

Ryszard Bartnik, Zbigniew Buryń, Anna Hnydiuk-Stefan

Politechnika Opolska, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki

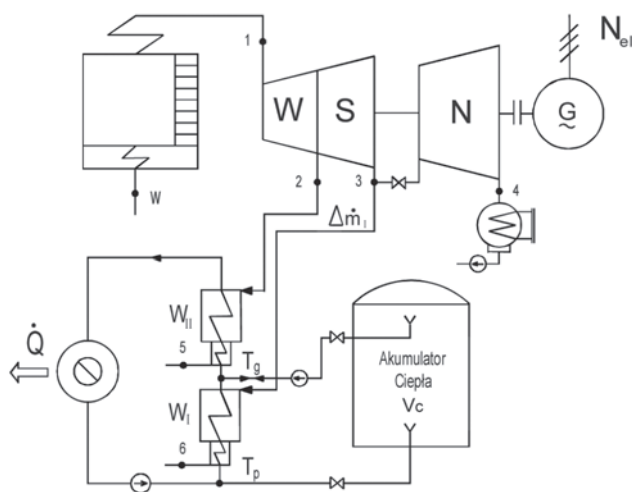
Adam Juszczyk

ArcelorMittal Poland S.A. Oddział Zdzeszowice

## Metodyka i model matematyczny z czasem ciągłym poszukiwania optymalnej objętości akumulatora ciepła do elektrociepłowni

### Methodology and a continuous time mathematical model for selecting the optimum capacity of a heat accumulator integrated with a CHP plant

Akumulator ciepła (rys. 1) pozwala gromadzić gorącą wodę sieciową w godzinach  $\tau_a$  zmniejszonego zapotrzebowania na energię elektryczną.



Rys. 1. Schemat ideowy elektrociepłowni z akumulatorem ciepła [3];

$G$  – generator;  $N_{el}$  – moc elektryczna elektrociepłowni;  
 $\dot{Q}$  – moc cieplna elektrociepłowni,  $T_g$ ,  $T_p$  – temperatura wody sieciowej po i przed podgrzaniem;  $V_c$  – objętość akumulatora ciepła;  
 $W$ ,  $S$ ,  $N$  – części wysoko-, średnio- i niskoprężna turbiny;  
 $W_I$  – wymiennik ciepłowniczy podstawowy;  
 $W_{II}$  – wymiennik ciepłowniczy szczytowy;  
 $\Delta \dot{m}_1$  – przyrost strumienia pary upustowej w upuście regulowanym

Akumulacji podlega wówczas dodatkowa ilość wody sieciowej, która jest podgrzewana w wymienniku podstawowym  $W_I$  (wymaga to zwiększenia mocy wymiennika) dzięki zwiększonemu strumieniowi upustowej pary grzejnej o wartość  $\Delta \dot{m}_1$ . W godzinach szczytu ( $\tau_D - \tau_a$ ) upust zasilający wymiennik  $W_I$  jest zamykany i cała upustowa para grzejna jest kierowana do części kondensacyjnej turbiny w celu produkcji dodatkowej, szczytowej energii elektrycznej, a zgromadzona w akumulatorze podgrzana woda jest w tym czasie wprowadzana do sieci ciepłowniczej i uzupełnia brakującą moc cieplną. Produkcja dodatkowej ilości energii elektrycznej w elektrociepłowni w szczycie obciążenia Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) i jej obniżenie w okresie doliny dzięki akumulacji ciepła może zwiększyć efektywność ekonomiczną jej pracy. O tym zatem czy budować, czy nie budować akumulatorów ciepła powinien decydować rachunek ekonomiczny [2-5].

#### Metodyka i analiza ekonomiczna doboru akumulatora ciepła do elektrociepłowni

Fundamentalnym problemem przy budowie akumulatora ciepła jest znalezienie jego objętości optymalnej  $V_c^{opt}$ , tj. objętości gwarantującej największy możliwy do osiągnięcia zdyskontowany zysk  $NPV$  z jego eksploatacji (wzór (7)). Aby tę objętość znaleźć należy, co istotne, posłużyć się nowatorskim zapisem zysku  $NPV$  z czasem ciągłym (wzór (1)) [1, 3] i wyrazić go za pomocą  $V_c$ . Do tej pory nie było to możliwe, gdyż istniał tylko zapis dyskretny miernika  $NPV$  [1].

Nowatorska metodyka [1, 3] zapisu zysku w czasie ciągłym za pomocą funkcjonału całkowego:

(1)

$$NPV = \int_0^T \{S_R(t) - K_e(t) - F(t) - R(t) - [S_R(t) - K_e(t) - F(t) - A(t)]p\} e^{-rt} dt$$

gdzie:

$A(t)$  – rata amortyzacji,

$e^{-rt}$  – czynnik dyskontujący pieniądze wstecz,

$F(t)$  – zmienne w czasie odsetki (koszty finansowe) od środków inwestycyjnych  $J_0$ ; odsetki  $F$  są funkcją zmiennych w czasie rat  $R$ ;  $F = F[R(t)]$ , (suma  $F+A$  to koszt kapitałowy),

$K_e(t)$  – zmienne w czasie koszty eksploatacji,

$p$  – zmienna w czasie stopa podatku dochodowego od zysku brutto,

$r$  – zmienna w czasie stopa oprocentowania kapitału inwestycyjnego,

$R(t)$  – zmienna w czasie rata spłaty kredytu,

$S_R(t)$  – zmienne w czasie przychody ze sprzedaży produktów (np. energii elektrycznej),

$t$  – czas,

$T$  – wyrażony w latach kalkulacyjny okres eksploatacji przedsięwzięcia inwestycyjnego,

daje zatem całkowicie nową jakość i nowe możliwości analiz techniczno-ekonomicznych wszelkich procesów inwestycyjnych. Dzięki zapisowi „ciągłemu” (1) otrzymuje się bowiem w konsekwencji:

- funkcje  $NPV$  dla analizowanych procesów, gdy tymczasem zapis dyskretny daje wyłącznie szczegół (punkt), tj. wartość liczbową  $NPV$ , co uniemożliwia jakąkolwiek analizę, i nie zmienia tego obliczenie nawet kilkudziesięciu, i więcej, wartości  $NPV$  i uznanie największej z nich za optymalną.

Dzięki nowatorskiej metodyce można w analizach wykorzystywać:

- rachunek różniczkowy do badania zmienności funkcji  $NPV$ , co pozwala uzyskiwać wyczerpujące o nich informacje, a także na sporządzanie ich wykresów, co umożliwi uzyskanie całego szeregu dodatkowych, ważnych informacji, których bez nich nie można by, a co najmniej byłoby trudno, dostrzec. Co więcej, rachunek różniczkowy pozwala na łatwe znalezienie wartości ekstremalnych i wartości największej funkcji  $NPV$ .

Kolejna szalenie istotna sprawa. Zapis „ciągły” umożliwia:

- wykorzystywanie dowolnych funkcji podcałkowych, tj. dowolnych scenariuszy czasowych w funkcjonałach (1) charakteryzujących analizowany proces inwestycyjny, które pozwalają, co bardzo ważne, analizować przyszłość, kreować myślenie o niej w sposób naukowy.

Podsumowując, otrzymane za pomocą funkcjonału (1) funkcje  $NPV$  mają fundamentalną, wręcz nie do przecenienia wartość. Dają bowiem całościowy obraz analizowanych procesów, którego nie daje zapis dyskretny miernika  $NPV$  i otrzymane za jego pomocą wartości „punktowe”. Funkcje te umożliwiają tym samym dyskusję i analizę wyników badań, umożliwiając wyciąganie wniosków o ogólnym charakterze o analizowanych procesach inwestycyjnych.

W przypadku analizy opłacalności budowy akumulatora ciepła zapis ciągły pozwala na pokazanie charakteru przebiegu funkcji  $NPV = f(V_c)$  w całym przedziale zmienności jego objętości

$V_c \in (0; \infty)$  – rysunki 2, 3. Funkcjonał (1) dla akumulatora należy zapisać zależnością [3, 5]:

(2)

$$NPV = \int_0^T [\Delta S_R - \Delta K_e - F^{aku} - R^{aku} - (\Delta S_R - \Delta K_e - F^{aku} - A^{aku})p] e^{-rt} dt,$$

z którego otrzymuje się końcową postać funkcji  $NPV = f(V_c)$  (wzór (7)),

gdzie:

$A^{aku}$  – rata amortyzacji,  $A^{aku} = J^{aku}/T$  [1-3],

$F^{aku}$  – zmienne w czasie odsetki (koszty finansowe) od środków inwestycyjnych  $J^{aku}$ ,  $F^{aku} = r[J^{aku} - (t-1)R^{aku}]$  [1-3],

$\Delta K_e$  – zmienny w czasie roczny przyrost kosztów eksploatacji w wyniku zabudowy w elektrociepłowni akumulatora ciepła [3, 5],

$R^{aku}$  – rata spłaty kredytu,  $R^{aku} = J^{aku}/T$  [1-3],

$\Delta S_R$  – zmienny w czasie przyrost rocznego przychodu z produkcji szczytowej energii elektrycznej [3, 5].

Nakłady inwestycyjne pod klucz na akumulator ciepła wynoszą [4]:

- akumulator ciśnieniowy:

$$J_{cis}^{aku} = 48,281(V_c)^{0,4955} \text{ [tys. USD]} \quad (3)$$

- akumulator bezciśnieniowy:

$$J_{bezcis}^{aku} = 2,5083(V_c)^{0,6442} \text{ [tys. USD]} \quad (4)$$

przy czym objętość  $V_c$  wyrażona jest w m<sup>3</sup>. Okres trwania budowy to 1 rok.

Ponieważ produkcja ciepła jest różna w sezonie grzewczym (zimowym, oznaczonym indeksem „z”) i poza sezonem (w sezonie letnim, oznaczonym indeksem „l”), roczny przyrost przychodu wynikający z produkcji szczytowej energii elektrycznej netto we wzorze (2) należy wyrazić zależnością [3, 5]:

$$\begin{aligned} \Delta S_R = & \{L_z [\Delta \dot{m}_l^z (i_3 - i_4) \eta_{me} (\tau_D - \tau_a^z) (e_{el}^{sz} - e_{el}^d) + \\ & + \dot{m}_l^z (i_3 - i_4) \eta_{me} (\tau_D - \tau_a^z) e_{el}^{sz} - \Delta \dot{m}_l^z (i_3 - i_4) \eta_{me} \tau_a^z e_{el}^d] + \\ & + L_l [\Delta \dot{m}_l^l (i_3 - i_4) \eta_{me} (\tau_D - \tau_a^l) (e_{el}^{sz} - e_{el}^d) + \\ & + \dot{m}_l^l (i_3 - i_4) \eta_{me} (\tau_D - \tau_a^l) e_{el}^{sz} - \Delta \dot{m}_l^l (i_3 - i_4) \eta_{me} \tau_a^l e_{el}^d] \} (1 - \varepsilon_{el}), \end{aligned} \quad (5)$$

a roczny przyrost kosztów eksploatacji elektrociepłowni w wyniku zabudowy w niej akumulatora ciepła równa się kosztowi jego konserwacji i remontów:

$$\Delta K_e = \delta_{rem} J^{aku} \quad (6)$$

gdzie:

$e_{el}^d, e_{el}^{sz}$  – ceny energii elektrycznej w dolinie i szczytce obciążenia KSE,

$i_3, i_4$  – entalpie właściwe pary (rys. 1),

$L_z$  – liczba dni trwania sezonu grzewczego,

$L_l$  – liczba dni poza sezonem grzewczym,  $L_l = 365 - L_z$ ,

$\delta_{rem}$  – stopa kosztów stałych zależnych od nakładów inwestycyjnych na akumulator (koszty konserwacji, remontów),

$\varepsilon_{el}$  – wskaźnik elektrycznych potrzeb własnych elektrociepłowni,

$\eta_{me}$  – sprawność elektromechaniczna turbopozostu,

$\tau_a$  – liczba godzin ładowania akumulatora ciepła (liczba godzin doliny obciążenia KSE),

$\tau_D$  – liczba godzin doby.

W zależności (5) założono, że ceny energii elektrycznej w szczytach i dołnach potrzeb w okresach grzewczym i pozagrzewczym są sobie równe. W obliczeniach ponadto wyrażono zmianę ich wartości w czasie za pomocą funkcji wykładniczej  $e_{el}(t) = e^{t=0} e^{a_{el}t}$  (w zależności od wartości  $a_{el}$  cena  $e_{el}(t)$  może rosnać, maleć lub być niezmienna).

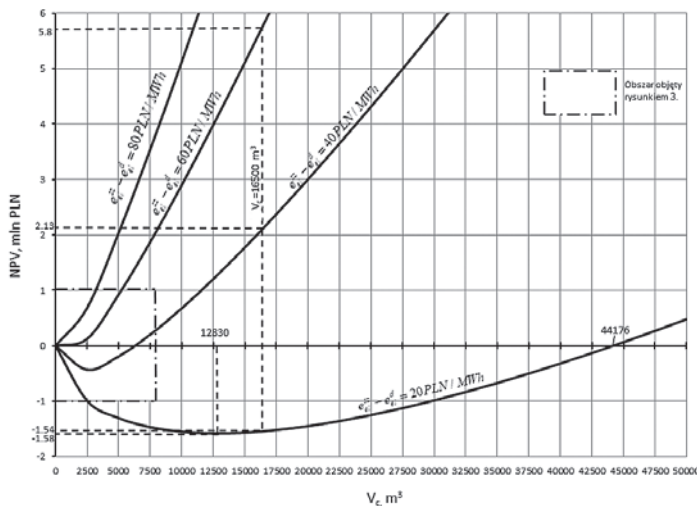
Po wyrażeniu wszystkich funkcji podcałkowych w funkcjonale (2) za pomocą  $V_c$  [5] i wykonaniu operacji jego scałkowania otrzymuje się końcową zależność na zysk  $NPV$  w postaci:

$$NPV = \left\{ L_c V_c \rho_w c_w (T_g^z - T_p^z) \frac{i_3 - i_4}{i_3 - i_6} \frac{\tau_D}{\tau_a^z} \eta_{mc} (1 - \varepsilon_{el}) \left[ e^{a_{el}^z t=0} \frac{e^{(a_{el}^z - r)T} - 1}{a_{el}^z - r} - e^{a_{el}^d t=0} \frac{e^{(a_{el}^d - r)T} - 1}{a_{el}^d - r} \right] + L_l \left[ \frac{V_c \rho_w c_w (T_g^z - T_p^z)}{\beta(i_3 - i_6)(\tau_D - \tau_a^z)} + \frac{V_c \rho_w c_w (T_g^z - T_p^z)}{\beta(i_3 - i_6)\tau_a^z} \right] \frac{\tau_a^z}{\tau_a^l} (i_3 - i_4) \eta_{mc} (1 - \varepsilon_{el}) (\tau_D - \tau_a^l) \times \right. \quad (7)$$

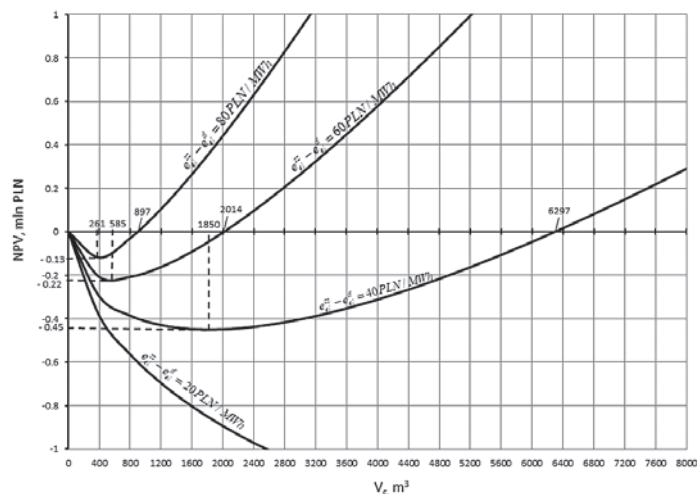
$$\times e^{a_{el}^z t=0} \frac{e^{(a_{el}^z - r)T} - 1}{a_{el}^z - r} - L_l \left\{ \left[ \frac{V_c \rho_w c_w (T_g^z - T_p^z)}{\beta(i_3 - i_6)(\tau_D - \tau_a^z)} + \frac{V_c \rho_w c_w (T_g^z - T_p^z)}{\beta(i_3 - i_6)\tau_a^z} \right] \frac{\tau_a^z}{\tau_a^l} - \frac{V_c \rho_w c_w (T_g^z - T_p^z)}{\beta(i_3 - i_6)(\tau_D - \tau_a^z)} \right\} \times$$

$$\times (i_3 - i_4) \eta_{mc} (1 - \varepsilon_{el}) \tau_D e^{a_{el}^d t=0} \frac{e^{(a_{el}^d - r)T} - 1}{a_{el}^d - r} - AV_c^B \left[ (1 - e^{-rT}) \frac{\delta_{rem}}{r} + z \left( \frac{1 - e^{-rT}}{T} + 1 \right) \right] \} (1 - p) \rightarrow \max$$

przy czym współczynniki A i B w (7) przyjmują wartości, jak we wzorach (3), (4).



Rys. 2. Wartość bieżąca netto  $NPV$  w funkcji objętości akumulatora ciepła



Rys. 3. Wybrany obszar z rysunku 2. w powiększeniu

Druga pochodna zysku  $NPV$  względem  $V_c$  przyjmuje wyłącznie wartości dodatnie. Funkcja  $NPV = f(V_c)$  jest zatem krzywą wklęsłą w całym przedziale zmienności objętości  $V_c \in (0; \infty)$  i ma minimum przyjmujące zawsze wartość ujemną:  $NPV_{\min} = f(V_c^{\min}) < 0$ . Funkcja  $NPV = f(V_c)$  jest zatem stale malejąca w przedziale  $V_c \in (0; V_c^{\min})$  i stale rosnąca w przedziale  $V_c \in (V_c^{\min}; \infty)$  – rysunki 2, 3.

Wartość  $NPV$  dąży zatem do nieskończoności, gdy objętość  $V_c$  dąży do nieskończoności:  $NPV \rightarrow \infty$ , gdy  $V_c \rightarrow \infty$ . Wartość  $V_c^{\min}$  oblicza się z warunku koniecznego istnienia ekstremum  $dNPV/dV_c = 0$  i jest tym większa, im mniejsza jest wartość  $e_{el}^z - e_{el}^d$ . Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przebiegi krzywych zysku  $NPV$  w funkcji objętości akumulatora ciepła  $V_c$  z różnicą cen energii elektrycznej  $e_{el}^z - e_{el}^d$  jako parametrem. Do obliczeń przyjęto ponadto następujące dane wejściowe:  $a_{el}^z = a_{el}^d = 0$ ,  $i_3 = 2600$  kJ/kg,  $i_4 = 2355$  kJ/kg,  $i_6 = 305$  kJ/kg,  $L_c = 225$  dni,  $p = 19\%$ ,  $r = 6\%$ ,  $T = 15$  lat,  $T_g^z - T_p^z = 25$  K,  $z = 1,03$ ,  $\beta = 5$ ,  $\delta_{rem} = 3\%$ ,  $\varepsilon_{el} = 7\%$ ,  $\eta_{mc} = 95\%$ ,  $\tau_a^z = 12$  h,  $\tau_a^l = \tau_a^z$ .

Na przykład dla  $e_{el}^z - e_{el}^d = 40$  PLN/MWh  $V_c = 1850$  m³. Rysunki 2 i 3 sporządzono dla bezciśnieniowego akumulatora ciepła, a więc dla nakładów inwestycyjnych przedstawionych równaniem (4). Dla akumulatora ciśnieniowego krzywe te, dla takich samych danych wejściowych jak dla akumulatora bezciśnieniowego, leżą w zakresie wartości ujemnych  $NPV$  dla realnego, tj. możliwego do zaakceptowania w praktyce przedziału zmienności objętości  $V_c$ , tj. przedziału, w którym wymiary akumulatora nie przekraczają sensownych technicznie wartości. Aby  $NPV$  przyjmował wartości dodatnie dla akceptowalnych wymiarów akumulatora, to różnica  $e_{el}^z - e_{el}^d$  musiałaby być wielokrotnie większa od różnicy dla akumulatora bezciśnieniowego. Wynika to z wielokrotnie większych nakładów inwestycyjnych na akumulator ciśnieniowy, wzór (3).

Jak wynika z charakteru przebiegu krzywych na rysunkach 2 i 3, największą wartość zysk  $NPV_{\max}$  osiąga dla jak największej wartości objętości  $V_c$ . W praktyce objętość  $V_c$  jest, co oczywiste, ograniczona. Największą wartość, nazwaną objętością optymalną  $V_c^{opt}$ , przyjmuje dla maksymalnej możliwej do osiągnięcia wartości przyrostu strumienia upustowej pary grzejnej  $\Delta \dot{m}_{I \max}^z$  w upuście regulowanym, z którego zasilany jest wymiennik  $W_I$  (rys. 1):

$$V_c^{opt} = \frac{\Delta \dot{m}_{I \max}^z \tau_a^z (i_3 - i_6)}{\rho_w c_w (T_g^z - T_p^z)} \quad (8)$$

Im wartość  $\Delta \dot{m}_{I \max}^z$  jest większa, tym większa jest zatem wartość  $V_c^{opt}$ , a tym samym większa jest wartość  $NPV_{\max}$ . Wartość  $NPV_{\max}$  jest ponadto tym większa, im większa jest wartość różnicy

cen  $e_{el}^{sz} - e_{el}^d$  (rys. 2, 3). Maksymalna możliwa wartość przyrostu strumienia pary  $\Delta \dot{m}_{I_{max}}^z$  jest, jak już zaznaczono, ograniczona od góry minimalnym możliwym strumieniem pary  $\dot{m}_4$ , który musi być odprowadzany do skraplacza turbiny – rys. 1. Strumień ten musi być na tyle duży, by zapewnić konieczne chłodzenie ostatnich stopni części niskoprężnej turbiny oraz by nie dopuścić do ich pracy wentylacyjnej. Ten minimalny strumień  $\dot{m}_4$  wynosi ok. 6-10% nominalnego strumienia masy pary  $\dot{m}_1$  doprowadzanego do części wysokoprężnej turbiny – rys. 1. Jeśli strumień  $\Delta \dot{m}_{I_{max}}^z$  jest na tyle mały, że przy danej możliwej do uzyskania na rynku energii elektrycznej różnicy cen  $e_{el}^{sz} - e_{el}^d$  wartość objętości  $V_c^{opt}$  otrzymana ze wzoru (8) jest mniejsza od wartości granicznej  $V_c^{gr}$ , tj. wartości, dla której zysk  $NPV$  jest równy zero, to wówczas budowa akumulatora jest nieopłacalna ekonomicznie, gdyż wówczas zysk  $NPV$  jest ujemny. Gdyby ta różnica wynosiła na przykład tylko  $e_{el}^{sz} - e_{el}^d = 20$  PLN/MWh, to dla wartości  $V_c = 16500$  m<sup>3</sup>, a więc wartości mniejszej od wartości granicznej równej  $V_c^{gr} = 44176$  m<sup>3</sup>, rys. 2, budowa akumulatora ciepła byłaby nieopłacalna. Wartość bowiem zysku jest wówczas ujemna i wynosi  $NPV = -1,54$  mln PLN. Opłacalna byłaby natomiast, gdyby różnica wynosiła  $e_{el}^{sz} - e_{el}^d = 40$  PLN/MWh ( $V_c^{gr} = 6297$  m<sup>3</sup>) i w jeszcze większym stopniu dla różnicy  $e_{el}^{sz} - e_{el}^d = 60$  PLN/MWh ( $V_c^{gr} = 2014$  m<sup>3</sup>). Wartości zysku są bowiem wówczas dodatnie i wynoszą odpowiednio  $NPV_{max} = 2,13$  mln PLN oraz  $NPV_{max} = 5,8$  mln PLN. *Warunek konieczny* opłacalności stosowania akumulatorów ciepła należy zatem zapisać relacją:

$$V_c \geq V_c^{gr}. \quad (9)$$

## Podsumowanie

Zastosowana w pracy nowatorska metodyka w zapisie z czasem ciągłym daje całkowicie nową jakość analiz ekonomicznych wszelkich procesów inwestycyjnych. Wykorzystanie jej przy poszukiwaniu optymalnej objętości akumulatora ciepła do elektrociepłowni (wzór (2)), tj. objętości gwarantującej największy możliwy do osiągnięcia zysk  $NPV_{max}$  z jego eksploatacji pozwoliło na otrzymanie funkcji  $NPV = f(V_c)$  (wzór (7)). Jest to bardzo istotne, gdyż znajomość jej przebiegu w całym przedziale zmienności objętości  $V_c \in \langle 0; \infty \rangle$  – rysunek 2 – daje, co należy z całą mocą podkreślić, całościowe spojrzenie na rozważany problem. Znany i stosowany do tej pory zapis dyskretny miernika  $NPV$  (krok dyskretyzacji to 1 rok) takiej możliwości nie dawał. Uzyskany bowiem wówczas wynik, to jedynie wartość liczbowa. Obliczenie nawet wartości  $NPV$  dla bardzo wielu wartości  $V_c$  nie pozwala na ocenę charakteru przebiegu krzywej  $NPV$ . „Punktowe” wyniki nie dają zatem możliwości uogólniania rozważań, a jedynie droga od ogółu do szczegółu jest poprawna i taką możliwość daje. Przejście natomiast od szczegółu do ogółu najczęściej – żeby nie powiedzieć, że zwykle – nie bywa prawdziwe.

Dzięki zastosowaniu nowatorskiej metodyki otrzymano także, co równie bardzo ważne, wzór (8). Ma on, co należy bardzo mocno podkreślić, charakter uniwersalny. Pozwala bowiem znaleźć optymalną objętość akumulatora ciepła do każdej elektrociepłowni, a więc niezależnie od jej mocy cieplnej oraz od tego, czy jest to elektrociepłownia zbudowana w układzie blokowym, tj. o jednoznacznym przyporządkowaniu kotła do turbiny (rys. 1), czy kolektorowym. Okazuje się przy tym, co jest kolejnym istotnym wnioskiem uzyskanym dzięki zastosowaniu metodyki „ciągłej”, że jedynymi niezbędnymi wielkościami do obliczenia  $V_c^{opt}$  są wyłącznie entalpie właściwe pary  $i_3, i_6$  oraz strumień  $\Delta \dot{m}_{I_{max}}^z$ . Kolejna ważna sprawa. Jeżeli otrzymana ze wzoru (8) objętość akumulatora ciepła dla danej, możliwej do uzyskania na rynku wartości różnicy cen  $e_{el}^{sz} - e_{el}^d$  jest mniejsza od wartości granicznej  $V_c^{gr}$ , tj. wartości, dla której zysk  $NPV$  (wzór (7)) jest równy zero (rys. 2), to wówczas budowa akumulatora jest nieopłacalna ekonomicznie. Ma ona sens tylko wówczas, gdy różnica cen  $e_{el}^{sz} - e_{el}^d$  zakupu energii elektrycznej w szczycie i w dolinie zapotrzebowania na energię elektryczną w KSE gwarantuje, że  $NPV = f(V_c) > 0$ . Różnica ta obok nakładów inwestycyjnych  $J^{aku}$  w głównej mierze decyduje o ekonomicznej opłacalności stosowania akumulatorów ciepła.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Bartnik R., *Poszukiwanie optymalnej strategii inwestycyjnej w energetyce. Metodyka i wyniki przykładowych obliczeń*, „Energetyka” 2015, nr 10.
- [2] Bartnik R., Buryń Z., Hnydiuk-Stefan A., *Ekonomika energetyki w modelach matematycznych z czasem ciągłym*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2017.
- [3] Bartnik R., Bartnik B., *Rachunek ekonomiczny w energetyce*, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2014.
- [4] Zuwała J., Akumulacja ciepła w elektrociepłowniach w aspekcie dodatkowej produkcji szczytowej energii elektrycznej, Rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska, Gliwice 2003.
- [5] Bartnik R., Buryń Z., Hnydiuk-Stefan A., Juszczyk A., *Methodology and continuous time mathematical model for selecting an optimum capacity of a heat accumulator integrated with a CHP plant*, “Energies”, 2018, Volume 11, Issue 5.

