

# Ekonomiczna ocena technologii zgazowania węgla ze szczególnym uwzględnieniem sekwencji składanej opcji czekania i wzrostu skali

Economic assessment of coal gasification technologies with particular focus on sequential compound option to wait and growth option



Dr inż. Krzysztof Kwaśniewski\*)



Dr inż. Michał Kopacz\*\*)



Mgr inż. Paweł Grzesiak\*)



Mgr inż. Radosław Kaplan\*)

**Treść:** Niniejsza publikacja przedstawia całościową koncepcję oceny technologii zgazowania węgla w metodzie opcji rzeczowych. Idea modelu zakłada wycenę 6 różnych sekwencji opcji. W artykule ograniczono się jednak do wyceny kombinacji opcji czekania z opcją wzrostu skali. Wartość zaktualizowana netto (NPV) technologii produkcji metanolu na drodze zgazowania przy skali bazowej wyrażonej zużyciem węgla kamiennego na poziomie 100 Mg/h była ujemna i wyniosła – 1091,8 mln zł. Tymczasem wycena składanej, sekwencyjnej opcji czekania i wzrostu skali pozwoliła wyznaczyć wartość strategiczną XNPV (ROV) analizowanej technologii rzędu 3508,49 mln zł. Wartość samej opcji wzrostu skali w tym przypadku ukształtowała się na poziomie 2911,63 mln zł.

**Abstract:** This paper presents a complex approach to the assessment of coal gasification technology in the real options method. The idea of the model involves the valuation of 6 different combination of sequential compound options. This article is basically focused on the valuation of combinations of the options to wait and growth option. Net present value (NPV) of IGCC methanol technology, at the base scale expressed by coal consumption of 100 t/h was negative and amounted to 1 091.8 million zł. Meanwhile, the valuation of the sequential compound option allowed to achieve the strategic value XNPV (ROV) of 3 508.49 million zł. The value of growth option separately was estimated at 2 911.63 million zł.

## Słowa kluczowe:

Zgazowanie węgla, wycena, analiza opcji rzeczowych, model wyceny, wartość strategiczna ROV (XNPV), sekwencyjne opcje składane.

## Keywords:

IGCC coal gasification, valuation, real option analysis, appraisal model, the strategic value ROV (XNPV), sequential compound options

\*) AGH w Krakowie \*\*) IGSMiE PAN w Krakowie

## 1. Wprowadzenie

Mimo iż potencjał rozwoju mocy produkcyjnych wytwarzania energii elektrycznej jest olbrzymi, sięgający około 40 GW do roku 2030, produkty technologii zgazowania węgla mogą być również zużywane w procesach przemysłowych jako substytut importowanego do Polski gazu ziemnego i ropy naftowej [10].

Metanol, który obecnie w całości importujemy w ilości około 400 tys. t rocznie jest surowcem bardzo uniwersalnym. Może być stosowany bezpośrednio w technologii MTG (*metanol to gasoline*), jako półprodukt – biodiesel FAME, czy też przetwarzany dalej w liczne estry metylowe i olefiny (MTP; *methanol to propylene*, MTO; *methanol to olefins*) [25].

Do roku 2002 około 90 % światowej produkcji metanolu bazowało na gazie syntezowym, uzyskiwanym z gazu ziemnego. Przy niskich cenach węgla w Azji (rzędu 10÷15 USD/Mg), większość obecnie uruchamianych instalacji wykorzystuje przede wszystkim ten surowiec [12].

Ocenia się, iż rynek olefin (produkcja etylenu i propylenu) kształtuje się na poziomie 1,4 mln Mg rocznie. Prognozy wzrostu rynku produktów chemicznych, bazujących na przetwórstwie metanolu lub bezpośredniej produkcji olefin zakładają wzrost w 2014 rzędu 3,5÷4,0% (największe tempo wzrostu będzie widoczne w rozwijających się krajach Azji, Środkowego Wschodu oraz Ameryce Południowej) [9]. Argumentacja ta wskazuje na tworzące się, sprzyjające warunki produkcji olefin również i w Polsce.

Postęp technologiczny i – z drugiej strony – zmiana uwarunkowań makroekonomicznych to główne czynniki, które stymulują rozwój technologii przetwórstwa węgla. Przedsiębiorstwa energetyczne i chemiczne dążą do poprawy swoich wyników technicznych i ekonomicznych poprzez wdrażanie coraz to nowszych technologii tudzież modernizację istniejących. Niewątpliwie od nowych rozwiązań technologicznych oczekuje się wysokiej sprawności przetwarzania energii w produktach, minimalizacji negatywnego oddziaływania na środowisko, czy wysokiej elastyczności operacyjnej, również w zakresie wykorzystania różnych rodzajów paliwa w sadowego [21].

Określoną wartością mierzoną w kategoriach ekonomicznych posiada możliwość wyczekiwania z podjęciem optymalnej w czasie decyzji o rozpoczęciu nowych inwestycji. Nie bez wartości może być również scenariusz przesadzający o rozbudowie czy ograniczeniu posiadanego potencjału wytwórczego (biorąc pod uwagę zmienność czynników zewnętrznych), możliwość przełączania się pomiędzy wytwarzaniem produktów, na których można zrealizować największe marże w określonej perspektywie czasu. Istotny wymiar ekonomiczny posiada również rozstrzygnięcie i wybór optymalnej decyzji pomiędzy budową instalacji sekwencji CO<sub>2</sub> (CCS) a kosztami z tytułu emisji tego gazu do atmosfery. Wycena w pieniądzu tego typu możliwości – alternatywy, stanowi przedmiot analizy opcji rzeczowych (ROV; *real option analysis*) w obszarze technologii energetycznych i zgazowania węgla.

W artykule postawiono tezę, że zdywersyfikowane przedsiębiorstwa branży energetycznej i chemicznej dysponują elastycznością operacyjną stanowiącą istotny komponent wartości całego przedsięwzięcia inwestycyjnego. Zwiększenie skali produkcji metanolu, traktowane jako opcja wzrostu, może spowodować zupełną zmianę rozstrzygającej decyzji inwestycyjnej. Otrzymane wyniki mogą pomóc także w wyjaśnieniu znaczenia elastyczności operacyjnej, zupełnie pomijanej w klasycznych metodach dyskontowych, w kształtowaniu wartości zdywersyfikowanych przedsiębiorstw branży chemicznej.

## 2. Uwarunkowania klasycznych metod oceny efektywności ekonomicznej oraz analizy opcji rzeczowych

Decyzja o realizacji danego projektu inwestycyjnego podejmowana jest zwykle na podstawie przesłanek o charakterze ekonomiczno-finansowym, gdzie istotną rolę odgrywa dostępność kapitałów, sposób i koszt finansowania.

W praktyce oceny przedsięwzięć inwestycyjnych ciągle prym wiodą metody dyskontowe, a w szczególności metoda zaktualizowanej wartości netto (NPV, *net present value*), wewnętrznej stopy zwrotu (IRR; *internal rate of return*) wraz z wszystkimi swoimi modyfikacjami [11] oraz zaktualizowany koszt wytwarzania [30]. Znane są wady i ograniczenia wskazanych metod. Kluczowe spośród nich:

- obciążone dużym błędem, prognozowanie przyszłych przepływów pieniężnych i założenia stabilności kluczowych parametrów w długiej perspektywie czasu,
- dysproporcja pomiędzy wartościami NPV uzyskiwanymi z analiz dyskontowanych przepływów pieniężnych (DCF, *discounted cash flows*) a wartościami ustalonymi przez rynek. Wartości przedsiębiorstw wycenione za pomocą analizy DCF są zazwyczaj mniejsze od ich późniejszych wartości rynkowych.
- dobór odpowiedniego czynnika dyskontowego, dostosowanego do ryzyka jest procesem subiektywnym, istotnie wpływającym na wynik oceny,
- niejasne kryteria odnośnie do wybierania terminu rozpoczęcia inwestycji,
- brak możliwości podejmowania alternatywnych decyzji w czasie trwania projektu.

Kryteria decyzyjne metody NPV odrzucają projekty o niskiej lub ujemnej wartości tego miernika. Tymczasem ujemna wartość zaktualizowana netto dzisiaj nie przesądza o możliwości osiągnięcia pozytywnej wartości przedsięwzięcia w przyszłości (w następstwie zdarzeń może nastąpić poprawa warunków inwestycyjnych).

Metoda IRR zakłada z kolei niezmienną stopy dyskontowej w całym okresie analizy. Tymczasem wraz z upływem czasu istnienia projektu i napływem kolejnych informacji, poziom ryzyka w projekcie zwykle się zmniejsza (przykładowo: stabilna faza produkcyjna ogranicza ryzyko technologiczne do minimum).

Niewątpliwie uzasadnienie celowości zastosowania rachunku opcyjnego do wyceny technologii zgazowania węgla leży u podstaw zalet tej metody. Do najważniejszych należą:

- uwzględnienie elastyczności decyzyjnej stwarza możliwość wyboru optymalnej strategii inwestycyjnej i jej kontroli wg zmieniających się warunków otoczenia,
- rachunek opcyjny pozwala na właściwe uwzględnienie faktu niepewności i ryzyka nie tylko związanego z cenami rynkowymi – daje możliwość wyceny ryzyka zmienności kilku parametrów jednocześnie,
- ROV pozwala określić optymalny moment podjęcia decyzji o rozpoczęciu inwestycji i jej zakończeniu,
- istnieją sytuacje, gdzie wykorzystanie tradycyjnych metod prowadzi do silnego zaniżania wartości projektów – przykładowo sektory wysokich technologii i innowacyjności, co pozwala uwzględnić również koszt utraconych korzyści [22].

Wymienione ograniczenia metod dyskontowych i zalety analizy opcji rzeczowych stanowią przyczynek do rozwijania nowych metod oceny efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych.

O rosnącej popularności metod bazujących na wycenie opcji rzeczowych w procesach energetycznych (zgazowania węgla) świadczą m.in. badania przeprowadzone przez Herbellota, Sekara i Laurikke [8], [23], [15].

Praca Herbellota była jedną z pierwszych publikacji w tym temacie. W pracy analizowany był przypadek bloku gazowego do produkcji energii elektrycznej, w którym zakładało się możliwość budowy instalacji zgazowania węgla celem produkcji własnego gazu. Symulowano przebiegi dwóch zmiennych: cen węgla i gazu ziemnego.

Sekar dokonał analizy trzech alternatywnych technologii wytwarzających energię elektryczną: klasyczny blok spalania z kotłem pyłowym (*Pulverized Coal, PC*), blok zgazowania IGCC oraz blok IGCC przygotowany wstępnie do zainstalowania modułu wychwytu i składowania dwutlenku węgla (*Carbon Capture and Storage, CCS*). Autor dokonuje wyceny rozważanych projektów wykorzystując analizy DCF i ROA, zakładając zmienność tylko jednego parametru, jakim jest cena praw do emisji CO<sub>2</sub>.

Laurikka, wykorzystując model symulacyjny, szacuje wartość opcyjną technologii IGCC uwzględniając wpływ Europejskiego Systemu Handlu Emisjami (*European Union Emission Trading Scheme, EU ETS*). Wpływem cen praw do emisji CO<sub>2</sub> na wybór odpowiedniej technologii produkcji energii elektrycznej zajmowali się również Yun i Baker [32].

Abadie i Chamorro natomiast w swoich publikacjach [1, 2] szeroko analizują elastyczność decyzyjną związaną z dwoma technologiami do produkcji energii elektrycznej: IGCC oraz NGCC. Dla rozważanych instalacji wyliczają strategiczną wartość opcji czekania.

Ważnymi publikacjami z tego zakresu są również prace Smeersa, Reedmana, Yanga i Blytha oraz Tenga [24, 18, 19, 31, 26].

Jak wskazują komentowane badania, istotnym komponentem wartości analizowanych przedsięwzięć inwestycyjnych jest elastyczność decyzyjna (operacyjna, menedżerska). Za Utonem można stwierdzić, iż jest ona „zdolnością do zmiany lub reakcji wiążącą się z ograniczonymi konsekwencjami dotyczącymi czasu, nakładów, kosztów lub efektywności...” [29].

Elastyczność decyzyjna, w ujęciu opcyjnym, oznacza możliwość wyboru najbardziej korzystnego scenariusza działań. W przypadkach projektów modelowanych kombinacją opcji, łączna wartość elastyczności to wybór scenariuszy działań (opcji) maksymalizujących wartość projektu dla przyjętego poziomu danych wejściowych (np. cen).

U podłoża wartości strategicznej leży potencjał wynikający ze zmienności kluczowych parametrów decydujących. Zmienność ta niejednokrotnie dezaktualizuje dotychczasowe kalkulacje lub podjęte decyzje. Fakt ten jest istotny, biorąc pod uwagę niepewność przyszłych przychodów i kosztów, jak i ekspozycję na ryzyko, związane z realizacją założonych celów produkcyjnych. „Dodatkowa wartość” jest związana z obecnością elastyczności oraz asymetrii profilu ryzyka uczestników transakcji kupna-sprzedaży [27].

Pomimo licznych analogii występujących pomiędzy opcjami finansowymi a rzeczowymi wiele założeń, na których opierają się metody wyceny opcji finansowych nie jest spełnionych w przypadku wyceny opcji rzeczowych (realnych). Najczęściej wymieniane różnice i trudności w stosowaniu analizy opcji rzeczowych [14]:

- identyfikacja elastyczności decyzyjnej i wyróżnianie opcji,
- określenie niepewności,
- ograniczoność stosowalności formuły Blacka-Scholesa do wyceny opcji europejskich o ustalonym terminie wykonania,
- założenie stałości kosztów wykonania opcji rzeczowych,
- czas życia opcji i moment jej wykonania,
- współzależność i sekwencyjność opcji rzeczowych,
- założenie o logarytmiczno-normalnym rozkładzie wartości aktywów bazowych opcji ze stałym poziomem zmienności,

- ustalenie wartości instrumentu bazowego,
- dobór parametru zmienności wartości projektu w czasie objętym analizą.

### 3. Procesy stochastyczne u podstaw wyceny opcji

Procesy stochastyczne opisujące zmienność instrumentów bazowych opcji odgrywają kluczową rolę w analizie i wycenie opcji.

Proces stochastyczny stanowi opis zmian wartości danego parametru w czasie w sposób, który jest przynajmniej w części losowy; proces ten może mieć charakter dyskretny lub ciągły [7].

Do najbardziej popularnych i najczęściej stosowanych w analizie opcji rzeczowych koncepcji procesów stochastycznych należy arytmetyczny i geometryczny ruch Browna, procesy Wienera, Ito oraz proces powracania do średniej Ornsteina-Uhlenbecka. Poniżej zamieszczono charakterystykę najważniejszych z nich.

Uogólniony proces Wienera jest ciągłym w czasie procesem stochastycznym w postaci

$$dx = a(x, t)dt + b(x, t)dz$$

gdzie:  $x$  zmienna losowa,  $t$  czas,  $dz$  przyrost,  $a(x, t)$ ,  $b(x, t)$  znane funkcje nielosowe czasu i położenia.

Postać geometrycznego ruchu Browna, wywodzącego się z rodziny procesów Wienera dla wersji ciągłej można przedstawić następującym wzorem

$$\frac{dS}{S} = \alpha dt + \sigma dz$$

gdzie:  $S$  cena instrumentu bazowego,  $\alpha$  chwilowy oczekiwany zwrot z instrumentu,  $\sigma$  chwilowe odchylenie standardowe zwrotów z instrumentu,  $dz$  różniczka uogólnionego procesu Browna.

Najczęściej przyjmuje się, iż  $dz$  ma rozkład normalny  $N(0, \sqrt{dt})$ , i jest równy iloczynowi  $\varepsilon_t \sqrt{t}$ , gdzie  $\varepsilon_t$  jest „białym szumem” o rozkładzie  $N(0, 1)$  [6].

Rozwiązania powyższych, stochastycznych równań różniczkowych, prowadzą do uzyskania funkcji zwracającej wartości ceny w zależności od czasu. Można wykaazać, że

$$S_{t+1} = S_t \exp \left[ \left( \alpha - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) dt + \sigma \sqrt{dt} N(0, 1) \right]$$

oraz w postaci logarytmicznej:

$$\ln(S_{t+1}) = \ln(S_t) + \left[ \left( \alpha_{ln} - \frac{1}{2} \sigma_{ln}^2 \right) dt + \sigma_{ln} \sqrt{dt} N(0, 1) \right]$$

gdzie:  $S_{t+1}$ ,  $S_t$  ceny aktywa odpowiednio w chwilach  $t+1$ ,  $t$ ;  $\ln(S_{t+1})$ ,  $\ln(S_t)$  ceny w postaci logarytmicznej;  $\alpha_{ln}$  trend procesu w postaci logarytmicznej,  $\sigma_{ln}$  odchylenie standardowe logarytmicznych przyrostów;  $\exp$  – funkcja wykładnicza  $e^x$ .

W grupie procesów stochastycznych „powracających do średniej” – trendu, wyróżnia się dwie podstawowe klasy. Typowe procesy rewersyjne (*mean reverting*) ciągłe w czasie, które charakteryzuje „ciągłość” ich rozkładów warunkowych. Z kolei, klasa procesów stochastycznych „ze skokiem” (*mean reverting with jumps*) to zasadniczo „mieszanki” realizacji zmiennych losowych, odpowiednio o rozkładach: ciągłym i dyskretnym.

Prostym przykładem procesu stochastycznego, który ma charakter procesu powracania do średniej jest proces Ornsteina-Uhlenbecka [28]. Proces ten opisany jest formułą:

$$\frac{dS}{S} = \frac{h(\bar{S} - S)dt}{S} + \sigma dz$$

gdzie:  $dS$  zmiana ceny instrumentu bazowego w nieskończenie małym przedziale czasu  $dt$ ,  $h$  prędkość rewersji cen,  $\bar{S}$  poziom, do którego skłania się powracać  $S$ ,  $\sigma$  chwilowe odchylenie standardowe zwrotów z instrumentu,  $dz$  różniczka uogólnionego procesu Browna (o średniej 0 i wariancji  $dt$ ).

Postać powyższego równania znana jest również jako model Dixita i Pindycka [16]. W modelu tym przyjmuje się, iż w długim okresie czasu ceny mają tendencję do oscylowania wokół długookresowej wartości średniej  $\bar{S}$ .

Rozwiązanie arytmetycznej, logarytmicznej postaci tego procesu przedstawia poniższy wzór zaczerpnięty z [5]

$$S_T = S_0 \exp^{-hT} + \bar{S}(1 - \exp^{-hT}) + \sigma \exp^{-hT} \int_0^T \exp^{-ht} dz(t)$$

oraz

$$\sigma \exp^{-hT} \int_0^T \exp^{-ht} dz(t) \approx 0$$

gdzie:  $S_0$  wartość początkowa ceny;  $T$  czas ewolucji procesu; (...) pozostałe oznaczenia jak wcześniej.

W modelach analitycznych obu opcji wykorzystano zaproponowany przez Coxa, Rossa i Rubinsteina (CRR) w 1979 roku model stanowiący dyskretną aproksymację ciągłego procesu stochastycznego (geometrycznego ruchu Browna) [4]. Model ten określamy jest dwumianowym procesem ilościowym lub geometrycznym.

Uogólniony proces wyceny opcji kupna w tym podejściu obejmuje [3]:

- definicję funkcji wypłaty opcji w dowolnym węźle kratownicy, określona jest formułą:

$$\max(0; u^N d^{T-N} V_0 - K)$$

- szacowanie wartości strategicznej (opcynnej) w chwili:

$$XNPV = ROV_0 = \frac{1}{(1+r_f)^T} \sum_{N=0}^T \frac{T!}{(T-N)!N!} p^N (1-p)^{T-N} \max(0; u^N d^{T-N} V_0 - K)$$

#### 4. Miejsce analizy opcji rzeczowych w kontekście całościowej metodyki oceny technologii zgazowania węgla

Całościowa koncepcja oceny technologii zgazowania węgla zakłada kilkietapową procedurę oceny. Analiza opcji rze-

czowych stanowi kluczowe ogniwo rozszerzające rozumienie aspektu wartości najbardziej perspektywicznych wariantów technologii zgazowania węgla. Zakres prowadzonych analiz stanowi rezultat złożenia (kombinacji) kilku strategicznych kryteriów:

- różnorodności paliwa wsadowego (węgiel kamienny vs brunatny),
- dostępności modułu sekwestracji węgla lub jego braku,
- wytwarzania trzech różnych produktów końcowych tj. energii elektrycznej (i ciepła), wodoru, metanolu.

W efekcie prac badawczych zbiór technologii zgazowania węgla w podziale na 3 grupy:

- odniesienia,
- referencyjne,
- badane,

stanowi w ujęciu ilościowym grupę ponad 30 różnych kombinacji.

Technologie odniesienia to technologie funkcjonujące i sprawdzone w rzeczywistości w skali przemysłowej wytwarzającej odpowiednio energię elektryczną, wodór i metanol.

Technologie referencyjne to technologie analizowane i oceniane na bazie danych literaturowych, rekomendowane do potencjalnego wdrożenia.

Technologie badane sklei te, które są przedmiotem prowadzonych eksperymentów w ramach podziemnego i naziemnego zgazowania węgla.

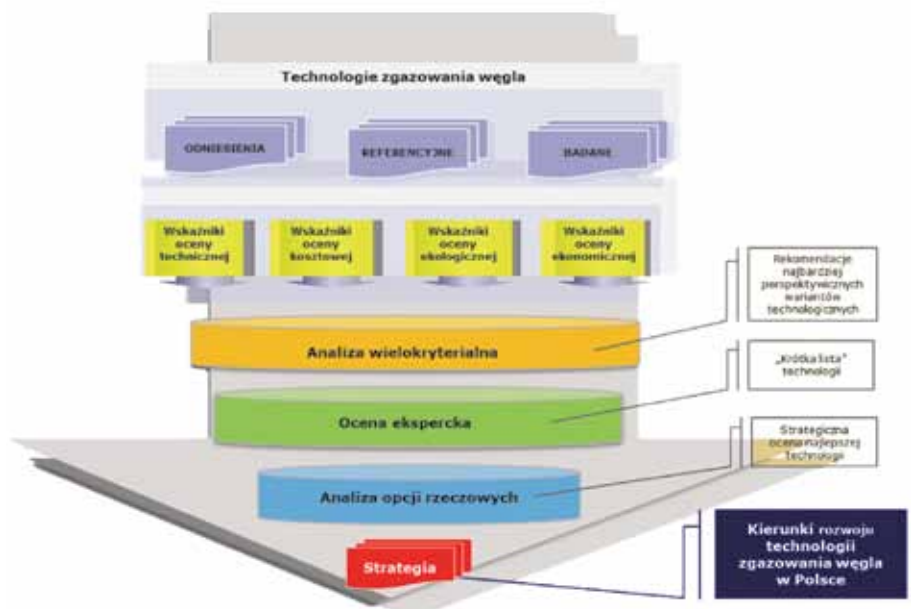
Całość analizy, której schemat ideowy prezentuje rysunek 1 składa się z następujących etapów:

- Etap I: Ocena zbioru wszystkich analizowanych technologii pod względem: technicznym, kosztowym, ekologicznym, ekonomicznym,
- Etap II: Ocena zbioru wariantów technologicznych w metodach: analizy wielokryterialnej (DEA) oraz eksperckiej (AHP),

Na podstawie wyników otrzymanych w etapach I oraz II następuje identyfikacja najbardziej perspektywicznych ścieżek produktowych analizowanych technologii zgazowania węgla.

- Etap III: Rozszerzona ocena efektywności ekonomicznej w analizie opcji rzeczowych,
- Etap IV: Identyfikacja priorytetowych kierunków rozwoju technologii zgazowania węgla w Polsce.

Na bazie wyników końcowych, zostaną określone (wskazane) priorytetowe kierunki rozwoju technologii zgazowania węgla w Polsce.



Rys. 1. Schemat procedury oceny analizowanych technologii zgazowania węgla.

Fig. 1. Scheme of assessment procedure of coal gasification technologies

W szczególności wyłonieniu najbardziej perspektywicznych wariantów technologii zgazowania węgla w ramach analizy efektywności ekonomicznej służyć będzie przygotowany standard oceny, identyfikujący kluczowe mierniki (wskaźniki) działalności operacyjnej, inwestycyjnej i finansowej, jak i wyniki metod NPV, IRR, czy wieloaspektowa ocena kosztów wytwarzania. Wykaz najważniejszych kryteriów różnicowania poszczególnych technologii w obszarze oceny ekonomicznej przedstawiono poniżej:

#### Nakłady:

Całkowite nakłady inwestycyjne  
Jednostkowe nakłady inwestycyjne  
Nakłady inwestycyjne na CCS

#### Rachunek przepływów

pieniężnych:  
Przepływy pieniężne z działalności operacyjnej  
Przepływy pieniężne z działalności inwestycyjnej  
Przepływy pieniężne z działalności finansowej  
Przepływy FCFF  
Przepływy FCFE

#### Działalność operacyjna:

Zysk (strata) z działalności operacyjnej  
Zysk (strata) ze sprzedaży  
Zysk (strata) brutto  
Zysk (strata) netto  
Średnie roczne koszty operacyjne  
Jednostkowe średnie roczne koszty operacyjne  
Uśredniony koszt wytwarzania  
Średnie roczne koszty emisji CO<sub>2</sub>  
Średnie roczne koszty sekwestracji CO<sub>2</sub>

#### Ryzyko i wycena:

Koszt ryzyka specyficznego projektu  
Stopa dyskontowa dostosowana do ryzyka  
Wyliczona wewnętrzna stopa zwrotu  
Wyliczona wartość zaktualizowana netto  
Wskaźnik wartości zaktualizowanej netto  
Ekonomiczna zaktualizowana wartość netto  
Ekonomiczna wewnętrzna stopa zwrotu

## 5. Metodyka analizy opcji rzeczowych dedykowana ocenie technologii zgazowania węgla

Właściwa ocena technologii zgazowania węgla w analizie opcji rzeczowych wiąże się z identyfikacją źródeł niepewności i ryzyka związanych z niepewnymi parametrami decyzyjnymi. Dotyczy przede wszystkim:

- niepewności, co do przyszłych cen paliwa oraz jego dostępności w Polsce (zasobność złóż węgla i techniczne możliwości ich zgazowania),
- możliwości przemysłowego wykorzystania produktów finalnych analizowanych technologii z uwagi na ich właściwości,
- możliwości eskalacji technologii eksperymentalnych do skali przemysłowej.

Wycena wartości technologii zgazowania węgla sprowadza się do wyznaczenia tzw. wartości strategicznej (opcyjnej), która zależy od:

- istoty przedstawionego problemu badawczego tj. liczby, typu zidentyfikowanych opcji,
- zastosowanego modelu wyceny oraz definicji parametrów charakterystycznych poszczególnych opcji (instrumentu bazowego i jego zmienności w czasie, ceny wykonania opcji, okresu istnienia oraz tzw. kroku obliczeniowego – dot. modeli dyskretnych).

#### Koncepcja szacowania XNPV (ROV) dedykowana technologiom zgazowania węgla

Opracowana na potrzeby oceny technologii zgazowania węgla koncepcja rachunku opcji rzeczowych zakłada wycenę następujących opcji:

- dla wybranych w metodach analizy wielokryterialnej (DEA) i eksperckiej (AHP) rekomendowanych ścieżek produktowych (indywidualnie dla węgla kamiennego i brunatnego), w zakresie referencyjnych oraz badanych technologii naziemnego zgazowania węgla:
  - opcji czekania z podjęciem rozstrzygającej decyzji o podjęciu inwestycji,
  - opcji wzrostu do skali przemysłowej (skala bazowa zakłada zużycie 100 Mg/h węgla kamiennego o kaloryczności 21,5 GJ/Mg)
  - opcji rozszerzenia technologii o moduł wychwytu i sekwestracji CO<sub>2</sub>,
- dla technologii ukierunkowanych na wytwarzanie metanolu, odpowiednio dla węgla kamiennego i brunatnego:
  - opcji rozszerzenia łańcucha technologicznego do produkcji olefin (MTO).

Wszystkie zidentyfikowane w tabelicy 1 opcje są opcjami inwestycyjnymi typu amerykańskiego (autorzy założyli, że wykonanie każdej z nich może nastąpić w dowolnym czasie, czyli na koniec danego roku analizy w okresie istnienia poszczególnych opcji).

Wykaz opcji włączonych w całościową koncepcję szacowania wartości strategicznej (opcyjnej) prezentuje poniższe zestawienie:

- Opcja czekania (nr 1 i 2) – najbardziej perspektywiczny wariant technologiczny bazujący odpowiednio na węglu kamiennym i brunatnym
- Opcja **budowy (rozbudowy) modułu CCS** (nr 3 i 4) – najbardziej perspektywiczny wariant technologiczny bazujący odpowiednio na węglu kamiennym i brunatnym,
- Opcja zwiększenia skali produkcji (z bazowej do przemysłowej) (nr 5 i 6) – najbardziej perspektywiczny wariant technologiczny bazujący odpowiednio na węglu kamiennym i brunatnym
- Opcja rozszerzenia łańcucha technologicznego do olefin (MTO) z jednoczesnym zwiększeniem skali (nr 7 i 8) – najbardziej perspektywiczny wariant produkcji olefin z metanolu odpowiednio dla węgla kamiennego lub brunatnego.

Ideę procesu wyceny, wiążącą poszczególne opcje ze sobą w logiczny schemat postępowania, rysunki 2 i 3.

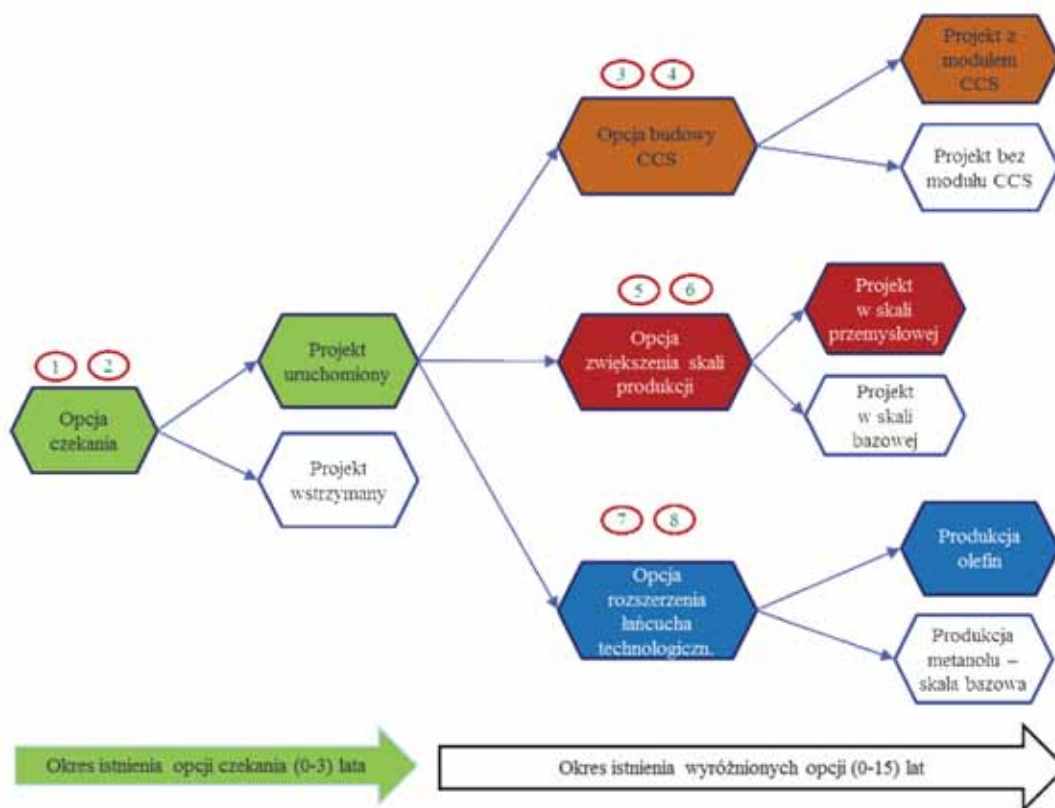
Do wyznaczenia wartości strategicznej (opcyjnej) zatem należy:

- przeprowadzić kalkulację wartości sześciu sekwencji opcji składanych,
- zaimplementować funkcje wypłaty z kombinacji modelowanych opcji, tj. wyznaczyć wartości maksymalne w poszczególnych węzłach drzewa decyzyjnego, przedstawionego na rysunku 2.

Omawiana koncepcja postępowania, w postaci graficznej, została przedstawiona na rysunku 3.

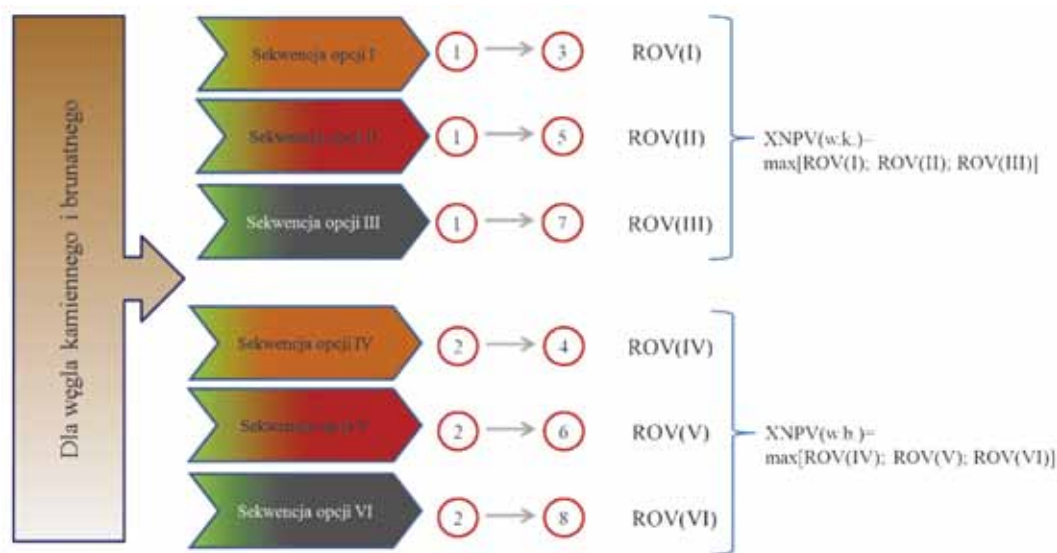
## 6. Wycena sekwencyjnej, składanej opcji czekania i wzrostu skali

Wycenę opcji wzrostu skali przeprowadzono dla technologii naziemnego zgazowania węgla kamiennego w reaktorze Shell, ukierunkowanej na wytwarzanie metanolu i nieposiadającej możliwości sekwestracji ditlenku węgla (brak CCS). Zdolność produkcyjna technologii bazowej odpowiada zużyciu węgla o kaloryczności 21,5 GJ/Mg w ilości



Rys. 2. Schemat drzewa decyzyjnego ilustrujący koncepcję szacowania wartości strategicznej najbardziej perspektywicznych technologii zgazowania węgla. Symbole od 1 do 8 odpowiadają opcjom wymienionym w tabelcy 1. Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Schematic diagram of the decision tree presenting the concept of estimating the strategic value of the most prospective coal gasification technologies. Symbols 1 to 8 correspond to the options listed in Table 1. Source: own study



Rys. 3. Idea wyceny wartości opcyjnej (ROV, XNPV) dla analizowanych technologii zgazowania węgla. Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Concept of the option value estimation (ROV, XNPV) for the analyzed coal gasification technologies. Source: own study

100 Mg/h. Skala przemysłowa została ustalona na około 2 mln Mg metanolu rocznie, co oznacza 5-krotne zwiększenie produkcji MeOH.

Dla rozpatrywanego przypadku, w pierwszym etapie zbudowano klasyczny model zdyskontowanych przepływów pieniężnych DCF (B) (*discounted cash flow*), pozwalający

na oszacowanie zdyskontowanych przepływów pieniężnych i wyliczenie wartości zaktualizowanej netto (NPV; net present value) na poziomie (-) 1091,8 mln zł. Analogiczny model – arkusz DCF (O) przygotowano dla scenariusza – projekt funkcjonujący w rozszerzonej skali, w którym opcja wzrostu została wykonana.

Wyceny dokonano przy następujących poziomach kluczowych zmiennych decyzyjnych: cena węgla: 310 zł/Mg (14,4 zł/GJ), cena metanolu 1850 zł/Mg, cena praw do emisji CO<sub>2</sub>: 40 zł/Mg CO<sub>2</sub>, długookresowa inflacja (CPI): 2,5%. Czas życia instalacji: 30 lat (w tym faza rozruchu i likwidacji), dyspozycyjność: 95 %, okres budowy: 3 lata. W modelach dyskontowych obliczenia wykonano w ujęciu nominalnym, przy czym zmianę w czasie istotnych zmiennych niepewnych przyrównano do poziomu długookresowej inflacji.

Jak już wspomniano, opcje czekania z budową oraz wzrostu skali stanowią sekwencyjną, składaną opcję typu amerykańskiego (sekwencja opcji II, rysunek 2). Jest to walor obejmujący dwie występujące po sobie opcje, które mogą zostać wykonane w dowolnym terminie do daty wygaśnięcia. Pierwszą jest opcja czekania (*option-to-wait*), dla której instrumentem bazowym jest wartość opcji drugiej; realizacja pierwszej uwarunkowana jest zatem wykonaniem następnej.

Zgodnie z metodyką wyceny projektów inwestycyjnych z wykorzystaniem rachunku opcji rzeczowych, celem kalkulacji wartości strategicznej (opcynnej), w środowisku arkusza kalkulacyjnego zbudowano model dedykowany bezpośrednio wycenie składanej, sekwencyjnej opcji typu amerykańskiego.

Każdorazowo, kalkulacja wartości strategicznej (XNPV, ROV) przebiega w dwóch etapach:

- Etap 1: wycena opcji drugiej tj. zwiększenia skali,
- Etap 2: wycena opcji pierwszej – czekania z podjęciem rozstrzygającej decyzji o rozpoczęciu (fazy budowy) inwestycji.

## 6.1. Wycena opcji drugiej

Szacowanie XNPV (ROV) rozpoczyna konstrukcja dwóch równoległych modeli („drzew”) zmian wartości technologii brutto:

- projektu bazowego (projekt uruchomiony, skala bazowa, brak CCS) – arkusz DCF (B),
- projektu po wykonaniu opcji wzrostu skali – arkusz DCF (O).

Parametry pozwalające na budowę obu „drzew”, zgodnie z dwumianowym modelem iloczynowym **Coxa-Rossa-Rubinsteina (CRR)**, zostały zaprezentowane w tablicy 1.

**Tablica 1. Parametry opcji wzrostu skali i modelu wyceny**  
**Table 1. Parameters of the growth option and pricing model**

Parametr	Projekt bazowy (B)	Projekt po wyk. opcji (O)
	Wartość / Sposób wyliczania / Źródło danych	
Okres analizy	15 lat (2016÷2030)	15 lat (2016÷2030)
„Krok” obliczeniowy Δt	1 rok	
Wartość projektu/instrument bazowy	PV <sub>B</sub> = 1 554,1 mln zł Wartość brutto projektu bazowego wartość obliczana na podstawie przepływów pieniężnych projektu (bez nakładów inwestycyjnych) oraz stopy dyskontowej dostosowanej do ryzyka (RADR), które pobrano z opracowanego modelu DCF (B).	PV <sub>O</sub> = 13 318,9 mln zł Wartość brutto projektu po wykonaniu opcji wartość obliczana na podstawie przepływów pieniężnych projektu (bez nakładów inwestycyjnych) oraz stopy dyskontowej dostosowanej do ryzyka (RADR), które pobierano z opracowanego modelu DCF (1).
Zmienność instrumentu bazowego (PV)	σ <sub>B</sub> = 15,65%	σ <sub>O</sub> = 13,81%
Stopa wolna od ryzyka	Skonsolidowana zmienność obliczana zgodnie z podejściem LCFR (logarithmic cash flow returns) na podstawie przepływów pieniężnych projektu bazowego [13,17]. r <sub>f</sub> = 4%	

Źródło: Opracowanie własne

W kolejnym etapie procesu wyceny budowane jest drzewo kalkulacji wartości opcji drugiej, która może być wykonana od roku 4 do 15 (aktualnie perspektywa: 2019÷2030). Cena wykonania tego waloru jest równa zaktualizowanym nakładom inwestycyjnym I<sub>2</sub> (7838,8 mln zł), jakie trzeba ponieść, aby uzyskać instrument bazowy (w modelu odpowiednio nakłady na zwiększenia skali).

Równania w poszczególnych węzłach drzewa wyceny przedstawiają się następująco:

- w węzłach końcowych
- w pierwszej kolejności wyznaczana jest wartość opcynna zgodnie ze wzorem

$$\max(PV_O - I_2; PV_B),$$

- zgodnie z teorią, w celu uzyskania wartości opcynnej przed odliczeniem „dywidendy” otrzymana wartość powiększana jest o wielkość tej ostatniej. W analizowanym przypadku, ze względu na wyłączenie płatności dywidendowych (rozumianych jako klasyczna dywidenda), wartość przepływów pieniężnych pomniejszających PV projektu wyzerowano w kolejnych okresach procesu wyceny.

- w węzłach pośrednich
- w pierwszej kolejności, korzystając z podejścia neutralnego względem ryzyka, kalkulowana jest wartość strategiczna (ROV) zgodnie ze wzorem:

$$ROV_{II} = \frac{pROV_u + gROV_d}{1+r_f},$$

- następnie konstruowany jest warunek funkcji wypłaty w postaci

$$\max(ROV_{II}; PV_O - I_2),$$

- w procedurze rekurencyjnej kalkulowana jest premia opcynna.

Ostatecznie, wartość opcynna (ROV) w węzle początkowym ROV<sub>II</sub><sup>0</sup> stanowi wartość strategiczną (opcynną; XNPV) opcji wzrostu skali.

Wyliczona wartość opcynna ROV<sub>II</sub><sup>0</sup> wynosi 6 111,4 mln zł. Odejmując zaktualizowane nakłady inwestycyjne na uruchomienie projektu bazowego (2645,9 mln zł) można uzyskać wartość opcynną samej opcji wzrostu skali (3465,4 mln zł).

## 6.2. Wycena opcji pierwszej

Zbudowany w etapie pierwszym model wartości opcji drugiej, stanowi drzewo zmian instrumentu bazowego dla opcji pierwszej. Opcja czekania z podjęciem rozstrzygającej decyzji o rozpoczęciu inwestycji może być wykonana na przestrzeni trzech pierwszych rocznych okresów obliczeniowych.

Parametry pozwalające na skonstruowanie drzewa wartości opcji pierwszej prezentuje tablica 2.

Równania w poszczególnych węzłach drzewa wyceny przedstawiają się następująco:

- w węzłach końcowych:
- $$\max(ROV_{II} - I_1; 0),$$
- w węzłach pośrednich:
  - w pierwszej kolejności, korzystając z podejścia neutralnego względem ryzyka, kalkulowana jest wartość opcynna zgodnie ze wzorem:

$$ROV_I = \frac{pROV_u + gROV_d}{1+r_f},$$

- następnie konstruowany jest warunek funkcji wypłaty w postaci:

$$\max(ROV_I; ROV_{II} - I_1)$$

**Tablica 2. Parametry opcji czekania i modelu wyceny**  
**Table 2. Parameters of the option to wait and pricing model**

Parametr	Wartość / Sposób wyliczenia / Źródło danych
Czas życia	3 lata (2016-2018)
„Krok” obliczeniowy $\Delta t$	1 rok
Instrument bazowy	Wartość $ROV_{II}$
Cena wykonania	$I_1 = 2\,645,9$ mln zł Nakłady inwestycyjne, jakie trzeba ponieść celem uruchomienia projektu bazowego; wartość pobrana z modelu dyskontowego DCF (B).
Zmienność instrumentu bazowego (PV)	$\sigma_1 = 2645,9$ mln zł Skonsolidowana zmienność obliczana zgodnie z podejściem LCFR (logarithmic cash flow returns) na podstawie przepływów pieniężnych projektu bazowego [13, 17].
Stopa wolna od ryzyka	$r_f = 4\%$

Źródło: Opracowanie własne

Ostatecznie, wartość opcyjna w węźle początkowym  $\max ROV_1^0$  stanowi wartość strategiczną złożonej, sekwencyjnej opcji typu amerykańskiego.

Wartość strategiczna (rozszerzona wartość NPV = XNPV) projektu uwzględniającego elastyczność decyzyjną związaną z możliwościami czekania z budową oraz późniejszego wzrostu skali, jest dodatnia i wynosi 3508,5 mln zł. Wartość elastyczności decyzyjnej ( premia opcyjna, OP), związanej z występowaniem opcji, przy tych parametrach wejściowych, obliczona jako różnica wartości strategicznej projektu XNPV oraz wartości zaktualizowanej netto NPV kształtuje się na poziomie:

$$OP = XNPV - NPV = 3\,508,5 - (-1\,091,8) = 4\,600,3 \text{ mln zł}$$

**Tablica 3. Analiza wrażliwości wartości opcji wzrostu skali**  
**Table 3. Sensitivity analysis of the growth option**

	J.m	Zmiana parametrów										
		-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	BAZA	10%	20%	30%	40%	50%
		0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
Zmienność	%	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,21
Wartość projektu brutto	tys. zł	6 659,5	7 991,4	9 323,3	10 655,1	11 987,0	13 318,9	14 650,8	15 982,7	17 314,6	18 646,5	19 978,4
Cena wykonania	tys. zł	3 919,4	4 703,3	5 487,2	6 271,1	7 054,9	7 838,8	8 622,7	9 406,6	10 190,5	10 974,4	11 758,2
	J.m	Zmiana XNPV, mln zł										
		-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	BAZA	10%	20%	30%	40%	50%
		0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
Zmienność	%	2 871,9	2 943,9	3 064,1	3 202,8	3 352,1	3 508,5	3 669,5	3 833,6	4 000,0	4 168,0	4 350,0
Wartość projektu brutto	tys. zł	103,4	332,5	811,5	1 555,0	2 424,8	3 508,5	4 641,1	5 865,9	7 110,6	8 383,9	9 696,6
Cena wykonania	tys. zł	6 844,0	6 087,4	5 348,7	4 690,2	4 058,4	3 508,5	3 000,1	2 491,9	2 157,0	1 862,0	1 567,3
		Wrażliwość XNPV, %										
		-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	BAZA	10%	20%	30%	40%	50%
		-0,50	-0,40	-0,30	-0,20	-0,10	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
Zmienność		-18,1	-16,1	-12,7	-8,7	-4,5	0,00	4,6	9,3	14,0	18,8	24,0
Wartość projektu brutto		-97,1	-90,5	-76,9	-55,7	-30,9	0,00	32,3	67,2	102,7	139,0	176,4
Cena wykonania		95,1	73,5	52,5	33,7	15,7	0,00	-14,5	-29,0	-38,5	-46,9	-55,3

## 7. Podsumowanie analiz i wnioski

Realizacja procedury wyceny sekwencyjnej opcji składanej pozwoliła na ocenę potencjału technologii zgazowania węgla w skali przemysłowej. Ocena procesu wytwarzania metanolu w małej i średniej skali (produkcja około 400 tys. Mg metanolu rocznie), wykazała negatywną efektywność mierzoną wartością zaktualizowaną netto (NPV – 1 091,8 mln zł).

W pracy przedstawiono całościową koncepcję oceny technologii zgazowania węgla w metodzie opcji rzeczowych. Idea modelu zakłada wycenę 6 różnych sekwencji opcji.

W zaprezentowanej publikacji ujęto tylko wycenę drugiej sekwencji (opcje oznaczone nr 1 i 5), gdzie paliwem wsadowym technologii był węgiel kamienny, a produktem końcowym metanol.

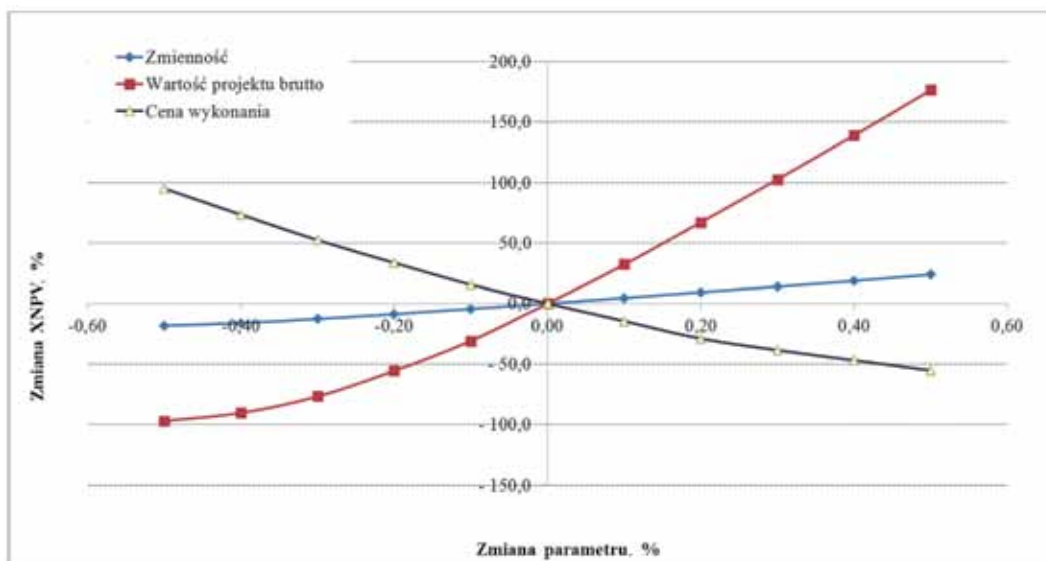
Wycena sekwencyjnej, składanej opcji (opcja czekania i opcja wzrostu) pozwoliła osiągnąć następujące rezultaty, mln zł:

- wartość opcji wzrostu skali 3 465,4;
- wartość sekwencji opcji (czekania i wzrostu skali) 3 508,5;
- wartość elastyczności z tytułu opcji wzrostu skali 4 557,2;
- wartość elastyczności z tytułu sekwencji opcji 4 600,3. Rezultaty te zostały osiągnięte w konsekwencji:
- 5-krotnego zwiększenia skali produkcji metanolu i w konsekwencji również zwiększenia wykładnika skalującego „f” z 0,65 do 0,9, co wiąże się z 3,97-krotnym zwiększeniem nakładów inwestycyjnych oraz 4,05-krotnym wzrostem kosztów operacyjnych w relacji do wariantu bazowego,
- niewielkiej redukcji zmienności aktywa bazowego opcji wzrostu skali (13,8%; vs. 15,7% PV-scenariusza bazowego),
- 15-letniego okresu istnienia opcji wzrostu skali i 3-letniego okresu istnienia opcji czekania,
- i w mniejszym stopniu – pozostałych zmiennych modelu wyceny.

Rezultaty badania wpływu zmienności kluczowych zmiennych decyzyjnych na oszacowanie XNPV prezentuje dołączona tab. nr 3.

W postaci graficznej wyniki analizy wrażliwości prezentuje też poniższy wykres (rys. 4).





Rys. 4. Graficzna prezentacja wrażliwości XNPV na zmianę kluczowych paramentów opcji wzrostu skali. Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Graphic presentation of the XNPV sensitivity for changing the key parameters of the growth option. Source: own study

Najwyższym wpływem na wartość XNPV posiada wartość projektu brutto, w drugiej kolejności cena wykonania i w stopniu kilkukrotnie niższym – zmienność instrumentu bazowego opcji. Poszczególne krzywe cechuje asymetryczność względem początku układu współrzędnych, co powoduje, że – przykładowo wzrost wartości instrumentu bazowego opcji (PV brutto) o 50 % powoduje wzrost XNPV o blisko 176,4 %, podczas gdy spadek wartości projektu o 50 % powoduje spadek XNPV o 97,1 %.

*Praca została wykonana w ramach Zadania Badawczego nr 3 pt. „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoelektywniej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.*

## 8. Literatura

- 1 Abadie L.M., Chamorro J.M.: Valuation of Energy Investments as Real Options: The case of an Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant, *Energy Economics* 30, 2008.
- 2 Abadie L.M., Chamorro J.M.: The Economics of Gasification: A Market-Based Approach, *Energies* 2, 2009.
- 3 Copeland T., Antikarov V.: *Real Options. A Practitioners Guide*, Texere, LLC New York, 2001.
- 4 Cox J.C., Ross S.A., Rubinstein M.: Option Pricing: a Simplified Approach. *Journal of Financial Economics*, Vol. 7, No. 3, 1979.
- 5 Dias M.A.G.: Stochastic processes, Zasoby internetowe - strona domowa autora: <http://marcoagd.usuarios.rdc.puc-rio.br/>
- 6 Dias M.A.G.S.: Real Options in Petroleum- An overview, Seminar Real Options in Real Life, MIT/Sloan School of Management, 2003.
- 7 Dixit A.K., Pindyck R.S.: *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton, 1993.
- 8 Herbelott O.: Option valuation of flexible investments: the case of a coal gasifier, Massachusetts Institute of Technology, January, 1994.
- 9 IHS Chemical Week, 2014: Outlook 2014: Looking forward, [http://www.chemweek.com/lab/Outlook-2014-Looking-forward\\_57898.html](http://www.chemweek.com/lab/Outlook-2014-Looking-forward_57898.html)
- 10 Instytut Studiów Energetycznych, 2009: Analiza wytwarzania produktów chemicznych z wykorzystaniem gazu syntezowego pozyskiwanego w oparciu o gaz ziemny. Warszawa.
- 11 Jajuga K., Jajuga T.: „Inwestycje”, PWN, Warszawa 2000.
- 12 Karcz A., Ściężko M.: Energochemiczne przetwórstwo węgla szansa dla górnictwa węglowego?, Mat. Konf. Szkoły Eksploatacji Podziemnej, PAN Kraków, 2006.
- 13 Kodukula P., Papudesu Ch.: *Project Valuation Using Real Options A Practitioner’s Guide*, J. Ross Publishing, Inc, 2006.
- 14 Kopacz M.: Wykorzystanie opcji rzeczowych w wycenie przedsięwzięć inwestycyjnych w górnictwie, w mat. konf. Międzynarodowej Konferencji Górnictwa Rud Miedzi, tom 2, 24-26 września, Lubin, 2009.
- 15 Laurikka H.: Option Value of Gasification Technology within an Emissions Trading Scheme, *Energy Policy*, 34, Issue 18, December, 2006
- 16 Metcalf G.E., Hasset K.A.: Investment under Alternative Return Assumptions Comparing Random Walks and Mean Reversion, *Journal of Economic Dynamics and Control*, vol.19, 1995.
- 17 Mun J.: *Real Options Analysis – Tolls and Techniques for Valuating Strategic Investments and Decisions*, New Jersey, 2006.
- 18 Reedman L., Graham P., Coombes P.: Using a Real Options Approach to Model Technology Adoption under Carbon Price Uncertainty: An Application to the Australian Electricity Generation Sector, *Economic Record*, 2006a, Vol. 82, No. S1.
- 19 Reedman L., Graham P., Coombes P., Vincent D.: Impact of carbon price uncertainty on investment in selected electricity generation options, *Technology Assessment Report* 59, 2006.
- 21 Rukes B., Taud R.: Status and perspectives of fossil power generation. *Energy*, vol. 29, no. 12–15/2004.
- 22 Samis M., Davis G.A., Laughton D., Poulin R.: Valuating Uncertain Asset Cash Flows when there are no Options, *Resources Policy* 30, 2006.
- 23 Sekar Ch. R.: Carbon Dioxide Capture from Coal-Fired Power Plants: A Real Options Analysis; Master of Science Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- 24 Smeers Y., Bolle L., Squilbin O.: Coal Options: Evaluation of coal-based power generation in an uncertain context: Final report, OSTC Global Change and Sustainable Development 1996-2000, Sub-programme 2, 2001.

- 25 *Taniewski M.*: Chemia gazu syntezowego i ditlenku węgla. Zarys współczesnych możliwości, *Przemysł Chemiczny* 91/4, 2012.
- 26 *Teng Y., Han L., Li Ch., Zhao H.*: Real option analysis on coal-to-oil project, *Energy Procedia* 5, 2011.
- 27 *Trigeorgis L.*: Real Options Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation, MIT Press, Cambridge, 2000.
- 28 *Uhlenbeck G.E., Ornstein L.S.*: On the theory of Brownian Motion, *Phys. Rev.* 36, 1930.
- 29 *Upton D.M.*: The Management of Manufacturing Flexibility: California Management Review Vo. 36, 1994.
- 30 *Vanek F.M. Albright L.D.*: Energy Systems Engineering, Evaluation&Implementation, McGraw Hill, 2008
- 31 *Yang M., Blyth W.*: Modelling Investment Risks and Uncertainties with Real Options Approach, Paper Number LTO/2007/WP01, Paris, 2007.
- 32 *Yun T., Baker R.*: Analysis of a power plant investment opportunity under a carbon neutral world, *Investment Management and Financial Innovations*, Volume 6, Issue 4, 2009.



Zadanie Badawcze nr 3 pt.: „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”.

