

**Zeszyty Naukowe**Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

rok 2018, nr 104, s. 5–18

DOI: 10.24425/124364

Bolesław ZAPOROWSKI¹

Kierunki zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę kierunków zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych energii elektrycznej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE). Sformułowano kryteria zrównoważonego rozwoju systemu elektroenergetycznego. Opracowano bilans mocy jednostek wytwórczych centralnie dysponowanych (JWCD), wymagany dla bezpiecznej pracy KSE do 2035 roku. Zdefiniowano 19 perspektywicznych technologii wytwarzania energii elektrycznej, podzielonych na trzy następujące grupy: elektrownie systemowe, elektrociepłownie dużej i średniej mocy oraz elektrownie i elektrociepłownie małej mocy (źródła rozproszone). Wyznaczono wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną wybranych do analizy technologii wytwórczych oraz ich emisyjność CO₂. Dla poszczególnych technologii wyznaczono również jednostkowe, zdyskontowane na 2018 rok, koszty wytwarzania energii elektrycznej, z uwzględnieniem kosztów uprawnień do emisji CO₂. Opracowano mapę drogową zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych w KSE w latach 2020–2035. Wyniki obliczeń i analiz przedstawiono w tabelach i na rysunku.

Słowa kluczowe: zrównoważony rozwój, Krajowy System Elektroenergetyczny, elektrownia, elektrociepłownia, efektywność energetyczna, efektywność ekonomiczna

Directions of sustainable development of electricity generation sources in National Power System

Abstract: The paper presents an analysis of the sustainable development of electricity generation sources in the National Power System (NPS). The criteria to be met by sustainable power systems were determined. The paper delineates the power balance of centrally dispatched power generation units (CDPGU), which is required for the secure work of the NPS until 2035. 19 prospective electricity generation technologies were defined. They were divided into the following three groups: system power plants, large and medium combined heat and power (CHP) plants, as well as small power plants and CHP plants (distributed sources). The quantities to characterize

¹ Politechnika Poznańska Instytut Elektroenergetyki, Poznań; e-mail: boleslaw.zaporowski@put.poznan.pl

the energy effectiveness and CO₂ emission of the energy generation technologies analyzed were determined. The unit electricity generation costs, discounted for 2018, including the costs of CO₂ emission allowance, were determined for the particular technologies. The roadmap of the sustainable development of the generation sources in the NPS between 2020 and 2035 was proposed. The results of the calculations and analyses were presented in tables and figure

Keywords: sustainable development, National Power System (NPS), power plant, combined heat and power (CHP) plant, energy effectiveness, economic effectiveness

Wprowadzenie

Porozumienie klimatyczne, przyjęte na 21 Konferencji Stron Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu w Paryżu (12.12.2015 r.), oraz decyzja Rady Europejskiej z października 2014 r. w sprawie poziomu redukcji emisji CO₂ w państwach członkowskich Unii Europejskiej do 2030 roku, stawiają przed polską energetyką poważne wyzwanie wdrożenia w pierwszej połowie naszego wieku energetycznych technologii wytwórczych, które doprowadzą do istotnej redukcji emisji CO₂. Polska, która podpisała Porozumienie paryskie, w siedzibie ONZ w Nowym Jorku w dniu 27.04.2016 r., jest zobowiązana do realizacji zarówno zobowiązań wynikających z tego Porozumienia, jak i ustaleń Rady Europejskiej z października 2014 r. Najważniejsze zadania, wynikające z tych porozumień, dotyczą sektora wytwórczego elektroenergetyki.

W artykule podjęto próbę opracowania mapy drogowej rozwoju sektora wytwórczego polskiej elektroenergetyki, uwzględniającej rozwiązanie problemu redukcji emisji CO₂. Jako punkt wyjścia, przy podjęciu próby rozwiązania tego problemu, przyjęto art. 5 Konstytucji Rzeczypospolitej Polskiej, który zobowiązuje nasz kraj, a w tym podmioty gospodarcze, do kierowania się w ich działalności zasadą zrównoważonego rozwoju. Zasadę tę, w odniesieniu do zrównoważonego rozwoju systemu elektroenergetycznego, można streścić w stwierdzeniu, że powinien on zapewniać ekonomiczny rozwój kraju, chroniąc równowagę ekosystemu. Biorąc to pod uwagę, zdaniem autora, zrównoważony rozwój sektora wytwórczego elektroenergetyki powinien spełniać następujące cztery kryteria:

- 1) zapewniać bezpieczną pracę Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE),
- 2) zapewniać dostępność taniej (wytwarzanej przy możliwie niskich kosztach) energii elektrycznej, sprzyjającej ekonomicznemu rozwojowi kraju,
- 3) zapewniać optymalne wykorzystanie zasobów energii pierwotnej,
- 4) zapewniać ochronę środowiska i przeciwdziałanie zmianom klimatycznym, przez minimalizację, przy produkcji energii elektrycznej, jednostkowej emisji CO₂ (kg CO₂/kWh). Chodzi o znalezienie równowagi między celami ochrony środowiska, kosztami wytwarzania energii elektrycznej i bezpieczeństwem jej dostaw.

1. Stan sektora wytwórczego energii elektrycznej w Polsce

Moc zainstalowana źródeł wytwórczych w KSE na 31.12.2017 r. wynosiła 42 346,8 MW. Źródła wytwórcze pracujące w KSE są bardzo zróżnicowane zarówno pod względem

TABELA 1. Moc zainstalowana elektrowni w Polsce, stan na 31.12.2017 r.

TABLE 1. Capacity of power plants in Poland on 12.31.2017

| Rodzaj źródła wytwórczego | Liczba bloków | Moc zainstalowana [MW] |
|---|---------------|------------------------|
| Bloki parowe na parametry nadkrytyczne opalane węglem kamiennym | 2 | 1 571,8 |
| Bloki parowe na parametry nadkrytyczne opalane węglem brunatnym | 2 | 1322,0 |
| Bloki parowe na parametry podkrytyczne opalane węglem kamiennym | 64 | 13 964,0 |
| Bloki parowe na parametry podkrytyczne opalane węglem brunatnym | 27 | 7 325,8 |
| Bloki parowe na parametry podkrytyczne opalane gazem koksowniczym | 3 | 165,0 |
| Bloki parowe na parametry podkrytyczne opalane biomasą | 4 | 385,0 |
| Elektrownie wodne przepływowe | > 440 | 983,0 |
| Elektrownie wodne szczytowo-pompowe | 9 | 1 337,0 |
| Elektrownie wiatrowe | > 2500 | 5 829,8 |
| Elektrownie fotowoltaiczne | | 326,1 |
| Razem | | 33 209,5 |

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Statystyka... 2017).

TABELA 2. Elektryczna moc zainstalowana elektrociepłowni w Polsce, stan na 31.12.2017 r.

TABLE 2. Electrical capacity of CHP plants in Poland on 12.31.2017

| Rodzaj źródła wytwórczego | Liczba bloków | Elektryczna moc zainstalowana [MW] |
|---|---------------|------------------------------------|
| Ciepłownicze bloki parowe opalane węglem kamiennym w elektrociepłowniach zawodowych | 154 | 5 115,4 |
| Ciepłownicze bloki parowe opalane węglem kamiennym w elektrociepłowniach przemysłowych | 100 | 1 658,3 |
| Ciepłownicze bloki parowe średniej mocy opalane biomasą | 5 | 251,5 |
| Ciepłownicze bloki gazowo-parowe opalane gazem ziemnym | 10 | 1 476,6 |
| Ciepłownicze bloki gazowe z turbinami gazowymi pracującymi w obiegu prostym opalane gazem ziemnym | 16 | 193,7 |
| Ciepłownicze bloki gazowe z silnikami gazowymi opalane gazem ziemnym | 55 | 124,7 |
| Ciepłownicze bloki gazowe z silnikami gazowymi opalane gazem z odmetanowania kopalń | 35 | 78,4 |
| Ciepłownicze bloki gazowe z silnikami gazowymi opalane biogazem | 305 | 238,4 |
| Ciepłownicze bloki parowe małej mocy opalane biomasą | 5 | 21,4 |
| Ciepłownicze bloki ORC (Organic Rankine Cycle) opalane biomasą | 4 | 5,5 |
| Razem | 687 | 9 129,5 |

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Statystyka... 2017).

efektywności energetycznej, stanu technicznego, jak i elastyczności na zmiany obciążenia. Zestawienie mocy zainstalowanej źródeł wytwórczych w KSE na 31.12.2017 r. podano w tabelach 1 i 2 (*Statystyka... 2017*).

Znaczna liczba jednostek wytwórczych, zarówno w elektrowniach, jak i w elektrociepłowniach, o łącznej mocy powyżej 9 GW, pracuje w KSE już ponad 40 lat, a czas ich pracy przekroczył 200 tys. godzin. Dlatego w najbliższych latach, z powodu konieczności wypełnienia konkluzji BAT (*Best Available Techniques*), należy spodziewać się wycofywania znacznej ich liczby z ruchu lub odstawiania do modernizacji (*Prognoza... 2016*).

Produkcja energii elektrycznej w 2017 roku w Polsce wyniosła 170,1 TWh, w tym w elektrowniach i elektrociepłowniach opalanych: węglem kamiennym i brunatnym – 80,45%, gazem ziemnym – 5,46%, biomasą i biogazem – 3,73% (w tym we współspalaniu z węglem – 1,07%), w elektrowniach wodnych przepływowych – 1,51%, w elektrowniach wiatrowych – 8,76% i w elektrowniach fotowoltaicznych – 0,09% (*Informacja... 2017*).

2. Zrównoważony rozwój źródeł wytwórczych energii elektrycznej w KSE

2.1. Bezpieczeństwo pracy KSE

Kryteria, jakie musi spełniać zrównoważony rozwój źródeł wytwórczych w KSE, zostały sformułowane we wprowadzeniu. Podstawowym celem zrównoważonego rozwoju systemu elektroenergetycznego jest zapewnienie bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej odbiorcom, przy zachowaniu ochrony środowiska (*Directive... 2006*). Nadrzędnym kryterium zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych w KSE jest zatem zapewnienie bezpiecznej pracy KSE. Podstawą bezpiecznej pracy KSE jest przede wszystkim zapewnienie równowagi między zapotrzebowaniem na energię elektryczną a dostępną mocą źródeł wytwórczych (*Machowski... 2007*). Podstawowe znaczenie dla zapewnienia stabilnej i bezpiecznej pracy KSE ma moc i stan techniczny jednostek wytwórczych centralnie dysponowanych (JWCD). Ich moc zainstalowana w KSE obecnie wynosi około 26,1 GW. Tworzą je: przede wszystkim kondensacyjne bloki parowe opalane węglem kamiennym i brunatnym, o mocy jednostkowej powyżej 120 MW, przyłączone głównie do sieci przesyłowej 440 i 220 kV, oraz częściowo do sieci dystrybucyjnej 110 kV, bloki szczytowo-pompowych elektrowni wodnych, część ciepłowniczych bloków parowych opalanych węglem oraz nowy blok gazowo-parowy o mocy 485 MW, opalany gazem ziemnym. Wymagana moc JWCD w KSE zależy od: zapotrzebowania na moc w szczycie zimowym i szczycie letnim KSE, średnich rocznych zapotrzebowań na moc oraz mocy dyspozycyjnej rozproszonych źródeł wytwórczych (nJWCD). Prognozowane wartości: zużycia energii elektrycznej brutto, obciążenia KSE w szczycie zimowym i szczycie letnim oraz mocy JWCD i mocy źródeł rozproszonych (nJWCD), narastająco na lata 2020, 2025, 2030 i 2035, przedstawiono w tabeli 3. Prognozowane wartości zużycia brutto energii elektrycznej wyznaczono na podstawie analizy rocznych przyrostów tego zużycia w KSE w latach 2000–2017, przyjmując wskaźnik rocznego przyrostu, na lata 2020–2035, w wysokości 1,27%. Prognozowane zapotrzebowanie na moc

szczytową dla szczytu zimowego i szczytu letniego KSE oraz planowane wycofania z ruchu JWCD przyjęto na podstawie opracowania PSE SA (Proгноza... 2016).

2.2. Efektywność energetyczna i emisyjność technologii wytwórczych energii elektrycznej

Biorąc pod uwagę sformułowane kryteria zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych KSE oraz obecną strukturę tych źródeł założono, że dalszy ich rozwój powinien odbywać się w następujących trzech grupach:

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

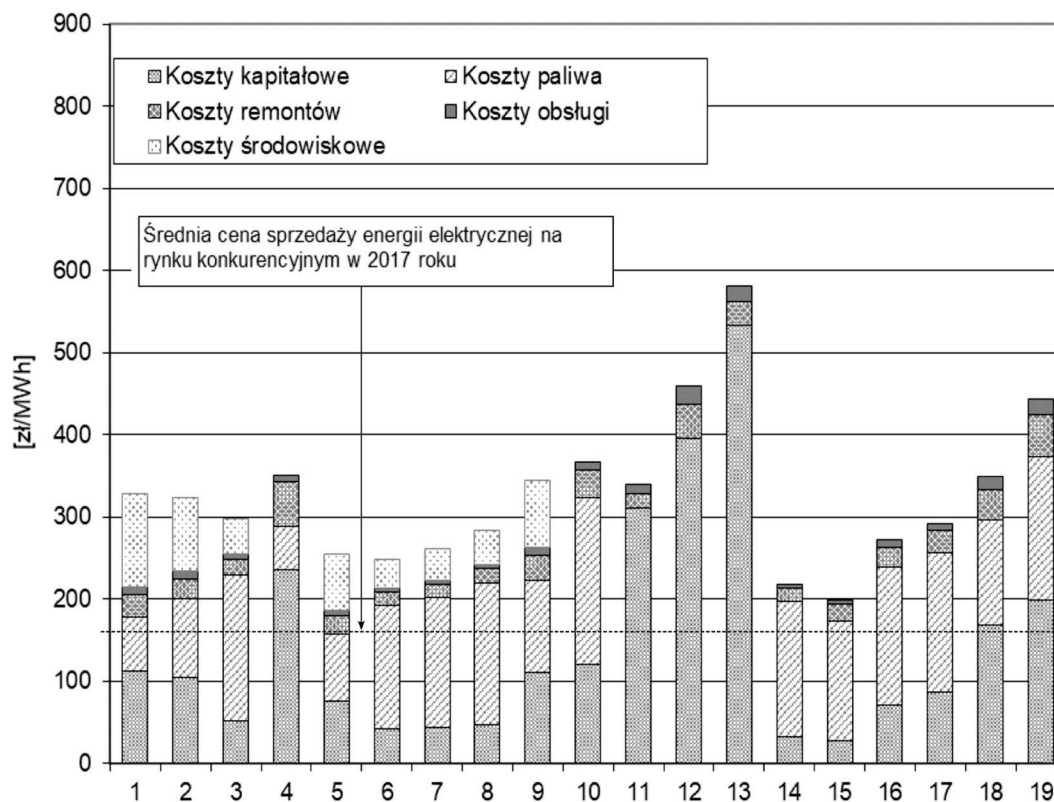
Do analizy wybrano 19 technologii wytwarzania energii elektrycznej, przypisanych do wyżej wymienionych trzech grup źródeł wytwórczych. Są one wymienione w podpisie rysunku 1. W grupie elektrowni systemowych (JWCD) analizie poddano cztery technologie, wymienione w tabeli 5, wykorzystujące jako paliwo węgiel kamienny i brunatny, paliwo jądrowe oraz gaz ziemny. Dla elektrowni opalanych węglem przyjęto technologię stosowaną w blokach parowych na parametry nadkrytyczne (ultranadkrytyczne), która obecnie jest jedyną w pełni komercyjnie dojrzałą technologią wytwarzania energii elektrycznej z węgla,

TABELA 3. Prognoza bilansu mocy w KSE w latach 2020–2035

TABLE 3. Predicted capacity balance of the National Power System (NPS): 2020–2035

| Wielkość | Lata | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 |
| Prognoza zużycia brutto energii elektrycznej [TWh] | 179,1 | 190,7 | 203,1 | 216,4 |
| Prognozowane zapotrzebowanie na moc szczytową dla szczytu zimowego [GW] | 28,0 | 30,3 | 32,7 | 35,2 |
| Prognozowane zapotrzebowanie na moc szczytową dla szczytu letniego [GW] | 24,8 | 27,5 | 30,5 | 32,7 |
| Planowane wycofania z ruchu JWCD [GW] | 2,2 | 2,6 | 5,1 | 13,3 |
| Planowana budowa nowych JWCD (parowych, opalanych węglem i gazowo-parowych, opalanych gazem ziemnym) [GW] | 3,8 | 5,8 | 5,8 | 5,8 |
| Prognozowana moc JWCD po wycofaniach i zbudowaniu planowanych nowych JWCD [GW] | 27,7 | 29,3 | 26,8 | 18,6 |
| Prognozowana moc źródeł rozproszonych (nJWCD) [GW] | 15,9 | 20,2 | 24,6 | 30,3 |
| Wymagane nowe moce JWCD [GW] | | | 3,0 | 6,0 |

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Proгноza... 2016).



Rys. 1. Jednostkowe, zdyskontowane na 2018 rok, koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach systemowych, elektrociepłowniach dużej i średniej mocy oraz elektrowniach i elektrociepłowniach małej mocy [zł/MWh]

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) elektrowni wiatrowej, 12) elektrowni wodnej małej mocy, 13) elektrowni fotowoltaicznej 14) ciepłowniczego bloku gazowego z silnikiem gazowym opalanego gazem ziemnym, 15) ciepłowniczego bloku gazowego z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym opalanego gazem ziemnym), 16) ciepłowniczego bloku ORC opalanego biomasą, 17) ciepłowniczego bloku parowego małej mocy opalanego biomasą, 18) ciepłowniczego bloku zintegrowanego z biologiczną konwersją biomasy i 19) ciepłowniczego bloku zintegrowanego ze zgasowaniem biomasy, z uwzględnieniem opłaty za uprawnienia do emisji CO₂ (126 zł/MgCO₂)

Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Unit electricity generation costs, discounted in 2018, in the system power plants, in large and medium scale CHP plants and in small scale power plant and CHP plants [PLN/MWh]

charakteryzującą się wysoką efektywnością energetyczną i ekonomiczną. Dla elektrowni opalanych paliwem jądrowym wybrano technologię trzeciej generacji, stosowaną w blokach jądrowych z ciśnieniowymi reaktorami wodnymi. Dla elektrowni opalanych gazem ziemnym wybrano technologię stosowaną w blokach gazowo-parowych z turbinami gazowymi czwartej generacji. Dla tej grupy technologii wyznaczono sprawność wytwarzania energii elektrycznej, jako wielkość charakteryzującą ich efektywność energetyczną oraz jednostkową emisyjność CO₂ (kg CO₂/kWh). Wyniki obliczeń przedstawiono tabeli 4.

TABELA 4. Wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną elektrowni systemowych

TABLE 4. Quantities characterizing the energy effectiveness of system power plants

| Lp. | Technologia | Sprawność brutto [%] | Jednostkowa emisja CO ₂ [kg CO ₂ /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 | 0,329 |
| 4 | Blok jądrowy z reaktorem PWR III generacji | 37 | |

Źródło: opracowanie własne.

W grupie elektrociepłowni dużej, średniej i małej mocy do analizy wybrano 12 technologii kogeneracyjnych wymienionych w tabelach 5 i 6, które mogą być stosowane w ciepłowniczych blokach o mocy cieplnej w skojarzeniu od kilkudziesięciu kW do kilkuset MW, gdyż pracują równocześnie w KSE, jako źródła energii elektrycznej, i w systemach ciepłowniczych o bardzo różnej mocy, jako źródła ciepła. Dla tych technologii, jako wielkości charakteryzujące ich efektywność energetyczną, wyznaczono: sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu, sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu oraz oszczędność energii pierwotnej (Directive... 2012) a także jednostkową emisyjność CO₂ (kg CO₂/kWh). Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelach 5 i 6.

Dla elektrowni wiatrowych, wodnych małej mocy i fotowoltaicznych nie wyznaczano efektywności energetycznej, gdyż ich koszty paliwowe są zerowe.

2.3. Efektywność ekonomiczna analizowanych technologii wytwórczych

Inwestycyjne perspektywy realizacyjne wybranych do analizy technologii, omówionych w podrozdziale 2.2, zależą przede wszystkim od ich zalet ekonomicznych. Jako kryterium

TABELA 5. Wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną elektrociepłowni dużej i średniej mocy

TABLE 5. Quantities characterizing the energy effectiveness of large and medium scale CHP plants

| Lp. | Technologia | Sprawność wytwarzania energii elektrycznej [%] | Sprawność wytwarzania ciepła [%] | Oszczędność energii pierwotnej [%] | Jednostkowa emisja CO ₂ [kg CO ₂ /kWh] |
|-----|--|--|----------------------------------|------------------------------------|--|
| 1 | Ciepłowniczy blok parowy na parametry nadkrytyczne opalany węglem kamiennym | 38,62 | 40,8 | 25,45 | 0,525 |
| 2 | Ciepłowniczy blok gazowo-parowy z 3-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym i międzystopniowym przegrzewaniem pary opalany gazem ziemnym | 55,61 | 24,98 | 16,97 | 0,276 |
| 3 | Ciepłowniczy blok gazowo-parowy z 2-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym opalany gazem ziemnym | 49,01 | 28,52 | 11,79 | 0,290 |
| 4 | Ciepłowniczy blok gazowo-parowy 1-ciśnieniowym kotłem odzysknicowym | 43,80 | 34,65 | 10,31 | 0,295 |
| 5 | Ciepłowniczy blok parowy średniej mocy opalany węglem | 30,52 | 40,36 | 13,21 | 0,596 |
| 6 | Ciepłowniczy blok parowy średniej mocy opalany biomasą | 29,28 | 41,50 | 27,00 | |

Źródło: opracowanie własne.

TABELA 6. Wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną elektrociepłowni małej mocy

TABLE 6. Quantities characterizing the energy effectiveness of small scale CHP plants

| Lp. | 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 | 20,60 |
| 2 | Ciepłowniczy blok gazowy z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym opalany gazem ziemnym | 32,01 | 53,80 | 17,18 |
| 3 | Ciepłowniczy blok ORC opalany biomasą | 14,14 | 68,36 | 18,25 |
| 4 | Ciepłowniczy blok parowy opalany biomasą | 18,45 | 64,00 | 23,27 |
| 5 | Ciepłowniczy blok gazowy zintegrowany z biologiczną konwersją energii biomasy | 26,00 | 31,00 | 12,92 |
| 6 | Ciepłowniczy blok gazowy zintegrowany ze zgazowaniem biomasy | 30,59 | 52,53 | 34,97 |

Źródło: opracowanie własne.

efektywności ekonomicznej poszczególnych technologii wytwórczych wybrano jednostkowe, zdyskontowane na 2018 rok, koszty wytwarzania energii elektrycznej. 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 CO₂). Przyjęto bowiem założenie, że wykonana analiza powinna być analizą porównawczą, to znaczy pozwalającą na wykonanie porównania efektywności ekonomicznej wszystkich dziesięciu, wybranych do badań i scharakteryzowanych w podrozdziale 2.2, technologii wytwórczych.

Obliczenia jednostkowych, zdyskontowanych na rok 2018, kosztów wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach i elektrociepłowniach wykonano, przyjmując jako dane wejściowe wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną oraz jednostkowe emisje CO₂ poszczególnych technologii wytwórczych, wyznaczone w rozdziale 2 (tab. 4–6) 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 – 38,69 zł/GJ,
- 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 CO₂). Przyjęto założenie, że w całym okresie eksploatacji elektrowni lub elektrociepłowni będą one średnio w wysokości 126 zł/MgCO₂ (30 Euro/MgCO₂). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 1.

3. Mapa drogowa zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych w KSE

Mapa drogowa zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych w KSE została opracowana na podstawie wykonanych w artykule obliczeń i analiz, których wyniki są przedstawione w tabelach 3–6 i na rysunku 1 w rozdziale 2, oraz przyjęciu następujących założeń: (1) do mocy JWCD, wymaganej dla bezpiecznej pracy KSE, zostały zaliczone moce bloków energetycznych elektrowni systemowych, opalanych węglem i paliwem jądrowym, moce gazowo-parowych bloków kogeneracyjnych z turbinami parowymi upustowo-kondensacyjnymi, o mocach powyżej 200 MW, opalane gazem ziemnym, moce parowych bloków kogeneracyjnych z turbinami upustowo-kondensacyjnymi, o mocach powyżej 100 MW, opalane węglem, oraz moce szczytowo-pompowych elektrowni wodnych, (2) jednostki wytwórcze małej mocy (źródła rozproszone), ze względu na wymaganą wysoką efektywność energetyczną (optymalne wykorzystanie energii pierwotnej), z wyjątkiem elektrowni wiatrowych, fotowoltaicznych i wodnych, powinny być budowane wyłącznie jako jednostki kogeneracyjne i (3) moc elektrowni i elektrociepłowni wykorzystujących odnawialne źródła energii

(OZE) jest pochodną zobowiązań Polski, wynikających z Porozumienia klimatycznego i decyzji Rady Europejskiej. Wyniki obliczeń i analiz zostały przedstawione w tabeli 7.

TABELA 7. Mapa drogowa zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych w KSE

TABLE 7. Roadmap of the sustainable development of the electricity generation sources in NPS

| Rodzaj paliwa (energii odnawialnej) | Moc elektrowni i elektrociepłowni oraz produkcja energii elektrycznej i jej struktura paliwowa w roku | | | | | | | | |
|--|---|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| | 2020 | | | 2030 | | | 2035 | | |
| | GW | TWh | % | GW | TWh | % | GW | TWh | % |
| Węgiel kamienny i brunatny | 30,7 | 139,6 | 78,0 | 28,3 | 132,1 | 65,3 | 21,5 | 118,1 | 54,9 |
| Paliwo jądrowe | | | | 1,5 | 12,0 | 5,9 | 3,0 | 24,0 | 11,1 |
| Gaz ziemny | 2,8 | 12,6 | 7,0 | 3,8 | 16,3 | 8,0 | 4,5 | 19,8 | 9,2 |
| Biomasa i biogaz | 1,3 | 7,3 | 4,1 | 3,2 | 13,5 | 6,7 | 4,0 | 17,3 | 8,0 |
| Woda | 2,3 | 2,5 | 1,4 | 2,4 | 2,6 | 1,3 | 2,5 | 2,7 | 1,3 |
| Wiatr | 6,8 | 15,9 | 8,9 | 9,8 | 22,4 | 11,1 | 12,2 | 27,9 | 13,0 |
| Słońce | 1,1 | 1,0 | 0,6 | 3,6 | 3,5 | 1,7 | 5,6 | 5,4 | 2,5 |
| Razem | 45,0 | 178,9 | 100,0 | 52,6 | 202,4 | 100,0 | 53,3 | 215,2 | 100,0 |

Źródło: opracowanie własne.

Wnioski

Wyniki wykonanych obliczeń i analiz, przedstawione w rozdziale 2 i 3, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków dotyczących kierunków zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych w KSE, w latach 2020–2035:

1. Zobowiązania naszego kraju w ramach Porozumienia klimatycznego (paryskiego) z 2015 r. oraz w ramach decyzji Rady Europejskiej z października 2014 r. stanowią poważne wyzwanie dla polskiej elektroenergetyki w zakresie technologicznej przebudowy źródeł wytwórczych w KSE. Przebudowa ta powinna doprowadzić do takiej zmiany struktury wykorzystywanej energii pierwotnej do produkcji energii elektrycznej, aby w 2030 roku było możliwe osiągnięcie redukcji emisji CO₂ o 40%, w odniesieniu do emisji w 1990 r. (Ruszel... 2017). Oznacza to, że produkcja energii elektrycznej w Polsce w 2030 roku powinna w około 35% odbywać się w źródłach bezemisyjnych, przy jednoczesnym wzroście do około 10% udziału gazu ziemnego w tej produkcji.

- Tak dużego wzrostu udziału źródeł bezemisyjnych w produkcji energii elektrycznej nie będą w stanie zapewnić jednostki wytwórcze wykorzystujące OZE, przede wszystkim ze względu na bezpieczeństwo pracy KSE.
2. Nadrzędnym kryterium kierunku technologicznej przebudowy źródeł wytwórczych w KSE musi być zapewnienie bezpieczeństwa jego pracy. Dlatego najważniejszym wyzwaniem koniecznej przebudowy technologicznej źródeł wytwórczych w KSE jest paliwowa przebudowa JWCD, które w decydującym stopniu odpowiadają za bezpieczeństwo pracy KSE. Obecnie w całkowitej mocy JWCD 91,7% stanowi moc bloków parowych opalanych węglem. Planowane wycofania z ruchu JWCD opalanych węglem oraz prognozowany wzrost obciążenia KSE, mimo obecnie planowanego wprowadzenia do KSE nowych JWCD opalanych węglem i kogeneracyjnych bloków gazowo-parowych opalanych gazem ziemnym (tab. 3), spowodują, przed 2030 rokiem, deficyt mocy JWCD i potrzebę zbudowania dodatkowo nowych JWCD (tab. 3), w postaci bezemisyjnych bloków jądrowych oraz, uzupełniająco-niskoemisyjnych, kogeneracyjnych bloków gazowo-parowych, opalanych gazem ziemnym. Ze względów czasowych do 2030 roku może być zbudowany tylko jeden blok jądrowy o mocy około 1,5 GW, a do roku 2035 – bloki jądrowe o łącznej mocy około 3 GW. Należy podkreślić, że jednostkowe koszty wytwarzania energii elektrycznej, zdyskontowane na 2018 rok, w elektrowniach jądrowych, są porównywalne z kosztami wytwarzania energii elektrycznej w źródłach wykorzystujących OZE, a w przypadku elektrowni fotowoltaicznych – znacznie niższe od nich (rys. 1). Jednak skala finansowa przedsięwzięcia inwestycyjnego związanego z budową elektrowni jądrowej wymaga zaangażowania państwa w postaci rządowych gwarancji cen zakupu energii elektrycznej w wysokości około 350 zł/MWh, szczególnie w pierwszym okresie eksploatacji elektrowni, gdy koszty wytwarzania energii elektrycznej mogą być w tym czasie jeszcze wyższe od ceny jej sprzedaży na rynku konkurencyjnym.
 3. W Polsce w szerokim zakresie powinny być rozwijane technologie skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, gdyż jest to skuteczny sposób na uzyskanie oszczędności energii pierwotnej i obniżenie emisji CO₂ oraz obniżenie kosztów wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Wykonana w artykule analiza efektywności energetycznej i ekonomicznej dwunastu technologii kogeneracyjnych, które mogą być stosowane w źródłach o mocach cieplnych w skojarzeniu od kilkudziesięciu kW do kilkuset MW wskazuje, że najwięcej zalet energetycznych, ekonomicznych i ekologicznych posiadają elektrociepłownie gazowe i gazowo-parowe opalane gazem ziemnym. Jest również energetycznie, ekonomicznie i ekologicznie uzasadnione dostosowywanie pracujących już oraz budowanych bloków parowych na parametry nadkrytyczne, opalanych węglem, do pracy w skojarzeniu przez dobudowanie w nich członu ciepłowniczego. Projekt taki jest przewidywany do realizacji w najbliższym czasie w bloku parowym na parametry nadkrytyczne o mocy 460 MW w Elektrowni Łagisza.
 4. Wśród technologii możliwych do zastosowania w skojarzonych źródłach małej mocy (kogeneracyjnych źródłach rozproszonych) najniższymi kosztami wytwarzania energii elektrycznej charakteryzują się kogeneracyjne źródła małej mocy opalane gazem ziemnym, z silnikami gazowymi i z turbinami gazowymi małej mocy pracującymi w obiegu prostym.

5. Koszty wytwarzania energii elektrycznej w źródłach rozproszonych, wykorzystujących odnawialne źródła energii, są wysokie. Istnienie zielonych certyfikatów i systemu taryf gwarantowanych zapewnia niektórym z nich opłacalność. Dojrzałość technologiczną uzyskały dotychczas elektrownie wykorzystujące energię wody, wiatru i słońca.
6. W dziedzinie wykorzystania biomasy w źródłach rozproszonych sytuacja jest złożona. Dojrzałość komercyjną uzyskały 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. 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 ciepłej w skojarzeniu.
7. Wśród technologii wykorzystujących odnawialne źródła najwyższymi kosztami wytwarzania energii elektrycznej charakteryzują się obecnie elektrownie fotowoltaiczne (około 580 zł/MWh). Opłacalność przedsięwzięć inwestycyjnych związanych z budową tego typu źródeł wytwórczych obecnie można uzasadnić, stosując rachunek kosztów unikniętych, w przypadku gdy wytwarzana w nich energia elektryczna będzie zużywana przez producenta (prosumenta). Założono, że po przewidywanym w najbliższej przyszłości spadku wysokości nakładów inwestycyjnych na budowę elektrowni fotowoltaicznych, ich moc zainstalowana w Polsce do 2030 roku wyniesie około 3,6 GW, a do 2035 roku – około 5,6 GW.
8. Zrealizowanie, z pewnym przybliżeniem, w okresie najbliższych siedemnastu lat, przedstawionej mapy drogowej rozwoju źródeł wytwórczych w KSE (tab. 7) pozwoliłoby na istotną poprawę dywersyfikacji struktury źródeł energii pierwotnej, wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej w naszym kraju. Taki program inwestycyjny pozwoliłby na istotne zmniejszenie emisji CO₂ oraz zwiększenie udziału OZE w produkcji energii elektrycznej. Byłoby to w przybliżeniu zgodne z decyzjami Rady Europejskiej z października 2014 r. w zakresie redukcji emisji CO₂ i zwiększenia udziału OZE w produkcji energii elektrycznej. Zrealizowanie przedstawionej propozycji programu zrównoważonego rozwoju źródeł wytwórczych w KSE nie zmieniłoby w najbliższych kilkunastu latach dominującej roli węgla w produkcji energii elektrycznej w Polsce.

Literatura

- Directive 2005/89/UEC of the European Parliament and Council of 18 January 2006 concerning measures of to safeguarded security of electricity supply and infrastructure investment. Official Journal of the European Union, 2006, L 33/32.
- Directive 2012/27/UE of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency. Official Journal of the European Union, 2012, L 315/1.
- Informacja statystyczna o energii elektrycznej. Agencja Rynku Energii SA, Nr 12, 2017.
- Machowski, J. 2007. *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Prognoza pokrycia zapotrzebowania szczytowego na moc w latach 2016–2035. Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA, 2016. [Online] <https://www.pse.pl/-/prognoza-pokrycia-zapotrzebowania-szczytowego-na-moc-w-latach-2016-2035> [Dostęp: 10.07.2018].

Ruszel, M. 2017. Rola surowców energetycznych w procesie produkcji energii elektrycznej w UE do 2050 roku. *Polityka Energetyczna – Policy Journal* t. 20, z. 3, s. 5–15.

Statystyka Elektroenergetyki Polskiej 2016. Agencja Rynku Energii SA, 2017.

