

Analiza kosztów wytwarzania chłodu w układach trójgeneracyjnych z zastosowaniem różnych typów ziębiarek

Analysis of cooling costs in tri-generation systems using different types of chillers

ALEKSANDRA OTAWA

DOI 10.36119/15.2025.7-8.2

W energetyce jednym z kluczowych kryteriów wyboru rozwiązań technologicznych jest ich opłacalność ekonomiczna. W artykule porównano koszty produkcji chłodu w dwóch wariantach układów trójgeneracyjnych: z ziębiarką sprężarkową (napędzaną silnikiem elektrycznym lub mechanicznie z turbiny gazowej) oraz z ziębiarką cieplną, napędzaną ciepłem ze spalin. W celu analizy ekonomicznej zastosowano modele matematyczne z czasem ciągłym. Głównym celem analizy było obliczenie jednostkowego kosztu produkcji chłodu w zależności od takich parametrów jak: ceny paliw, energii elektrycznej, uprawnień do emisji CO₂, temperatury spalin, a także nakładów inwestycyjnych. Wpływ tych czynników na koszty produkcji chłodu jest trudny do analizy, jednak zastosowane w niniejszym artykule modele matematyczne z czasem ciągłym oraz zmiennymi bezwymiarowymi umożliwiają uniwersalne porównania dla układów o różnych mocach. Wyniki obliczeń pokazują, że koszt produkcji chłodu jest silnie zależny od wspomnianych czynników.

Słowa kluczowe: trójgeneracja, trigeneracja, koszty chłodu, produkcja chłodu, opłacalność ekonomiczna, ziębiarka sprężarkowa, ziębiarka cieplna

In the energy sector, one of the key criteria for selecting technological solutions is their economic profitability. The article compares the costs of producing cold in two variants of trigeneration systems: with a compressor chiller (driven by an electric motor or mechanically from a gas turbine) and with a thermal chiller, driven by heat from exhaust gases. Mathematical models with continuous time were used for the economic analysis. The main objective of the analysis was to calculate the unit cost of producing cold depending on such parameters as: fuel prices, electricity, CO₂ emission allowances, exhaust gas temperature, and investment outlays. The impact of these factors on the costs of producing cold is difficult to analyze, but the mathematical models with continuous time and dimensionless variables used in this article enable universal comparisons for systems with different capacities. The calculation results show that the cost of producing cold is strongly dependent on the above-mentioned factors.

Keywords: trigeneration, trigeneration, cooling costs, cooling production, economic profitability, compressor chiller, thermal chiller

Wprowadzenie

Trigeneracja, czyli systemy umożliwiające jednoczesną produkcję energii elektrycznej, ciepła i chłodu, w połączeniu z technologiami kogeneracyjnymi i poligeneracyjnymi, mogą odegrać kluczową rolę w transformacji sektora energetycznego w Polsce. Trigeneracja znajduje zastosowanie zarówno w sektorze przemysłowym, jak i w budownictwie mieszkaniowym, oferując znaczne oszczędności energetyczne oraz redukcję emisji zanieczyszczeń. Wdrażanie takich rozwiązań wiąże się z licznymi korzyściami, układy trigeneracyjne przyczyniają się do zwiększenia efektywności energetycznej, poprawy bezpieczeństwa energetycznego oraz wspierają realizację celów zrównoważonego rozwoju i polityki klimatycznej. Rozwój układów trójgeneracyjnych sprzyja także decentralizacji energetyki, umożliwiając lo-

kalne wytwarzanie energii dostosowane do rzeczywistych potrzeb użytkowników [8, 12, 13].

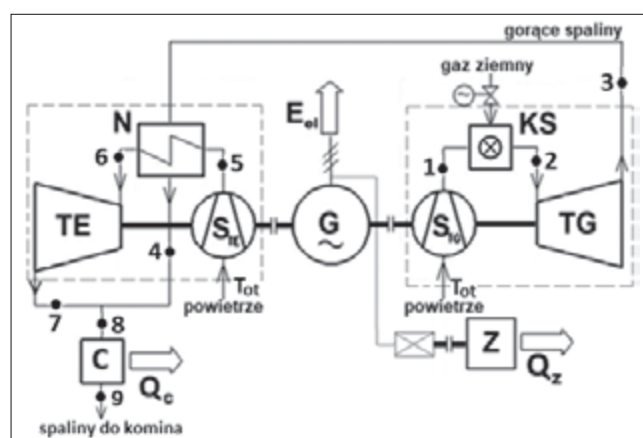
Kluczowym aspektem w doborze rozwiązań energetycznych jest analiza ich opłacalności ekonomicznej – to właśnie ona powinna stanowić fundament podejmowanych decyzji inwestycyjnych [7]. W artykule przeprowadzono analizę porównawczą dwóch wariantów układu trigeneracyjnego: jednego z ziębiarką sprężarkową, a drugiego z cieplną ziębiarką absorpcyjną. Wykorzystując modele matematyczne z czasem ciągłym przeanalizowano parametry techniczno-ekonomiczne mające wpływ na jednostkowe koszty wytwarzania chłodu. Tego typu podejście pozwala na racjonalną ocenę opłacalności poszczególnych technologii, co ma szczególne znaczenie w kontekście transformacji energetycznej i dążenia do obniżenia kosztów energii.

Charakterystyka wariantów układów trójgeneracyjnych

W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki analiz ekonomicznych dla hierarchicznego silnika gazowo-gazowego z tym, że analizie poddano układ trójgeneracyjny, w którym produkowane są w skojarzeniu energia elektryczna, ciepło i chłód – rys. 1, 2, 3.

W pracy [1] wykazano, że zastosowanie trójgeneracji pozwala na istotny wzrost sprawności energetycznej układu gazowo-gazowego w porównaniu do wariantów bez produkcji chłodu. Mimo że sprawności energetyczne układów gazowo-gazowych są niższe niż w przypadku silników gazowo-parowych, przewagę zapewnia im znacznie niższy poziom jednostkowych nakładów inwestycyjnych – sięgających jedynie ok. 45% kosztów układów gazowo-parowych. Dzięki temu, mimo mniejszej produkcji energii elektrycznej, układy gazowo-gazowe mogą oferować lepszą efektywność ekonomiczną, szczególnie w trybie skojarzonej produkcji.

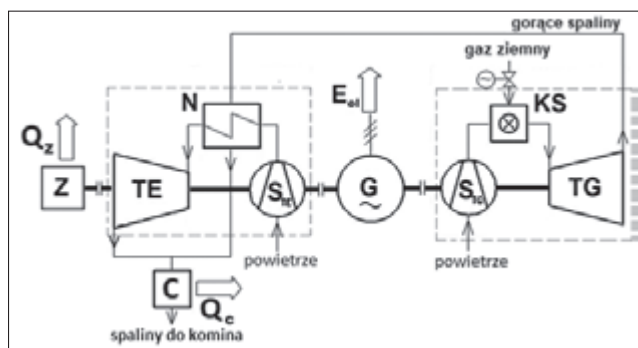
Rys. 1 i 2 przedstawiają dwa warianty układów trójgeneracyjnych z zastosowaniem ziębiarek sprężarkowych. W pierwszym z nich agregat chłodniczy napędzany jest silnikiem elektrycznym, natomiast w drugim – bezpośrednio pracą mechaniczną przekazywaną przez wspólny wał, który łączy turbinę gazową i turboekspander. Integracja turboekspandera i sprężarki niskopięrzej w jednej obudowie i na wspólnym wale wpływa na ograniczenie nakładów inwestycyjnych. Z punktu widzenia sterowania mocą chłodniczą, bardziej elastycznym rozwiązaniem wydaje się układ z napędem elektrycznym. Sprężarkowe agregaty chłodnicze wykorzystujące energię elektryczną jako źródło zasilania należą do najczęściej stosowanych rozwiązań w technice chłodniczej. W układach kogeneracyjnych energia elektryczna (lub mechaniczna) zużywana do napędu sprężarki pochodzi z własnej produkcji, co oznacza mniejszy potencjalny



Rys. 1.

Schemat ideowy układu z ziębiarką sprężarkową napędzaną silnikiem elektrycznym [2] (G – generator elektryczny, KS – komora spalania turbiny gazowej, N – nagrzewnica powietrza; nagrzewnica jest urządzeniem sprzęgającym obieg turbiny gazowej z obiegiem turboekspandera, S_{TE} – sprężarka niskopięrza, S_{TG} – sprężarka wysokopięrza turbiny gazowej, TG – część turbinowa turbiny gazowej, TE – turboekspander, C – wymiennik ciepłowniczy, Z – ziębiarka ciepła, Eel – energia elektryczna, Q_z – ciepło zasilające ziębiarkę, Q_c – ciepło odebrane przez chłodzoną instalację, 1÷9 – punkty układu)

Fig. 1. Schematic diagram of the system with a compressor chiller driven by an electric motor [2] (G – electric generator, KS – gas turbine combustion chamber, N – air heater; the heater is a device that couples the gas turbine cycle with the turboexpander cycle, S_{TE} – low-pressure compressor, S_{TG} – high-pressure compressor of the gas turbine, TG – turbine part of the gas turbine, TE – turboexpander, C – heat exchanger, Z – thermal chiller, Eel – electrical energy, Q_z – heat supplying the chiller, Q_c – heat received by the cooled installation 1÷9 – system points)



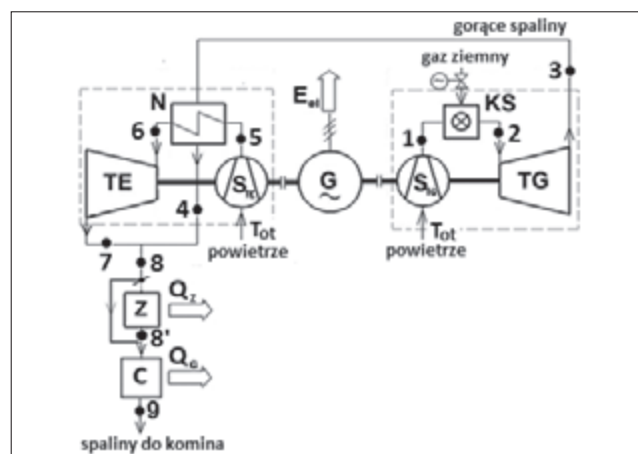
Rys. 2.

Schemat ideowy układu z ziębiarką sprężarkową umieszczoną na wspólnym wale z turbiną gazową i turboekspanderem (oznaczenia analogiczne jak w rys.1) [2]

Fig. 2. Schematic diagram of the system with a compressor chiller placed on a common shaft with a gas turbine and a turboexpander (symbols similar to those in Fig. 1) [2]

przychód ze sprzedaży tej energii na zewnątrz. Z drugiej strony, dużą zaletą ziębiarek sprężarkowych jest ich wysoka moc chłodnicza, co przekłada się na większą ilość dostarczanego chłodu, zwłaszcza w porównaniu z rozwiązaniami opartymi na ziębiarkach cieplnych, które charakteryzują się niższą wydajnością chłodniczą [2].

Na rys. 3. przedstawiono schemat ideowy układu z ziębiarką ciepłą, która napędzana jest niskotemperaturową entalpią spalin wylotowych z hierarchicznego silnika gazowo-gazowego.



Rys. 3.

Schemat ideowy hierarchicznego układu gazowo-gazowego trójgeneracyjnego z turbiną gazową i turboekspanderem w konfiguracji jednowałowej do skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i chłodu w ziębiarce cieplnej (oznaczenia analogiczne jak w rys.1) [2]

Fig. 3. Schematic diagram of a hierarchical gas-gas trigeneration system with a gas turbine and a turboexpander in a single-shaft configuration for combined generation of electricity, heat and cold in a thermal chiller (symbols similar to those in Fig. 1) [2]

Dzięki temu nie ulega „uszczipieniu” przychód ze sprzedaży energii elektrycznej produkowanej w układzie w porównaniu z układami 1 i 2. Do napędu bowiem ziębiarek sprężarkowych, jak już wyżej wspomniano, jest wykorzystywana energia elektryczna (praca mechaniczna – rys. 2) produkowana w układzie, co pomniejsza przychód z jej sprzedaży. Zaletą natomiast ziębiarek sprężarkowych jest dzięki temu ich duża moc ziębienia, a więc duża sprzedaż chłodu, gdy tymczasem w układzie z ziębiarką ciepłą jego produkcja jest relatywnie mała. Wynika to z ograniczonego dostępnego zakresu temperatury spalin służących do napędu ziębiarki. Również relatywnie mała jest produkcja w nim ciepła grzejnego z uwagi na wykorzystywanie entalpii

spalin nie tylko do jego produkcji, ale także, jak już powyżej zaznaczono, do produkcji chłodu – rys. 3 [2].

Modele matematyczne z czasem ciągłym wykorzystane w analizie kosztów produkcji chłodu w układzie trójgeneracyjnym z ziębiarką sprężarkową

Wielkościami wejściowymi do analizy ekonomicznej układu trójgeneracyjnego są: moc turbiny gazowej N^{TG} , moc turboekspandera N^{TE} , moc cieplna $\dot{Q}_c$ wymiennika ciepłowniczego, moc ziębnicza $\dot{Q}_z$ ziębiarki sprężarkowej oraz strumień energii chemicznej gazu $\dot{E}_{ch}$ spalane w turbinie gazowej.

Należy podkreślić, że ocena opłacalności ekonomicznej może być przeprowadzona dopiero po wcześniejszej analizie termodynamicznej, której wyniki stanowią dane wejściowe do dalszych obliczeń ekonomicznych. Analiza termodynamiczna umożliwia identyfikację potencjalnych obszarów usprawnień procesów technologicznych oraz udoskonaleń konstrukcyjnych urządzeń i maszyn energetycznych. W niniejszym artykule nie zamieszczono szczegółowej analizy termodynamicznej – została ona omówiona w pracy [2]. Głównym przedmiotem niniejszej publikacji jest analiza ekonomiczna, ponieważ w praktyce to właśnie kwestie ekonomiczne dominują nad technicznymi przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnych.

Parametrem wejściowym wyznaczonym w analizie termodynamicznej [2], który warunkuje wszystkie pozostałe wielkości charakterystyczne dla pracy układu trójgeneracyjnego, jest moc turbiny gazowej N^{TG} . To właśnie od tej mocy oraz od temperatury spalin dopływających T_2 do turbiny gazowej zależą pozostałe moce: $N^{TE} = f(N^{TG})$, $\dot{Q}_c = f(N^{TG})$, $\dot{Q}_z = f(N^{TG})$ oraz $\dot{E}_{ch} = f(N^{TG})$. Dlatego opracowując matematyczny model analizy ekonomicznej pracy układu trójgeneracyjnego, istotne było nadanie mu charakteru uniwersalnego – umożliwiającego analizę efektywności ekonomicznej dla dowolnej mocy turbiny gazowej, a tym samym dla dowolnej konfiguracji mocy całego układu. W tym celu zastosowano w modelu jedynie wielkości bezwymiarowe: N^{TE}/N^{TG} , $\dot{Q}_c/N^{TG}$, $\dot{Q}_z/N^{TG}$, $\dot{E}_{ch}/N^{TG}$. Taki bezwymiarowy sposób modelowania pozwala na uogólnienie wyników i odniesienie ich do układów o dowolnej skali mocy – niezależnie od konkretnej wartości mocy elektrycznej, cieplnej czy chłodniczej. Należy ponownie podkreślić, że wszystkie te wielkości są funkcją jedynie mocy turbiny gazowej N^{TG} oraz temperatury spalin T_2 z komory spalania turbiny gazowej. W praktyce oznacza to, że do oszacowania jednostkowego kosztu produkcji chłodu w analizowanych układach wystarczy znajomość temperatury spalin dopływających do turbiny T_2 oraz aktualnych cen gazu, energii elektrycznej i ciepła [2] – co zilustrowano na rysunkach (4-15).

Temperatura T_2 jest ważnym czynnikiem wpływającym na sprawność układu trójgeneracyjnego. Wartość temperatury T_2 zależy od temperatury spalania w komorze spalania turbiny gazowej, która jest determinowana przez jakość paliwa, warunki pracy układu oraz zastosowaną technologię spalania. Kolejnym czynnikiem wpływającym na wartość T_2 jest żarowytrzymałość materiałowa łopatek turbiny gazowej, która wyznacza dopuszczalne termiczne obciążenia elementów wirujących. Starsze konstrukcje turbin gazowych ograniczają T_2 do poziomu około 1100 K, podczas gdy nowoczesne turbiny mogą pracować przy temperaturach przekraczających 1800 K. Utrzymywanie temperatury T_2 na możliwie wysokim, lecz bezpiecznym poziomie ma istotne znaczenie dla sprawności turbiny gazowej (wzrasta ona wraz ze wzrostem T_2), wielkości produkcji energii elektrycznej (skorelowanej bezpośrednio z mocą turbiny), efektywności wy-

korzystania spalin w ziębiarce cieplnej oraz opłacalności ekonomicznej układu (redukcja jednostkowego kosztu wytwarzania chłodu, szczególnie w układzie z ziębiarką sprężarkową, gdzie moc chłodnicza nie jest ograniczana termicznie, lecz energetycznie). W przypadku układów z ziębiarką sprężarkową wysoka temperatura T_2 przekłada się pośrednio na zwiększoną produkcję energii elektrycznej, która może być wykorzystana do napędu sprężarki, a nadwyżka ciepła może zostać odprowadzona lub wykorzystana w procesach pomocniczych, co podnosi ogólną sprawność egzergetyczną układu [2].

Jednostkowy koszt produkcji chłodu został wyznaczony za pomocą wzoru na zdyskontowany zysk NPV osiągany w ciągu T lat eksploatacji trójgeneracyjnego układu gazowo-gazowego do skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i chłodu [3, 4, 5]:

$$NPV = \left\{ \left[(N^{TG} + N^{TE}) \eta_G \tau_R - N_z \tau_z \right] (1 - \varepsilon_{el}) \frac{e_{el}^{t=0}}{a_{el} - r} \right. \\ \left. [e^{(a_{el}-r)T} - 1] + Q_{Rc} \frac{e_c^{t=0}}{a_c - r} [e^{(a_c-r)T} - 1] + \right. \\ \left. + Q_{Rz} \frac{e_z^{t=0}}{a_z - r} [e^{(a_z-r)T} - 1] - \right. \\ \left. - \dot{E}_{ch} \tau_R \left\{ \frac{e_{pal}^{t=0}}{a_{pal} - r} [e^{(a_{pal}-r)T} - 1] + \frac{p_{CO_2} p_{CO_2}^{t=0}}{a_{CO_2} - r} [e^{(a_{CO_2}-r)T} - 1] + \right. \right. \\ \left. + \frac{p_{CO} p_{CO}^{t=0}}{a_{CO} - r} [e^{(a_{CO}-r)T} - 1] + \frac{p_{NO_x} p_{NO_x}^{t=0}}{a_{NO_x} - r} [e^{(a_{NO_x}-r)T} - 1] + \right. \\ \left. + \frac{p_{SO_2} p_{SO_2}^{t=0}}{a_{SO_2} - r} [e^{(a_{SO_2}-r)T} - 1] + \frac{p_{pyt} p_{pyt}^{t=0}}{a_{pyt} - r} [e^{(a_{pyt}-r)T} - 1] + \right. \\ \left. + \frac{p_{CO_2} e_{CO_2}^{t=0}}{b_{CO_2} - r} [e^{(b_{CO_2}-r)T} - 1] \right\} + \\ \left. - (1 + x_{pl,p,ub}) (J_{G-G} + J_z) (1 - e^{-rT}) \frac{\delta_{rem}}{r} - \right. \\ \left. - z (J_{G-G} + J_z) \left(\frac{1 - e^{-rT}}{T} + 1 \right) \right\} (1-p) \quad (1)$$

przy czym roczne produkcje ciepła i chłodu wyrażają się odpowiednio wzorami [2]:

$$Q_{Rc} = \frac{(N^{TG} + N^{TE}) \eta_G \tau_R}{\sigma_R}; \quad (2)$$

$$Q_{Rz} = \dot{Q}_z \tau_z = N_z \varepsilon_z \tau_z \quad (3)$$

a moc napędowa ziębiarki sprężarkowej zależnością [2]:

$$N_z = x (N^{TG} + N^{TE}) \eta_G; \quad x \in \langle 0; 1 \rangle \quad (4)$$

gdzie:

$a_{el}, a_c, a_z, a_{pal}, a_{CO_2}, a_{CO}, a_{SO_2}, a_{NO_x}, a_{pyt}, b_{CO_2}$ – wykładniki eksponent obrazujących zmiany w czasie cen energii elektrycznej, ciepła, chłodu, paliwa, taryfowych opłat środowiskowych, uprawnień do emisji CO_2 , $e_{el}^{t=0}, e_{pal}^{t=0}, e_c^{t=0}, e_z^{t=0}, e_{CO_2}^{t=0}, p_{CO_2}^{t=0}$ itd. – początkowe wartości cen energii elektrycznej, paliwa, ciepła, chłodu, uprawnień do emisji CO_2 itd.,

- $\dot{E}_{ch}$ – strumień energii chemicznej paliwa spalane w turbinie gazowej ($\dot{E}_{ch} = N_{TG}^{TE}/\eta_{TG}^{max}$), ciepła, chłodu, zakupu pozwoleń na emisję CO_2 , taryfowych opłat środowiskowych,
- J_{G-G} – nakłady inwestycyjne na układ gazowo-gazowy i ziębiarkę [zł],
- $P_{CO_2}, P_{CO}, P_{NO_x}, P_{SO_2}, P_{pył}$ – jednostkowe stawki za emisję CO_2, CO, NO_x, SO_2 , pyłu,
- r – stopa oprocentowania kapitału inwestycyjnego [%/rok],
- $x_{pl,p,ub}$ – współczynnik uwzględniający koszty płac, podatków, ubezpieczeń itd. (w praktyce wartość $x_{pl,p,ub}$ wynosi ok. 0,25),
- z – współczynnik dyskontujący (współczynnik zamrożenia) kapitał inwestycyjny J na moment zakończenia budowy inwestycji,
- δ_{rem} – roczna stopa kosztów stałych zależnych od nakładów inwestycyjnych [%/rok] (koszty konserwacji, remontów urządzeń),
- $\varepsilon_z = \dot{Q}_z/N_z$ – sprawność termiczna ziębiarki (do analizy przyjęto ziębiarkę parową sprężarkową pracującą według obiegu Lindego; czynnikiem obiegowym jest amoniak; do obliczeń przyjęto $\varepsilon_z = 3,2$),
- ε_{el} – wskaźnik elektrycznych potrzeb własnych układu,
- η_G – sprawność generatora elektrycznego,
- $P_{CO_2}, P_{CO}, P_{NO_x}, P_{SO_2}, P_{pył}$ – emisje CO_2, CO, NO_x, SO_2 , pyłu na jednostkę energii chemicznej paliwa,
- $\sigma_R = E_{el,R}/Q_{Rc}$ – stosunek rocznej produkcji energii elektrycznej do rocznej produkcji ciepła,
- τ_R – wyrażony w godzinach roczny czas pracy układu trójgeneracyjnego [h/rok] (w obliczeniach przyjęto jego wartość równą 8424 h; uwzględniono dwutygodniowy postój układu w roku na konserwację i remonty),
- τ_z – wyrażony w godzinach roczny czas pracy ziębiarki,
- x – procentowy udział mocy ziębiarki w mocy silnika gazowo-gazowego; x należy do przedziału $<0;1>$.

Z warunków $NPV = 0$ oraz $a_z = 0$ otrzymuje się wzór na średni jednostkowy koszt produkcji chłodu w okresie T lat [2]:

$$k_{z\ sr} = \frac{r\tau_R}{x \left(1 + \frac{N^{TE}}{N^{TG}} \right) \eta_G \varepsilon_z \tau_z (1 - e^{-rT}) \eta_{TG}^{max}} \times \left\{ \frac{e_{pal}^{t=0}}{a_{pal} - r} [e^{(a_{pal} - r)T} - 1] + \frac{P_{CO_2} P_{CO_2}^{t=0}}{a_{CO_2} - r} [e^{(a_{CO_2} - r)T} - 1] + \frac{P_{CO} P_{CO}^{t=0}}{a_{CO} - r} [e^{(a_{CO} - r)T} - 1] + \frac{P_{NO_x} P_{NO_x}^{t=0}}{a_{NO_x} - r} [e^{(a_{NO_x} - r)T} - 1] + \frac{P_{SO_2} P_{SO_2}^{t=0}}{a_{SO_2} - r} [e^{(a_{SO_2} - r)T} - 1] + \frac{P_{pył} P_{pył}^{t=0}}{a_{pył} - r} [e^{(a_{pył} - r)T} - 1] + \frac{P_{CO_2} e_{CO_2}^{t=0}}{b_{CO_2} - r} [e^{(b_{CO_2} - r)T} - 1] \right\} + (1 + x_{pl,p,ub}) \frac{(J_{G-G} + x_i z)}{x \varepsilon_z \tau_z} \delta_{rem} + \frac{r z (J_{G-G} + x_i z)}{x \varepsilon_z \tau_z (1 - e^{-rT})} \left(\frac{1 - e^{-rT}}{T} + 1 \right) + \frac{r (\tau_R - x \tau_z) (1 - \varepsilon_{el})}{x \varepsilon_z \tau_z (1 - e^{-rT})} \frac{e_{el}^{t=0}}{a_{el} - r} [e^{(a_{el} - r)T} - 1] - \frac{r\tau_R}{x \varepsilon_z \tau_z \sigma_R (1 - e^{-rT})} \frac{e_c^{t=0}}{a_c - r} [e^{(a_c - r)T} - 1] \quad (5)$$

gdzie:

- i_{G-G} – jednostkowy (na jednostkę mocy elektrycznej) nakład inwestycyjny na silnik gazowo-gazowy, $i_{G-G} = J_{G-G} / [(N^{TG} + N^{TE})\eta_G]$,
- i_z – jednostkowy (na jednostkę mocy elektrycznej) nakład inwestycyjny na ziębiarkę,
- $i_z = J_z/N_z$ (w obliczeniach założono dwa warianty wysokości nakładów; $i_z = 0,5i_{G-G}$ oraz $i_z = 0,7i_{G-G}$).

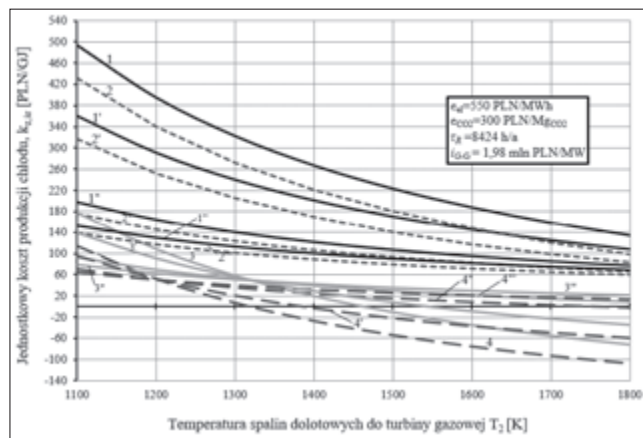
Przychody ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła (wzory (1) i (5)) są tzw. kosztami unikniętymi produkcji chłodu. Jedną z wielkości, która obok nakładów inwestycyjnych, sprawności energetycznej turbozespołu gazowego, mocy i czasu pracy ziębiarki, cen energii elektrycznej, paliwa i ciepła, ma istotny wpływ na wysokość jednostkowego kosztu produkcji chłodu $k_{z\ sr}$ jest cena uprawnień do emisji dwutlenku węgla e_{CO_2} . Podlega ona bardzo dużym wahaniom, nawet z tygodnia na tydzień, gdyż często jest ceną spekulacyjną. W obliczeniach w niniejszym artykule w celach porównawczych przyjęto jej wartość dwuwariantowo. Raz równą $e_{CO_2} = 300$ PLN/Mg $_{CO_2}$, a w drugim wariantcie wyższą równą $e_{CO_2} = 450$ PLN/Mg $_{CO_2}$. Zgodnie z prognozami Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBIZE), ceny uprawnień w systemie ETS2 rosną od początku jego funkcjonowania, mając osiągnąć szczyt na poziomie 149 Euro za tonę w 2030 roku. Po tym okresie przewidywany jest spadek cen do około 80 Euro w latach 2031–2035 [10, 11]. Ogromną zaletą wykorzystania do analiz modeli matematycznych z czasem ciągłym jest możliwość wykonywania za ich pomocą analiz dla dowolnych cen paliw, energii elektrycznej czy też zakupu pozwoleń na emisję CO_2 . Jest to niezwykle przydatne w przypadku, gdy mamy do czynienia ze zmiennością parametrów [3, 7].

Wyniki analizy kosztu jednostkowego produkcji chłodu w układzie trójgeneracyjnym z ziębiarką sprężarkową

Na rysunkach 4-9 przedstawiono wyniki wielowariantowych obliczeń jednostkowego kosztu produkcji chłodu w układzie z ziębiarką sprężarkową. W tabeli 1. zestawiono przyjęte do obliczeń dane wejściowe dla poszczególnych krzywych zaprezentowanych na rysunkach 4-9. Parametr x wyraża udział mocy ziębiarki w mocy silnika gazowo-gazowego (udział produkcji chłodu w układzie). Układy z ziębiarką sprężarkową, jak już zostało w wcześniej wspomniane, są napędzane energią elektryczną. Charakteryzują się też wysoką sprawnością termiczną, możliwością regulacji mocy w szerokim zakresie oraz elastycznością pod względem skali pracy (mogą pracować przy wyższych wartościach x). Wartość x w układzie z ziębiarką sprężarkową można zwiększać, ponieważ chłód nadal będzie produkowany względnie tanio, dlatego w obliczeniach w tym wariantcie przyjęto $x=0,1$ oraz $x=0,3$.

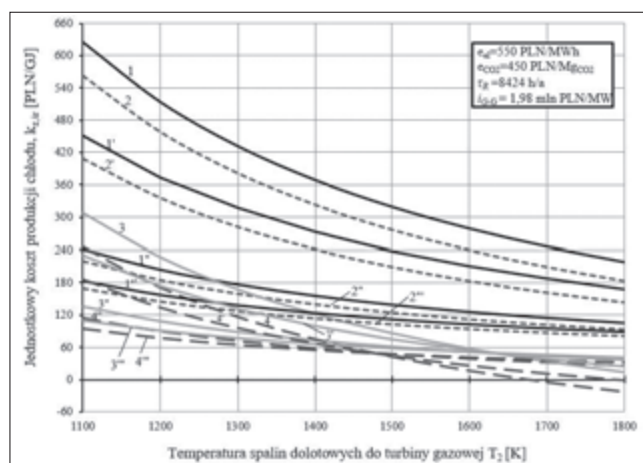
Tabela 1. Dane wejściowe
Table 1. Input data

	1	1'	1''	1'''	2	2'	2''	2'''
e_c , PLN/GJ	140	140	140	140	170	170	170	170
e_{pal} , PLN/GJ	70	70	70	70	70	70	70	70
i_z , PLN/MW	0,5 <i>i_{G-G}</i>	0,7 <i>i_{G-G}</i>	0,5 <i>i_{G-G}</i>	0,7 <i>i_{G-G}</i>	0,5 <i>i_{G-G}</i>	0,7 <i>i_{G-G}</i>	0,5 <i>i_{G-G}</i>	0,7 <i>i_{G-G}</i>
τ_z , h/a	0,7 <i>\tau_R</i>	$\tau_z = \tau_R$	0,7 <i>\tau_R</i>	$\tau_z = \tau_R$	0,7 <i>\tau_R</i>	$\tau_z = \tau_R$	0,7 <i>\tau_R</i>	$\tau_z = \tau_R$
x , %	0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,3
	3	3'	3''	3'''	4	4'	4''	4'''
e_c , PLN/GJ	140	140	140	140	170	170	170	170
e_{pal} , PLN/GJ	50	50	50	50	50	50	50	50
i_z , PLN/MW	0,5 <i>i_{G-G}</i>	0,7 <i>i_{G-G}</i>	0,5 <i>i_{G-G}</i>	0,7 <i>i_{G-G}</i>	0,5 <i>i_{G-G}</i>	0,7 <i>i_{G-G}</i>	0,5 <i>i_{G-G}</i>	0,7 <i>i_{G-G}</i>
τ_z , h/a	0,7 <i>\tau_R</i>	$\tau_z = \tau_R$	0,7 <i>\tau_R</i>	$\tau_z = \tau_R$	0,7 <i>\tau_R</i>	$\tau_z = \tau_R$	0,7 <i>\tau_R</i>	$\tau_z = \tau_R$
x , %	0,1	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	0,3



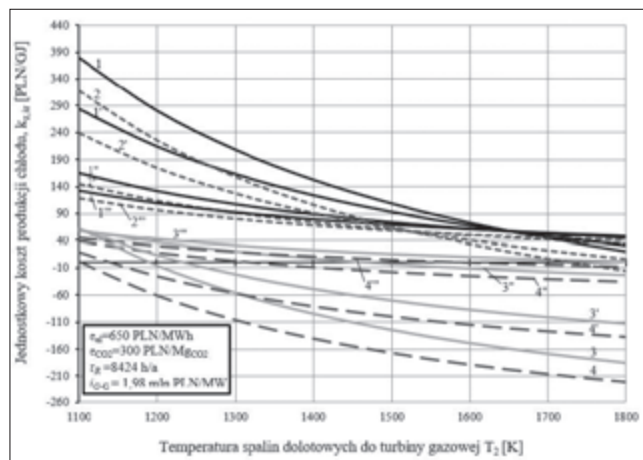
Rys. 4. Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazowo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką sprężarkową w funkcji temperatury spalin dolotowych do turbiny gazowej T_2

Fig. 4. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and a compressor chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2



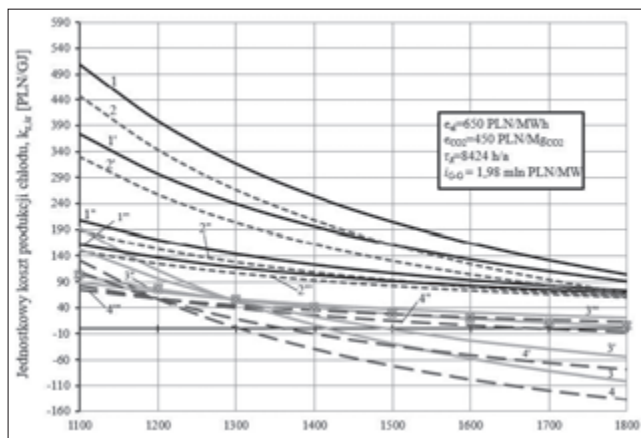
Rys. 5. Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazowo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką sprężarkową w funkcji temperatury spalin dolotowych do turbiny gazowej T_2

Fig. 5. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and a compressor chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2



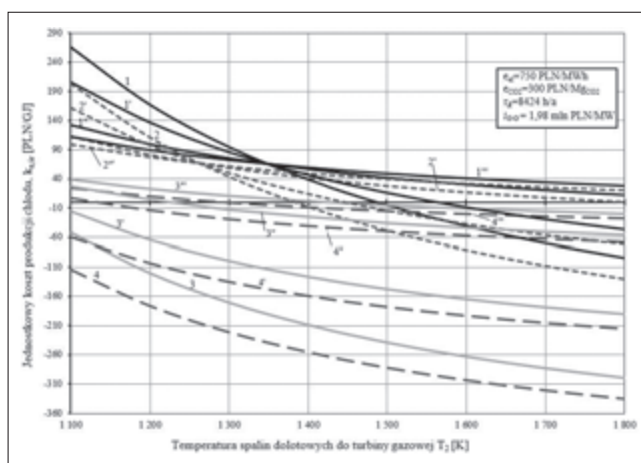
Rys. 6. Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazowo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką sprężarkową w funkcji temperatury spalin dolotowych do turbiny gazowej T_2

Fig. 6. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and a compressor chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2



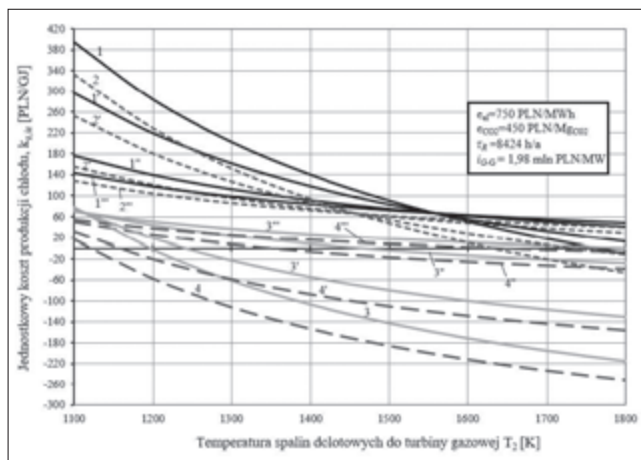
Rys. 7. Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazowo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką sprężarkową w funkcji temperatury spalin dolotowych do turbiny gazowej T_2

Fig. 7. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and a compressor chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2



Rys. 8. Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazowo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką sprężarkową w funkcji temperatury spalin dolotowych do turbiny gazowej T_2

Fig. 8. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and a compressor chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2



Rys. 9. Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazowo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką sprężarkową w funkcji temperatury spalin dolotowych do turbiny gazowej T_2

Fig. 9. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and a compressor chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2

Jak pokazują rysunki 4–9, jednostkowe koszty produkcji chłodu rosną wraz ze spadkiem, co oczywiste, ceny energii elektrycznej oraz ze wzrostem cen paliw i uprawnień do emisji CO₂, jak również w miarę wzrostu jednostkowych nakładów inwestycyjnych. Podobny efekt wywołuje zwiększanie wartości x , a więc zwiększanie produkcji chłodu w układzie (wzór (3), (4)) – przy rosnącej cenie energii elektrycznej powoduje to wzrost kosztu jednostkowego chłodu. Dzieje się tak, ponieważ w takiej sytuacji spada produkcja energii elektrycznej, a tym samym maleje dochód z jej sprzedaży, stanowiący koszt uniknięty produkcji chłodu.

Modele matematyczne z czasem ciągłym wykorzystane w analizie kosztów produkcji chłodu w układzie trójgeneracyjnym z ciepłą ziębiarką absorpcyjną

Zaletą ziębiarki absorpcyjnej jest brak sprężarki i wykorzystywanie zatem do jej napędu nie energii elektrycznej, a niskotemperaturowej, odpadowej entalpii spalin wylotowych z silnika gazowo-gazowego – rys. 3. Dzięki temu w porównaniu z układem z ziębiarką sprężarkową produkowana jest w nim większa ilość elektryczności, najszlachetniejszej, a więc i najcenniejszej, najdroższej postaci energii, a przychód z jej sprzedaży jest kosztem unikniętym produkcji chłodu. Wadą natomiast układu z ziębiarką absorpcyjną jest jego mała moc ziębnicza. Temperatura spalin stanowiących źródło ciepła napędowego w desorberze (worniku) ziębiarki absorpcyjnej musi być bowiem wyższa od temperatury roztworu amoniaku do niego doprowadzanego. Temperatura ta wynosi ok. $T_8 = 395\text{ K}$, natomiast temperatura T_8 spalin dolotowych do desorbera zawiera się w przedziale od ok. 458 do ok. 524 K [2, 9].

Całkowity zdyskontowany zysk NPV osiągany z pracy układu trójgeneracyjnego z ciepłą ziębiarką absorpcyjną przedstawia się zależnością [2]:

$$\begin{aligned}
 NPV = & \left\{ \left[(N^{TG} + N^{TE}) \eta_G \tau_R \right] (1 - \varepsilon_{el}) \frac{e_{el}^{t=0}}{a_{el} - r} [e^{(a_{el}-r)T} - 1] + \right. \\
 & + Q_{Rc} \frac{e_c^{t=0}}{a_c - r} [e^{(a_c-r)T} - 1] + \\
 & + Q_{Rz} \frac{e_z^{t=0}}{a_z - r} [e^{(a_z-r)T} - 1] - \dot{E}_{ch} \tau_R \left\{ \frac{e_{pal}^{t=0}}{a_{pal} - r} [e^{(a_{pal}-r)T} - 1] + \right. \\
 & + \frac{p_{CO_2} p_{CO_2}^{t=0}}{a_{CO_2} - r} [e^{(a_{CO_2}-r)T} - 1] + \frac{p_{CO} p_{CO}^{t=0}}{a_{CO} - r} [e^{(a_{CO}-r)T} - 1] + \\
 & + \frac{p_{NO_x} p_{NO_x}^{t=0}}{a_{NO_x} - r} [e^{(a_{NO_x}-r)T} - 1] + \frac{p_{SO_2} p_{SO_2}^{t=0}}{a_{SO_2} - r} [e^{(a_{SO_2}-r)T} - 1] + \\
 & + \frac{p_{pyt} p_{pyt}^{t=0}}{a_{pyt} - r} [e^{(a_{pyt}-r)T} - 1] + \left. \left. \frac{p_{CO_2} e_{CO_2}^{t=0}}{b_{CO_2} - r} [e^{(b_{CO_2}-r)T} - 1] \right\} + \right. \\
 & - (1 + x_{pt,p,ub}) (J_{G-G} + J_z) (1 - e^{-rT}) \frac{\delta_{rem}}{r} - \\
 & \left. - z (J_{G-G} + J_z) \left(\frac{1 - e^{-rT}}{T} + 1 \right) \right\} (1 - p) \quad (6)
 \end{aligned}$$

a jednostkowy koszt produkcji chłodu z warunków $NPV = 0$ oraz $a_z = 0$ wzorem [2]:

$$\begin{aligned}
 k_{z\ sr} = & \frac{r \tau_R}{A \eta_{TG}^{max} \varepsilon_{z\ abs} \tau_z (1 - e^{-rT})} \left\{ \frac{e_{pal}^{t=0}}{a_{pal} - r} [e^{(a_{pal}-r)T} - 1] + \right. \\
 & + \frac{p_{CO_2} p_{CO_2}^{t=0}}{a_{CO_2} - r} [e^{(a_{CO_2}-r)T} - 1] + \\
 & + \frac{p_{CO} p_{CO}^{t=0}}{a_{CO} - r} [e^{(a_{CO}-r)T} - 1] + \frac{p_{NO_x} p_{NO_x}^{t=0}}{a_{NO_x} - r} [e^{(a_{NO_x}-r)T} - 1] + \\
 & + \frac{p_{SO_2} p_{SO_2}^{t=0}}{a_{SO_2} - r} [e^{(a_{SO_2}-r)T} - 1] + \frac{p_{pyt} p_{pyt}^{t=0}}{a_{pyt} - r} [e^{(a_{pyt}-r)T} - 1] + \\
 & + \left. \frac{p_{CO_2} e_{CO_2}^{t=0}}{b_{CO_2} - r} [e^{(b_{CO_2}-r)T} - 1] \right\} + \\
 & + \frac{B \eta_{G-G}}{A \varepsilon_{z\ abs} \tau_z} \left[(1 + x_{pt,p,ub}) \delta_{rem} + \frac{zr}{(1 - e^{-rT})} \left(\frac{1 - e^{-rT}}{T} + 1 \right) \right] + \\
 & + \frac{i_z}{\tau_z} \left[(1 + x_{pt,p,ub}) \delta_{rem} + \frac{zr}{(1 - e^{-rT})} \left(\frac{1 - e^{-rT}}{T} + 1 \right) \right] + \\
 & - \frac{B \eta_G \tau_R}{A \varepsilon_{z\ abs} \tau_z (1 - e^{-rT})} \left\{ (1 - \varepsilon_{el}) \frac{e_{el}^{t=0}}{a_{el} - r} [e^{(a_{el}-r)T} - 1] + \right. \\
 & + \left. \frac{1}{\sigma_R} \frac{e_c^{t=0}}{a_c - r} [e^{(a_c-r)T} - 1] \right\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

przy czym:

$$A = \left[\frac{\eta_m}{\eta_m^2 (T_2 - T_3) - (T_1 - T_{ot})} + \frac{N^{TE}}{N^{TG}} \frac{\eta_m}{\eta_m^2 (T_6 - T_7) - (T_5 - T_{ot})} \right] (T_8 - 395) \quad (8)$$

$$B = \left(1 + \frac{N^{TE}}{N^{TG}} \right) \quad (9)$$

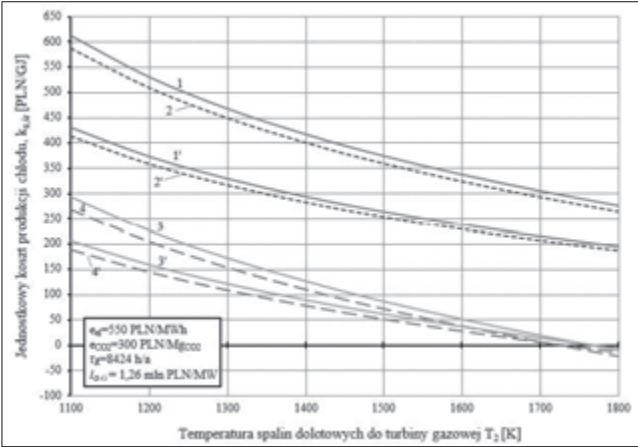
$$i_z = \frac{J_z}{Q_z} \quad (10)$$

Wyniki analizy kosztu jednostkowego produkcji chłodu w układzie trójgeneracyjnym z ziębiarką ciepłą

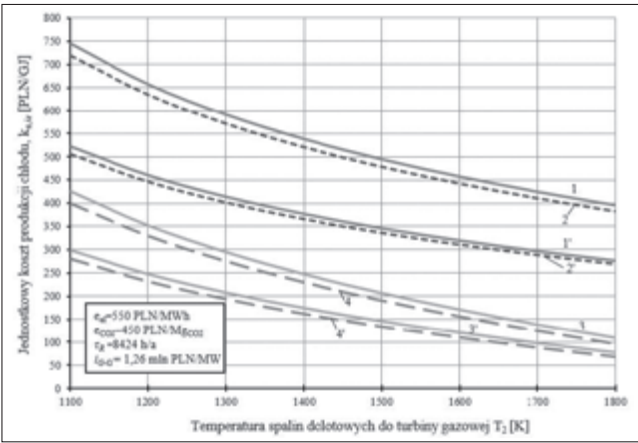
Na rysunkach 10–15 przedstawiono wyniki obliczeń jednostkowego kosztu produkcji chłodu $k_{z\ sr}$ dla układu gazowo-gazowego z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką ciepłą absorpcyjną w funkcji temperatury spalin dolotowych do turbiny gazowej T_2 . W tabeli 2. zestawiono przyjęte do obliczeń dane wejściowe dla poszczególnych krzywych zaprezentowanych na rysunkach 10–15. W przypadku układu z ziębiarką ciepłą absorpcyjną do obliczeń przyjęto tylko wartość $x = 0, 1$. Układ z ziębiarką ciepłą charakteryzuje się niższą sprawnością termiczną oraz mniejszą elastycznością technologiczną niż układ z ziębiarką sprężarkową. Zwiększanie wartości x w tym przypadku wpływa na opłacalność ekonomiczną – większa wartość x spowodowałaby wzrost jednostkowego kosztu chłodu, a także mniejsze przychody ze sprzedaży ciepła. Uwarunkowania technologiczne i ekonomiczne ograniczają zastosowanie ziębiarki ciepłej do niższych wartości x .

Tabela 2. Dane wejściowe
Table 2. Input data

	1	1'	2	2'	3	3'	4	4'
c_e , PLN/GJ	140	140	170	170	140	140	170	170
c_{pal} , PLN/GJ	70	70	70	70	50	50	50	50
i_{zg} , PLN/MW	$0,5i_{g-g}$	$0,7i_{g-g}$	$0,5i_{g-g}$	$0,7i_{g-g}$	$0,5i_{g-g}$	$0,7i_{g-g}$	$0,5i_{g-g}$	$0,7i_{g-g}$
T_{zg} , h/a	$0,7\tau_R$	τ_R	$0,7\tau_R$	τ_R	$0,7\tau_R$	τ_R	$0,7\tau_R$	τ_R



Rys. 10.
Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką cieplną absorpcyjną w funkcji temperatury spalin docelowych do turbiny gazowej T_2
Fig. 10. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and an absorption heat chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2

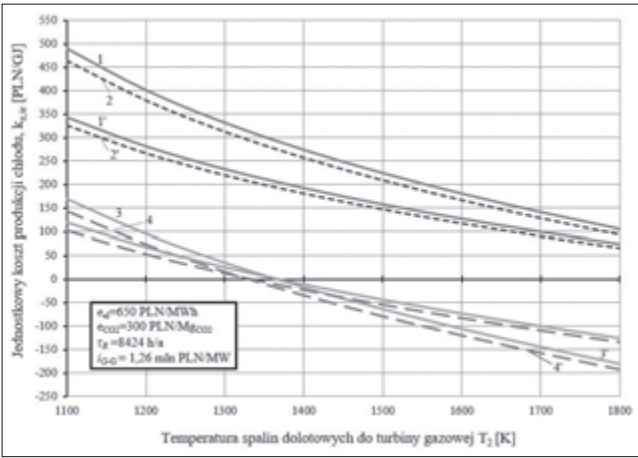


Rys. 11.
Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką cieplną absorpcyjną w funkcji temperatury spalin docelowych do turbiny gazowej T_2
Fig. 11. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and an absorption heat chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2

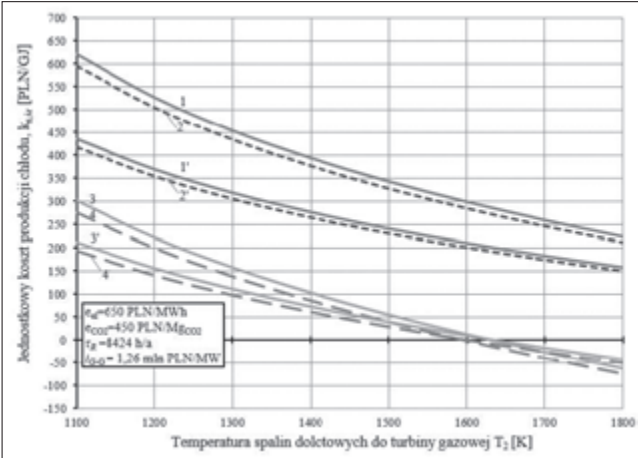
Jak wynika z przedstawionych na rysunkach 10-15 wyników obliczeń, jednostkowy koszt produkcji chłodu w największej mierze zależy od ceny energii elektrycznej. Należy przy tym zauważyć, że gdy porówna się jednostkowe koszty produkcji chłodu w układzie z ziębiarką sprężarkową dla wartości $x = 0, 1$, a więc dla takich samych w obu układach produkcjach chłodu, to jednostkowe koszty są mniejsze dla ziębiarki sprężarkowej.

Wnioski

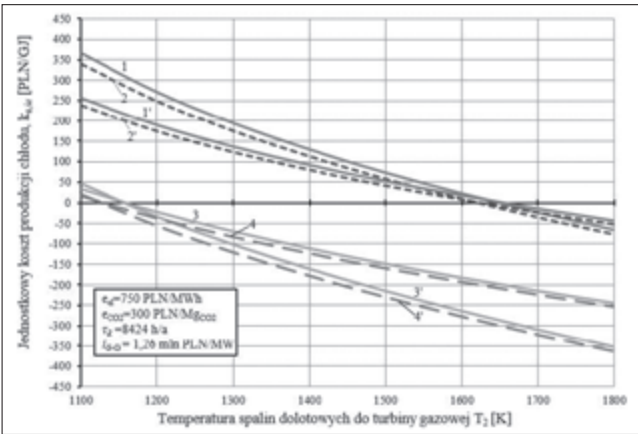
Analizując wyniki obliczeń kosztów produkcji chłodu w dwóch wariantach układów z różnymi typami ziębiarek widać, że układ z ziębiarką sprężarkową charakteryzuje się niższymi kosztami produkcji chłodu niż układ z ziębiarką cieplną. W obu układach koszt produkcji chłodu przyjmuje wartości ujemne – co oznacza występowanie kosztu unikniętego. Jednak o wiele częściej wartości



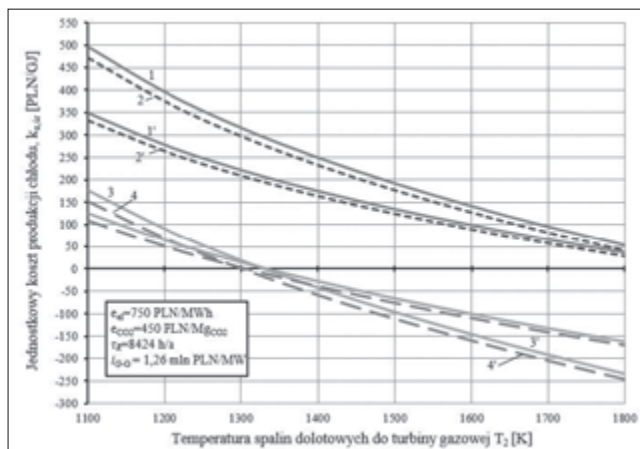
Rys. 12.
Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką cieplną absorpcyjną w funkcji temperatury spalin docelowych do turbiny gazowej T_2
Fig. 12. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and an absorption heat chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2



Rys. 13.
Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką cieplną absorpcyjną w funkcji temperatury spalin docelowych do turbiny gazowej T_2
Fig. 13. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and an absorption heat chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2



Rys. 14.
Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazo-gazowym z turboekspanderem bez regeneracji ciepła z ziębiarką cieplną absorpcyjną w funkcji temperatury spalin docelowych do turbiny gazowej T_2
Fig. 14. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and an absorption heat chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2



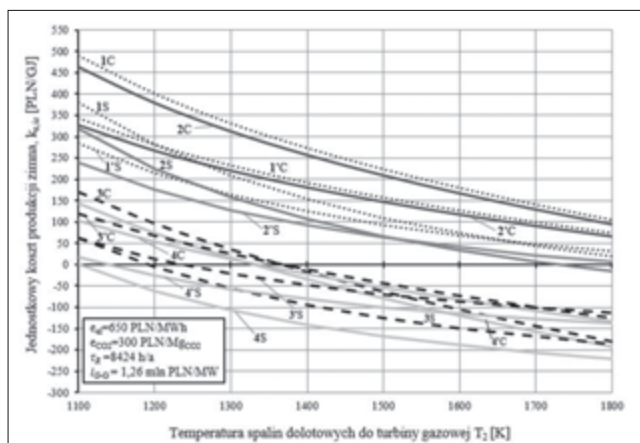
Rys. 15.

Wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazowo-gazowym z turbosprężarką bez regeneracji ciepła z ziębiarką cieplną absorpcyjną w funkcji temperatury spalin dolotowych do turbiny gazowej T_2

Fig. 15. Unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration and an absorption heat chiller as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2

ujemne jednostkowego kosztu produkcji chłodu występują w przypadku układu z ziębiarką sprężarkową. Przy wysokich cenach energii elektrycznej, układ z ziębiarką sprężarkową generuje niższe koszty niż układ z ziębiarką cieplną. Układ sprężarkowy lepiej „korzysta” z wysokiej ceny energii elektrycznej. Porównanie dwóch układów, dla przykładowych danych: ceny energii elektrycznej: $e_{el} = 650$ zł/MWh, ceny emisji CO_2 : $e_{CO_2} = 300$ zł przedstawiono na rys. 16 (dane wejściowe znajdują się w Tabeli 2, symbolem „S” oznaczono linie z wartością kosztów dla układu z ziębiarką sprężarkową, symbolem „C” dla układu z ziębiarką cieplną).

Należy ponadto zaznaczyć, że produkcja energii elektrycznej w układach zarówno z ziębiarką sprężarkową, jak i cieplną, jest tym większa, im większa jest sprawność jej wytwarzania w turbosprężarce gazowym i turbosprężarce, a więc im wyższa jest T_2 – temperatura dolotowych do turbosprężarki gazowej spalin. Ze wzrostem zatem tej temperatury w znacznym stopniu maleją jednostkowe koszty produkcji chłodu. Ziębiarka sprężarkowa jest napędzana energią elektryczną wytwarzaną w układzie. Przy-



Rys. 16.

Porównanie wartości jednostkowych kosztów produkcji chłodu $k_{z, sr}$ w układzie gazowo-gazowym z turbosprężarką bez regeneracji ciepła z ziębiarką sprężarkową (linie oznaczone symbolem „S”) oraz w układzie gazowo-gazowym z turbosprężarką bez regeneracji ciepła z ziębiarką cieplną absorpcyjną (linie oznaczone symbolem „C”) w funkcji temperatury spalin dolotowych do turbiny gazowej T_2

Fig. 16. Comparison of the unit values of cold production costs $k_{z, sr}$ in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration with a compressor chiller (lines marked with the symbol „S”) and in a gas-gas system with a turboexpander without heat regeneration with an absorption heat chiller (lines marked with the symbol „C”) as a function of the gas turbine inlet exhaust gas temperature T_2

chód ze sprzedaży elektryczności w układzie z ziębiarką sprężarkową maleje ze wzrostem jego mocy ziębniczej. Ziębiarki cieplne, które mogą korzystać z ciepła odpadowego lub odnawialnych źródeł energii, mogą mieć przewagę związaną z ilością emisji CO_2 – pod warunkiem niskich kosztów źródła ciepła.

Wzrost ceny emisji CO_2 wpływa niekorzystnie na koszty produkcji chłodu w obu układach. Jednak wyraźnie widać, że w przypadku układów z ziębiarką sprężarką jednostkowy koszt produkcji chłodu jest znacznie niższy niż w przypadku układu z ziębiarką cieplną. Przykładowo, w jednej grupie obliczeń, gdy analizowano koszty przy następujących danych: cenę energii elektrycznej: $e_{el} = 550$ zł/MWh, cena emisji CO_2 : $e_{CO_2} = 450$ zł/Mg CO_2 (rys. 5, rys. 11), jednostkowy koszt produkcji chłodu w układzie sprężarkowym w wielu przypadkach spada poniżej 100 zł/MWh, podczas gdy w układzie z ziębiarką cieplną rzadko kiedy spada poniżej 200 zł/MWh. W układzie z ziębiarką cieplną jednostkowe koszty produkcji chłodu nie przyjmują w ogóle wartości ujemnych, co oznacza, że produkcja chłodu w takim wypadku zawsze będzie wiążała się z mniejszym przychodem. Układ sprężarkowy osiąga wartości ujemne, co oznacza, że w niektórych warunkach jego zastosowanie jest ekonomicznie korzystne (produkcja chłodu jest kosztem unikniętym).

Zaletą układu z ziębiarką sprężarkową, jest też to, że dzięki napędzaniu ziębiarki energią elektryczną, jego moc ziębnicza może być dowolnie duża. W ziębiarce cieplnej jest ona natomiast bardzo mocno ograniczona możliwym do wykorzystania zakresem temperaturowym entalpii spalin wylotowych z silnika służących do jej napędu.

LITERATURA:

- [1] Bartnik, R., Buryn Z., Hnyduki-Stefan A.: Thermodynamic and economic analysis of a gas turbine set coupled with a turboexpander in a hierarchical gas-gas system, Energy, Volume 190, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116394>
- [2] Bartnik R., Skomudek W., Buryn Z., Hnyduki-Stefan A., Skomudek W., Otawa A.: Thermodynamic and Economic Analysis of Trigeneration System Comprising a Hierarchical Gas-Gas Engine for Production of Electricity, Heat and Cold, Energies, 2020, vol. 13, nr 4, s. 1-37, numer artykułu: 1006. DOI:10.3390/en13041006
- [3] Bartnik R., Buryn Z., Hnyduki-Stefan A.: Ekonomika Energetyki w modelach matematycznych z czasem ciągłym. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [4] Bartnik R., Bartnik B., Hnyduki-Stefan A.: Optimum Investment Strategy in the Power Industry. Mathematical Models. Wydawnictwo Springer, New York 2016.
- [5] Bartnik R.: The Modernization Potential of Gas Turbines in the Coal-Fired Power Industry. Thermal and Economic Effectiveness, Wydawnictwo Springer, London 2013.
- [6] Bartnik R., Buryn Z., Hnyduki-Stefan A.: Investment Strategy in Heating and CHP. Mathematical Models. Wydawnictwo Springer, London 2017
- [7] Michalak J.: Metody oceny opłacalności wybranych inwestycji energetycznych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2020.
- [8] Nowak W.: Układy poligeneracyjne do skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu, Energetyka Rozproszona, Wydawnictwo AGH, nr 4, s.63-70, 2021.
- [9] Kalina J.: Skojarzone wytwarzanie ciepła, zimna i energii elektrycznej w systemach trójgeneracyjnych – aspekty techniczne i ekonomiczne, Kogeneracja w energetyce przemysłowej i komunalnej, opracowanie Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej w Gliwicach, s. 225-244, [https://docplayer.pl/4925097-Skojarzone-wytwarzanie-ciepła-zimna-i-energii-elektrycznej-w-systemach-trójgeneracyjnych-aspekty-techniczne-i-ekonomiczne.html?utm_source=chatgpt.com], dostęp: 5.05.2025 r.
- [10] Portal Globenergia: ETS coraz droższe? Ceny uprawnień do emisji osiągną szczyt w 2030 roku, [<https://globenergia.pl/ets-coraz-drozsze-ceny-uprawnien-do-emisji-osiagną-szczyt-w-2030-roku/>], dostęp: 30.05.2025 r.
- [11] Portal Energetyka24: Ceny uprawnień do emisji CO_2 mogą zaliczyć „astronomiczny wzrost”, [<https://energetyka24.com/elektroenergetyka/wiadomosci/ceny-uprawnien-do-emisji-co2-moga-zaliczyc-astronomiczny-wzrost/>], dostęp: 30.05.2025 r.
- [12] Reszewska S.: Trigeneracja rozproszona w warunkach wrocławskich, Instal 4/2025, s. 21-26, DOI10.36119/15.2025.4.2
- [13] Ziembicki P., Bernasiński J., Francuz R.: Wytwarzanie chłodu z ciepła sieciowego w Zielonej Górze, Instal 9/2016, s. 38-43