

METODYKA I MODELE MATEMATYCZNE Z CZASEM CIĄGŁYM ANALIZY WARTOŚCI RYNKOWEJ CIEPŁOWNI I ELEKTROCIEPŁOWNI ORAZ WARTOŚCI RYNKU CIEPŁA PRZEZ NIE ZASILANEGO

Ryszard BARTNIK, Zbigniew BURYŃ, Anna HNYDIUK-STEFAN,
Adam JUSZCZAK

Streszczenie. W pracy przedstawiono oryginalną metodykę oraz modele matematyczne z czasem ciągłym analizy wartości rynkowej ciepłowni i elektrociepłowni oraz wartości rynku ciepła przez nie zasilanego.

Słowa kluczowe: ciepłownia, elektrociepłownia, wartość rynkowa, rynek ciepła, modele matematyczne z czasem ciągłym.

1. Wprowadzenia

W pracy przedstawiono, co istotne, oryginalną metodykę i modele matematyczne z czasem ciągłym analizy wartości rynkowej ciepłowni i elektrociepłowni, a także analizy i wyceny wartości rynku ciepła przez nie zasilanego. Są one uogólnieniem metodyki i modeli matematycznych wartości rynkowej elektrowni i rynku energii elektrycznej przez nie zasilanego przedstawionych w [2].

Wartość rynkowa ciepłowni i elektrociepłowni J_{rw} , to cena ich sprzedaży/zakupu przez ich właściciela/nabywcę, przy której zarówno właściciel jak i nabywca osiągają satysfakcjonujący ich zysk. Wartość rynku ciepła, i nie tylko, to natomiast wyrażony w pieniądzu zysk NPV , jaki można osiągnąć lokując na nim środki finansowe. Podstawowym kryterium wyceny wartości dowolnych przedsiębiorstw, a więc także źródeł ciepła, powinna być osiągnięta stopa oprocentowania IRR inwestowanego kapitału [1]. Satysfakcjonujący zysk dla kupującego lub budującego ciepłownię lub elektrociepłownię, zwanym dalej IPP (*Independent Power Producer*), to zatem odpowiednia wysokość stopy oprocentowania IRR_{rw}^{IPP} kapitału J_{rw} , jaki zamierza w nie zainwestować. Oprocentowanie to powinno być większe od oprocentowania, jakie mógłby osiągnąć lokując środki finansowe J_{rw} na rynku kapitałowym. Satysfakcjonujący zysk dla sprzedającego ciepłownię lub elektrociepłownię, to odpowiednia wysokość udziału v_m (tzw. względna wartość rynku) we współwłasności ciepłowni lub elektrociepłowni, jaką chce zachować dla siebie. Wielkości IRR_{rw}^{IPP} i v_m są ze sobą ściśle powiązane. Kupując ciepłownię lub elektrociepłownię IPP przejmuje także, proporcjonalnie do swojego udziału $(1 - v_m)$ w jej współwłasności, zobowiązania finansowe, jeśli jeszcze są, związane z kredytem zaciągniętym na ich budowę. Wartość rynkowa ciepłowni lub elektrociepłowni oraz wartość rynku ciepła przez nie zasilanego zależą od jednostkowego kosztu wytwarzania ciepła w ciepłowni lub elektrociepłowni oraz wielkości jego produkcji (popytu na ciepło). Wysokość kosztów i wysokość produkcji ciepła zależą od technologii jego wytwarzania.

2. Metodyka z czasem ciągłym przeprowadzania obliczeń wartości rynkowej ciepłowni i elektrociepłowni oraz wartości rynku ciepła przez nie zasilanego

W pracy przedstawiono metodykę wyznaczania wartości rynkowej ciepłowni i elektrociepłowni oraz wartości rynku ciepła i energii elektrycznej przez nie zasilanego. Gdy w modelach podstawą się za produkcję ciepła wartość zero, otrzymuje się modele dla elektrowni [1–4].

2.1. Modele matematyczne bez uwzględnienia nakładów inwestycyjnych na modernizację ciepłowni lub elektrociepłowni

2.1.1. Wartość rynkowa ciepłowni i elektrociepłowni bez uwzględnienia nakładów inwestycyjnych na ich modernizację

Fundamentalną zależnością, za pomocą której wyznacza się wartość rynkową dowolnych przedsiębiorstw, a więc także ciepłowni i elektrociepłowni, jest równanie na wewnętrzną stopę zwrotu IRR z kapitału inwestycyjnego [1–4]:

$$\int_0^T [F + A + (S_R - K_e - F - A)(1 - p)(1 - v_m)] e^{-IRR_p^{IPP} t} dt = \int_0^T [F(IRR_p^{IPP}) + R(IRR_p^{IPP})] e^{-IRR_p^{IPP} t} dt. \quad (1)$$

gdzie:

- A – rata amortyzacji,
- F – zmienne w czasie odsetki (koszty finansowe) od środków inwestycyjnych; odsetki są nieznaną funkcją zmiennych w czasie rat R ; $F = F[R(t)]$,
- K_e – zmienne w czasie roczne koszty eksploatacji,
- p – stopa podatku dochodowego,
- R – zmienna w czasie rata spłaty kredytu,
- S_R – zmienny w czasie przychód,
- t – czas,
- T – wyrażony w latach kalkulacyjny okres eksploatacji ciepłowni i elektrociepłowni,
- v_m – względna wartość rynku ciepła ($0 \leq v_m \leq 1$); jest to procentowa wartość udziału dotychczasowego właściciela we współwłasności z IPP w sprzedanej mu ciepłowni i elektrociepłowni.

W równaniu (1) i wszystkich pozostałych zależnościach w niniejszej pracy zachowano takie same oznaczenia i scenariusze zmian w czasie kosztów eksploatacji, kosztów kapitałowych i przychodów ze sprzedaży ciepła i energii elektrycznej, jak w pracach [1–4]. Po scałkowaniu zależności (1) otrzymuje się (w przypadku analizy wartości rynkowej ciepłowni oraz wartości rynku ciepła przez nią zasilanego, za roczną wartość produkcji energii elektrycznej $E_{el,R}$ w poniższych wzorach należy podstawić wartość zero):

- **wartość rynkowa ciepłowni i elektrociepłowni J_{rw}** (wzór poniższy zapisano dla ogólnego przypadku, tj. dla sytuacji, gdy w obliczeniach jest uwzględniany również podatek dochodowy od zysku brutto o stopie podatkowej p)

$$\begin{aligned}
J_{rw,p} = & \left\{ E_{el,R} e^{t=0} \frac{1}{a_{el} - IRR_{p,rw}^{IPP}} [e^{(a_{el} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - 1] + \right. \\
& + Q_R e_c^{t=0} \frac{1}{a_c - IRR_{p,rw}^{IPP}} [e^{(a_c - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - 1] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} (1 + x_{wu,m,od}) e_{pal}^{t=0} \frac{1}{a_{pal} - IRR_{p,rw}^{IPP}} [e^{(a_{pal} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - 1] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{CO_2} P_{CO_2}^{t=0} \frac{1}{a_{CO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP}} [e^{(a_{CO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - 1] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{CO} P_{CO}^{t=0} \frac{1}{a_{CO} - IRR_{p,rw}^{IPP}} [e^{(a_{CO} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - 1] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{NO_x} P_{NO_x}^{t=0} \frac{1}{a_{NO_x} - IRR_{p,rw}^{IPP}} [e^{(a_{NO_x} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - 1] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{SO_2} P_{SO_2}^{t=0} \frac{1}{a_{SO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP}} [e^{(a_{SO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - 1] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{pyl} P_{pyl}^{t=0} \frac{1}{a_{pyl} - IRR_{p,rw}^{IPP}} [e^{(a_{pyl} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - 1] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} (1-u) \rho_{CO_2} e_{CO_2}^{t=0} \frac{1}{b_{CO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP}} [e^{(b_{CO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - 1] + \\
& \left. - J(1 + x_{pt,p,ub}) \frac{\delta_{rem}}{IRR_{p,rw}^{IPP}} (1 - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} T}) \right\} \frac{(1-p)(1-v_m)}{A}
\end{aligned} \tag{2}$$

przy czym

$$\begin{aligned}
A = & \frac{(1 + IRR_{p,rw}^{IPP})^{b+1} - 1}{(b+1)IRR_{p,rw}^{IPP}} \left(1 + \frac{1 - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} T}}{T} \right) + \\
& + \frac{(1+r)^{b+1} - 1}{(b+1)r} \left[\frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1 - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} T}}{T} \left(\frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{IRR_{p,rw}^{IPP}} - \frac{r}{(IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \right) \right] [(1-p)(1-v_m) - 1]
\end{aligned} \tag{3}$$

gdzie:

a_{el} , a_c , a_{pal} , a_{CO_2} , a_{CO} , a_{SO_2} , a_{NO_x} , a_{pyl} , b_{CO_2} – wykładniki eksponent, tzw. sterowania,

b – okres trwania budowy ciepłowni i elektrociepłowni wyrażony w latach,

$e_{el}^{t=0}$, $e_c^{t=0}$, $e_{pal}^{t=0}$, $e_{CO_2}^{t=0}$, $P_{CO_2}^{t=0}$ itd. – początkowe wartości cen energii elektrycznej, ciepła,

paliwa, zakupu pozwoleń na emisję CO₂, taryfowych opłat środowiskowych,

$E_{el,R}$ – roczna produkcja netto energii elektrycznej w elektrociepłowni, MWh/a,

$IRR_{p,rw}^{IPP}$ – żądana przez *IPP* wartość stopy oprocentowania kapitału $J_{rw,p}$ przy uwzględnieniu podatku dochodowego od zysku brutto, tj. dla $p \neq 0$,
 J – nakłady inwestycyjne poniesione na budowę ciepłowni i elektrociepłowni, PLN,
 $P_{CO_2}, P_{CO}, P_{NO_x}, P_{SO_2}, P_{pył}$ – jednostkowe stawki za emisję $CO_2, CO, NO_x, SO_2, pyłu$, PLN/kg,
 Q_R – roczna produkcja netto ciepła w ciepłowni i elektrociepłowni, GJ/a,
 r – stopa oprocentowania kapitału inwestycyjnego,
 η_c – sprawność energetyczna netto wytwarzania ciepła i energii elektrycznej w elektrociepłowni,
 T – wyrażony w latach kalkulacyjny okres eksploatacji ciepłowni i elektrociepłowni,
 u – udział energii chemicznej paliwa w całkowitym jej rocznym zużyciu, dla którego nie jest wymagany zakup pozwoleń na emisję CO_2 ,
 $x_{wu,m,od}$ – współczynnik uwzględniający koszty wody uzupełniającej, materiałów pomocniczych, odprowadzania ścieków, składowania żużla, odpadów (w praktyce wartość $x_{wu,m,od}$ wynosi ok. 0,25),
 $x_{pl,p,ub}$ – współczynnik uwzględniający koszty płac, podatków, ubezpieczeń itd. (w praktyce wartość $x_{pl,p,ub}$ wynosi ok. 0,02),
 δ_{em} – roczna stopa kosztów stałych zależnych od nakładów inwestycyjnych poniesionych na budowę ciepłowni i elektrociepłowni (koszty konserwacji, remontów urządzeń),
 $\rho_{CO_2}, \rho_{CO}, \rho_{NO_x}, \rho_{SO_2}, \rho_{pył}$ – emisje $CO_2, CO, NO_x, SO_2, pyłu$ na jednostkę energii chemicznej paliwa, kg/GJ (wielkości te zależą od zastosowanego paliwa).

Wartość rynkowa ciepłowni i elektrociepłowni J_{rw} jest funkcją względnej wartości rynku v_m , stóp r i IRR_{rw}^{IPP} , cen nośników energii oraz opłat środowiskowych. Wartość J_{rw} jest wyliczana z (2) przy założeniu, że nie jest osiągnięty zysk z pracy ciepłowni lub elektrociepłowni, a więc podatek dochodowy od zysku brutto jest równy zero, czyli stopa $p = 0$. Roczny zysk jaki osiąga inwestor *IPP* jest już jednak zyskiem po opodatkowaniu i *IPP* może żądać, by wartość oprocentowania kapitału zainwestowanego w zakup ciepłowni lub elektrociepłowni obliczać dla zysku netto [1]. Uwzględniając zatem podatek dochodowy od zysku brutto, wewnętrzną stopę zwrotu $IRR_{p,rw}^{IPP}$ należy, jak już wyżej zaznaczono, wyznaczać z (2) przy $p \neq 0$ (obecnie w Polsce $p = 19\%$). W tej sytuacji na przykład dla żądanej przez *IPP* wartości $IRR_{p,rw}^{IPP}$ równej IRR_{rw}^{IPP} i dla tej samej względnej wartości rynku v_m maleje cena zakupu ciepłowni lub elektrociepłowni z wartości J_{rw} do wartości $J_{rw,p}$. Gdy natomiast $J_{rw} = J_{rw,p}$ i $IRR_{rw}^{IPP} = IRR_{p,rw}^{IPP}$, to maleje względna wartość rynku v_m i rośnie zysk NPV^{IPP} dla *IPP*.

Gdy we wzorze (2) za $J_{rw,p}$ podstawimy się rzeczywiste nakłady finansowe J poniesione na budowę ciepłowni lub elektrociepłowni oraz przy założeniu, że z eksploatacji elektrociepłowni nie jest osiągnięty zysk, a więc $p = 0$, to dla $v_m = 0$ otrzymuje się wartość całkowitego oprocentowania IRR (IRR oczywiście nie zależy od v_m), jakie przynosi kapitał J [1]. Oczywiście musi zachodzić zależność $IRR_{rw}^{IPP} \leq IRR$ (gdy $IRR_{rw}^{IPP} = IRR$, wówczas

jedynym właścicielem elektrociepłowni jest *IPP*). W przeciwnym wypadku rynek ciepła dla *IPP* jest całkowicie nieatrakcyjny.

2.1.2. Wartość rynku ciepła bez uwzględnienia nakładów inwestycyjnych na modernizację ciepłowni lub elektrociepłowni

Fundamentalną zależnością, za pomocą której wyznacza się wartość rynku zasilanego w dowolne towary przez dowolne przedsiębiorstw, a więc i wartość rynku ciepła zasilanego przez ciepłownię lub elektrociepłownię, jest równanie na całkowity zysk *NPV*, jaki się osiąga z ich eksploatacji przez okres *T* lat [1–4]:

$$NPV = \int_0^T [S_R - K_e - F - R - (S_R - K_e - F - A)p] e^{-rt} dt. \quad (4)$$

Zysk jaki osiąga *IPP* wyznacza się z równania:

$$NPV^{IPP} = (1 - v_m) \int_0^T [S_R - K_e - F - R - (S_R - K_e - F - A)p] e^{-rt} dt. \quad (5)$$

Po scałkowaniu (5) otrzymuje się:

– wartość rynku ciepła dla *IPP*

$$\begin{aligned} NPV^{IPP} = & \left\{ E_{el,R} e^{t=0} \frac{1}{a_{el} - r} [e^{(a_{el} - r)T} - 1] + Q_R e_c^{t=0} \frac{1}{a_c - r} [e^{(a_c - r)T} - 1] + \right. \\ & - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} (1 + x_{wu,m,od}) e_{pal}^{t=0} \frac{1}{a_{pal} - r} [e^{(a_{pal} - r)T} - 1] + \\ & - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{CO_2} p_{CO_2}^{t=0} \frac{1}{a_{CO_2} - r} [e^{(a_{CO_2} - r)T} - 1] + \\ & - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{CO} p_{CO}^{t=0} \frac{1}{a_{CO} - r} [e^{(a_{CO} - r)T} - 1] + \\ & - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{NO_x} p_{NO_x}^{t=0} \frac{1}{a_{NO_x} - r} [e^{(a_{NO_x} - r)T} - 1] + \\ & - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{SO_2} p_{SO_2}^{t=0} \frac{1}{a_{SO_2} - r} [e^{(a_{SO_2} - r)T} - 1] + \\ & - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{pyl} p_{pyl}^{t=0} \frac{1}{a_{pyl} - r} [e^{(a_{pyl} - r)T} - 1] + \\ & - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} (1 - u) \rho_{CO_2} e_{CO_2}^{t=0} \frac{1}{b_{CO_2} - r} [e^{(b_{CO_2} - r)T} - 1] + \\ & \left. - J(1 - e^{-rT})(1 + x_{pl,p,ub}) \frac{\delta_{rem}}{r} - Jz \left(\frac{1 - e^{-rT}}{T} + 1 \right) \right\} (1 - p)(1 - v_m). \quad (6) \end{aligned}$$

gdzie:

z – współczynnik dyskontujący (współczynnik zamrożenia) nakłady inwestycyjne J poniesione na budowę elektrociepłowni na moment jej zakończenia,
 $z = [(1 + r)^{b+1} - 1] / [(b + 1)r]$ [1].

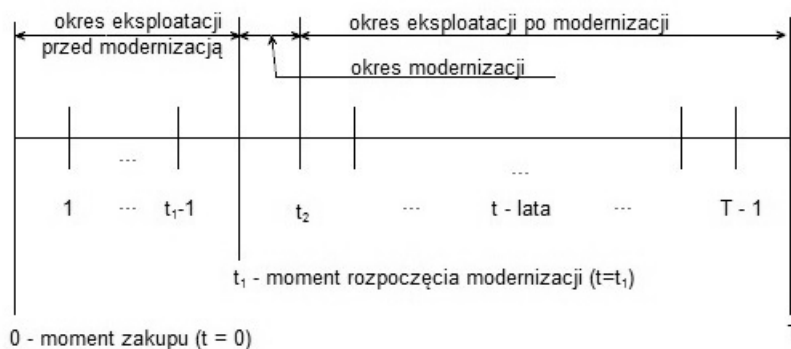
Wzór na całkowitą wartość rynku NPV wyznacza się z (6) dla $v_m = 0$. Wartość rynku dla sprzedającego ciepłownię lub elektrociepłownię wynosi NPV_{v_m} .

Wartości J_{rw} , IRR , NPV zależą od jednostkowego kosztu produkcji ciepła w ciepłowni lub elektrociepłowni. Im jest on mniejszy, tym są one oczywiście większe. Średni jednostkowy koszt produkcji ciepła w ciepłowni lub elektrociepłowni $k_{c,śr}$ w okresie T lat ich eksploatacji przedstawiono w [5].

Fundamentalną jednak wielkością, od których zależą wartości rynkowe ciepłowni i elektrociepłowni J_{rw} , $J_{rw,p}$ oraz wartości zysków NPV i NPV^{IPP} osiąganych na rynku ciepła przez nie zasilanego jest różnica pomiędzy możliwą do osiągnięcia na tym rynku ceną sprzedaży ciepła, a jednostkowym kosztem jego wytworzenia. Im ta różnica jest większa, tym większe są, co oczywiste, wartości IRR , NPV , NPV^{IPP} , J_{rw} , $J_{rw,p}$. Wartości J_{rw} , $J_{rw,p}$ są ponadto tym większe, im mniejsze są żądane przez IPP wartości stóp IRR_{rw}^{IPP} , $IRR_{p,rw}^{IPP}$. Gdy wartości IRR_{rw}^{IPP} , $IRR_{p,rw}^{IPP}$ są większe od wartości IRR , to oczywiście ceny J_{rw} , $J_{rw,p}$ są mniejsze od nakładów inwestycyjnych J poniesionych na budowę ciepłowni lub elektrociepłowni.

2.2. Modele matematyczne uwzględniające nakłady inwestycyjne na modernizację ciepłowni i elektrociepłowni

Na rys. 1. przedstawiono diagram czasowy, jakim posłużono się do zbudowania modelu matematycznego służącego do analizy efektywności ekonomicznej zmodernizowanej ciepłowni i elektrociepłowni.



Rys. 1. Diagram czasowy pracy zmodernizowanej elektrociepłowni

Przedziały czasu $\langle 0, t_1 \rangle$, $\langle t_1, t_2 \rangle$, $\langle t_2, T \rangle$ reprezentują kolejno lata eksploatacji ciepłowni i elektrociepłowni przed, w trakcie i po ich modernizacji.

2.2.1. Rynkowa wartość ciepłowni i elektrociepłowni uwzględniająca nakłady inwestycyjne na ich modernizację

Fundamentalną zależnością, za pomocą której wyznacza się rynkową wartość ciepłowni i elektrociepłowni z uwzględnieniem nakładów inwestycyjnych na ich modernizację jest równanie na wewnętrzną stopę zwrotu IRR [1-4]:

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{t_1} [F(r) + A(r)]e^{-IRR_p^{IPP} t} dt + \left\{ \int_0^{t_1} [S - K_e - F(r) - A(r)]e^{-IRR_p^{IPP} t} dt \right\} (1-p)(1-v_m) + \\
 & + \int_{t_1}^{t_2} [F(r) + A(r) + F^M(r) + A^M(r)]e^{-IRR_p^{IPP} t} dt + \left\{ \int_{t_1}^{t_2} [S^M - K_e^M + \right. \\
 & \left. - F(r) - A(r) - F^M(r) - A^M(r)]e^{-IRR_p^{IPP} t} dt \right\} (1-p)(1-v_m) + \\
 & + \int_{t_2}^T [F(r) + A(r) + F^M(r) + A^M(r)]e^{-IRR_p^{IPP} t} dt + \left\{ \int_{t_2}^T [S^{\text{mod}} - K_e^{\text{mod}} + \right. \\
 & \left. - F(r) - A(r) - F^M(r) - A^M(r)]e^{-IRR_p^{IPP} t} dt \right\} (1-p)(1-v_m) = \\
 & = \int_0^T [F(IRR_p^{IPP}) + R(IRR_p^{IPP})]e^{-IRR_p^{IPP} t} dt + \int_{t_1}^T [F^M(IRR_p^{IPP}) + R^M(IRR_p^{IPP})]e^{-IRR_p^{IPP} t} dt.
 \end{aligned} \tag{7}$$

przy czym

$$F^M \equiv F^M(r) = r[J_M - (t-1)R^M], \tag{8}$$

$$F^M(IRR_p^{IPP}) = IRR_p^{IPP}[J_M - (t-1)R^M], \tag{9}$$

$$A^M = R^M = \frac{J_M}{T - t_1}. \tag{10}$$

J_M – nakłady inwestycyjne na modernizację elektrociepłowni.

Po scałkowaniu (7) otrzymuje się:

- **wartość rynkowa ciepłowni i elektrociepłowni J_{rw}** uwzględniająca nakłady inwestycyjne J_M na ich modernizację (wzór (11), tak jak (2), zapisano dla ogólnego przypadku, tj. dla sytuacji, gdy w obliczeniach jest uwzględniany również podatek dochodowy o stopie podatkowej p od zysku brutto)

$$\begin{aligned}
& J_{rw,p} \frac{(1+r)^{b+1} - 1}{(b+1)r} \left\{ \left(\frac{r}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} \right) \left(1 - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_1} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{T (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[1 - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_1} \left(IRR_{p,rw}^{IPP} t_1 + 1 \right) \right] \right\} + \\
& + \left\{ E_{el,R} e^{t=0} \frac{1}{a_{el} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{el} - IRR_{p,rw}^{IPP}) t_1} - 1 \right] + Q_R e^{t=0} \frac{1}{a_c - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_c - IRR_{p,rw}^{IPP}) t_1} - 1 \right] + \right. \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} (1 + x_{wu,m,od}) e^{t=0} \frac{1}{a_{pal} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{pal} - IRR_{p,rw}^{IPP}) t_1} - 1 \right] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{CO_2} p_{CO_2}^{t=0} \frac{1}{a_{CO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{CO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP}) t_1} - 1 \right] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{CO} p_{CO}^{t=0} \frac{1}{a_{CO} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{CO} - IRR_{p,rw}^{IPP}) t_1} - 1 \right] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{NO_x} p_{NO_x}^{t=0} \frac{1}{a_{NO_x} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{NO_x} - IRR_{p,rw}^{IPP}) t_1} - 1 \right] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{SO_2} p_{SO_2}^{t=0} \frac{1}{a_{SO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{SO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP}) t_1} - 1 \right] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{pyl} p_{pyl}^{t=0} \frac{1}{a_{pyl} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{pyl} - IRR_{p,rw}^{IPP}) t_1} - 1 \right] + \\
& - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} (1-u) \rho_{CO_2} e^{t=0} \frac{1}{b_{CO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(b_{CO_2} - IRR_{p,rw}^{IPP}) t_1} - 1 \right] + \\
& - J (1 + x_{pl,p,ub}) \frac{\delta_{rem}}{IRR_{p,rw}^{IPP}} (1 - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_1}) + \\
& - J_{rw,p} \frac{(1+r)^{b+1} - 1}{(b+1)r} \left\{ \left(\frac{r}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} \right) \left(1 - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_1} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{T (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[1 - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_1} \left(IRR_{p,rw}^{IPP} t_1 + 1 \right) \right] \right\} (1-p)(1-v_m) + \\
& + J_{rw,p} \frac{(1+r)^{b+1} - 1}{(b+1)r} \left\{ \left(\frac{r}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} \right) \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_1} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_2} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{T (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_1} \left(IRR_{p,rw}^{IPP} t_1 + 1 \right) - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_2} \left(IRR_{p,rw}^{IPP} t_2 + 1 \right) \right] \right\} + \\
& + J_M \left\{ \left[\frac{r}{(T-t_1) IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{(T-t_1) IRR_{p,rw}^{IPP}} \right] \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_1} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_2} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{(T-t_1) (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_1} \left(IRR_{p,rw}^{IPP} t_1 + 1 \right) - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP} t_2} \left(IRR_{p,rw}^{IPP} t_2 + 1 \right) \right] \right\} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left\{ E_{el,R}^M e_{el}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{el}^M - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{el}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} - e^{(a_{el}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_1} \right] + \right. \\
& + Q_R^M e_c^{M,t=t_1} \frac{1}{a_c^M - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_c^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} - e^{(a_c^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} e_{pal}^{M,t=t_1} (1 + x_{wu,m,od}) \frac{1}{a_{pal}^M - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{pal}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} - e^{(a_{pal}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{CO_2} P_{CO_2}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{CO_2}^M - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{CO_2}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} - e^{(a_{CO_2}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{CO} P_{CO}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{CO}^M - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{CO}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} - e^{(a_{CO}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{NO_x} P_{NO_x}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{NO_x}^M - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{NO_x}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} - e^{(a_{NO_x}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{SO_2} P_{SO_2}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{SO_2}^M - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{SO_2}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} - e^{(a_{SO_2}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{pyl} P_{pyl}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{pyl}^M - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{pyl}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} - e^{(a_{pyl}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} (1 - u^M) \rho_{CO_2} e_{CO_2}^{M,t=t_1} \frac{1}{b_{CO_2}^M - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(b_{CO_2}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} - e^{(b_{CO_2}^M - IRR_{p,rw}^{IPP})t_1} \right] + \\
& - \frac{(J + J_M)(1 + x_{pl,p,ub}) \delta_{rem}^M}{IRR_{p,rw}^{IPP}} \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_1} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} \right) + \\
& - J_{rw,p} \frac{(1+r)^{b+1} - 1}{(b+1)r} \left\{ \left(\frac{r}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} \right) \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_1} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{T (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_1} (IRR_{p,rw}^{IPP}t_1 + 1) - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} (IRR_{p,rw}^{IPP}t_2 + 1) \right] \right\} + \\
& - J_M \left\{ \left[\frac{r}{(T-t_1) IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{(T-t_1) IRR_{p,rw}^{IPP}} \right] \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_1} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{(T-t_1) (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_1} (IRR_{p,rw}^{IPP}t_1 + 1) - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} (IRR_{p,rw}^{IPP}t_2 + 1) \right] \right\} (1-p)(1-v_m) + \\
& + J_{rw,p} \frac{(1+r)^{b+1} - 1}{(b+1)r} \left\{ \left(\frac{r}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} \right) \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{T (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} (IRR_{p,rw}^{IPP}t_2 + 1) - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} (IRR_{p,rw}^{IPP}T + 1) \right] \right\} + \\
& + J_M \left\{ \left[\frac{r}{(T-t_1) IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{(T-t_1) IRR_{p,rw}^{IPP}} \right] \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{(T-t_1) (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} (IRR_{p,rw}^{IPP}t_2 + 1) - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} (IRR_{p,rw}^{IPP}T + 1) \right] \right\} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left\{ E_{el,R}^{mod} e_{el}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{el}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{el}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - e^{(a_{el}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} \right] + \right. \\
& + Q_R^{mod} e_c^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_c^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_c^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - e^{(a_c^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{n_c^{mod}} e_{pal}^{mod,t=t_2} (1 + x_{wu,m,od}) \frac{1}{a_{pal}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{pal}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - e^{(a_{pal}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{n_c^{mod}} \rho_{CO_2} P_{CO_2}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{CO_2}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{CO_2}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - e^{(a_{CO_2}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{n_c^{mod}} \rho_{CO} P_{CO}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{CO}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{CO}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - e^{(a_{CO}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{n_c^{mod}} \rho_{NO_x} P_{NO_x}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{NO_x}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{NO_x}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - e^{(a_{NO_x}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{n_c^{mod}} \rho_{SO_2} P_{SO_2}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{SO_2}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{SO_2}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - e^{(a_{SO_2}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{n_c^{mod}} \rho_{pyl} P_{pyl}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{pyl}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(a_{pyl}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - e^{(a_{pyl}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{n_c^{mod}} (1 - u^{mod}) \rho_{CO_2} e_{CO_2}^{mod,t=t_2} \frac{1}{b_{CO_2}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP}} \left[e^{(b_{CO_2}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})T} - e^{(b_{CO_2}^{mod} - IRR_{p,rw}^{IPP})t_2} \right] + \\
& - \frac{(J + J_M)(1 + x_{pl,p,ub})\delta_{rem}^{mod}}{IRR_{p,rw}^{IPP}} \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} \right) + \\
& - J_{rw,p} \frac{(1+r)^{b+1} - 1}{(b+1)r} \left\{ \left(\frac{r}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{T IRR_{p,rw}^{IPP}} \right) \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{T (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} (IRR_{p,rw}^{IPP}t_2 + 1) - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} (IRR_{p,rw}^{IPP}T + 1) \right] \right\} + \\
& - J_M \left\{ \left[\frac{r}{(T-t_1) IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{r}{IRR_{p,rw}^{IPP}} + \frac{1}{(T-t_1) IRR_{p,rw}^{IPP}} \right] \left(e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} \right) + \right. \\
& \left. - \frac{r}{(T-t_1) (IRR_{p,rw}^{IPP})^2} \left[e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_2} (IRR_{p,rw}^{IPP}t_2 + 1) - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} (IRR_{p,rw}^{IPP}T + 1) \right] \right\} (1-p)(1-v_m) = \\
& = J_{rw,p} \frac{(1 + IRR_{p,rw}^{IPP})^{b+1} - 1}{(b+1) IRR_{p,rw}^{IPP}} \left(1 + \frac{1 - e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T}}{T} \right) + \\
& + J_M \left[\left(1 + \frac{1}{T-t_1} - \frac{t_1}{T-t_1} \right) e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}t_1} - \left(1 + \frac{1}{T-t_1} - \frac{T}{T-t_1} \right) e^{-IRR_{p,rw}^{IPP}T} \right].
\end{aligned} \tag{11}$$

Gdy we wzorze (11) za $J_{rw,p}$ podstawią się rzeczywiste nakłady finansowe J poniesione na budowę ciepłowni lub elektrociepłowni oraz przy założeniu, że z ich eksploatacji nie jest osiągnięty zysk, a więc $p = 0$, to dla $v_m = 0$ otrzymuje się wartość całkowitego oprocentowania IRR , jakie przynosi kapitał J .

2.2.2. Wartość rynku ciepła z uwzględnieniem nakładów inwestycyjnych na modernizację ciepłowni i elektrociepłowni

Fundamentalną zależnością, za pomocą której wyznacza się wartość rynku ciepła zasilanego przez elektrociepłownię uwzględniającą nakłady inwestycyjne J_M na jej modernizację jest równanie na całkowity zysk NPV , jaki osiąga się z jej eksploatacji przez okres T lat [1–4]:

$$\begin{aligned}
 NPV^{IPP} &= \int_0^{t_1} [F + A + (S - K_e - F - A)(1 - p)(1 - v_m)] e^{-rt} dt + \\
 &+ \int_{t_1}^{t_2} [F + A + F^M + A^M + (S^M - K_e^M - F - A - F^M - A^M)(1 - p)(1 - v_m)] e^{-rt} dt + \\
 &+ \int_{t_2}^T [F + A + F^M + A^M + (S^{\text{mod}} - K_e^{\text{mod}} - F - A - F^M - A^M)(1 - p)(1 - v_m)] e^{-rt} dt + \\
 &- \int_0^T (F + R) e^{-rt} dt - \int_{t_1}^T (F^M + R^M) e^{-rt} dt = \\
 &= NPV(1 - v_m) = \left[\int_0^{t_1} (S - K_e - F - A)(1 - p) e^{-rt} dt + \right. \\
 &\quad + \int_{t_1}^{t_2} (S^M - K_e^M - F - A - F^M - A^M)(1 - p) e^{-rt} dt + \\
 &\quad \left. + \int_{t_2}^T (S^{\text{mod}} - K_e^{\text{mod}} - F - A - F^M - A^M)(1 - p) e^{-rt} dt \right] (1 - v_m)
 \end{aligned} \tag{12}$$

Wzór na całkowitą wartość rynku NPV wyznacza się z (12) dla $v_m = 0$. Wartość rynku dla sprzedającego elektrociepłownię wynosi NPV_{v_m} .

Po scałkowaniu (12) otrzymuje się:

– **wartość rynku ciepła dla IPP**

$$\begin{aligned}
 NPV^{IPP} &= \left\{ E_{el,R} e^{t=0} \frac{1}{a_{el} - r} [e^{(a_{el} - r)t_1} - 1] + Q_R e_c^{t=0} \frac{1}{a_c - r} [e^{(a_c - r)t_1} - 1] + \right. \\
 &- \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} (1 + x_{wu,m,od}) e_{pal}^{t=0} \frac{1}{a_{pal} - r} [e^{(a_{pal} - r)t_1} - 1] + \\
 &- \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{CO_2} p_{CO_2}^{t=0} \frac{1}{a_{CO_2} - r} [e^{(a_{CO_2} - r)t_1} - 1] - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{CO} p_{CO}^{t=0} \frac{1}{a_{CO} - r} [e^{(a_{CO} - r)t_1} - 1] + \\
 &\left. - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{NO_x} p_{NO_x}^{t=0} \frac{1}{a_{NO_x} - r} [e^{(a_{NO_x} - r)t_1} - 1] - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{SO_2} p_{SO_2}^{t=0} \frac{1}{a_{SO_2} - r} [e^{(a_{SO_2} - r)t_1} - 1] + \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} \rho_{pyl} p_{pyl}^{t=0} \frac{1}{a_{pyl} - r} \left[e^{(a_{pyl} - r)t_1} - 1 \right] - \frac{E_{el,R} + Q_R}{\eta_c} (1-u) \rho_{CO_2} e_{CO_2}^{t=0} \frac{1}{b_{CO_2} - r} \left[e^{(b_{CO_2} - r)t_1} - 1 \right] + \\
& - J \left(1 + x_{pl,p,ub} \right) \frac{\delta_{rem}}{r} \left(1 - e^{-rt_1} \right) - J_0 \left[1 + \frac{1}{T} - \left(1 + \frac{1}{T} - \frac{t_1}{T} \right) e^{-rt_1} \right] \Bigg\} + \\
& + \left\{ E_{el,R}^M e_{el}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{el}^M - r} \left[e^{(a_{el}^M - r)t_2} - e^{(a_{el}^M - r)t_1} \right] + Q_R^M e_c^{t=t_1} \frac{1}{a_c^M - r} \left[e^{(a_c^M - r)t_2} - e^{(a_c^M - r)t_1} \right] + \right. \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} (1 + x_{wu,m,od}) e_{pal}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{pal}^M - r} \left[e^{(a_{pal}^M - r)t_2} - e^{(a_{pal}^M - r)t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{CO_2} P_{CO_2}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{CO_2}^M - r} \left[e^{(a_{CO_2}^M - r)t_2} - e^{(a_{CO_2}^M - r)t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{CO} P_{CO}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{CO}^M - r} \left[e^{(a_{CO}^M - r)t_2} - e^{(a_{CO}^M - r)t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{NO_x} P_{NO_x}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{NO_x}^M - r} \left[e^{(a_{NO_x}^M - r)t_2} - e^{(a_{NO_x}^M - r)t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{SO_2} P_{SO_2}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{SO_2}^M - r} \left[e^{(a_{SO_2}^M - r)t_2} - e^{(a_{SO_2}^M - r)t_1} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} \rho_{pyl} p_{pyl}^{M,t=t_1} \frac{1}{a_{pyl}^M - r} \left[e^{(a_{pyl}^M - r)t_1} - e^{(a_{pyl}^M - r)t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^M + Q_R^M}{\eta_c^M} (1 - u^M) \rho_{CO_2} e_{CO_2}^{M,t=t_1} \frac{1}{b_{CO_2}^M - r} \left[e^{(b_{CO_2}^M - r)t_2} - e^{(b_{CO_2}^M - r)t_1} \right] + \\
& - \frac{(J + J_M)(1 + x_{pl,p,ub}) \delta_{rem}^M}{r} \left(e^{-rt_1} - e^{-rt_2} \right) - J_0 \left[\left(1 + \frac{1}{T} - \frac{t_1}{T} \right) e^{-rt_1} - \left(1 + \frac{1}{T} - \frac{t_2}{T} \right) e^{-rt_2} \right] + \\
& - J_M \left[\left(1 + \frac{1}{T - t_1} - \frac{t_1}{T - t_1} \right) e^{-rt_1} - \left(1 + \frac{1}{T - t_1} - \frac{t_2}{T - t_1} \right) e^{-rt_2} \right] \Bigg\} + \\
& + \left\{ E_{el,R}^{mod} e_{el}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{el}^{mod} - r} \left[e^{(a_{el}^{mod} - r)T} - e^{(a_{el}^{mod} - r)t_2} \right] + Q_R^{mod} e_c^{t=t_2} \frac{1}{a_c^{mod} - r} \left[e^{(a_c^{mod} - r)T} - e^{(a_c^{mod} - r)t_2} \right] + \right. \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{\eta_c^{mod}} (1 + x_{wu,m,od}) e_{pal}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{pal}^{mod} - r} \left[e^{(a_{pal}^{mod} - r)T} - e^{(a_{pal}^{mod} - r)t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{\eta_c^{mod}} \rho_{CO_2} P_{CO_2}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{CO_2}^{mod} - r} \left[e^{(a_{CO_2}^{mod} - r)T} - e^{(a_{CO_2}^{mod} - r)t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{\eta_c^{mod}} \rho_{CO} P_{CO}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{CO}^{mod} - r} \left[e^{(a_{CO}^{mod} - r)T} - e^{(a_{CO}^{mod} - r)t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{\eta_c^{mod}} \rho_{NO_x} P_{NO_x}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{NO_x}^{mod} - r} \left[e^{(a_{NO_x}^{mod} - r)T} - e^{(a_{NO_x}^{mod} - r)t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{\eta_c^{mod}} \rho_{SO_2} P_{SO_2}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{SO_2}^{mod} - r} \left[e^{(a_{SO_2}^{mod} - r)T} - e^{(a_{SO_2}^{mod} - r)t_2} \right] + \\
& - \frac{E_{el,R}^{mod} + Q_R^{mod}}{\eta_c^{mod}} \rho_{pyl} p_{pyl}^{mod,t=t_2} \frac{1}{a_{pyl}^{mod} - r} \left[e^{(a_{pyl}^{mod} - r)T} - e^{(a_{pyl}^{mod} - r)t_2} \right] +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{E_{el,R}^{\text{mod}} + Q_R^{\text{mod}}}{\eta_c^{\text{mod}}} (1 - u^{\text{mod}}) \rho_{CO_2} e_{CO_2}^{\text{mod}, t=t_2} \frac{1}{b_{CO_2}^{\text{mod}} - r} \left[e^{(b_{CO_2}^{\text{mod}} - r)T} - e^{(b_{CO_2}^{\text{mod}} - r)t_2} \right] + \\
& - \frac{(J + J_M)(1 + x_{pl,p,ub})\delta_{rem}^{\text{mod}}}{r} (e^{-rt_2} - e^{-rT}) - J_0 \left[\left(1 + \frac{1}{T} - \frac{t_2}{T} \right) e^{-rt_2} - \frac{1}{T} e^{-rT} \right] + \\
& - J_M \left[\left(1 + \frac{1}{T - t_1} - \frac{t_2}{T - t_1} \right) e^{-rt_2} - \left(1 + \frac{1}{T - t_1} - \frac{T}{T - t_1} \right) e^{-rT} \right] \Bigg\} (1 - p)(1 - v_m)
\end{aligned} \tag{13}$$

przy czym J_0 oznaczają zdyskontowane na moment zakończenia budowy elektrociepłowni nakłady J poniesione na jej budowę w okresie b lat jej trwania, $J_0 = Jz$ [1].

Średni jednostkowy koszt produkcji ciepła $k_{c,\dot{s}r}$ w zmodernizowanej ciepłowni lub elektrociepłowni, od którego zależą wartości J_{rv} , NPV (wzory (11) i (13)) przedstawiono w [6]. Jak już wyżej zaznaczono, w przypadku analizy wartości rynkowej ciepłowni oraz wartości rynku ciepła przez nią zasilanego, za roczną wartość produkcji w nich energii elektrycznej $E_{el,R}$ we wzorach (2), (6), (11), (13) należy podstawić wartość zero.

3. Podsumowanie

Zaprezentowane modele matematyczne z czasem ciągłym analizy efektywności techniczno-ekonomicznej ciepłowni i elektrociepłowni, ich wartości rynkowej oraz analizy i wyceny wartości rynku ciepła przez nie zasilanego pozwalają na szeroką analizę techniczno-ekonomiczną polskiej, i nie tylko, energetyki. Analiza techniczno-ekonomiczna gospodarki ciepłno-elektrycznej wykonana za pomocą przedstawionych modeli pozwoli m.in. odpowiedzieć na następujące pytania. W jakie technologie skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej należy inwestować? Ile można „zarobić” inwestując na rynku ciepła? W jakim stopniu na wartość tego rynku wpływają ceny nośników energii i jednostkowe taryfy opłat za zanieczyszczanie środowiska naturalnego oraz zmiany ich wartości w czasie. Jak wpływa na wartość rynku roczny czas pracy źródeł ciepła, cena zakupu pozwoleń na emisję CO_2 , nakłady inwestycyjne na modernizację elektrociepłowni? Jaka jest cena rynkowa ciepłowni i elektrociepłowni? Itd.

Jak do tej pory sprzedaż państwowych komunalnych ciepłowni i elektrociepłowni zagranicznym koncernom odbywała się wielokrotnie poniżej ich wartości. Ceny sprzedaży (sprzedaże te odbywały się pod hasłem prywatyzacji, przy czym słowo prywatyzacja należałoby napisać w wieloznaczącym cudzysłowie), były kilkakrotnie razy niższe od cen (wartości) rynkowych. Różnice pomiędzy ceną rynkową a rzeczywistą ceną sprzedaży na przykład największych krajowych elektrociepłowni wynosiły nawet do dwóch miliardów złotych. Przy kupnie elektrociepłowni koncerny otrzymywały ponadto „w pakiecie”, tj. za darmo, kilkaset kilometrowe, rozległe przesyłowe sieci ciepłne, które na ogół były i są więcej warte od samych elektrociepłowni [1]. Nowi zagraniczni ich właściciele w tej sytuacji osiągnęli kolosalne zyski nawet wówczas, gdy musieli ponieść nakłady finansowe na ich modernizację. Mało tego, sprzedaż elektrociepłowni łącznie z ciepłą siecią przesyłową, a więc połączenie całej infrastruktury w jednych rękach, stworzyło monopol, uniemożliwiając podłączenie się do sieci kolejnym inwestorom. Tylko oddzielenie energii jako towaru od usługi polegającej na jej dostarczaniu konsumentom daje możliwość

konkurencji w energetyce, co jest z oczywistych względów dla konsumentów korzystne. Zasada oddzielenia wytwarzania energii od jej przesyłu jest uniwersalna, nie dotyczy tylko energii elektrycznej. Należy się zgodzić jedynie z poglądem, że w przypadku próby włączenia w istniejącą sieć przesyłową nowego źródła ciepła może to być czasami nieopłacalne ekonomicznie z uwagi na konieczne wówczas modyfikacje sieci. Wtedy jednak żaden kolejny inwestor (który musiałby przecież sfinansować modyfikację) nie zaryzykuje wybudowania konkurencyjnego źródła ciepła i włączenia go w istniejącą sieć przesyłową. Do kolejnego zatem inwestora powinna należeć wyłącznie decyzja, czy budować nowe źródło ciepła, a operator sieci przesyłowej (podlegający regulacjom administracyjnym) z mocy prawa powinien umożliwić włączenie go w istniejącą sieć przesyłową. Co więcej, sprzedaż zagranicznemu koncernowi elektrociepłowni łącznie z siecią przesyłową pozwala na łatwe wydzielenie sieci i utworzenie nowej firmy ją eksploatującej, i rebranding tej firmy, tj. zmianę jej marki (nazwy) na markę na przykład jednej ze spółek córek koncernu i sprzedaż sieci (co w niedalekiej przeszłości miało miejsce; cena sprzedaży przez jeden z koncernów sieci zagranicznemu funduszowi inwestycyjnemu była o 1/3 wyższa od ceny zakupu przez koncern elektrociepłowni wraz z siecią), i transfer kwoty sprzedaży oraz zysków za granicę.

Literatura

1. Bartnik R., Bartnik B.: Rachunek ekonomiczny w energetyce, WNT, Warszawa 2014
2. Bartnik R., Bartnik B., Hnydiuk-Stefan A.: Optimum Investment Strategy in the Power Industry. Mathematical Models, Wydawnictwo Springer, New York 2016
3. Bartnik R., Bartnik B.: Model matematyczny poszukiwania optymalnej strategii inwestycyjnej w energetyce, Energetyka, nr 1, 2015
4. Bartnik R.: Poszukiwanie optymalnej strategii inwestycyjnej w energetyce. Metodyka i wyniki przykładowych obliczeń, Energetyka, nr 10, 2015
5. Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A., Juszcak A.: Metodyka i modele matematyczne z czasem ciągłym poszukiwania optymalnej strategii inwestowania w źródła ciepła. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją. Opole 2017
6. Bartnik R., Buryn Z., Hnydiuk-Stefan A., Juszcak A.: Metodyka i modele matematyczne z czasem ciągłym analizy efektywności techniczno-ekonomicznej modernizacji ciepłowni i elektrociepłowni. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją. Opole 2017

Prof. dr hab. inż. Ryszard BARTNIK

Dr inż. Zbigniew BURYN

Dr inż. Anna HNYDIUK-STEFAN

Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów/Katedra Zarządzania Energetyką

Politechnika Opolska/Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki

45-758 Opole, ul. Ozimska 75

e-mail: r.bartnik@po.opole.pl, z.buryn@po.opole.pl, a.hnydiuk-stefan@po.opole.pl

Mgr inż. Adam JUSZCZAK

ArcelorMittal Poland S.A. Oddział Zdzeszowice

Doktorant Studiów Doktoranckich na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej

e-mail: a.juszcak74@o2.pl