieplnej w skojarzeniu od kilkudziesięciu kW do kilkuset MW, gdyż pracują one równocześnie w KSE, jako źródła energii elektrycznej, i w systemach ciepłowniczych o różnej mocy, jako źródła ciepła. W grupie wybranych do analizy 12-stu technologii kogeneracyjnych jest: pięć technologii wykorzystujących jako paliwo gaz ziemny, pięć technologii wykorzystujących jako paliwo biomasę lub biogaz i dwie technologie węglowe.

Jako jednostki wytwórcze tylko energii elektrycznej, wykorzystujące OZE, analizie poddano:

- lądową farmę wiatrową z jednostkami wytwórczymi o mocy jednostkowej ok. 5 MW,
- morską farmę wiatrową z jednostkami wytwórczymi o mocy jednostkowej ok. 8 MW,
- elektrownię wodną o mocy ok. 500 kW,
- elektrownię fotowoltaiczną o mocy ok. 8 kW,
- elektrownię fotowoltaiczną o mocy ok. 1 MW.

### 3.EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA TECHNOLOGII WYTWÓRCZYCH

Dla wybranych do analizy perspektywicznych technologii wytwórczych w KSE wyznaczono wielkości charakteryzujące ich efektywność energetyczną. Dla grupy technologii stosowanych w elektrowniach systemowych, jako wielkość charakteryzującą ich efektywność energetyczną, wyznaczono sprawność wytwarzania energii elektrycznej, a dla grupy technologii kogeneracyjnych, jako wielkości charakteryzujące ich efektywność energetyczną, wyznaczono: sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu, sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu oraz oszczędność energii pierwotnej [1,4,5]. Dla

kondensacyjnych i kogeneracyjnych bloków opalanych paliwami kopalnymi wyznaczono również jednostkowe emisje CO<sub>2</sub> (kgCO<sub>2</sub>/kWh). Dla elektrowni wiatrowych, wodnych i fotowoltaicznych nie wyznaczano efektywności energetycznej, gdyż ich koszty paliwowe są zerowe. Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicach 1-3.

Tablica 1. Wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną elektrowni systemowych

Lp.	Technologia	Sprawność brutto [%]	Jednostkowa emisja CO <sub>2</sub> [kg CO <sub>2</sub> /kWh]
1	Blok parowy na parametry nadkrytyczne opalany węglem brunatnym	47	0,868
2	Blok parowy na parametry nadkrytyczne opalany węglem kamiennym	48	0,685
3	Blok gazowo-parowy opalany gazem ziemnym	61	0,324
4	Blok jądrowy z reaktorem PWR III generacji	37	

Tablica 2. Wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną elektrociepłowni dużej i średniej mocy

Lp.	Technologia	Sprawność wytwarzania energii elektrycznej [%]	Sprawność wytwarzania ciepła [%]	Oszczędność energii pierwotnej [%]	Jednostkowa emisja CO <sub>2</sub> [kg CO <sub>2</sub> / kWh]
1	Ciepłowniczy blok parowy na parametry nadkrytyczne opalany węglem kamiennym	38,62	40,8	21,15	0,540
2	Ciepłowniczy blok gazowo-parowy z 3-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym i międzystopniowym przegrzewaniem pary opalany gazem ziemnym	55,61	25,98	16,69	0,274
3	Ciepłowniczy blok gazowo-parowy z 2-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym opalany gazem ziemnym	48,56	32,52	12,41	0,288
4	Ciepłowniczy blok gazowo-parowy 1-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym	43,80	36,25	10,78	0,294
5	Ciepłowniczy blok parowy średniej mocy opalany węglem	30,52	42,36	10,49	0,613
6	Ciepłowniczy blok parowy średniej mocy opalany biomasą	29,28	41,50	27,00	

### 4.EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNA ANALIZOWANYCH TECHNOLOGII WYTWÓRCZYCH

Inwestycyjne perspektywy realizacyjne wybranych do analizy technologii wytwórczych, omówionych w rozdziale 2, zależą przede wszystkim od ich zalet ekonomicznych. Jako kryterium efektywności ekonomicznej poszczególnych technologii wytwórczych wybrano jednostkowe, zdyskontowane na 2019 rok, koszty wytwarzania energii elektrycznej [4]. Pozwalają one porównywać efektywność ekonomiczną różnych technologii wytwarzania energii elektrycznej, stosowanych zarówno w elektrowniach jak i elektrociepłowniach. W jednostkowych kosztach wytwarzania energii elektrycznej w sposób bezpośredni są uwzględnione również takie ważne właściwości

poszczególnych technologii jak efektywność energetyczna oraz wpływ na środowisko (koszty uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>).

Obliczenia jednostkowych, zdyskontowanych na 2019 rok, kosztów wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach i elektrociepłowniach wykonano przyjmując jako dane wejściowe wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną oraz jednostkowe emisje CO<sub>2</sub>, poszczególnych technologii wytwórczych, wyznaczone w rozdziale 3 (tablice 1-3), oraz:

- czas budowy elektrowni jądrowych 6 lat, elektrowni i elektrociepłowni parowych opalanych węglem i biomasą 4 lata, elektrowni i elektrociepłowni gazowo-parowych opalanych gazem ziemnym 2 lata, a źródeł rozproszonych 1 rok,
- cenę sprzedaży ciepła 36,44 zł/GJ,

Tablica 3. Wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną elektrociepłowni małej mocy

L.p.	Technologia	Sprawność wytwarzania energii elektrycznej [%]	Sprawność wytwarzania ciepła [%]	Oszczędność energii pierwotnej [%]
1	Ciepłowniczy blok gazowy z silnikiem gazowym opalany gazem ziemnym	42,50	40,50	14,02
2	Ciepłowniczy blok gazowy z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym opalany gazem ziemnym	32,01	53,80	10,92
3	Ciepłowniczy blok ORC opalany biomasą	14,14	68,36	18,26
4	Ciepłowniczy blok parowy opalany biomasą	18,45	64,00	23,27
5	Ciepłowniczy blok gazowy zintegrowany ze biologiczną konwersją energii biomasy	26,00	31,00	12,92
6	Ciepłowniczy blok gazowy zintegrowany ze zgazowaniem biomasy	30,59	52,53	34,97

- stopę dyskontową: dla elektrowni jądrowych oraz elektrowni i elektrociepłowni parowych opalanych węglem 8%, elektrowni i elektrociepłowni opalanych gazem ziemnym 7,5%, a źródeł rozproszonych 7%.

W jednostkowych kosztach wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach i elektrociepłowniach uwzględniano: koszty kapitałowe, koszty paliwa, koszty remontów, koszty obsługi oraz koszty środowiskowe (koszty uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>). Koszty uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, średnio dla całego okresu eksploatacji elektrowni lub elektrociepłowni, przyjęto w wysokości 126 zł/MgCO<sub>2</sub> (30 Euro/MgCO<sub>2</sub>). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 1.

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Obliczone wartości prognozowanych jednostkowych, zdyskontowanych na 2019 rok, kosztów wytwarzania energii elektrycznej, z uwzględnieniem kosztów uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, dla różnych rodzajów elektrowni systemowych są na tym samym poziomie 350-360 zł/MWh, a mianowicie dla: bloków parowych na parametry nadkrytyczne opalanych węglem brunatnym 356 zł/MWh, bloków parowych na parametry nadkrytyczne opalanych węglem kamiennym 352 zł/MWh, bloków gazowo-parowych opalanych gazem ziemnym 357 zł/MWh, a bloków jądrowych 351 zł/MWh. Istotne różnice występują natomiast w wartościach składowej paliwowej tych kosztów, a mianowicie wynoszą one odpowiednio: 67,3, 96,1, 185,6 i 53,5 zł/MWh, czyli najniższe są dla bloków jądrowych, a najwyższe dla bloków gazowo-parowych opalanych gazem ziemnym.

W grupie bloków kogeneracyjnych dużej i średniej mocy największe zalet ekonomicznych i ekologicznych posiadają bloki gazowo-parowe opalane gazem ziemnym [6], dla których jednostkowe, zdyskontowane na 2019 rok, koszty wytwarzania energii elektrycznej, z kosztami uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> są w zakresie 271-301 zł/MWh.

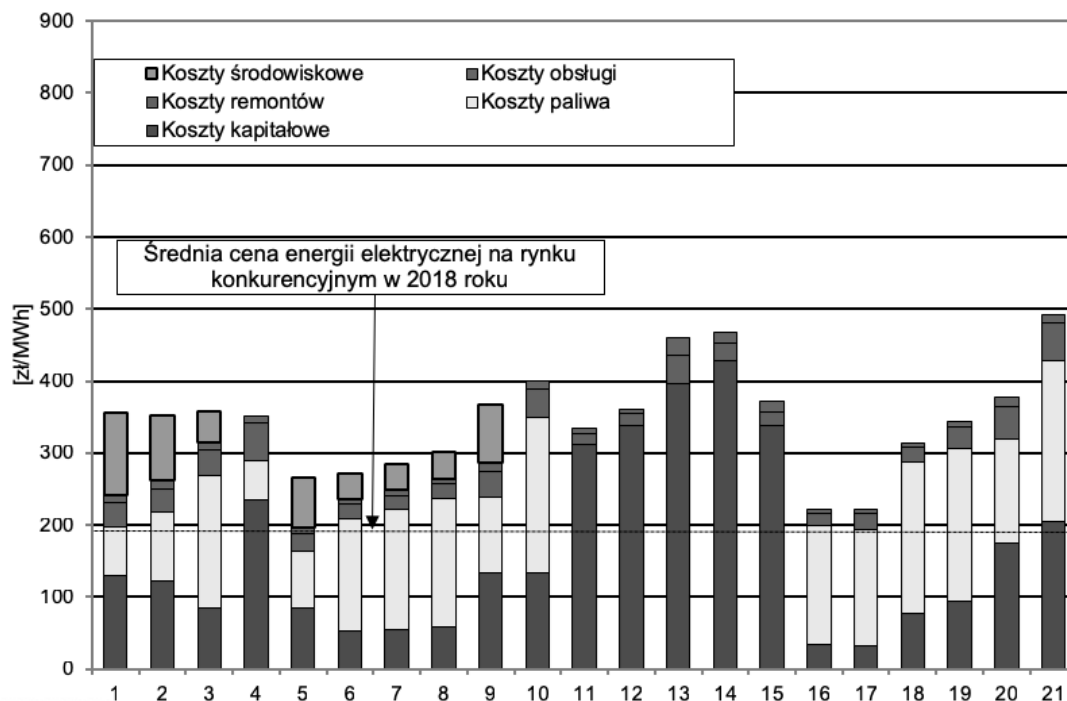
Ich zaletą są poza tym niskie jednostkowe nakłady inwestycyjne, a wadą wysoka wartość jednostkowych kosztów paliwowych w granicach 155,2-177,8 zł/MWh. Pozostałe technologie kogeneracyjne średniej mocy, wykorzystujące jako paliwo węgiel i biomasę mają wysokie koszty wytwarzania energii elektrycznej w granicach 368-401 zł/MWh. Tylko kogeneracyjny blok parowy na parametry nadkrytyczne charakteryzuje się niskimi kosztami wytwarzania (266 zł/MWh), jednak dla bardzo dużej mocy cieplnej w skojarzeniu powyżej 500 MW.

Wśród technologii możliwych do zastosowania w skojarzonych źródłach małej mocy (kogeneracyjnych źródłach rozproszonych) najniższymi kosztami wytwarzania energii elektrycznej, zdyskontowanymi na 2019 rok, charakteryzują się kogeneracyjne źródła małej mocy opalane gazem ziemnym, z silnikami gazowymi i z turbinami gazowymi małej mocy pracującymi w obiegu prostym, o nominalnej mocy w paliwie nie przekraczającej 20 MW, które nie są zobowiązane do zakupu uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>, dla których jednostkowe, zdyskontowane na 2019 rok, koszty wywarzania energii elektrycznej wynoszą ok. 222 zł/MWh.

W dziedzinie wykorzystania biomasy w kogeneracyjnych źródłach rozproszonych sytuacja jest złożona. Dojrzałość komercyjną uzyskały dotychczas wyłącznie technologie wykorzystujące spalanie biomasy w elektrociepłowniach parowych małej mocy i ORC (Organic Rankine Cycle) oraz częściowo technologia wykorzystująca biologiczną konwersję energii chemicznej biomasy. Charakteryzują się one jednak niską efektywnością energetyczną i w związku z tym dość wysokimi kosztami wytwarzania energii elektrycznej (314-493 zł/MWh). Dla uzyskania przez nie względnie wysokiej efektywności ekonomicznej jest konieczne zapewnienie im pracy w trybie pełnej kogeneracji, przy długim czasie wykorzystania zainstalowanej mocy elektrycznej i mocy cieplnej w skojarzeniu (powyżej 7000 godz./rok).

Wśród technologii stosowanych w elektrowniach małej mocy, wykorzystujących OZE, wysoką dojrzałość komercyjną uzyskały lądowe elektrownie wiatrowe, dla których jednostkowe koszty wytwarzania energii elektrycznej wynoszą ok. 335 zł/MWh. Morskie elektrownie wiatrowe znajdują się na początkowym etapie rozwoju. Najwyższymi kosztami wytwarzania energii elektrycznej charakteryzują się obecnie w Polsce mikroelektrownie (do 50 kW) fotowoltaiczne (ok. 460 zł/MWh). Koszty te ulegają znacznemu obniżeniu przy wzroście mocy elektrowni fotowoltaicznej. Opłacalność przedsięwzięć inwestycyjnych związanych z budową elektrowni fotowoltaicznych małej mocy obecnie można uzasadnić, stosując rachunek kosztów unikniętych, w przypadku gdy wytwarzana w nich energia elektryczna jest zużywana przez producenta (prosumenta).

Przeprowadzone badania jednostkowych kosztów wytwarzania energii elektrycznej pozwalają na stwierdzenie, że w horyzoncie długoterminowym jest uzasadnione w Polsce: wdrożenie elektrowni jądrowych, w miejsce wycofywanych z ruchu kondensacyjnych bloków parowych opalanych węglem, dla zapewnienia bezpieczeństwa pracy KSE, rozwój technologii kogeneracyjnych wykorzystujących jako paliwo gaz ziemny oraz rozwój technologii wykorzystujących OZE, dla umożliwienia wypełnienia międzynarodowych zobowiązań Polski w zakresie redukcji emisji CO<sub>2</sub>, w proporcjach wynikających między innymi z kryterium ekonomicznego.



Rys. 1. Jednostkowe, zdyskontowane na 2019 rok, koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach systemowych, elektrociepłowniach dużej i średniej mocy oraz elektrowniach i elektrociepłowniach małej mocy [zł/MWh] dla: 1) bloku parowego na parametry nadkrytyczne opalanego węglem brunatnym, 2) bloku parowego na parametry nadkrytyczne opalanego węglem kamiennym, 3) bloku gazowo-parowego opalanego gazem ziemnym 4) bloku jądrowego z reaktorem PWR, 5) ciepłowniczego bloku parowego na parametry nadkrytyczne opalanego węglem kamiennym, 6) ciepłowniczego bloku gazowo-parowego z 3-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym i międzystopniowym przegrzewaniem pary opalanego gazem ziemnym 7) ciepłowniczego bloku gazowo-parowego z 2-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym opalanego gazem ziemnym 8) ciepłowniczego bloku gazowo-parowego z 1-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym opalanego gazem ziemnym, 9) ciepłowniczego bloku parowego średniej mocy opalanego węglem kamiennym, 10) ciepłowniczego bloku parowego średniej mocy opalanego biomasą, 11) lądowej elektrowni wiatrowej, 12) morskiej elektrowni wiatrowej 13) elektrowni wodnej małej mocy, 14) elektrowni fotowoltaicznej o mocy ok. 10 kW, 15) elektrowni fotowoltaicznej o mocy ok. 1 MW 16) ciepłowniczego bloku gazowego z silnikiem gazowym opalanego gazem ziemnym, 17) ciepłowniczego bloku gazowego z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym opalanego gazem ziemnym), 18) ciepłowniczego bloku ORC opalanego biomasą, 19) ciepłowniczego bloku parowego małej mocy opalanego biomasą, 20) ciepłowniczego bloku zintegrowanego z biologiczną konwersją biomasy i 21) ciepłowniczego bloku zintegrowanego ze zgazowaniem biomasy, z uwzględnieniem kosztów uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> (126 zł/MgCO<sub>2</sub>)

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Directive 2012/27/UE of the European Parliament and Council of 25 October 2012 on energy efficiency. Official Journal of the European Union, 2012, L 315/1 – L315/56.
2. Informacja statystyczna o energii elektrycznej. Agencja Rynku Energii S.A., Nr 12, 2018, Warszawa, 2019.
3. Statystyka Elektroenergetyki Polskiej 2017. Agencja Rynku Energii S.A., Warszawa, 2018.
4. Zaporowski B.: Energy Effectiveness and Economic Performance of Gas and Gas-Steam Combined Heat and Power Plant Fired with Natural Gas. Acta Energetica, Nr 1/26, 2016, 152-157.
5. Zaporowski B.: Nowoczesne technologie skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Polityka Energetyczna, Tom 20, Zeszyt 3, 2017, 41-53.
6. Zaporowski B.: Perspektywy rozwoju wytwarzania energii elektrycznej z gazu ziemnego w Polsce. Rynek Energii, Nr 5(138), 2018, 2-8.

## ENERGY AND ECONOMIC EFFECTIVENESS OF PROSPECTIVE GENERATION TECHNOLOGIES FOR POLISH ELECTRIC POWER INDUSTRY

The paper presents the analysis of energy and economic effectiveness of prospective generation technologies for Polish electric power industry. The analysis has been done for 21 electricity generation technologies applied in system power plants, large and medium capacity combined and heat power (CHP) plants, and small capacity power plants, and small capacity CHP plants. The following quantities to characterize their energy effectiveness have been determined. For the system power plants, it is efficiency of electric energy generation. For large, medium and small capacity CHP plants, it is efficiency of combined electric energy generation, efficiency of combined heat generation, and primary energy savings. Unitary CO<sub>2</sub> emission has also been determined for the technologies using fossil fuels. Unitary costs of electric energy generation, as discounted for 2019, have been determined for all the analyzed generation technologies as a criterion of economic effectiveness evaluation.

**Keywords:** energy generation technology, energy effectiveness, economic effectiveness.