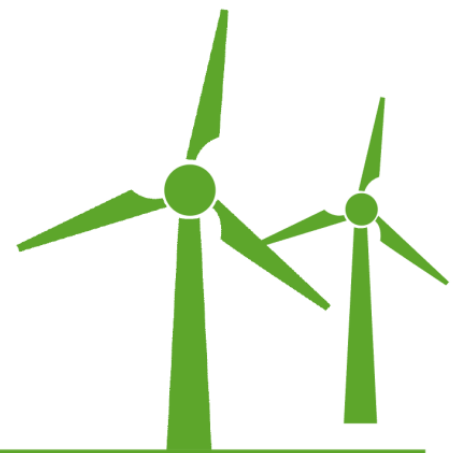




„Innowacyjne modele biznesowe związane z wprowadzaniem na rynek **energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych** i uelastycznieniem użycia energii elektrycznej w przemyśle”

# Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

Opracowanie 5.1  
Maj 2017 r.



IndustRE

## Podziękowania

Niniejszy raport stanowi część projektu IndustRE „Innowacyjne modele biznesowe związane z wprowadzaniem na rynek energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych i uelastycznieniem użycia energii elektrycznej w przemyśle”. Poniżej przedstawiono logo partnerów uczestniczących w tym projekcie. Informacje o nich zamieszczono w witrynie [www.IndustRE.eu](http://www.IndustRE.eu)

Wtworzeniu niniejszego raportu brali udział: Dimitrios Papadaskalopoulos, Roberto Moreira, Danny Pudjianto, Predrag Djapic, Fei Teng oraz Goran Strbac z uniwersytetu Imperial College London. Autorzy dziękują za cenny wkład wszystkich partnerów w tworzenie projektu.

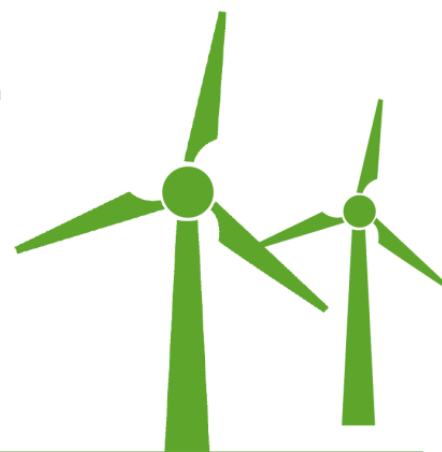


### Wyłączenie odpowiedzialności

Niniejszy projekt jest finansowany z programu Unii Europejskiej Horizon 2020 w zakresie badań naukowych i innowacji w ramach umowy dotacji nr 646191.

Autorzy ponoszą wyłączną odpowiedzialność za treść niniejszego raportu. Raport ten może nie odzwierciedlać opinii Unii Europejskiej. INEA ani Komisja Europejska nie odpowiadają za wykorzystanie informacji w nim zamieszczonych.

Chociaż niniejszą publikację przygotowano z należytą starannością, jej autorzy i ich podwładni nie udzielają żadnych gwarancji w odniesieniu do jej treści i nie ponoszą odpowiedzialności za jakiegokolwiek bezpośrednie, przypadkowe lub wynikowe szkody związane z korzystaniem z zawartych w niej danych lub informacji. Powielanie jest dozwolone, pod warunkiem zachowania kompletności materiału i podania źródła.



## Spis treści

<b>STRESZCZENIE</b>	<b>4</b>
<b>1. WPROWADZENIE</b>	<b>11</b>
1.1 ZAKRES OPRACOWANIA	11
1.2 STRUKTURA OPRACOWANIA	11
<b>2. NOWE WYZWANIA STOJĄCE PRZED EUROPEJSKIM SYSTEMEM ENERGETYCZNYM I ROLA ELASTYCZNOŚCI ZAPOTRZEBOWANIA PRZEMYSŁOWEGO</b>	<b>12</b>
2.1 NOWE WYZWANIA STOJĄCE PRZED EUROPEJSKIM SYSTEMEM ENERGETYCZNYM	12
2.2 ROLA ELASTYCZNOŚCI ZAPOTRZEBOWANIA PRZEMYSŁOWEGO W KONTEKŚCIE NOWYCH WYZWAŃ	13
<b>3. METODY MODELOWANIA SŁUŻĄCE ILOŚCIOWEMU OKREŚLENIU KORZYŚCI FID</b>	<b>14</b>
3.1 PRZEDSTAWIENIE ELASTYCZNOŚCI ZAPOTRZEBOWANIA PRZEMYSŁOWEGO	14
3.2 ODGÓRNE ILOŚCIOWE UJĘCIE KORZYŚCI FID	16
3.3 ODDOLNE ILOŚCIOWE UJĘCIE KORZYŚCI FID	23
<b>4. BADANIA I SPOSTRZEŻENIA DOTYCZĄCE ODGÓRNEGO ILOŚCIOWEGO UJĘCIA KORZYŚCI FID</b>	<b>28</b>
4.1 OCENA KORZYŚCI FID DLA EUROPEJSKIEGO SYSTEMU WYTWARZANIA/PRZESYŁU	28
4.2 OCENA KORZYŚCI FID DLA SIECI DYSTRYBUCJI ENERGII 6 KRAJÓW DOCELOWYCH	36
<b>5. BADANIA I SPOSTRZEŻENIA DOTYCZĄCE ODDOLNEGO ILOŚCIOWEGO UJĘCIA KORZYŚCI FID</b>	<b>39</b>

### Streszczenie

#### Zakres opracowania

Opracowanie obejmuje podsumowanie prac wykonanych w ramach zadań 5.1 oraz 5.2 projektu IndustRE, które odnoszą się do oceny ilościowej potencjalnych korzyści gospodarczych elastycznego zapotrzebowania przemysłowego (FID) w kontekście europejskim. W szczególności:

- **Zadanie 5.1 — *Odgórne ilościowe ujęcie korzyści gospodarczych***: skupia się na ocenie ilościowej korzyści z perspektywy całego systemu energetycznego (perspektywy społecznej). Celem zadania 5.1 jest zatem ocena ilościowa oszczędności kapitałowych i kosztów eksploatacyjnych związanych z rozwojem i eksploatacją europejskiego systemu energetycznego przez integrację elastyczności zapotrzebowania przemysłowego.
- **Zadanie 5.2 — *Oddolne ilościowe ujęcie korzyści gospodarczych***: skupia się na ocenie ilościowej korzyści z perspektywy pojedynczego elastycznego odbiorcy przemysłowego. Celem zadania 5.2 jest zatem ocena ilościowa oszczędności kosztów ponoszonych przez odbiorcę przemysłowego związana z wdrożeniem elastyczności.

#### Rola elastyczności zapotrzebowania przemysłowego w powstającym europejskim systemie energetycznym

Przed europejskim systemem energetycznym stoją nowe wyzwania związane z ograniczeniem emisji dwutlenku węgla spowodowane troską o bezpieczeństwo energetyczne i środowisko naturalne. Zasadniczo większość źródeł niskoemisyjnych charakteryzuje się jednak zmiennością, nieciągłością i brakiem kontroli, co stwarza poważne wyzwania w zakresie zrównoważenia systemu i powoduje spadek wydajności konwencjonalnego wytwarzania energii i/lub ogranicza możliwości jej wytwarzania ze źródeł odnawialnych. Ponadto oczekuje się, że poziom ograniczenia emisji dwutlenku węgla w transporcie i ciepłownictwie znacznie się zwiększy, prowadząc do konieczności poczynienia znacznych inwestycji w nowe, niewykorzystane dotąd moce wytwórcze i sieciowe. W tym kontekście elastyczność zapotrzebowania przemysłowego może pozwolić na znalezienie oszczędniejszych metod redukcji emisji dwutlenku węgla poprzez wsparcie zrównoważenia systemu i redukcję zapotrzebowania szczytowego.

#### Przedstawienie elastyczności zapotrzebowania przemysłowego

Elastyczność określa zdolność odbiorców przemysłowych do zmiany wzorców korzystania z energii elektrycznej. Należy podkreślić, że takie modyfikacje nie wiążą się na ogół z redukcją/zwiększeniem całkowitego zużycia energii elektrycznej, lecz raczej ze zmianą/redystrybucją jej zużycia w czasie — większość odbiorców przemysłowych wymaga bowiem określonej ilości energii do realizacji procesów. Oznacza to, że całkowite zużycie energii elektrycznej w pewnym czasie (np. w ciągu dnia) nie może się znacząco zmieniać, ale w tych samych granicach okresy, w których energia elektryczna jest dostarczana, mogą zmieniać się elastycznie. Oznacza to, brak wpływu na działalność odbiorców przemysłowych.

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

Ponieważ elastyczność poszczególnych zakładów przemysłowych różni się znacznie w zależności od ich działalności, instalacji technicznych i procesu produkcyjnego, jak również poglądów, preferencji i wymagań ich właścicieli i operatorów, autorzy opracowania zastosowali ogólny, procesowo-agnostyczny model elastyczności zapotrzebowania przemysłowego. Zgodnie z tym modelem zapotrzebowanie odbiorcy przemysłowego na energię elektryczną można w dowolnym czasie zredukować/zwiększyć w stosunku do poziomu bazowego w ramach limitu proporcjonalnego  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 100\%$ ), o ile całkowita redukcja zapotrzebowania jest równa całkowitej wielkości wzrostu zapotrzebowania w ciągu dnia. Przykładowo  $\alpha = 0\%$  oznacza, że zapotrzebowanie odbiorców przemysłowych nie wykazuje elastyczności w czasie, a  $\alpha = 100\%$  oznacza, że całe zapotrzebowanie może zmienić się w czasie.

### Odgórnie ilościowe ujęcie korzyści gospodarczych związanych z elastycznością zapotrzebowania przemysłowego

Elastyczne zapotrzebowanie przemysłowe może mieć potencjalny wpływ na wiele sektorów europejskiego systemu energetycznego (wytwarzanie, przesył i dystrybucję) w różnych ramach czasowych (długo- i krótkoterminowe planowanie oraz równoważenie w czasie rzeczywistym). W rezultacie kompleksowa ocena ilościowa korzyści FID dla całego systemu energetycznego jest złożonym zadaniem, wymagającym zaawansowanych metod modelowania w celu uchwycenia różnych warstw działania i rozwoju systemu energetycznego. W oparciu o bogate doświadczenie partnerów Imperial College w zakresie oceny wartości całego systemu dla różnych technologii przyjęto następujące strategie modelowania:

- **Odrębna ocena europejskiego poziomu wytwarzania/przesyłu energii elektrycznej i lokalnego poziomu dystrybucji w krajach docelowych:** Kraje europejskie są już połączone ze sobą siecią wysokonapięciowych połączeń międzysystemowych, a oczekuje się, że liczba projektów takich połączeń jeszcze wzrośnie. Z drugiej strony planowanie i użytkowanie sieci dystrybucji energii są zadaniami typowo lokalnymi, ponieważ sieci te nie są wzajemnie połączone i muszą odzwierciedlać lokalny popyt oraz warunki wytwarzania energii. Z tego powodu do oceny korzyści gospodarczych związanych z FID zastosowano dwa różne podejścia modelowania. Pierwsze z nich — obejmujące model inwestycyjny całościowego systemu energetycznego (Whole-electricity System Investment Model, WeSIM) oraz model zaangażowania jednostek stochastycznych (Stochastic Unit Commitment Model, SUCM) — odnosi się do oceny korzyści związanych z wytwarzaniem i przesyłem energii elektrycznej na poziomie europejskim poprzez włączenie zintegrowanego modelu europejskiej międzysystemowej sieci przesyłowej. Drugie, stanowiące model planowania sieci dystrybucji energii (Distribution Network Planning Model, DistPlan), odnosi się do oceny korzyści związanych z dystrybucją w każdym z 6 krajów docelowych IndustRE (Belgia, Francja, Niemcy, Włochy, Hiszpania i Wielka Brytania) osobno. Biorąc pod uwagę wielkość i różnorodność sieci dystrybucji energii oraz bardzo ograniczoną ilość danych dotyczących rzeczywistej topologii i charakterystyki technicznej sieci dystrybucji energii, model ten opiera się na analizie ograniczonej liczby statystycznie reprezentatywnych sieci, a nie na analizie samych sieci.

- **Kompleksowa ocena długoterminowych inwestycji i krótkoterminowych korzyści operacyjnych:** Oczekuje się, że zwiększony udział energii odnawialnej w europejskim systemie energetycznym spowoduje

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

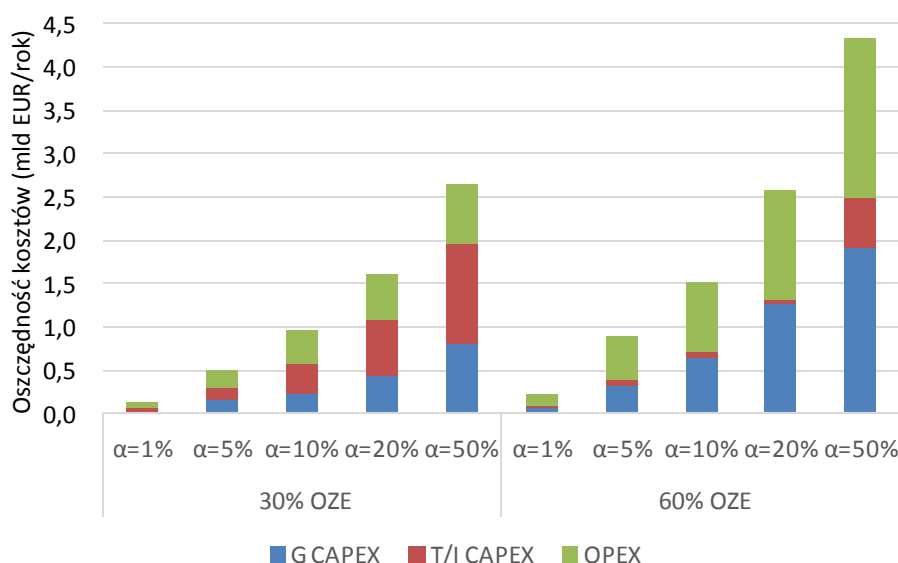
znaczne skomplikowanie pracy systemu i zwiększenie liczby wymaganych usług bilansowania, czyli usług niezbędnych do bezpiecznej eksploatacji systemu, takich jak rezerwy i regulacja częstotliwości. W tym kontekście dokładna ocena korzyści płynących z FID wymaga zastosowania zaawansowanych modeli działania systemu, które dzięki odpowiednim technikom stochastycznym będą mogły zniwelować niepewność towarzyszącą wytwarzaniu energii ze źródeł odnawialnych. Ponadto eksploatacja systemu jest naturalnie powiązana z decyzjami inwestycyjnymi, szczególnie że dostępne zasoby wytwórcze i sieciowe muszą zapewnić bezpieczne i oszczędne działanie systemu. Biorąc jednak pod uwagę wysoki stopień złożoności modelowania i obliczeń związany z takimi technikami stochastycznymi, ich włączenie do ogólnoeuropejskiego modelu wytwarzania i przesyłu energii, który jednocześnie optymalizowałby długoterminowe decyzje inwestycyjne i stochastyczną działalność krótkoterminową, jest niezwykle wymagające pod kątem obliczeniowym. Z tych powodów zastosowano podejście dwuetapowe w celu oceny ilościowej określenia ogólnych korzyści gospodarczych związanych z FID na poziomie europejskiego systemu wytwarzania i przesyłu energii. Model WeSIM określa optymalne (generujące najniższe koszty) decyzje inwestycyjne i eksploatacyjne w zakresie wytwarzania oraz przesyłu energii na terenie całej Europy, wykorzystując jednak w tym celu uproszczoną deterministyczną reprezentację pracy systemu bez uwzględniania czynników niepewności. Decyzje inwestycyjne otrzymane w modelu WeSIM są następnie wprowadzane do modelu SUCM, który udoskonala decyzje operacyjne poprzez określenie czynników niepewności dzięki zaawansowanym technikom modelowania stochastycznego i optymalizacji.

Termin graniczny modelowania ogólnego ilościowego ujęcia korzyści gospodarczych FID określono jako rok 2030. Inaczej mówiąc, zastosowane modele wykorzystują prognozy popytu i wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych na rok 2030 oraz optymalizują decyzje inwestycyjne i eksploatacyjne w celu zminimalizowania kosztów systemowych niezbędnych do ich realizacji. Biorąc pod uwagę, że zgodnie z podstawowymi oczekiwaniami Komisji Europejskiej wytwarzanie energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych pokryje około 45% całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną w Europie w roku 2030, w niniejszym raporcie przeanalizowano dwa alternatywne scenariusze obejmujące 30% i 60% całkowitego zużycia energii elektrycznej, która będzie wytwarzana ze źródeł odnawialnych (scenariusze te wyrażają kolejno pesymistyczny i optymistyczny przebieg integracji wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych w Europie).

Rysunek ES1 przedstawia oszczędności kosztów związanych z wytwarzaniem i przesyłem (w miliardach euro rocznie), wynikające z różnych poziomów elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (w odniesieniu do scenariusza odniesienia  $\alpha = 0\%$ , który odpowiada brakowi elastyczności zapotrzebowania przemysłowego) oraz dwa alternatywne scenariusze dotyczące poziomu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych w 2030 r. Trzy kolory na każdym słupku wykresu przedstawiają różne strumienie oszczędności kosztów związane z FID:

- **G CAPEX** (kolor niebieski): oszczędności w kosztach kapitałowych wynikające z uniknięcia inwestycji w dodatkowe moce wytwórcze.
- **T/I CAPEX** (kolor czerwony): oszczędności w kosztach kapitałowych wynikające z uniknięcia inwestycji w dodatkowe moce przesyłowe i połączenia międzysystemowe.
- **OPEX** (kolor zielony): oszczędności w kosztach operacyjnych wynikające ze zwiększenia poziomu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych i zastosowania oszczędnych źródeł wytwórczych oraz

świadczenia usług bilansowania (ograniczając tym samym straty wynikające z wydajności wytwórców konwencjonalnych).



**Rysunek ES1.** Oszczędności w zakresie wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej w Europie związane z FID dla różnych scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego i wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych

Zgodnie z oczekiwaniami wyższe poziomy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (wyższe wartości  $\alpha$ ) zwiększają różnicę strumienia oszczędności kosztów i zwiększają całkowite oszczędności kosztów w obu scenariuszach wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. Ponadto zauważono, że całkowite oszczędności kosztów są większe w przypadku większego udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, ponieważ zbilansowanie systemu staje się trudniejsze, a wymagania dotyczące elastyczności rosną. Tendencja ta wskazuje na związek między zwiększonym udziałem wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych a elastycznością zapotrzebowania przemysłowego, co stanowi główny rezultat projektu IndustRE.

Rysunek ES2 przedstawia oszczędności kosztów kapitałowych w zakresie rozbudowy sieci dystrybucji (w miliardach euro rocznie), wynikające z różnych poziomów elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (w porównaniu z scenariuszem odniesienia  $\alpha=0\%$ ). Oszczędności te wynikają z korzystnego wpływu elastyczności zapotrzebowania przemysłowego na redukcję szczytowych poziomów zapotrzebowania. Zgodnie z oczekiwaniami, wyższe poziomy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (wyższe wartości  $\alpha$ ) przyczyniają się do zwiększenia tych oszczędności.

Zauważono jednak, że oszczędności te różnią się znacznie w każdym z 6 krajów docelowych objętych projektem. Różnice te wynikają z następujących czynników:

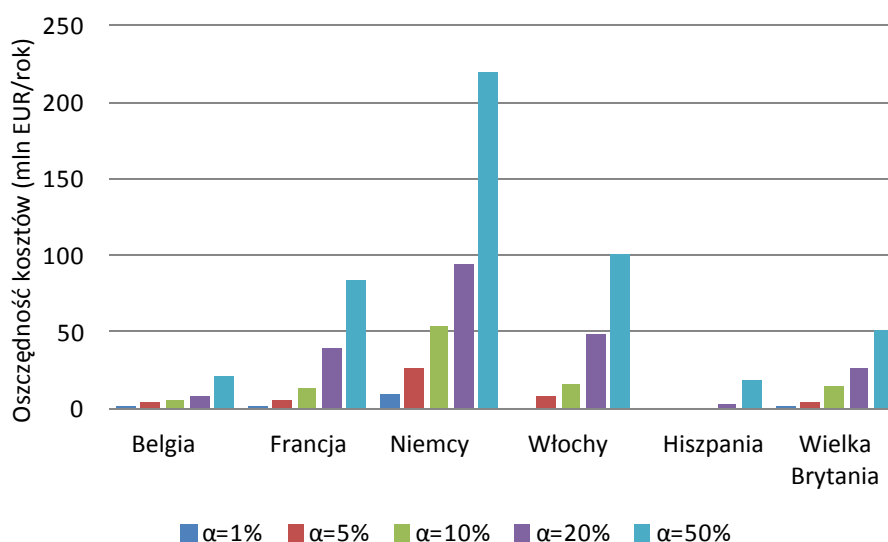
- Rozbudowa sieci dystrybucji jest związana ze szczytowymi poziomami zapotrzebowania. W wyniku tego w krajach, od których spodziewa się znacznego zwiększenia zapotrzebowania do roku 2030, dochodzi do znacznego obciążenia sieci dystrybucji energii, co nie może zostać w łatwy sposób skompensowane przez elastyczność zapotrzebowania przemysłowego.
- Elastyczność zapotrzebowania przemysłowego w zakresie redukcji poziomów szczytowych zależy od udziału zapotrzebowania przemysłowego w kontekście całkowitego zapotrzebowania w danym kraju. Inaczej



## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

mówiąc, określona wartość elastyczności zapotrzebowania przemysłowego  $\alpha$  przekłada się na większy potencjał redukcji zapotrzebowania szczytowego w krajach o większym udziale zapotrzebowania przemysłowego i niższy potencjał w krajach, w których udział zapotrzebowania przemysłowego jest niższy.

- Koszty rozbudowy sieci dystrybucji energii i wynikająca z nich rola elastyczności zapotrzebowania przemysłowego w ich redukcji zależą od wielkości sieci dystrybucji energii, co jest w oczywisty sposób związane z wielkością kraju.



**Rysunek ES2.** Oszczędności w zakresie dystrybucji energii elektrycznej w 6 krajach docelowych związane z FID dla różnych scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego

### Oddolne ilościowe ujęcie korzyści gospodarczych związanych z elastycznością zapotrzebowania przemysłowego

W ramach wymogów rynkowych i przepisów prawa część przytoczonych oszczędności kosztów związanych z systemem powinna zostać przeniesiona na elastycznych odbiorców przemysłowych w celu „wynagrodzenia” ich elastyczności i zachęcenia ich do dalszych działań w zakresie elastyczności. Aby dokonać ilościowej oceny oszczędności kosztów elastycznych odbiorców przemysłowych, partnerzy z Imperial College opracowali nowy model — oddolny model oceny ilościowej (Bottom-Up Quantification Model, BUQM). Model ten przedstawia zagadnienie z perspektywy pojedynczego odbiorcy przemysłowego, który dąży do zminimalizowania całkowitych kosztów użycia energii elektrycznej przez optymalne wykorzystanie elastyczności w zakresie zużycia, bilansowania i możliwości wytwarzania/przesyłu/dystrybucji. Uwzględniając jednocześnie strumienie energii, bilansowania i zdolności wytwórczych, model BUQM bierze pod uwagę wzajemne zależności i konflikty związane ze świadczeniem różnych usług przez elastycznych odbiorców przemysłowych. Model ten optymalizuje alokację elastyczności odbiorców w ramach konfliktów usług z uwzględnieniem cen rynkowych powiązanych z tymi usługami.

Rezultat tej oddolnej oceny ilościowej korzyści FID zależy w znacznym stopniu od ram rynku energii elektrycznej z uwzględnieniem a) zasad rynkowych powiązanych z udziałem różnych podmiotów w rynku energii, bilansowania i zdolności wytwórczych oraz b) mechanizmów cenowych związanych z energią, bilansowaniem i wydajnością.



## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

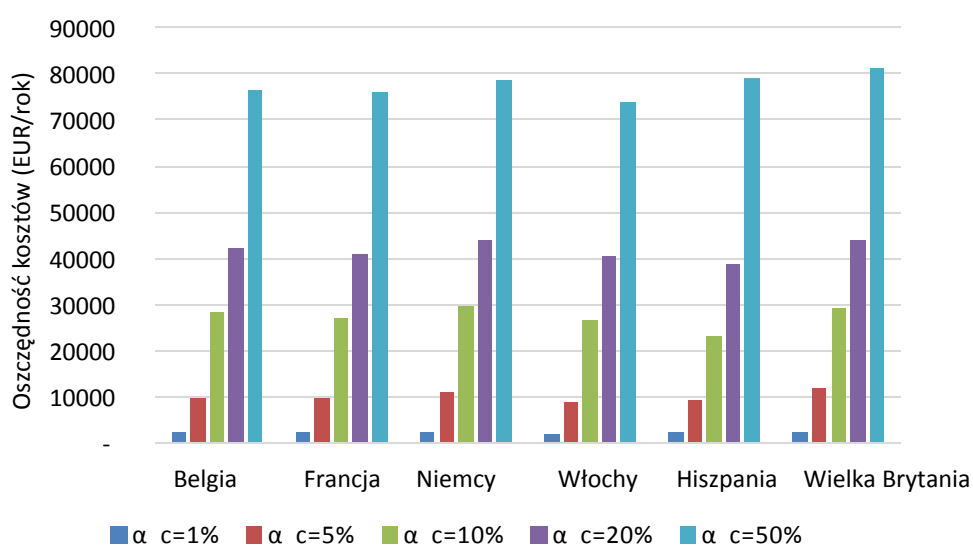
Celem zadania 5.2 projektu IndustRE jest ocena ilościowa oszczędności kosztów elastycznego odbiorcy przemysłowego w „idealnych” warunkach rynku energii elektrycznej, która uwzględnia mechanizmy cenowe odzwierciedlające koszty, nie nakłada nadmiernych ograniczeń na podmioty obecne na rynku i jest jednorodna w różnych krajach europejskich. Chociaż zapewnienie „idealnych” ram rynkowych jest niezwykle trudne, autorzy niniejszego opracowania wprowadzili kilka założeń dotyczących pewnych aspektów odpowiednich ram, które wg nich są zgodne z głównymi wnioskami wynikającymi z odpowiednich badań oraz działań w przemyśle i polityce na terenie Europy. Główne założenia: a) aby zapewnić, że ceny rynkowe energii, bilansowania i zdolności wytwórczych będą określane na podstawie optymalizacji europejskiego systemu energetycznego przeprowadzonej zgodnie z zadaniem 5.1 b) aby poprawić wydajność kosztową europejskiego systemu energetycznego, zakłada się istnienie jednolitego, połączonego rynku ogólnoeuropejskiego w zakresie energii, usług bilansowania, mocy wytwórczych i usług przesyłowych oraz c) pominięto limity i praktyczne ograniczenia nałożone przez bieżące przepisy rynkowe dotyczące udziału odbiorców przemysłowych na rynkach energii elektrycznej.

Odbiorcy przemysłowi uwzględnieni w badaniu charakteryzują się rocznym profilem zapotrzebowania odpowiadającym typowemu europejskiemu zakładowi przemysłowemu ze szczytowym zapotrzebowaniem na poziomie 2666 kW. Sprawdzono kilka różnych scenariuszy dotyczących:

- *Stopnia elastyczności charakteryzującej rozpatrywanych odbiorców przemysłowych*: jest on wyrażany parametrem  $\alpha_c$  w celu odróżnienia od stopnia elastyczności charakteryzującej pozostałe zapotrzebowanie przemysłowe w systemie europejskim.
- *Stopnia elastyczności charakteryzującej pozostałe zapotrzebowanie odbiorców przemysłowych w systemie (innych niż odbiorcy badani)*: jest on wyrażany parametrem  $\alpha_s$  w celu odróżnienia od stopnia elastyczności charakteryzującej badanych odbiorców przemysłowych.
- *Udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych w systemie europejskim*: przeanalizowano dwa scenariusze zakładające całkowity udział energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych w Europie na poziomach 30 i 60%.
- *Kraju, w którym znajduje się dany odbiorca przemysłowy*: rozpatrzono sześć alternatywnych scenariuszy w kontekście badanych odbiorców, z których każdy znajduje się w jednym z 6 krajów docelowych ujętych w projekcie (Belgia, Francja, Niemcy, Włochy, Hiszpania i Wielka Brytania).

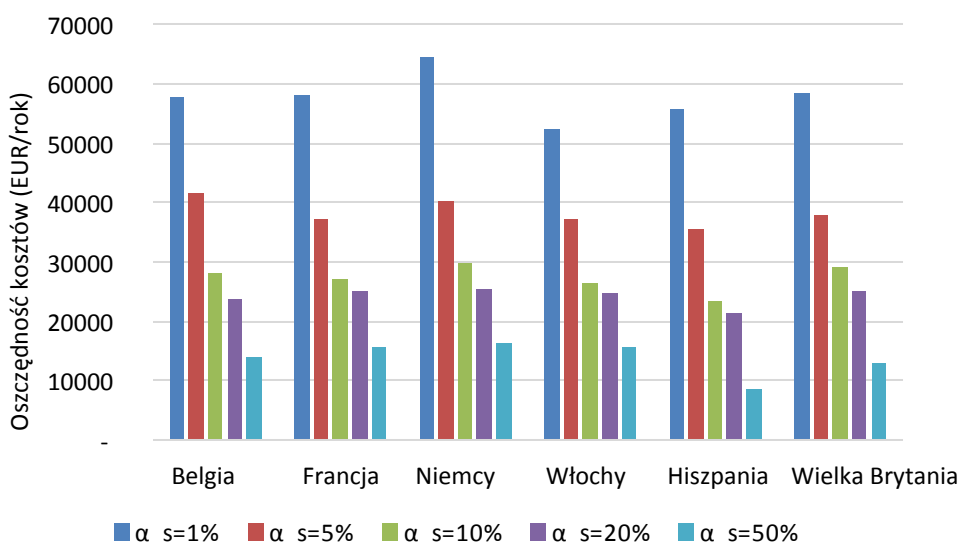
Rysunek ES3 przedstawia oszczędności kosztów (w odniesieniu do scenariusza odniesienia  $\alpha_c = 0\%$ ) uzyskane przez badanego odbiorcę w scenariuszu zakładającym 60-procentowy udział OZE,  $\alpha_s = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące elastyczności badanego odbiorcy i jego kraju. Zgodnie z oczekiwaniami wyższe poziomy elastyczności (wyższe wartości  $\alpha_c$ ) oznaczają wzrost całkowitych oszczędności w przypadku danego odbiorcy — jest to spowodowane umocnieniem jego pozycji na rynku energii, bilansowania i zdolności wytwórczych.

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym



**Rysunek ES3.** Całkowite oszczędności związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 60-procentowy udział OZE  $\alpha_s = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące zakresu elastyczności i miejsca działania

Rysunek ES4 przedstawia oszczędności (w odniesieniu do scenariusza odniesienia  $\alpha_c = 0\%$ ) w scenariuszu zakładającym 60-procentowy udział OZE,  $\alpha_c = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące elastyczności pozostałego przemysłowego zapotrzebowania na energię w systemie i miejsca działania badanego konsumenta. Poziom redukcji kosztów uzyskany przez badanego odbiorcę zmniejsza się w zależności od zwiększenia liczby innych odbiorców przemysłowych w systemie. Jest tak, ponieważ zwiększa się liczba konkurentów rozpatrywanego odbiorcy na rynku energii, bilansowania i zdolności wytwórczych.



**Rysunek ES4.** Całkowite oszczędności związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 60-procentowy udział OZE,  $\alpha_c = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące miejsca działania oraz zakresu elastyczności charakteryzując pozostałą część zapotrzebowania przemysłowego w systemie

## 1. Wprowadzenie

### 1.1 Zakres opracowania

Opracowanie obejmuje podsumowanie prac wykonanych w ramach zadań 5.1 oraz 5.2 projektu IndustRE. Celem obu zadań jest zasadniczo ocena ilościowa potencjalnych korzyści gospodarczych elastycznego zapotrzebowania przemysłowego (FID) w kontekście europejskim. W szczególności:

- **Zadanie 5.1** skupia się na ocenie ilościowej korzyści z perspektywy całego systemu energetycznego (perspektywy społecznej). Celem zadania 5.1 jest zatem ocena ilościowa oszczędności kapitałowych i kosztów eksploatacyjnych związanych z rozwojem i eksploatacją europejskiego systemu energetycznego przez integrację elastyczności zapotrzebowania przemysłowego. Zadanie to będzie w dalszej części raportu *określane jako „odgórne ilościowe ujęcie korzyści gospodarczych FID”*.
- **Zadanie 5.2** skupia się na ocenie ilościowej korzyści z perspektywy pojedynczego elastycznego odbiorcy przemysłowego. Celem zadania 5.2 jest zatem ocena ilościowa oszczędności kosztów ponoszonych przez odbiorcę przemysłowego związana z wdrożeniem elastyczności. Zadanie to będzie w dalszej części raportu *określane jako „oddolne ilościowe ujęcie korzyści gospodarczych FID”*.

Aby osiągnąć wymienione cele, partnerzy z Imperial College opracowali dedykowane modele optymalizacyjne. Dane techniczne i gospodarcze na potrzeby analizy uzyskano z różnych publicznie dostępnych źródeł i uwzględniono w opracowanych modelach. Aby przeprowadzić złożoną analizę, rozpatrzono różne scenariusze dotyczące: a) *zakresu elastyczności zapotrzebowania przemysłowego*, wyrażonego jako % zużycia energii elektrycznej w przemyśle, który można elastycznie zmienić w czasie oraz b) *udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych w europejskim systemie energetycznym*, wyrażonego jako współczynnik % zużycia energii elektrycznej w Europie dostarczanej z odnawialnych źródłem.

### 1.2 Struktura opracowania

Pozostała część opracowania ma następujący układ:

- **Rozdział 2** zawiera skrócone informacje o nowych wyzwaniach stojących przed europejskim systemem energetycznym, które są związane z ograniczaniem emisji dwutlenku węgla w tym sektorze i identyfikuje teoretyczną podstawę uzyskania korzyści gospodarczych w związku z FID.
- **Rozdział 3** zawiera ogólne informacje dotyczące modeli zastosowanych w projekcie IndustRE na potrzeby ilościowej oceny korzyści.
- **Rozdział 4** przedstawia badania, dane przyjęte na ich potrzeby oraz wyniki odgórnej oceny ilościowej korzyści gospodarczych FID.

- **Rozdział 5** przedstawia badania, dane przyjęte na ich potrzeby oraz wyniki oddolnej oceny ilościowej korzyści gospodarczych FID.

## 2. Nowe wyzwania stojące przed europejskim systemem energetycznym i rola elastyczności zapotrzebowania przemysłowego

### 2.1 Nowe wyzwania stojące przed europejskim systemem energetycznym

Systemy energetyczne w Europie i poza nią są obecnie poddawane zasadniczym modyfikacjom, których konieczność wynika z troski o środowisko naturalne i bezpieczeństwo energetyczne. Stale rosnące poziomy emisji gazów cieplarnianych są przyczyną obaw o zmiany klimatyczne i środowiskowe. W reakcji na te problemy Komisja Europejska ustanowiła cele polegające na redukcji emisji gazów cieplarnianych o 20% (w stosunku do poziomu z roku 1990) [1] do roku 2020 oraz o 40% do roku 2030 [2]. Poza kwestią zmian klimatycznych, należy uwzględnić także rosnące zaniepokojenie poziomem bezpieczeństwa energetycznego w związku z zależnością wytwarzania energii elektrycznej od dostępności paliw kopalnych, która stale malejąc, powoduje wzrost cen.

W kontekście powyższych kwestii środowiskowych i bezpieczeństwa energetycznego zarówno proces wytwarzania energii, jak i zapotrzebowanie na nią są związane z ograniczaniem emisji dwutlenku węgla. Proces ograniczania emisji tego gazu związanej z wytwarzaniem energii elektrycznej został już wdrożony, czego rezultatem jest wprowadzenie na szeroką skalę źródeł odnawialnych i niskoemisyjnych. Komisja Europejska określiła prawnie wiążący cel, zgodnie z którym odnawialne źródła energii mają pokryć 20% całkowitego zapotrzebowania na energię w Unii Europejskiej do roku 2020 [1], oraz 27% do roku 2030 [2]. Większość tych źródeł — szczególnie elektrownie wiatrowe i zasilane energią słoneczną, które mają największy udział w technologiach OZE na terenie Europy — charakteryzuje się jednak zmiennością, brakiem ciągłości pracy oraz możliwości kontroli. Ich wydajność jest nie tylko zmienna, ale może spaść do zera w okresie bezwietrznym lub podczas całkowitego zachmurzenia.

Biorąc pod uwagę, że obecne zapotrzebowanie uważa się za nieelastyczne i niekontrolowane, wymagana elastyczność bilansowania systemu oraz oferowania usług pomocniczych zapewnione są wyłącznie przez źródła konwencjonalne. Ponieważ w przyszłości znaczny udział w wytwarzaniu energii przypadnie na źródła odnawialne, źródła konwencjonalne będą wytwarzać znacznie mniej energii, co będzie spowodowane priorytetowym traktowaniem źródeł oszczędnych i nieemitujących CO<sub>2</sub>. Biorąc jednak pod uwagę zmienność i brak ciągłości wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, źródła konwencjonalne nadal będą wykorzystywane i będą działać w trybie obciążenia częściowego na zasadzie źródeł pomocniczych (np. przy niskiej prędkości wiatru) w celu zagwarantowania elastyczności. Źródła odnawialne bowiem nie tylko charakteryzują się zbyt ograniczonymi możliwościami wytwórczymi, by zapewnić bilansowanie systemu, lecz także powodują, że bilansowanie

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

jest trudniejsze. Niepełne wykorzystanie źródeł konwencjonalnych spowoduje redukcję ich efektywności kosztowej. Ponadto gdy elastyczność źródeł konwencjonalnych okaże się niewystarczająca, ostatecznym rozwiązaniem pozwalającym na zbilansowanie systemu może okazać się ograniczenie wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Oznacza to, że ze względu na wyzwania związane z bilansowaniem, źródła odnawialne charakteryzujące się wysokimi kosztami kapitałowymi będą również niewykorzystywane w pełni, w wyniku czego mogą nie osiągnąć pełnego potencjału w zakresie redukcji emisji CO<sub>2</sub>.

W przypadku zapotrzebowania po roku 2030 oczekuje się znacznego spadku emisji dwutlenku węgla w sektorach transportu i ciepłowniczym. Tradycyjne technologie stosowane w obu tych sektorach (silniki spalinowe w transporcie oraz spalanie gazu/oleju w ciepłowniach) powodują znaczne zużycie paliw kopalnych oraz mają istotny udział w emisji gazów cieplarnianych [3]. W kontekście obecnych i przyszłych procesów redukcji emisji dwutlenku węgla w systemach wytwórczych istnieje nacisk na elektryfikację tych sektorów. Obecny rozwój technologii w branży motoryzacyjnej i sektorze ciepłowniczym stwarza techniczne i gospodarcze warunki wprowadzenia zmian umożliwiających produkcję i użytkowanie *pojazdów z napędem elektrycznym (EV)* [4] oraz *elektrycznych pomp ciepła (EHP)* [5]. Niemniej jednak, ze względu na naturalne zużycie energii przez pojazdy i zakłady ciepłownicze, potencjał takiej zmiany, ze względu na kwestie środowiskowe oraz bezpieczeństwa energetycznego, jest związany ze znacznym wzrostem nowego zapotrzebowania na energię w systemach wytwórczych. Ponadto ze względu na tymczasową charakterystykę użytkowania pojazdów i systemów grzewczych, nowe zapotrzebowanie szczytowe będzie nieproporcjonalnie wyższe niż wzrost całkowitego zużycia energii elektrycznej [6].

Biorąc pod uwagę fakt, że zapotrzebowanie jest obecnie traktowane jako nieelastyczne i niekontrolowane, zapotrzebowanie szczytowe jest zaspokajane przez zapewnianie odpowiedniej mocy wytwórczej i wydajności sieci (w ramach określonych marginesów bezpieczeństwa). Nieproporcjonalne zwiększenie szczytowego zapotrzebowania w stosunku do wzrostu ogólnego zużycia energii, które jest spowodowane przewidywaną elektryfikacją sektorów transportu i ciepłowniczego, oznacza, że w najbliższych latach trzeba będzie zapewnić znaczną liczbę nowych źródeł wytwórczych i odpowiednią wydajność sieci, przy czym będą one w znacznym stopniu niewykorzystywane, ponieważ będą używane jedynie do pokrycia zwiększonego zapotrzebowania szczytowego.

Powyższe czynniki wskazują, że przyszłe systemy energetyczne będą charakteryzowały się niewykorzystywanymi w pełni zasobami oraz wysokimi kosztami kapitałowymi i operacyjnymi.

### 2.2 Rola elastyczności zapotrzebowania przemysłowego w kontekście nowych wyzwań

W ciągu ostatnich lat rola i wartość elastyczności zapotrzebowania w realizowaniu powyższych wyzwań stały się obiektem zainteresowania Komisji Europejskiej, rządów oraz środowisk przemysłowych i naukowych. Niniejszy projekt skupia się w szczególności na znacznym potencjale elastyczności zapotrzebowania przemysłowego. Elastyczność określa zdolność odbiorców przemysłowych do zmiany wzorców korzystania z energii elektrycznej. Należy podkreślić, że takie modyfikacje nie wiążą się na ogół z redukcją/zwiększeniem całkowitego zużycia energii elektrycznej,

lecz raczej ze zmianą/redystrybucją jej zużycia w czasie — większość odbiorców przemysłowych wymaga bowiem określonej ilości energii do realizacji procesów. Oznacza to, że całkowite zużycie energii elektrycznej w pewnym czasie (np. w ciągu dnia lub tygodnia) nie może się znacząco zmieniać, ale w tych samych granicach okresy, w których energia elektryczna jest dostarczana, mogą zmieniać się elastycznie. Inaczej mówiąc, redukcji obciążenia w pewnych okresach towarzyszy *efekt wzrostu obciążenia* w okresach wcześniejszych lub późniejszych.

Odpowiednia koordynacja takiej elastyczności zapotrzebowania przemysłowego może przyczynić się do:

- *Wsparcia dla bilansowania systemu* w przyszłości przy zwiększonym udziale wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, a tym samym redukcji ograniczeń związanych z taki sposobem wytwarzania oraz zmniejszenia strat wydajności wytwarzania energii metodami tradycyjnymi.
- *Ograniczenia szczytowych poziomów zapotrzebowania*, a tym samym unikania inwestycji kapitałowych w niewykorzystywane w pełni obiekty do wytwarzania i przesyłu energii.

Inaczej mówiąc, FID może przyczynić się do odwrócenia tendencji niepełnego wykorzystywania zasobów oraz umożliwić w przyszłości znalezienie oszczędniejszych metod redukcji emisji dwutlenku węgla. W ramach wymogów rynkowych i przepisów prawa część przytoczonych oszczędności kosztów będzie przenoszona na odbiorców przemysłowych, redukując ponoszone przez nich koszty związane z energią elektryczną. Odgórne i oddolne oceny korzyści FID prowadzone w niniejszym raporcie mają na celu ilościowe określenie tych oszczędności systemowych oraz oszczędności kosztów u dostawców przemysłowych.

### 3. Metody modelowania służące ilościowemu określeniu korzyści FID

Niniejszy rozdział zawiera informacje o modelach analitycznych zastosowanych w projekcie IndustRE na potrzeby oceny ilościowej korzyści FID. Pierwszy wymóg modelu mający na celu osiągnięcie założonego celu jest związany z przedstawieniem elastyczności zapotrzebowania przemysłowego opisanej w części 3.1. Ten model FID zostaje następnie zastosowany w ramach modelowych dotyczących odgórnej (zadanie 5.1) i oddolnej (zadanie 5.2) analizy ilościowej korzyści FID, które przedstawiono kolejno w częściach 3.2 i 3.3.

#### 3.1 Przedstawienie elastyczności zapotrzebowania przemysłowego

Zgodnie z opisem w sekcji 2.2 elastyczność zapotrzebowania przemysłowego określa zdolność odbiorców przemysłowych do zmiany wzorców używania energii elektrycznej. Modelowanie elastyczności stanowi zasadniczy etap oceny ilościowej korzyści FID. Zgodnie z informacjami zamieszczonymi w poprzednich opracowaniach IndustRE D3.2 [7] i D3.3 [8] elastyczność różnych zakładów przemysłowych w znacznej mierze zależy od profilu ich działalności, instalacji technicznych oraz procesów produkcyjnych, a także poglądów, preferencji i wymagań właścicieli i operatorów. Opracowanie szczegółowego modelu elastyczności w dokładny sposób ujmującego te czynniki w kontekście różnych zakładów przemysłowych jest procesem bardzo



## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

złożonym i czasochłonnym. Ponadto zastosowanie takich skomplikowanych instalacji i modeli procesowych w złożonym systemie i modelach rynkowych wymaganych na potrzeby dokładnej oceny ilościowej korzyści gospodarczych FID (szczegółowo opisanych w częściach 3.2 i 3.3) podlega ograniczeniom związanym z kontrolowaniem.

Z tych powodów konsorcjum IndustRE zdecydowało się zastosować ogólny procesowo-agnostyczny model elastyczności zapotrzebowania przemysłowego. Zgodnie z tym modelem zapotrzebowanie odbiorcy przemysłowego na energię elektryczną można w dowolnym czasie zmniejszyć/zwiększyć w ramach określonych limitów, o ile całkowita redukcja zapotrzebowania jest równa całkowitej wielkości wzrostu zapotrzebowania w ciągu dnia. Zgodnie z informacjami podanymi w części 2.2 ostatnie ograniczenie jest związane z poziomami zapotrzebowania niektórych odbiorców na energię w celu realizacji procesów. Inaczej mówiąc, redukcji obciążenia w pewnych godzinach towarzyszy *efekt wzrostu obciążenia* w godzinach wcześniejszych lub późniejszych.

Ten ogólny model elastyczności wyrażają zamieszczone poniżej równania (1) i (2), gdzie  $d^{base}$  wyraża podstawowe zapotrzebowanie przemysłowe na moc w danej godzinie  $t$  (moc, która w typowych warunkach zostałaby zużyta, gdyby nie wdrożono elastyczności),  $d^{flex}$  wyraża zapotrzebowanie przemysłowe na moc w danej godzinie  $t$ , gdyby wdrożono elastyczność, a  $T^s$  oznacza liczbę godzin z uwzględnieniem pierwszej godziny każdego dnia.

$$(1 - \alpha) * d^{base} \leq d^{flex} \leq (1 + \alpha) * d^{base}, \forall t \quad (1)$$

$$\sum_{t=1}^{T^s} d^{base} = \sum_{t=1}^{T^s} d^{flex}, \forall t \in T^s \quad (2)$$

Ograniczenie (1) określa limity zmiany zapotrzebowania w każdym okresie ze względu na zastosowanie elastyczności zapotrzebowania w postaci współczynnika  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 100\%$ ) zapotrzebowania podstawowego; przykładowo:  $\alpha = 0\%$  oznacza, że zapotrzebowanie przemysłowe nie wyraża elastyczności w zależności od czasu, natomiast  $\alpha = 100\%$  oznacza możliwość przesunięcia w czasie całego zapotrzebowania przemysłowego. Ograniczenie (2) oznacza, że redystrybucja zapotrzebowania przemysłowego charakteryzuje się neutralnością w ciągu dnia, czyli że całkowita redukcja zapotrzebowania odpowiada całkowitemu wzrostowi zapotrzebowania w ciągu dnia.

Ponieważ zakres elastyczności zapotrzebowania przemysłowego wyrażany jako współczynnik może się znacznie zmieniać w zależności od określonych działań odbiorcy przemysłowego, instalacji technicznych oraz procesów produkcyjnych zakładów, a także poglądów, preferencji i wymagań ich właścicieli i operatorów, przeanalizowano różne scenariusze, w tym uwzględniające parametry skrajne. Scenariusze te uwzględniają wartości  $\alpha = 1\%$ ,  $\alpha = 5\%$ ,  $\alpha = 10\%$ ,  $\alpha = 20\%$  oraz  $\alpha = 50\%$ , a także scenariusz odniesienia  $\alpha = 0\%$ , który odpowiada sytuacji, w której nie występuje elastyczność zapotrzebowania przemysłowego.

Należy pamiętać, że w praktyce zastosowanie elastyczności zapotrzebowania przemysłowego może wiązać się z kosztami. Mogą to być stałe koszty kapitałowe powiązane z urządzeniami pomiarowymi, komunikacyjnymi i kontrolnymi, pozwalającymi na modyfikację profili zużycia energii elektrycznej,



atak że zmienne koszty operacyjne, będące kosztami poniesionymi z tytułu modyfikacji procesów przemysłowych i zależącymi od stopnia, w jakim zmienia się profil zużycia energii elektrycznej. Podobnie jak w przypadku elastyczności zapotrzebowania przemysłowego, koszty te mogą znacznie się różnić dla określonych odbiorców przemysłowych. Badanie i analizę takich kosztów ujęto w projekcie IndustRE, który skupia się na ocenie ilościowej samych korzyści gospodarczych elastyczności zapotrzebowania przemysłowego. Oczekujemy jednak, że korzyści gospodarcze mogą stanowić punkt odniesienia do porównań powiązanych kosztów w przyszłości, a tym samym utworzyć studium biznesowe na potrzeby realizacji elastyczności zapotrzebowania przemysłowego.

### 3.2 Odgórne ilościowe ujęcie korzyści FID

Zgodnie z informacjami zamieszczonymi w rozdziale 2 FID może mieć korzystny wpływ w wielu ramach czasowych, w tym:

- *Planowanie długoterminowe* (kilka lat przed dostawą energii) — FID może pomóc uniknąć inwestycji w wytwarzanie i zasoby sieciowe, które planuje się na wiele lat przed ich rzeczywistym wykorzystaniem na potrzeby dostawy energii.
- *Planowanie krótkoterminowe* (kilka dni lub godzin przed dostawą energii) — FID może wspomóc wytwarzanie energii z wykorzystaniem źródeł odnawialnych i generujących niskie koszty.
- *Bilansowanie w czasie rzeczywistym* (kilka sekund przed dostawą energii) — FID może zapewnić usługi rezerwowe i oferujące regulację częstotliwości, zmniejszając straty wydajności generatorów konwencjonalnych oraz ograniczenia wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych.

Ponadto FID może mieć korzystny wpływ na kilka sektorów systemu energetycznego, w tym:

- *System wytwórczy*, ponieważ FID może pomóc uniknąć inwestycji w dodatkowe moce wytwórcze i poprawić wydajność operacyjną istniejących mocy wytwórczych.
- *Sieć przesyłową*, ponieważ FID może pomóc uniknąć inwestycji w dodatkowe sieci przesyłowe (wysokiego napięcia).
- *Sieć dystrybucji energii*, ponieważ FID może pomóc uniknąć inwestycji w dodatkowe sieci dystrybucji energii (niskiego napięcia).

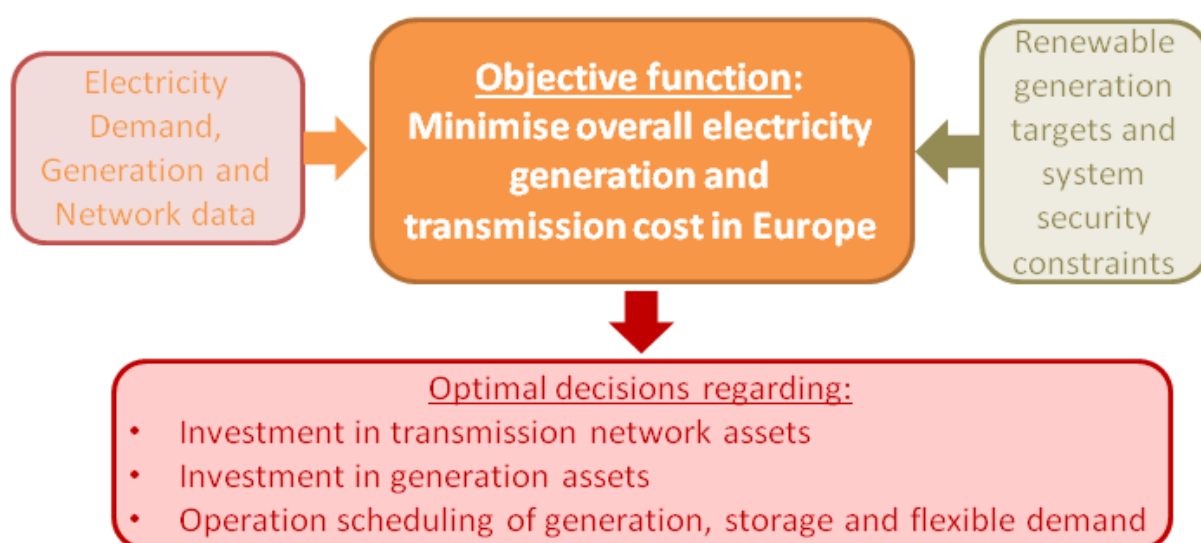
Biorąc powyższe pod uwagę, oczywiste staje się, że dokładna ocena ilościowa korzyści FID dla całego systemu energetycznego jest zadaniem złożonym, wymagającym zastosowania zaawansowanych modeli. Uwzględnienie kilku skali czasowych i sektorów, z których każdy charakteryzuje się własnymi cechami technicznymi i ekonomicznymi sprawia, że ocena ilościowa wszystkich korzyści dla systemu w ramach jednego modelu analitycznego jest niemal niemożliwa. Odzworowanie różnych warstw działania i rozwoju systemu energetycznego wymaga zastosowania różnych modeli. W oparciu o bogate doświadczenie partnerów Imperial College w zakresie oceny wartości całego systemu dla różnych technologii przyjęto następujące strategie modelowania:

- **Odrębna ocena europejskiego poziomu wytwarzania/przesyłu energii elektrycznej i lokalnego poziomu dystrybucji w krajach docelowych:** Kraje europejskie są już połączone ze sobą siecią wysokonapięciowych połączeń międzysystemowych. Ponadto oczekuje się wzrost liczby projektów związanych z połączeniami międzysystemowymi w związku z korzyściami wykorzystania naturalnego zróżnicowania technologii odnawialnych w różnych krajach oraz zwiększenia konkurencyjności na rynku energii elektrycznej. Z drugiej strony planowanie i użytkowanie sieci dystrybucji energii są zadaniami typowo lokalnymi, ponieważ sieci te nie są wzajemnie połączone i muszą odzwierciedlać lokalny popyt oraz warunki wytwarzania energii. Z tego powodu do oceny korzyści gospodarczych związanych z FID zastosowano dwa różne podejścia modelowania. Pierwsze z nich (obejmujące modele WeSIM oraz SUCM omówione szczegółowo w sekcjach 3.2.1 i 3.2.2) odnosi się do oceny korzyści związanych z wytwarzaniem i przesyłem energii elektrycznej na poziomie europejskim poprzez włączenie zintegrowanego modelu europejskiej międzysystemowej sieci przesyłowej. Drugie podejście (model DistPlan omówiony w sekcji 3.2.3) wiąże się z oceną korzyści związanych z dystrybucją w każdym z 6 krajów docelowych IndustRE (Belgia, Francja, Niemcy, Włochy, Hiszpania i Wielka Brytania) przez włączenie szczegółowych modeli sieci dystrybucji energii w tych krajach.

- **Kompleksowa ocena długoterminowych inwestycji i krótkoterminowych korzyści operacyjnych:** Oczekuje się, że zwiększony udział energii odnawialnej w europejskim systemie energetycznym spowoduje znaczne skomplikowanie pracy systemu i zwiększenie liczby wymaganych usług bilansowania, czyli usług niezbędnych do bezpiecznej eksploatacji systemu, takich jak rezerwy i regulacja częstotliwości. W tym kontekście dokładna ocena korzyści płynących z FID wymaga zastosowania zaawansowanych modeli działania systemu, które dzięki odpowiednim technikom stochastycznym będą mogły zniwelować niepewność towarzyszącą wytwarzaniu energii ze źródeł odnawialnych. Ponadto eksploatacja systemu jest naturalnie powiązana z decyzjami inwestycyjnymi, szczególnie że dostępne zasoby wytwórcze i sieciowe muszą zapewnić bezpieczne i oszczędne działanie systemu. Biorąc jednak pod uwagę wysoki stopień złożoności modelowania i obliczeń związany z takimi technikami stochastycznymi, ich włączenie do ogólnoeuropejskiego modelu wytwarzania i przesyłu energii, który jednocześnie optymalizowałby długoterminowe decyzje inwestycyjne i stochastyczną działalność krótkoterminową, jest niezwykle wymagające pod kątem obliczeniowym. Z tych powodów zastosowano podejście dwuetapowe w celu oceny ilościowej określenia ogólnych korzyści gospodarczych związanych z FID na poziomie europejskiego systemu wytwarzania i przesyłu energii. Model WeSIM (omówiony w sekcji 3.2.1) określa optymalne decyzje inwestycyjne i eksploatacyjne w zakresie wytwarzania oraz przesyłu energii na terenie całej Europy, wykorzystując jednak w tym celu uproszczoną deterministyczną reprezentację pracy systemu bez uwzględniania czynników niepewności. Decyzje inwestycyjne otrzymane w modelu WeSIM są następnie wprowadzane do modelu SUCM (omówionego w sekcji 3.2.2), który udoskonala decyzje operacyjne poprzez określenie czynników niepewności dzięki zaawansowanym technikom modelowania stochastycznego i optymalizacji.

### 3.2.1 Model inwestycyjny całościowego systemu energetycznego (WeSIM)

Model *całościowego systemu energetycznego* (WeSIM) [9] jest holistycznym modelem optymalizacji całej europejskiej sieci przesyłowej, który determinuje decyzje dotyczące inwestycji (z punktu widzenia ilości i miejsca zastosowania nowych mocy wytwórczych i sieci przesyłowych), minimalizując ogólne koszty systemu w Europie, a jednocześnie spełniając wymagania dotyczące bezpieczeństwa dostaw. Model WeSIM przeprowadza zintegrowaną optymalizację inwestycji i działania systemu energetycznego z uwzględnieniem dwóch różnych okresów: (i) działania krótkoterminowego, mającego typową rozdzielczość jednej godziny, połączonego z (ii) inwestycjami długoterminowymi, tj. decyzjami planistycznymi w przeciągu kilku lat. Wszystkie decyzje związane z inwestycjami i działaniem określane są jednocześnie w celu zoptymalizowania rozwiązania. Rysunek 1 przedstawia strukturę WeSIM.



Rysunek 1. Model WeSIM

Celem modelu *WeSIM* jest zminimalizowanie ogólnych kosztów systemu energetycznego, które składają się z kosztów inwestycyjnych i operacyjnych:

- Koszty *inwestycyjne* obejmują (w skali roku) koszty kapitałowe związane z nowymi zespołami wytwórczymi i magazynowania energii, nowymi połączeniami międzysystemowymi oraz kosztami rozbudowy sieci przesyłu energii. Różne rodzaje kosztów inwestycji przedstawiono w skali roku, używając w tym celu odpowiedniego średniego ważonego kosztu kapitału (WACC) oraz szacowanego czasu użytkowania danego zasobu.
- Koszty *operacyjne* obejmują roczne koszty obsługi związane z wytwarzaniem energii oraz koszty związane z zakłóceniami spowodowanymi niedostateczną wydajnością. Model ten uwzględnia straty wydajności przy obciążeniu częściowym oraz koszty związane z rozruchem, z jednoczesnym uwzględnieniem charakterystyki dynamicznej elektrowni (minimalny stabilny poziom wytwarzania energii, minimalne czasy rozruchu i odstawiania, tempa narastania itp.), co stanowi podstawę oceny ilościowej kosztów integracji systemu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych oraz roli i wartości FID.

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

Wyróżnia się kilka ograniczeń, które należy uwzględnić w modelu, jednocześnie minimalizując koszty ogólne. Obejmują one:

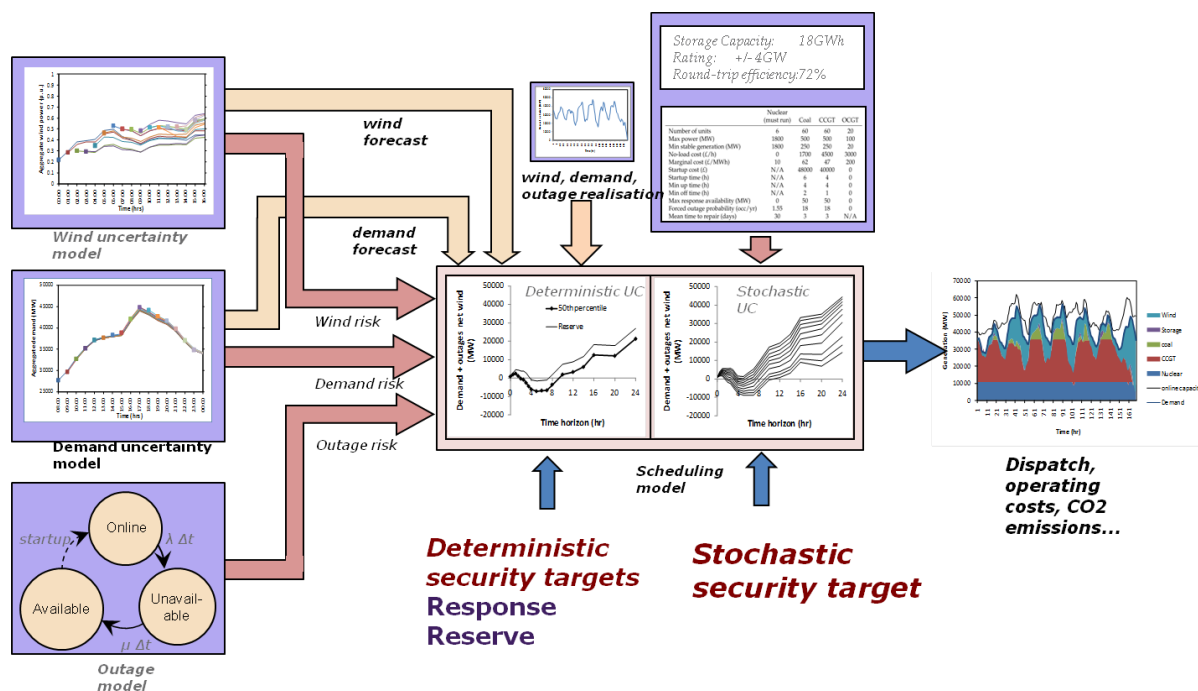
- *Ograniczenia związane z bilansowaniem mocy*, które zapewniają, że zapotrzebowanie i podaż w każdym węźle sieci przesyłowej są stale zbilansowane.
- *Ograniczenia związane z rezerwą*, które zapewniają dostępność odpowiednich rezerw i odpowiednią regulację częstotliwości na potrzeby zagwarantowania niezawodnego działania systemu energetycznego z sekundy na sekundę.
- *Ograniczenia związane z adekwatnością*, które określają dostępność odpowiednich mocy wytwórczych w systemie do pokrycia zapotrzebowania przy danym poziomie bezpieczeństwa.
- *Ograniczenia związane z przepływem energii*, które określają redukcję przepływu energii przez linie między różnymi obszarami, z uwzględnieniem wydajności sieci jako górnej granicy. Model ten może także obejmować zwiększenie skuteczności sieci przesyłowej i połączeń międzysystemowych, jeżeli jest to opłacalne.
- *Ograniczenia związane z udziałem OZE*, które zapewniają określony udział % źródeł odnawialnych w wytwarzaniu energii elektrycznej.
- *Ograniczenia związane z obsługą źródeł odnawialnych (elektrownie wiatrowe, słoneczne itp.)*, które powodują, że maksymalny poziom wytwarzania energii elektrycznej przez daną jednostkę zależy od miejsca. Ten model zakłada maksymalne wykorzystanie jednostek, ponieważ charakteryzują się one najniższymi kosztami operacyjnymi. W pewnych warunkach, gdy w systemie występuje nadpodaż energii elektrycznej lub gdy wymogi w zakresie rezerw/reakcji ograniczają ilość wytwarzanej energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, może okazać się konieczne ograniczenie produkcji energii elektrycznej w celu zrównoważenia systemu i rachunków modelowych.
- *Ograniczenia dotyczące działania konwencjonalnych źródeł (gaz, węgiel, olej itp.)*, które obejmują: (i) minimalne ograniczenia w zakresie stabilnego wytwarzania i maksymalnej mocy wytwórczej; (ii) ograniczenia w zakresie zwiększania i zmniejszania mocy wytwórczej; (iii) minimalne ograniczenia czasowe dotyczące działania i wyłączenia; oraz (iv) dostępne ograniczenia w zakresie regulacji częstotliwości i rezerw.
- *Ograniczenia operacyjne dotyczące hydroelektrowni ze zbiornikami i elektrowni szczytowo-pompowych*, które zapewniają, że wytwarzanie przez nie energii elektrycznej jest ograniczone nie tylko maksymalnymi zdolnościami wytwórczymi, ale również energią dostępną w zbiorniku w określonym czasie (przy jednoczesnej optymalizacji funkcji magazynowania). Ilość energii w zbiorniku w dowolnym momencie jest ograniczona wielkością zbiornika. Uwzględniane są minimalne ograniczenia energetyczne i straty wydajności.
- *Ograniczenia operacyjne FID*, które omówiono w części 3.1 i wyrażono równaniami (1) i (2).

### 3.2.2 Model zaangażowania jednostek stochastycznych (SUCM)

Zgodnie z podanymi wcześniej informacjami, oczekuje się, że zwiększony udział źródeł odnawialnych w systemie europejskim znacznie skomplikuje działanie systemu oraz zwiększy liczbę

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

usług pomocniczych w celu zbilansowania podaży i zapotrzebowania w cyklu sekundowym, czyli rezerw oraz regulacji częstotliwości. W tym kontekście dokładne przedstawienie działania systemu wymaga zastosowania zaawansowanych modeli mogących zniwelować niepewność związaną z działaniem systemu dzięki odpowiednim technikom stochastycznym. W tym celu partnerzy z Imperial College opracowali *model zaangażowania jednostek stochastycznych* (SUCM) [9], który pozwala optymalnie zaplanować wytwarzanie energii oraz świadczenie szeregu usług bilansowania pomimo niepewności związanej z energią wiatrową, zapotrzebowaniem oraz wyłączeniem elektrowni. Rysunek 2 przedstawia strukturę modelu SUCM.



Rysunek 2. Ilustracja modelu SUCM

Ramy modelu obejmują dwie zasadnicze części: 1) modele statystyczne opisujące niepewności związane z systemem; 2) model planowania systemu mający na celu znalezienie optymalnych decyzji dotyczących zaangażowania i wysyłania zgodnie z deterministycznymi lub stochastycznymi zasadami bezpieczeństwa.

Profile wytwarzania energii wiatrowej/słonecznej i zapotrzebowania na nią oraz dane statystyczne dotyczące błędów prognostycznych i niezawodności procesu wytwarzania energii elektrycznej są wprowadzane do modeli statystycznych, które na podstawie scenariuszy tworzą drzewo scenariuszy opisujących niepewności systemowe. Metoda wyboru scenariusza bazującego na kwantylu jest stosowana w tym modelu poprzez tworzenie i określanie wagi drzew scenariuszy w oparciu o zdefiniowane przez użytkownika kwantyle dystrybucji popytu netto. W porównaniu z powszechnie stosowanymi metodami Monte Carlo metoda ta wychwytuje dane o krytycznym znaczeniu dotyczące niepewności, uwzględniając przy tym jedynie relatywnie niewielką liczbę scenariuszy. Proces tworzenia scenariusza składa się z dwóch etapów: a) tworzenie dystrybucji zapotrzebowanie netto oraz b) obliczanie wartości węzłowej zapotrzebowania netto i związanego z tym prawdopodobieństwa.

Opracowane drzewo scenariuszy zostaje następnie wprowadzone do modelu planowania, który określi optymalne decyzje dotyczące zaangażowania i wysyłania zgodnie z deterministycznymi lub stochastycznymi zasadami bezpieczeństwa. Celem planowania stochastycznego jest zminimalizowanie spodziewanych kosztów operacyjnych (w tym kosztów wytwarzania i związanych ze spadkiem obciążenia) we wszystkich możliwych scenariuszach. Optymalizacja ta podlega ograniczeniom związanym z bilansem obciążenia lokalnego, lokalnymi lub systemowymi ograniczeniami w zakresie pierwotnej/wtórnej regulacji częstotliwości, ograniczeniom zdolności przesyłowej oraz ograniczeniom jednostek wytwarzających ciepło (np. minimalny/maksymalny poziom wytwarzania, czas działania, minimalny czas działania i wyłączenia, tempo narastania, zapewnienie pierwotnej/wtórnej regulacji częstotliwości) oraz jednostek magazynowych (np. minimalne/maksymalne ograniczenia mocy i energii, tempo narastania i zapewnienie pierwotnej/wtórnej regulacji częstotliwości).

Symulacje są przeprowadzane za pomocą planu kroczącego, który polega na wykonaniu obliczeń dla 24 godzin z przyjęciem godzinnego odstępu czasu oraz odrzuceniu wszystkich decyzji nie dotyczącymi węzłów głównych. W następnym odstępie czasowym dostępne realizacje niektórych niepewnych zmiennych, które mogą odbiegać od istniejących scenariuszy. Następnie stworzone zostaje zaktualizowane drzewo scenariuszy, obejmujące okres 24 godzin; decyzje operacyjne są dostosowywane tak, by spełnić wymagania dotyczące połączenia w czasie.

### 3.2.3 Model planowania sieci dystrybucji energii (DistPlan)

Jak wspomniano wcześniej, planowanie i użytkowanie sieci dystrybucji energii są zadaniami typowo lokalnymi, ponieważ sieci te nie są wzajemnie połączone i muszą odzwierciedlać lokalny popyt oraz warunki wytwarzania energii. Z tego powodu partnerzy z Imperial College opracowali *model planowania sieci dystrybucji energii* (DistPlan) [9], uwzględniający tylko optymalne decyzje dotyczące planowania sieci dystrybucji energii w poszczególnych krajach. Celem tego modelu jest określenie możliwie najniższych kosztów związanych z decyzjami niezbędnymi do zaspokojenia przyszłego rosnącego zapotrzebowania w każdym kraju.

Opracowane podejście modelowania obejmuje trzy poziomy napięcia sieci dystrybucyjnej, odpowiadające strukturze sieci dystrybucji energii w Europie:

- *Sieci niskiego napięcia (nN)*, o napięciu zbliżonym do 0,4 kV, które są zasilane z osobnych podstacji dystrybucyjnych.
- *Sieci średniego napięcia (SN)*, obejmujące linie zasilające o napięciu rzędu 6–20 kV prowadzące od podstacji WN/SN do podstacji dystrybucyjnych.
- *Sieci wysokiego napięcia (WN)*, obejmujące zasoby znajdujące się między punktem zasilającym sieci, czyli przyłączem do sieci przesyłowej (220–400 kV) lub podrzędnej sieci przesyłowej (72–132 kV), a podstacjami WN/SN.

Biorąc pod uwagę wielkość i różnorodność sieci dystrybucji energii oraz bardzo ograniczoną ilość danych dotyczących rzeczywistej topologii i charakterystyki technicznej sieci dystrybucji energii, model ten opiera się na analizie ograniczonej liczby statystycznie







### 3.3 Oddolne ilościowe ujęcie korzyści FID

Modele przedstawione w części 3.2 wykorzystano w projekcie IndustRE na potrzeby oddolnej ilościowej oceny korzyści FID m.in. na potrzeby ilościowej analizy oszczędności związanych ze stosowaniem FID w kontekście systemu energetycznego. W ramach wymogów rynkowych i przepisów prawa część oszczędności kosztów związanych z systemem powinna zostać przeniesiona na elastycznych odbiorców przemysłowych w celu „wynagrodzenia” ich elastyczności i zachęcenia ich do dalszych działań w zakresie elastyczności.

Aby dokonać ilościowej oceny oszczędności kosztów elastycznych odbiorców przemysłowych, partnerzy z Imperial College opracowali nowy model nazywany w dalszej części raportu *oddolnym modelem oceny ilościowej* (BUQM). Model ten oparto za zasadach przedstawionych w publikacjach [11]–[13]. Przedstawia zagadnienie z perspektywy pojedynczego odbiorcy przemysłowego, który dąży do zminimalizowania całkowitych kosztów użycia energii elektrycznej przez optymalne wykorzystanie elastyczności.

Zgodnie z informacjami zamieszczonymi w rozdziałach 2 i 3, oszczędności związane z FID odnoszą się do różnych ram czasowych (wytworzenie, przesył i dystrybucję) oraz wielu sektorów systemu energetycznego (długo- i krótkoterminowe planowanie oraz równoważenie w czasie rzeczywistym). Oznacza to, że zgodnie z odpowiednimi przepisami i zasadami rynkowymi elastyczni odbiorcy przemysłowi powinni jednocześnie być w stanie świadczyć wiele różnych usług, a tym samym mieć dostęp do wielu strumieni wartości. Zgodnie z informacjami podanymi w rozdziałach 2 i 3 oraz analizy przedstawionej w poprzednim opracowaniu IndustRE D2.1[14], strumienie te obejmują:

- *Oszczędność kosztów energii*: Ten strumień wartości odpowiada zmniejszeniu rachunków za zużycie energii dla elastycznego odbiorcy przemysłowego i wiąże się z jego zdolnością do dostosowania sposobu zużycia energii elektrycznej w zależności od chwilowych wahań cen energii elektrycznej. Ta tymczasowa zmienność cen energii wynika z wahań całkowitego zapotrzebowania i poziomu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. Ten strumień wartości jest zatem pośrednio związany ze zdolnością FID do zapewniania wytwarzania większej ilości energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych i oszczędnych źródeł.
- *Przychody z tytułu świadczenia usług bilansowania*: ten strumień wartości jest powiązany ze zdolnością FID do zapewniania usług rezerw i regulacji częstotliwości, zmniejszając straty wydajności generatorów konwencjonalnych oraz ograniczenia wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. Elastyczny odbiorca przemysłowy może zwiększyć lub zmniejszyć swoje zapotrzebowanie z uwzględnieniem produkcji w odniesieniu do nabytej ilości energii, gdy tylko wystąpi brak równowagi pomiędzy całkowitą wytwarzaną ilością energii elektrycznej a całkowitym zapotrzebowaniem na nią. W odpowiednich warunkach rynkowych odbiorcy przemysłowi powinni być wynagradzani za zapewnianie takich usług bilansowania na poziomie wytwórców energii, z uwzględnieniem cen odzwierciedlających koszty.

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

- *Przychody z tytułu usług wytwarzania/przesyłu/dystrybucji energii:* Ten strumień wartości jest związany z możliwością uniknięcia/pominięcia inwestycji w moce wytwórcze i sieci przesyłowe/dystrybucji energii poprzez stosowanie elastycznego zapotrzebowania przemysłowego. W odpowiednich warunkach rynkowych odbiorcy przemysłowi powinni być wynagradzani za możliwość uniknięcia/pominięcia takich kosztownych inwestycji, z uwzględnieniem cen odzwierciedlających koszty.

Model BUQM uwzględnia wszystkie te wartości, a jego funkcją obiektywną jest minimalizowanie całkowitego kosztu energii elektrycznej dla elastycznego odbiorcy przemysłowego, które jest wyrażane wzorem (3):

$$\text{Min} \left\{ \sum_t [d^{flex} \cdot \pi^E - (BS^{IN} + BS^{DE}) \cdot \pi^{BS}] - (\overline{d^{base}} - \overline{d^{flex}}) \cdot (\pi^{GC} + \pi^{TC} + \pi^{DC}) \right\} \quad (3)$$

Ta obiektywna funkcja obejmuje:

- *Koszty energii* definiowane dla każdej godziny  $t$  jako produktu końcowego zapotrzebowania  $d_t^{flex}$  odbiorcy przemysłowego mnożone przez cenę energii  $\pi^E$ .
- *Przychód z tytułu świadczenia usług bilansowania:* definiowany dla każdej godziny  $t$  jako oferowana wielkość usługi bilansowania (możliwości zwiększenia zapotrzebowania przez  $BS^{IN}$  lub jego zmniejszenia przez  $BS^{DE}$  w odniesieniu do ilości  $d^{flex}$  dostarczanej na rynek energii), pomnożony przez cenę usług bilansowania  $\pi^{BS}$ .
- *Przychód z tytułu usług wytwarzania/przesyłu/dystrybucji energii:* biorąc pod uwagę fakt, że inwestycje w moce wytwórcze i możliwości sieci są zasadniczo związane z zapotrzebowaniem szczytowym, przychód ten jest definiowany dla całego okresu objętego analizą (rok) jako redukcja zapotrzebowania szczytowego odbiorcy przemysłowego spowodowana wdrożeniem elastyczności  $\overline{d^{base}} - \overline{d^{flex}}$  pomnożona przez cenę wytwarzania/przesyłu/dystrybucji energii.

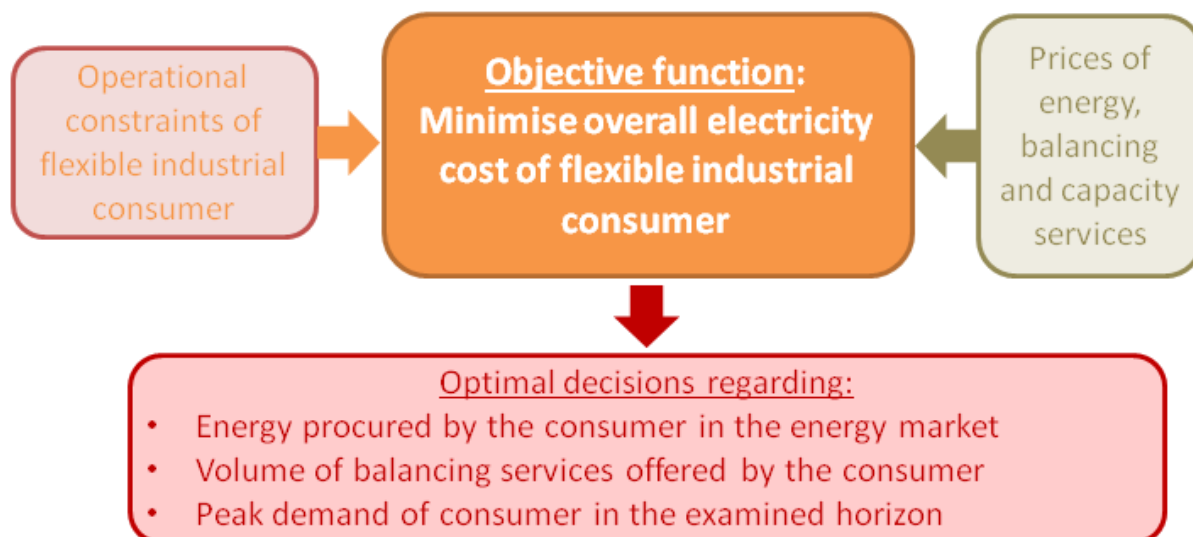
Model ten wymaga uwzględnienia kilku ograniczeń przy minimalizowaniu kosztów ogólnych. Obejmują one:

- *Ograniczenia operacyjne elastycznego odbiorcy przemysłowego:* omówiono je w części 3.1 i wyrażono równaniami (1) i (2).
- *Limity świadczenia usług bilansowania:* maksymalny wzrost zapotrzebowania  $BS^{IN}$  zapewniany przez odbiorcę przemysłowego jest wyrażany jako różnica między zapotrzebowaniem maksymalnym  $(1 + \alpha) \cdot d^{base}$  wg równania (1), pomniejszona o jego zapotrzebowanie na rynku energii  $d^{flex}$ ; z drugiej strony maksymalny spadek zapotrzebowania  $BS^{DE}$  oferowany przez odbiorcę przemysłowego jest wyrażany jako różnica między jego zapotrzebowaniem na rynku energii  $d^{flex}$  pomniejszona o jego zapotrzebowanie minimalne, czyli  $(1 - \alpha) \cdot d^{base}$  (równanie (1)).

Rysunek 4 przedstawia strukturę modelu BUQM. Uwzględniając powyższe strumienie wartości energii, bilansowania i zdolności, model BUQM bierze pod uwagę

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

wzajemne zależności i konflikty związane ze świadczeniem różnych usług przez elastycznych odbiorców przemysłowych. Przykładowo odbiorca może wykorzystywać okresy, kiedy cena energii jest niska, zwiększając w ich trakcie swoje zapotrzebowanie i zmniejszając koszty jej zakupu; takie działanie jednak potencjalnie może zwiększyć jego zapotrzebowanie szczytowe, prowadząc do obniżenia przychodu z rynków energii. Model ten optymalizuje alokację elastyczności odbiorców w ramach konfliktów usług z uwzględnieniem cen rynkowych powiązanych z tymi usługami.



**Rysunek 4.** Ilustracja modelu BUQM

Oczywiste jest, że rezultat tej oddolnej oceny ilościowej korzyści FID zależy w znacznym stopniu od ram rynku energii elektrycznej z uwzględnieniem a) zasad rynkowych powiązanych z udziałem różnych podmiotów w rynku energii, bilansowania i zdolności wytwórczych oraz b) mechanizmów cenowych związanych z energią, bilansowaniem i wydajnością. Zmiany w regulacji rynkowej oraz mechanizmach cenowych mają zasadniczy wpływ na oszczędności dla elastycznych odbiorców przemysłowych. Zgodnie z informacjami zamieszczonymi w poprzednim opracowaniu IndustRE D2.2 [15], warunki na rynku energii elektrycznej różnią się znacznie w każdym z 6 krajów docelowych objętych projektem. Ponadto, zgodnie z danymi zawartymi w poprzednich opracowaniach D2.3 [16] i D2.4 [17], istniejące warunki rynkowe w większości krajów europejskich nadal wykazują znaczne braki, które nie pozwalają na pełne zastosowanie potencjału FID oraz elastyczności ogólnej.

Celem tego zadania (5.2) projektu IndustRE jest ocena ilościowa oszczędności kosztów elastycznego odbiorcy przemysłowego w „idealnych” warunkach rynku energii elektrycznej, która uwzględnia mechanizmy cenowe odzwierciedlające koszty, nie nakłada nadmiernych ograniczeń na podmioty obecne na rynku i jest jednorodna w różnych krajach europejskich. Oczywiście kwestią jest, że utworzenie rynku „idealnego” jest bardzo trudnym i skomplikowanym zadaniem zarówno w teorii, jak i praktyce. Duża liczba działań w tym kontekście jest obecnie stosowana przez Komisję Europejską, rządy,

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

zakłady przemysłowe i instytucje naukowe; chociaż osiągnięto porozumienie w odniesieniu do niektórych aspektów takich „idealnych” warunków rynkowych (np. korzyści gospodarcze wynikające z cen energii uzależnionych od czasu i lokalizacji), obserwuje się intensywne debaty i brak zgodności poglądów na temat innych kwestii (np. tworzenia rynków wytwórczych, z którymi doświadczenie w Europie jest niewielkie).

W tym kontekście partnerzy pracujący nad projektem IndustRE, którzy opracowywali niniejszy dokument, nie twierdzą, że warunki rynkowe symulowane przez oddolną ocenę ilościową korzyści są „idealne”. Należy także zauważyć, że szczegółowe zalecenia konsorcjum IndustRE dotyczące odpowiedniego profilu rynkowego zostaną przedstawione w opracowaniu 5.3, które będzie także uwzględniać praktyczne spostrzeżenia wynikające ze studiów przypadku objętych projektem — jest ono obecnie przygotowywane. Autorzy niniejszego opracowania wprowadzili jednak kilka założeń dotyczących pewnych aspektów „idealnych” warunków rynkowych, które wg nich są zgodne z głównymi wnioskami wynikającymi z odpowiednich badań oraz działań w przemyśle i polityce na terenie Europy:

- *Mechanizm ustalania cen energii:* Ceny na rynku energii elektrycznej są ustalane w oparciu o zasady ustalania cen krańcowych w danym miejscu, uwzględniające zarówno zależność czasową, jak i lokalizacyjną kosztów wytworzenia energii. Aby zapewnić odzwierciedlenie kosztów przez ceny autorzy ustalili ceny na podstawie rezultatów optymalizacji europejskiego systemu energetycznego przeprowadzonej zgodnie z zadaniem 5.1 i omówionej w części 3.2 i rozdziale 4. Dokładniej rzecz ujmując, cena energii w każdym okresie i każdym węźle europejskiej sieci przesyłowej odpowiada mnożnikowi Lagrange’a powiązanemu z ograniczeniem bilansu mocy w modelu SUCM w danym czasie i węźle sieci. Przyjęte ceny energii odzwierciedlają zatem warunki czasowe i miejscowe w optymalnie (przy uwzględnieniu najniższych kosztów) zaprojektowanym i działającym europejskim systemie energetycznym.
- *Mechanizm wyceny usług bilansujących:* Zgodnie z informacjami podanymi w rozdziale 3.2, bilansowanie systemu w czasie rzeczywistym jest niezwykle trudne; aby wykonać je stosunkowo niewielkim nakładem kosztów, należy zastosować zaawansowane narzędzia modelowania stochastycznego i optymalizacji. W tak złożonym systemie zasady ustalania miejscowych cen krańcowych nie mogą być łatwo stosowane na rynkach bilansujących z przyczyn teoretycznych i praktycznych. Dlatego też na potrzeby ustalenia cen odzwierciedlających koszty w zadaniu 5.2 przyjęto podejście oparte na „koszcie alternatywnym”, które bazuje na rezultacie optymalizacji europejskiego systemu energetycznego. Dokładniej europejskie oszczędności kosztów operacyjnych związanych z bilansowaniem przez FID w każdym czasie (według oceny ilościowej na podstawie modelu SUCM, zob. części 3.2.2 i 4.1) są dzielone przez całkowitą ilość mocy zbilansowanej zapewnianej przez FID w tym samym okresie (także określonym przez model SUCM); podział ten określa cenę za świadczenie usług bilansowania w dowolnym fragmencie rozpatrywanego okresu.
- *Mechanizm wyceny usług wytwórczych:* Inwestowanie w wytwarzanie, przesył i dystrybucję charakteryzuje się korzyściami skali — wiąże się ono

ze znacznymi stałymi kosztami kapitałowymi niezależnymi od ilości generowanej mocy/wydajności sieci (np. koszt wykupu ziemi, robocizny itp.). Zgodnie z teorią gospodarki ceny krańcowe nie uwzględniają stałych składników kosztów. Dlatego też, podobnie jak w przypadku opisanego wyżej mechanizmu wyceny usług bilansujących, przyjęto podejście oparte na „koszcie alternatywnym”, które bazuje na rezultacie optymalizacji europejskiego systemu energetycznego. Biorąc pod uwagę fakt, że inwestycje w moce wytwórcze i możliwości sieci są zasadniczo podyktowane szczytowym poziomem zapotrzebowania, oszczędności kosztów kapitałowych związanych z wytwarzaniem, przesyłem i dystrybucją energii przez FID dzieli się przez ograniczenie zapotrzebowania szczytowego w związku z FID; podział ten zapewnia cenę za świadczenie usług wytwarzania/transmisji/dystrybucji energii. Redukcja szczytowego zapotrzebowania oraz oszczędności kosztów kapitałowych na poziomie ogólnoeuropejskiego systemu wytwarzania i przesyłu energii są określane ilościowo przez model WeSIM (zob. części 3.2.1 i 4.1), natomiast redukcja szczytowego zapotrzebowania i oszczędności kosztów kapitałowych w systemach dystrybucji energii każdego z 6 krajów docelowych ujętych w projekcie IndustRE są określane ilościowo za pomocą modelu DistPlan (zob. części 3.2.3 i 4.2).

- *Łączenie rynków na poziomie wytwarzania i przesyłu:* Zgodnie z informacjami podanymi w części 3.2 systemy krajów europejskich są już ze sobą połączone siecią wysokonapięciowych połączeń międzysystemowych; ponadto oczekuje się wzrostu liczby projektów związanych z takimi połączeniami w związku z korzyściami wykorzystania naturalnego zróżnicowania technologii odnawialnych w różnych krajach oraz zwiększenia konkurencyjności na europejskim rynku energii elektrycznej. Z tego powodu w niniejszym raporcie korzyści gospodarcze związane z FID na poziomie wytwarzania i przesyłu energii rozpatrzono na poziomie ogólnoeuropejskiego systemu energetycznego jako całości (zob. części 3.2 i 4.1). W tym kontekście zadanie 5.2 zakłada ujednoczenie (lub połączenie) rynków energii, usług bilansowania, wytwórczych i przesyłu energii; inaczej ujmując, dla każdego z wyżej wymienionych produktów zakłada się istnienie jednolitego rynku ogólnoeuropejskiego, w którym udział biorą wytwórcy i odbiorcy z całej Europy. W odniesieniu do rynków bilansowania i zdolności wytwórczych, biorąc pod uwagę zastosowanie podejścia polegającego na określeniu cen „kosztu alternatywnego”, ujednoczenie takie oznacza, że wszystkich odbiorców przemysłowych w Europie będą dotyczyły takie same ceny bilansowania i zdolności wytwórczych, niezależnie od ich lokalizacji. W kontekście rynku energii, uwzględniając zastosowanie miejscowych cen krańcowych, ujednoczenie to nie musi oznaczać, że te same ceny energii będą mieć zastosowanie do wszystkich odbiorców przemysłowych; w przypadku nadmiernego obciążenia sieci różne ceny energii będą obowiązywać odbiorców przyłączonych do różnych węzłów sieci europejskiej.
- *Rynki dystrybucyjne poszczególnych krajów na poziomie dystrybucji energii:* Sieci dystrybucji energii różnych krajów nie są wzajemnie połączone i muszą być dostosowane do krajowego zapotrzebowania i warunków wytwórczych. Z tego powodu w niniejszym raporcie korzyści gospodarcze związane z FID na poziomie dystrybucji energii rozpatrzono dla każdego z 6 krajów docelowych osobno (zob. części 3.2 i 4.2). W tym kontekście w zadaniu 5.2 założono,

że każdy z 6 krajów posiada własny rynek usług dystrybucji energii i dlatego dla odbiorców przemysłowych w różnych krajach przyjęto inną cenę możliwości dystrybucji energii.

- *Nieuwzględnianie limitów i ograniczeń praktycznych narzuconych przez aktualne regulacje rynkowe:* Zgodnie z danymi zawartymi w poprzednim opracowaniu IndustRE D2.4 [17], istniejące warunki na rynku energii elektrycznej w większości krajów europejskich wykazują znaczne braki i ograniczenia praktyczne związane z udziałem odbiorców na tym rynku, które nie pozwalają na pełne zastosowanie potencjału FID oraz elastyczności ogólnej. Przykłady: a) w większości krajów europejskich brakuje rynków mocy wytwórczych, co oznacza, że korzyści FID związane z unikaniem/odraczaniem inwestycji w moce wytwórcze/sieci nie są wynagradzane, b) większość istniejących rynków usług bilansujących w krajach europejskich narzuca wysoki limit minimalnej wielkości i/lub dostępności na podmioty na nich obecne. Partnerzy IndustRE, którzy wzięli udział w przygotowaniu niniejszego opracowania, nie lekceważą istotnych trudności praktycznych związanych z tymi ograniczeniami; zagadnienia te zostały dogłębnie przeanalizowane w poprzednich opracowaniach D2.3[16] i D2.4[17], a szczegółowe zalecenia dotyczące ich rozwiązania zostaną przedstawione w przygotowywanym opracowaniu 5.3. Partnerzy ci uważają, że „idealne” warunki na rynku energii elektrycznej powinny zniwelować te ograniczenia. Z tego powodu w zadaniu 5.2 pominięto braki i ograniczenia praktyczne nałożone przez obecne regulacje rynkowe.

### 4. Badania i spostrzeżenia dotyczące ogólnego ilościowego ujęcia korzyści FID

W niniejszym rozdziale przedstawiono badania, źródła uwzględnionych danych oraz wyniki ogólnego oceny ilościowej korzyści gospodarczych FID. Ze względów omówionych w części 3.2, korzyści dla europejskiego systemu wytwarzania/przesyłu energii oraz korzyści dla systemów dystrybucji energii w 6 krajach docelowych oceniono oddzielnie; szczegółowe informacje dotyczące tych ocen przedstawiono natomiast kolejno w częściach 4.1 i 4.2.

Granicą czasową dla obu ocen jest rok 2030. Inaczej mówiąc, zastosowane modele wykorzystują prognozy popytu i wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych na rok 2030 oraz optymalizują decyzje inwestycyjne i eksploatacyjne w celu zminimalizowania kosztów systemowych niezbędnych do ich realizacji.

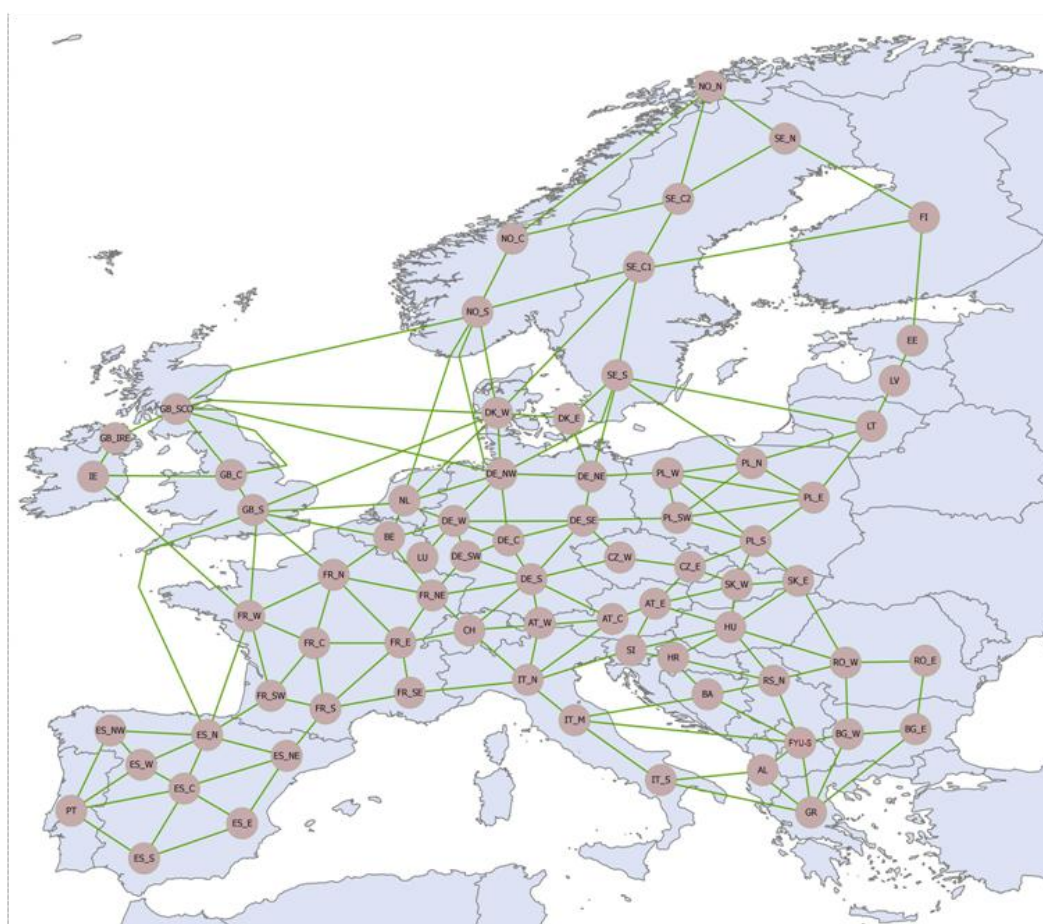
#### 4.1 Ocena korzyści FID dla europejskiego systemu wytwarzania/przesyłu

W celu oceny korzyści gospodarczych związanych z FID na poziomie europejskiego systemu energetycznego, w IndustRE zastosowano uproszczony reprezentatywny model ogólnoeuropejskiej sieci przesyłowej, opracowany w ramach raportu [18] i przedstawiony na rysunku 5. Model ten obejmuje nie tylko 6 krajów docelowych projektu (Belgię,



## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

Francję, Niemcy, Włochy, Hiszpanię i Wielką Brytanię), lecz także wszystkie państwa członkowskie, będące częściami rynku energii elektrycznej UE i kompleksowo reprezentujące kontynentalną sieć europejską. Łączna liczba stref sieciowych (lub węzłów) w tym modelu wynosi 74 i obejmuje 31 krajów europejskich. Węzły te są połączone za pomocą 166 połączeń reprezentujących istniejące lub potencjalne połączenia międzysystemowe. Sieci większych krajów (np. Francji, Niemiec, Hiszpanii) są reprezentowane przez wiele stref sieciowych, co pozwala odzwierciedlić wewnętrzne skutki przeciążenia oraz potrzebę zwiększenia wydajności sieci przesyłowej. Mniejsze kraje (np. Belgia, Holandia, Portugalia), ze względu na niewielkie rozmiary ich systemów energetycznych, przedstawiono natomiast przez jedną strefę. Wydajność każdego istniejącego połączenia określa zdolność przesyłowa sieci (GTC), która determinuje możliwości przesyłu energii elektrycznej przez daną granicę przez sieć europejską. Wartości współczynnika GTC oraz dane wykorzystane do obliczenia kosztów rozbudowy/zwiększenia wydajności sieci przesyłowej szczegółowo przedstawiono w [18, część 2.2].



**Rysunek 5.** Model europejskiej międzysystemowej sieci przesyłowej

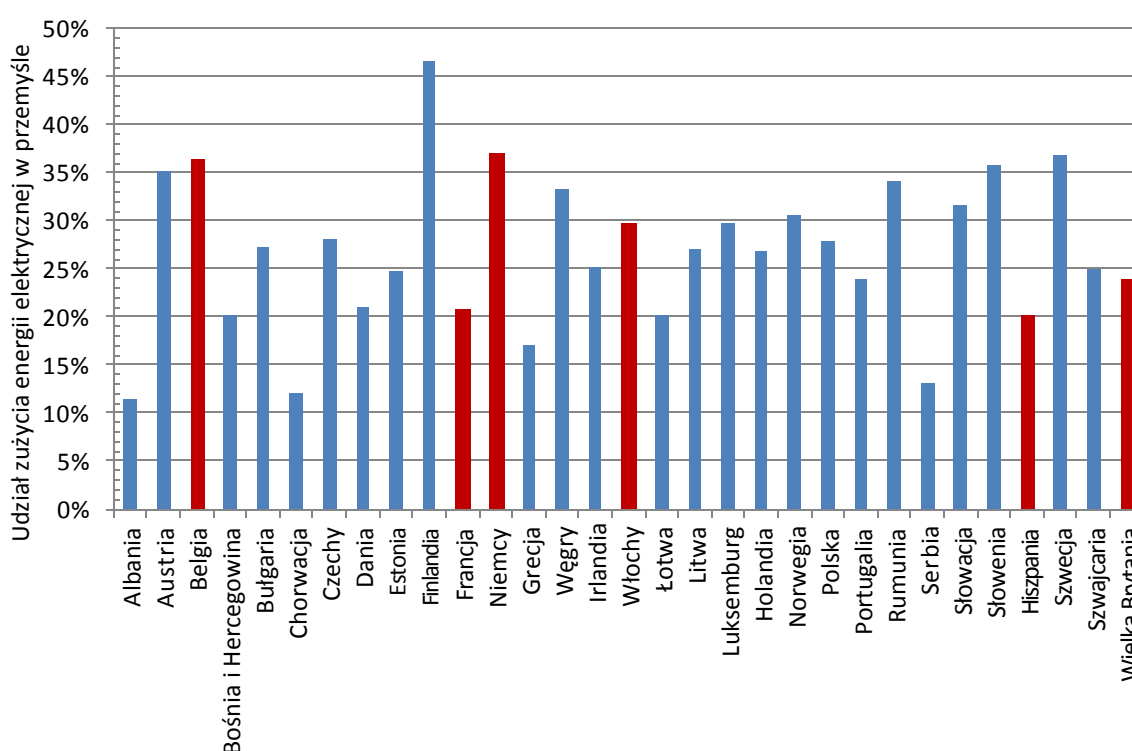
W odniesieniu do systemu wytwarzania poszczególne generatory w Europie wytwarzające energię ze źródeł konwencjonalnych i odnawialnych pogrupowano zgodnie z podstawowymi technologiami wytwarzania energii, których charakterystyki techniczne i kosztowe omówiono w dokumencie [18, sekcja 2.1.2]. Zgodnie z dokumentem [19, strona 6] zakłada się, że energia wytwarzana ze źródeł odnawialnych pozwoli zaspokoić około 45% ogólnego



## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

zapotrzebowania w Europie w 2030 roku. W tym kontekście rozważa się dwa alternatywne scenariusze dotyczące udziału energii ze źródeł odnawialnych w systemie europejskim w 2030 roku. Scenariusze te obejmują 30% i 60% całkowitego europejskiego zużycia energii elektrycznej, która będzie wytwarzana ze źródeł odnawialnych (w dalszej części udziały te będą oznaczane jako scenariusze 30% OZE i 60% OZE) i wyrażają kolejno pesymistyczny i optymistyczny przebieg integracji wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych w Europie.

W odniesieniu do zapotrzebowania całkowite zużycie energii elektrycznej oraz rozkład zużycia energii elektrycznej w przemyśle w krajach europejskich w 2030 roku określono na podstawie prognoz Eurostat [20]. Na rysunku 6 przedstawiono udział zużycia w przemyśle w stosunku do całkowitego zużycia energii elektrycznej w poszczególnych krajach europejskich (6 krajów docelowych należących do projektu InustRE zaznaczono na czerwono).



**Rysunek 6.** Udział zużycia w przemyśle w stosunku do całkowitego zużycia energii elektrycznej w poszczególnych krajach europejskich. Kraje docelowe należące do projektu InustRE zaznaczono na czerwono.

Zgodnie z opisem w sekcji 3.1 zbadano alternatywne scenariusze dotyczące zakresu elastyczności zapotrzebowania przemysłowego wyrażonego przez stosunek  $\alpha$  w równaniu (1). Badane scenariusze dotyczyły wartości  $\alpha = 1\%$ ,  $\alpha = 5\%$ ,  $\alpha = 10\%$ ,  $\alpha = 20\%$  oraz  $\alpha = 50\%$ . Zbadano także scenariusz odniesienia  $\alpha = 0\%$ , który odpowiada brakowi elastyczności zapotrzebowania przemysłowego.

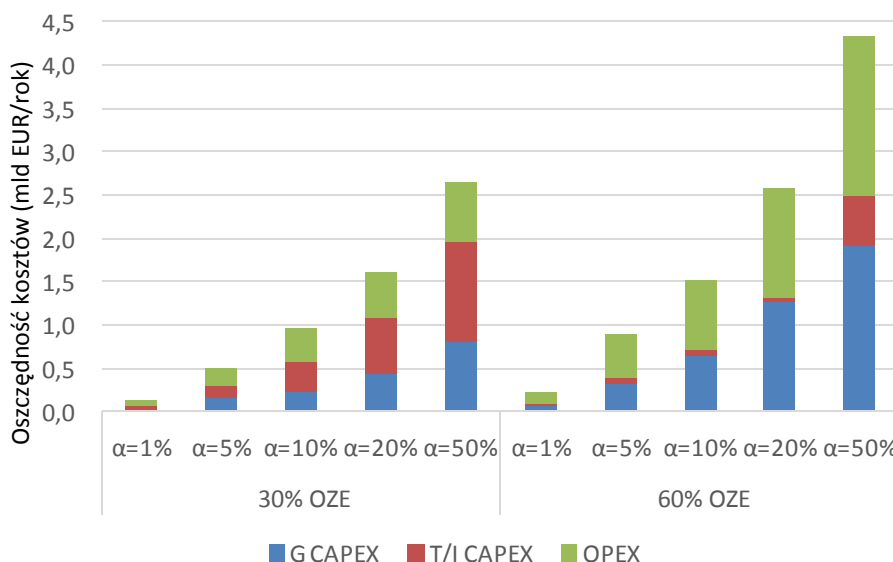
Powyższe dane dotyczące wytwarzania energii, zapotrzebowania oraz międzysystemowej sieci przesyłowej są wykorzystywane w modelach WeSIM (sekcja 3.2.1) i SUCM (3.2.2) do podejmowania decyzji operacyjnych inwestycyjnych w zakresie wytwarzania i przesyłu energii w Europie w celu minimalizowania ogólnych kosztów systemu.

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

Zgodnie z opisem w sekcji 3.2 do realizacji tego zadania stosuje się podejście dwuetapowe. Model WeSIM określa optymalne decyzje inwestycyjne i eksploatacyjne w zakresie wytwarzania oraz przesyłu energii na terenie całej Europy, wykorzystując w tym celu jednak uproszczoną deterministyczną reprezentację pracy systemu bez uwzględniania czynników niepewności. Decyzje inwestycyjne otrzymane w modelu WeSIM są następnie wprowadzane do modelu SUCM, który udoskonala decyzje operacyjne poprzez określenie czynników niepewności dzięki zaawansowanym technikom modelowania stochastycznego i optymalizacji.

Proces jest wykonywany dla wszystkich kombinacji badanych scenariuszy wytwarzania energii z źródeł odnawialnych oraz elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (2 scenariusze wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych \* 6 scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego = łącznie 12 scenariuszy). Różnice w otrzymanych wynikach między scenariuszem odniesienia  $\alpha = 0\%$  (który odpowiada brakowi elastyczności zapotrzebowania przemysłowego) a poszczególnymi scenariuszami uwzględniającymi pewien stopień elastyczności zapotrzebowania przemysłowego ( $\alpha = 1\%$ ,  $\alpha = 5\%$ ,  $\alpha = 10\%$ ,  $\alpha = 20\%$  i  $\alpha = 50\%$ ) wyrażają wpływ FID na rozwój i działanie europejskiego systemu wytwarzania i przesyłu energii. Najistotniejszym czynnikiem, którego próbę oceny podjęto w niniejszym raporcie, jest różnica w ogólnych kosztach wytwarzania i przesyłu energii, która odzwierciedla oszczędności ekonomiczne zapewniane przez FID.

Rysunek 7 przedstawia oszczędności kosztów związanych z wytwarzaniem i przesyłem (w miliardach euro rocznie), wynikające z różnych poziomów elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (w odniesieniu do scenariusza odniesienia  $\alpha = 0\%$ ) oraz dwa alternatywne scenariusze dotyczące poziomu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych.



**Rysunek 7.** Oszczędności w zakresie wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej w Europie (w miliardach EUR/rok) związane z FID dla różnych scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego i wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

Trzy kolory na każdym słupku wykresu przedstawiają różne strumienie oszczędności kosztów związane z FID:

- **G CAPEX** (kolor niebieski): oszczędności w kosztach kapitałowych wynikające z uniknięcia inwestycji w dodatkowe moce wytwórcze.
- **T/I CAPEX** (kolor czerwony): oszczędności w kosztach kapitałowych wynikające z uniknięcia inwestycji w dodatkowe moce przesyłowe i połączenia międzysystemowe.
- **OPEX** (kolor zielony): oszczędności w kosztach operacyjnych wynikające ze zwiększenia poziomu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych i zastosowania oszczędnych źródeł wytwórczych oraz świadczenia usług bilansowania (redukując tym samym straty wynikające z wydajności wytwórców konwencjonalnych).

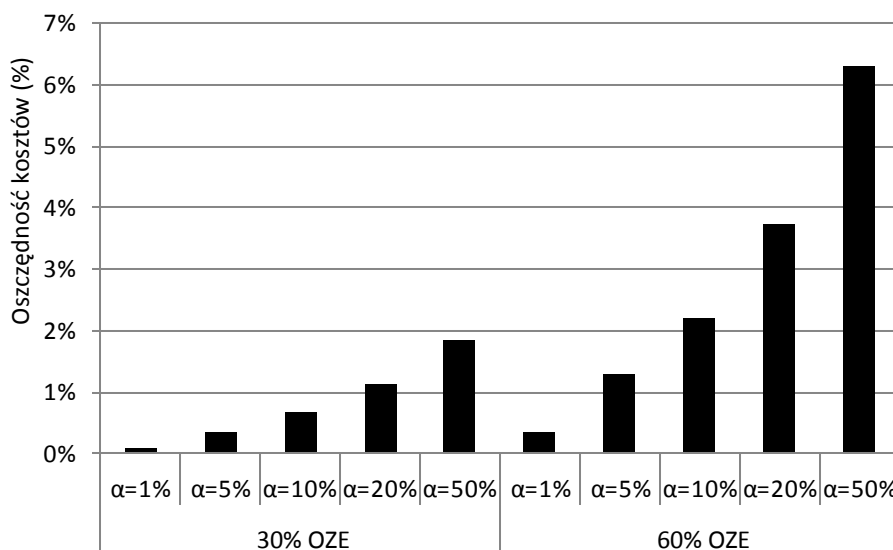
Zgodnie z oczekiwaniami wyższe poziomy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (wyższe wartości  $\alpha$ ) zwiększają różne strumienie oszczędności kosztów i zwiększają całkowite oszczędności kosztów w obu scenariuszach wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. W scenariuszu 30% OZE całkowita oszczędność kosztów mieści się zakresie od 136 milionów euro na rok (dla  $\alpha = 1\%$ ) do 2,65 miliarda euro na rok (dla  $\alpha = 50\%$ ). W scenariuszu 60% OZE całkowita oszczędność kosztów mieści się zakresie od 232 milionów euro na rok (dla  $\alpha = 1\%$ ) do 4,34 miliarda euro na rok (dla  $\alpha = 50\%$ ).

Ponadto stwierdzono, że oszczędności kapitałowe związane z wytwarzaniem (G CAPEX) oraz oszczędności operacyjne (OPEX) dla każdego ze scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (dla każdej wartości  $\alpha$ ) są istotnie większe w scenariuszu 60% OZE niż w scenariuszu 30% OZE. Dzieje się tak dlatego, że wyższe poziomy wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych utrudniają równoważenie systemu i zwiększają zapotrzebowanie na elastyczność w systemie europejskim. Z drugiej jednak strony stwierdzono, że oszczędności kapitałowe związane ze skutecznością sieci przesyłowych i połączeń międzysystemowych są większe w scenariuszu 30% OZE. Taką tendencję można wyjaśnić tym, że inwestycje w sieć są zasadniczo tańsze niż inwestycje w urządzenia wytwórcze i są powodowane głównie zapotrzebowaniem szczytowym. W rezultacie przy większym udziale wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych (60% OZE) elastyczność zapotrzebowania przemysłowego jest wykorzystywana głównie do zapewnienia wydajnego ekonomicznie bilansowania systemu i pozwala unikać kosztownych inwestycji w elastyczne generatory konwencjonalne (takie jak turbiny OCGT oraz generatory olejowe). W mniejszym stopniu służy do redukcji szczytowych poziomów zapotrzebowania i unikania tańszych inwestycji w sieci. Przy mniejszym udziale wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych (30% OZE) obciążenie układu bilansowania systemu jest mniejsze, a tym samym elastyczność zapotrzebowania przemysłowego może w większym stopniu zredukować szczytowe poziomy zapotrzebowania oraz pozwolić uniknąć inwestycji w sieci.

Podsumowując, scenariusz 60% OZE zapewnia całkowite oszczędności ekonomiczne na znacznie większym poziomie niż scenariusz 30% OZE, ponieważ dodatkowe oszczędności w zakresie G CAPEX i OPEX w scenariuszu 60% OZE dominują nad dodatkowymi oszczędnościami T/I CAPEX w scenariuszu 30% OZE. Tendencja ta wskazuje na związek między zwiększonym udziałem wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych a elastycznością zapotrzebowania przemysłowego, co stanowi główny rezultat projektu IndustRE.

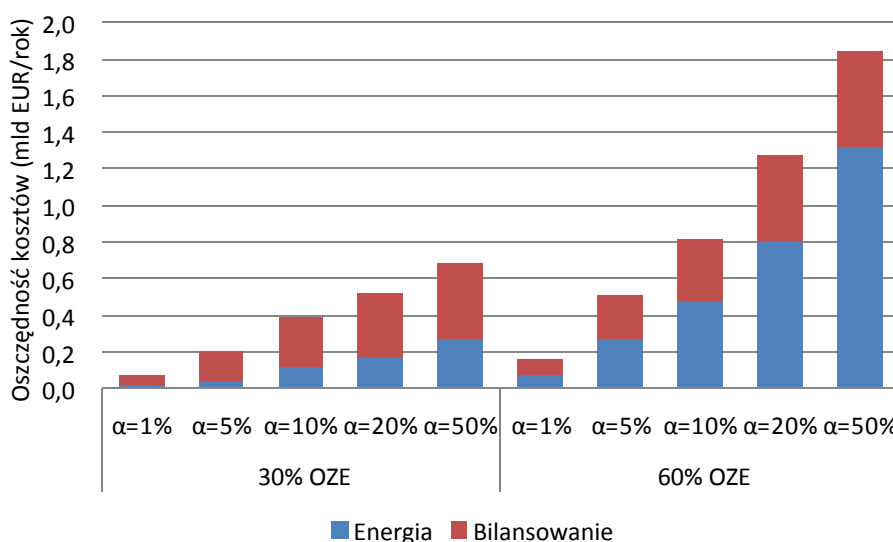
## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

Inną metodą oceny ilościowej oszczędności w zakresie wytwarzania i przesyłu energii zapewnianych przez FID jest wyrażenie bezwzględnych oszczędności pokazanych na rysunku 7 jako procentowej wartości całkowitych kosztów wytwarzania i przesyłu energii w scenariuszu odniesienia nieuwzględniającym elastyczności zapotrzebowania przemysłowego. Uzyskane oszczędności wyrażone w % zostały przedstawione na rysunku 8. Można zauważyć, że całkowite oszczędności kosztów mieszczą się w zakresie od 0,1% (dla  $\alpha = 1\%$  w scenariuszu 30% OZE) do 6,3% (dla  $\alpha = 50\%$  w scenariuszu 60% OZE).



**Rysunek 8.** Oszczędności w zakresie wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej w Europie (w %) związane z FID dla różnych scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego i wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych

Oszczędności kosztów operacyjnych zapewniane przez FID (zielona część na rysunku 7) można następnie podzielić na różne strumienie wartości, jak pokazano na rysunku 9.



**Rysunek 9.** Oszczędności operacyjne w zakresie energii elektrycznej w Europie (w miliardach EUR/rok) związane z FID dla różnych scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego i wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych

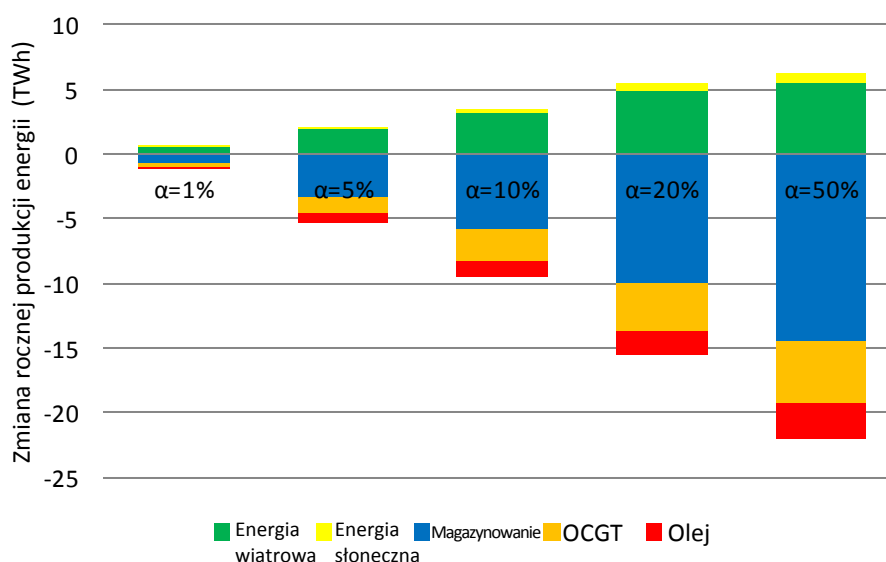
Dwa kolory w poszczególnych kolumnach reprezentują:

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

- **Energię** (oznaczoną niebieskim kolorem): oszczędności kosztów operacyjnych dotyczące wytwarzania energii zużywanej przez odbiorców w Europie zapewniane przez możliwość wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych lub źródeł oszczędnych.
- **Bilansowanie** (oznaczone kolorem czerwonym): oszczędności kosztów operacyjnych związane ze świadczeniem wymaganych usług bilansowania (rezerwy i regulacja częstotliwości), które zapewniają, że dostarczanie energii i zapotrzebowanie będą zawsze wyważone mimo wahań związanych z wytwarzaniem energii ze źródeł odnawialnych oraz usterkami obiektów wytwórczych/przesyłowych.

Zgodnie z oczekiwaniami wyższe poziomy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (wyższe wartości  $\alpha$ ) zwiększają oba strumienie oszczędności kosztów i zwiększają całkowite oszczędności kosztów w obu scenariuszach wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych. Ponadto, zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami, takie oszczędności kosztów operacyjnych są znacznie większe w scenariuszu 60% OZE niż w scenariuszu 30% OZE, ponieważ większy poziom wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych utrudnia bilansowanie systemu i zwiększa zapotrzebowanie na elastyczność w systemie europejskim.

Oprócz przedstawionych wyżej oszczędności kosztów FID ma także istotny wpływ na sposób wykorzystywania różnych źródeł służących do wytwarzania energii. Na rysunku 10 przedstawiono zmiany w rocznej produkcji energii dla różnych technologii wytwarzania energii w Europie (oznaczone różnymi kolorami) wynikające ze stosowania różnych poziomów elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (w odniesieniu do scenariusza odniesienia  $\alpha = 0\%$ ) przy założeniu scenariusza 60% OZE. Wartości dodatnie/ujemne oznaczają, że przy stosowaniu FID za pomocą określonych technologii wytwórczych produkuje się więcej/mniej energii.



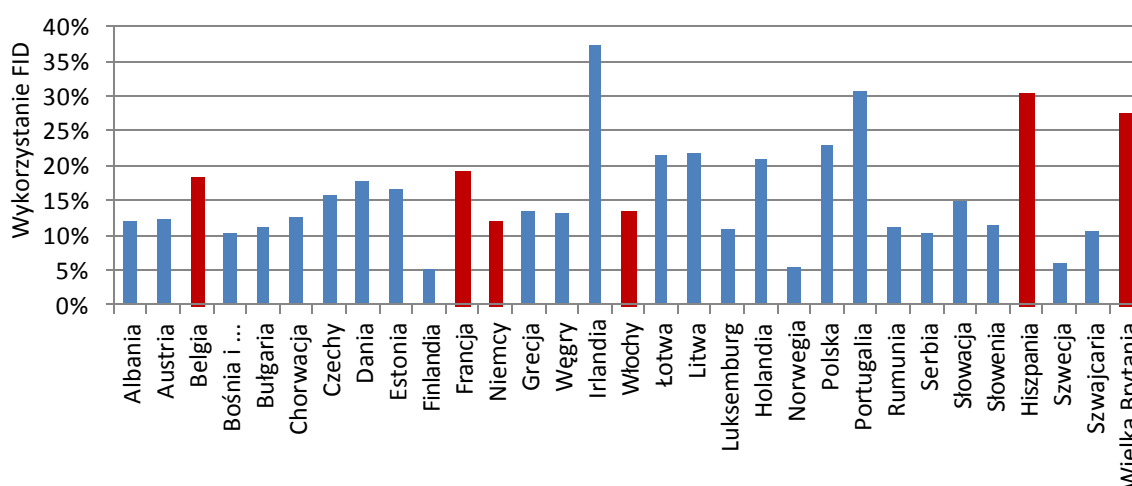
**Rysunek 10.** Wpływ różnych poziomów elastyczności zapotrzebowania przemysłowego na roczną produkcję energii przy różnych technologiach wytwarzania

Zauważyć można, że wraz ze wzrostem poziomu elastyczności zapotrzebowania przemysłowego maleje wykorzystanie jednostek wytwarzania zapewniających zapotrzebowania szczytowe (OCGT i generatory olejowe) oraz jednostek magazynujących, ponieważ FID ogranicza poziom zapotrzebowania szczytowego i pozwala zastąpić takie jednostki usługami bilansowania systemu.

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

Taka tendencja pokazuje konkurencyjną zależność między elastycznością zapotrzebowania, wytwarzaniem szczytowym oraz magazynowaniem w przyszłym kontekście systemu europejskiego. Z drugiej strony można stwierdzić, że wraz ze wzrostem poziomu elastyczności zapotrzebowania przemysłowego rośnie wykorzystanie energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych (głównie energia wiatrowa i słoneczna) — lub, co jest równoznaczne, następuje redukcja ograniczenia stosowania takich źródeł — ponieważ FID pozwala przenosić zużycie energii do okresów o zwiększonej produkcji energii ze źródeł odnawialnych i zapewnia usługi bilansowania systemu oraz regulacji częstotliwości. Taka tendencja ponownie pokazuje synergię między zwiększonym udziałem energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych a elastycznością zapotrzebowania przemysłowego.

Interesujące wyniki zaobserwowane także w zakresie sposobu, w jaki wykorzystuje się elastyczne zapotrzebowanie przemysłowe. W tym kontekście można zdefiniować i ocenić ilościowo wykorzystanie FID jako stosunek % między zużyciem energii w przemyśle, które będzie faktycznie przenoszone w czasie dzięki optymalnym decyzjom operacyjnym i inwestycyjnym podjętym na podstawie modeli WeSIM oraz SUCM do maksymalnego zużycia energii w przemyśle, które może przenieść w tym okresie. Parametr ten wyraża zakres, w jakim dostępna elastyczność odbiorców przemysłowych będzie rzeczywiście wykorzystywana, pomagając w skutecznym ekonomicznie planowaniu i obsłudze systemu europejskiego.



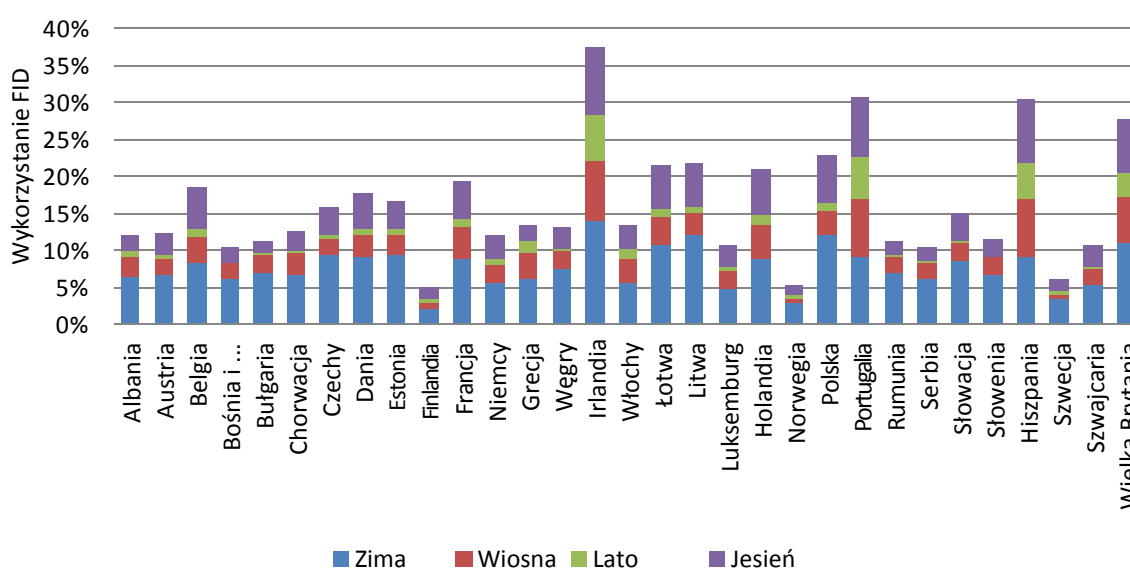
**Rysunek 11.** Wykorzystanie elastyczności zapotrzebowania przemysłowego dla różnych krajów europejskich. Kraje docelowe należące do projektu InustRE zaznaczono na czerwono.

Na rysunku 11 pokazano wykorzystanie FID w każdym kraju badanej sieci europejskiej dla scenariusza zakładającego  $\alpha = 20\%$  i  $60\%$  OZE. Zaobserwowano, że wykorzystanie FID w znacznym stopniu różni się w poszczególnych krajach. Stosunkowo „izolowane” kraje (tzn. kraje o ograniczonych połączeniach międzysystemowych z innymi państwami), takie jak Irlandia, Portugalia, Hiszpania i Wielka Brytania charakteryzują się większym wykorzystaniem FID, uwzględniając trudniejsze bilansowanie systemu oraz wymóg większych poziomów elastyczności. Z drugiej strony kraje z większą liczbą połączeń międzysystemowych z innymi państwami oraz wyższymi poziomami energii wytwarzanej w sposób elastyczny (np. hydroelektrownie), takie jak Finlandia, Norwegia i Szwecja, charakteryzują się mniejszym wykorzystaniem FID,

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

uwzględniając fakt, że połączenia międzysystemowe oraz elastyczne wytwarzanie energii ograniczają wartość dodatkowej elastyczności. Taka tendencja pokazuje konkurencyjną zależność między elastycznością zapotrzebowania, elastycznością wytwarzania oraz połączeniami międzysystemowymi w przyszłym kontekście systemu europejskiego.

Na rysunku 12 przedstawiono rozkład wykorzystania FID w poszczególnych krajach należących do sieci w poszczególnych porach roku przy założeniu scenariusza  $\alpha = 20\%$  i  $60\%$  OZE. Można stwierdzić, że wykorzystanie FID jest znacznie większe w zimie i istotnie mniejsze latem. Taką tendencję można wyjaśnić tym, że w zimie występują największe poziomy zapotrzebowania szczytowego oraz największa produkcja energii wiatrowej, co zwiększa zapotrzebowanie na elastyczność.



**Rysunek 12.** Wykorzystanie elastyczności zapotrzebowania przemysłowego dla różnych krajów europejskich i różnych pór roku

### 4.2 Ocena korzyści FID dla sieci dystrybucji energii 6 krajów docelowych

Zgodnie z opisem w sekcji 3.2.3, aby ocenić korzyści ekonomiczne płynące z FID dla systemu dystrybucji energii w każdym z krajów docelowych, przeanalizowano statystycznie istotną liczbę reprezentacyjnych sieci, biorąc pod uwagę wielkość i różnorodność sieci dystrybucji energii oraz bardzo ograniczoną ilość danych dotyczących rzeczywistej topologii i charakterystyki technicznej sieci dystrybucji energii. Aby wygenerować takie reprezentacyjne sieci, wykorzystano dane dotyczące gęstości zaludnienia, oraz typowych zasad i norm projektowania sieci dla 6 krajów docelowych uczestniczących w projekcie, posługując się informacjami w dokumencie [18, sekcja 2.3.2]. Dodatkowo dane dotyczące kosztów rozbudowy poszczególnych zasobów służących dystrybucji energii opisano w dokumencie [18, sekcja 2.3.3].



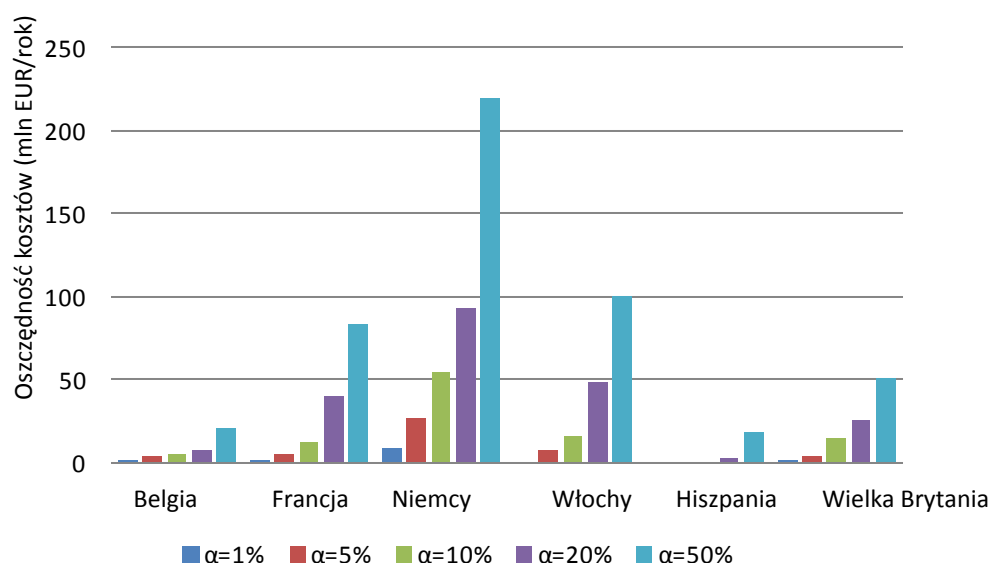
Podobnie jak w przypadku analizy korzyści dla europejskiego systemu wytwarzania/przesyłu energii (sekcja 4.1) całkowite zużycie energii elektrycznej oraz rozkład zużycia energii elektrycznej w przemyśle w 6 krajach docelowych w 2030 roku określono na podstawie prognoz Eurostat [20]. Opierając się na danych pochodzących ze źródeł [18], założono, że 60% całkowitego zapotrzebowania przemysłowego w każdym kraju wiąże się z siecią dystrybucji energii oraz w szczególności z poziomem WN w sieci. Założono, że pozostała część zapotrzebowania przemysłowego jest połączona bezpośrednio z siecią przesyłową w kraju i dlatego jego elastyczność nie wpływa na decyzje o rozbudowie sieci dystrybucji energii.

Zgodnie z opisem w sekcji 4.1 zbadano alternatywne scenariusze dotyczące zakresu elastyczności zapotrzebowania przemysłowego wyrażonego przez stosunek  $\alpha$  w równaniu (1). Scenariusze te uwzględniają wartości  $\alpha = 1\%$ ,  $\alpha = 5\%$ ,  $\alpha = 10\%$ ,  $\alpha = 20\%$  oraz  $\alpha = 50\%$ , a także scenariusz odniesienia  $\alpha = 0\%$ , który odpowiada sytuacji, w której nie występuje elastyczność zapotrzebowania przemysłowego. W przeciwieństwie do opisu w sekcji 4.1 nie zbadano alternatywnych scenariuszy dotyczących poziomu wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych w Europie, ponieważ założono, że zdecydowana większość energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych jest połączona z sieciami przesyłowymi poszczególnych krajów, a tym samym nie ma dużego wpływu w kontekście niniejszego badania.

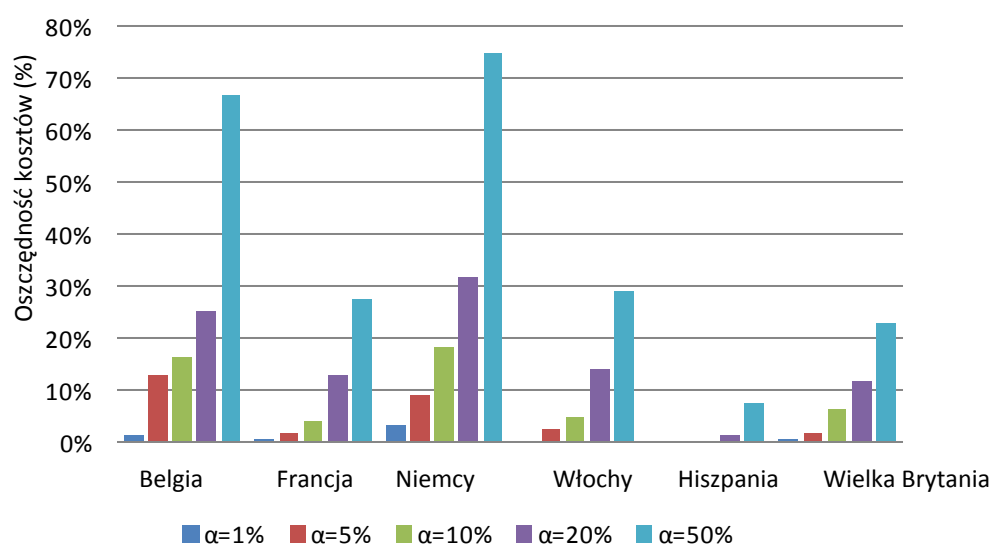
Wygenerowane reprezentacyjne sieci wraz z powyższymi danymi dotyczącymi kosztów i zapotrzebowania wykorzystano w modelu DistPlan (sekcja 3.2.3) do określenia decyzji o generującej najmniejsze koszty rozbudowie sieci dystrybucji energii dla każdego z kraju spełniającego wymogi zapotrzebowania w 2030 roku. Taki proces wykonano dla każdego z 6 scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego. Różnice w otrzymanych wynikach między scenariuszem odniesienia  $\alpha = 0\%$  (który odpowiada brakowi elastyczności zapotrzebowania przemysłowego) a poszczególnymi scenariuszami uwzględniającymi pewien stopień elastyczności zapotrzebowania przemysłowego ( $\alpha = 1\%$ ,  $\alpha = 5\%$ ,  $\alpha = 10\%$ ,  $\alpha = 20\%$  i  $\alpha = 50\%$ ) wyrażają wpływ FID na rozwój i działanie europejskiego systemów dystrybucji energii w 6 docelowych krajach uczestniczących w projekcie.

Rysunek 13 przedstawia oszczędności kosztów kapitałowych w zakresie rozbudowy sieci dystrybucji (w miliardach euro rocznie), wynikające z różnych poziomów elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (w porównaniu z scenariuszem odniesienia  $\alpha=0\%$ ). Na rysunku 14 przedstawiono te same oszczędności kosztów jako procentową wartość całkowitych kosztów sieci dystrybucji energii w scenariuszu odniesienia  $\alpha = 0\%$ . Oszczędności te wynikają z korzystnego wpływu elastyczności zapotrzebowania przemysłowego na redukcję szczytowych poziomów zapotrzebowania. Zgodnie z oczekiwaniami, wyższe poziomy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego (wyższe wartości  $\alpha$ ) przyczyniają się do zwiększenia tych oszczędności.

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym



**Rysunek 13.** Oszczędności w zakresie dystrybucji energii elektrycznej (w milionach euro/rok) w 6 krajach docelowych związane z FID dla różnych scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego



**Rysunek 14.** Oszczędności w zakresie dystrybucji energii elektrycznej (w %) w 6 krajach docelowych związane z FID dla różnych scenariuszy elastyczności zapotrzebowania przemysłowego

Zauważono jednak, że oszczędności te różnią się znacznie w każdym z 6 krajów docelowych objętych projektem. Niemcy charakteryzują się bardzo wysokimi oszczędnościami bezwzględnymi i procentowymi, dla Hiszpanii można stwierdzić bardzo niskie wartości bezwzględne oszczędności kosztów, natomiast w Belgii oszczędności bezwzględne są niskie, ale procentowe — wysokie. Aby wyjaśnić te wyniki, należy rozważyć następujące czynniki:

- Rozbudowa sieci dystrybucji jest związana ze szczytowymi poziomami zapotrzebowania. W wyniku tego w krajach, od których spodziewa się znacznego zwiększenia zapotrzebowania do roku 2030,

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

dochodzi do znacznego obciążenia sieci dystrybucji energii, co nie może zostać w łatwy sposób skompensowane przez elastyczność zapotrzebowania przemysłowego.

- Elastyczność zapotrzebowania przemysłowego w zakresie redukcji poziomów szczytowych zależy od udziału zapotrzebowania przemysłowego w kontekście całkowitego zapotrzebowania w danym kraju. Inaczej mówiąc, określona wartość elastyczności zapotrzebowania przemysłowego  $\alpha$  przekłada się na większy potencjał redukcji zapotrzebowania szczytowego w krajach o większym udziale zapotrzebowania przemysłowego i niższy potencjał w krajach, w których udział zapotrzebowania przemysłowego jest niższy.
- Koszty bezwzględne rozbudowy sieci dystrybucji energii i wynikająca z nich bezwzględna rola elastyczności zapotrzebowania przemysłowego w ich redukcji zależą od wielkości sieci dystrybucji energii, co jest w oczywisty sposób związane z wielkością kraju.

Mając na uwadze powyższe czynniki, uzyskane wyniki można wyjaśnić w sposób następujący:

- Zgodnie z prognozami Eurostat [20] Niemcy charakteryzują się najniższym wzrostem zapotrzebowania do roku 2030 spośród wszystkich 6 badanych krajów. Co więcej charakteryzują się największym udziałem zapotrzebowania przemysłowego spośród 6 badanych krajów (rysunek 6). Dodatkowo duża powierzchnia kraju przekłada się na duży rozmiar sieci dystrybucji energii. Połączenie tych czynników pozwala wyjaśnić, skąd biorą się największe bezwzględne i procentowe oszczędności kosztów związanych z dystrybucją spośród 6 badanych krajów (rysunki 13 i 14).
- Hiszpania charakteryzuje się największym wzrostem zapotrzebowania do roku 2030 spośród wszystkich 6 badanych krajów [20]. Co więcej charakteryzuje się najmniejszym udziałem zapotrzebowania przemysłowego spośród 6 badanych krajów (rysunek 6). Mimo dużej powierzchni kraju, połączenie tych czynników pozwala wyjaśnić, skąd biorą się najmniejsze bezwzględne i procentowe oszczędności kosztów związanych z dystrybucją spośród 6 badanych krajów (rysunki 13 i 14).
- Belgia charakteryzuje się drugim najmniejszym (za Niemcami) wzrostem zapotrzebowania do roku 2030 [20]. Co więcej charakteryzuje się drugim największym (tuż po Niemczech) udziałem zapotrzebowania przemysłowego (rysunek 6). Połączenie tych czynników pozwala wyjaśnić, skąd biorą się drugie pod względem wielkości (po Niemczech) procentowe oszczędności kosztów (rysunek 14). Ponieważ jednak Belgia jest najmniejszym z 6 rozpatrywanych krajów, bezwzględne oszczędności kosztów plasują ją na drugim miejscu od końca (przed Hiszpanią) (rysunek 13).

## 5. Badania i spostrzeżenia dotyczące oddolnego ilościowego ujęcia korzyści FID

W niniejszym rozdziale opisano przeprowadzone badania, zastosowane dane oraz uzyskane wyniki dotyczące oddolnego ujęcia ilościowego korzyści ekonomicznych FID, czyli ocenę ilościową oszczędności kosztów energii elektrycznej, które odbiorca przemysłowy może uzyskać dzięki wprowadzeniu elastyczności.

Odbiorcy przemysłowi uwzględnieni w badaniach charakteryzują się rocznym profilem zapotrzebowania odpowiadającym typowemu europejskiemu zakładowi przemysłowemu ze szczytowym zapotrzebowaniem na poziomie 2666 kW. Tacy odbiorcy skupiają się na zminimalizowaniu całkowitych kosztów energii elektrycznej przez optymalne alokowanie elastyczności na wielu różnych rynkach (energia, usługi bilansowania, usługi wytwarzania/przesyłu/dystrybucji energii).

Celem zadania 5.2 jest ocena ilościowa oszczędności kosztów energii elektrycznej u takiego odbiorcy przemysłowego w „idealnych” warunkach rynkowych. W tym kontekście do niniejszych badań użyto zasad omówionych w sekcji 3.3. Zgodnie z tymi zasadami ceny kierujące działaniami odbiorcy przemysłowego są ustalane na podstawie wyników optymalizacji europejskiego systemu energetycznego (przedstawiono je w rozdziale 4).

Powyższe dane dotyczące cen i zapotrzebowania odbiorcy przemysłowo wykorzystano w modelu BUQM (sekcja 3.3) do określania optymalnych regulacji zapotrzebowania wykonywanych przez odbiorcę przemysłowego zapewniających minimalizację całkowitych kosztów energii elektrycznej. Proces ten wykonano dla wielu różnych scenariuszy dotyczących:

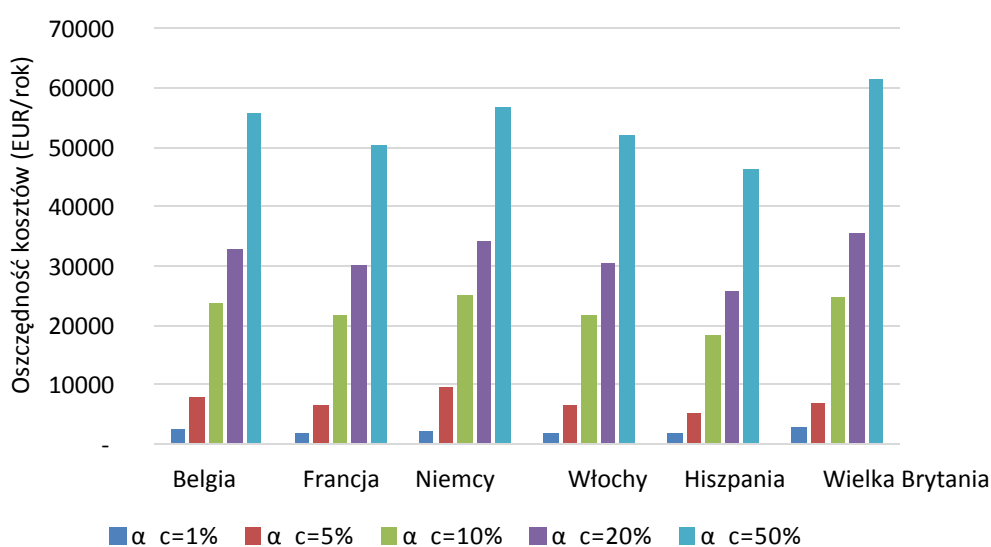
- *Stopnia elastyczności charakteryzującej rozpatrywanych odbiorców przemysłowych*: jest on wyrażany parametrem  $\alpha_c$  (opisanym w niniejszym rozdziale) w celu odróżnienia od stopnia elastyczności charakteryzującej pozostałe zapotrzebowanie przemysłowe w systemie. Badane scenariusze dotyczyły wartości  $\alpha_c = 1\%$ ,  $\alpha_c = 5\%$ ,  $\alpha_c = 10\%$ ,  $\alpha_c = 20\%$  oraz  $\alpha_c = 50\%$ , a także uwzględniono scenariusz odniesienia  $\alpha_c = 0\%$  który odpowiada sytuacji, w której badany odbiorca przemysłowy nie wykazuje żadnej elastyczności.
- *Stopnia elastyczności charakteryzującej pozostałe zapotrzebowanie odbiorców przemysłowych w systemie (innych niż odbiorcy badani)*: jest on wyrażany parametrem  $\alpha_s$  (opisanym w niniejszym rozdziale) w celu odróżnienia od stopnia elastyczności charakteryzującej badanych odbiorców przemysłowych. Badane scenariusze dotyczyły wartości  $\alpha_s = 1\%$ ,  $\alpha_s = 5\%$ ,  $\alpha_s = 10\%$ ,  $\alpha_s = 20\%$  oraz  $\alpha_s = 50\%$ .
- *Udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych w systemie europejskim*: Zgodnie z analizą opisaną w rozdziale 4 przebadano dwa scenariusze zakładające całkowity udział energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych w Europie na poziomach 30 i 60% (30% OZE i 60% OZE).
- *Kraju, w którym znajduje się dany odbiorca przemysłowy*: rozpatrzono sześć alternatywnych scenariuszy w kontekście badanych odbiorców, z których każdy znajduje się w jednym z 6 krajów docelowych ujętych w projekcie (Belgia, Francja, Niemcy, Włochy, Hiszpania i Wielka Brytania).

Jak pokazano w rozdziale 4, zakres elastyczności charakteryzujący zapotrzebowanie przemysłowe w systemie oraz poziom wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych w Europie ma duży wpływ na decyzje inwestycyjne i operacyjne związane z systemem, a tym samym wpływa na ceny energii, usług bilansowania i magazynowania zgodnie z zasadami wyceny określonymi w sekcji 3.3.

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

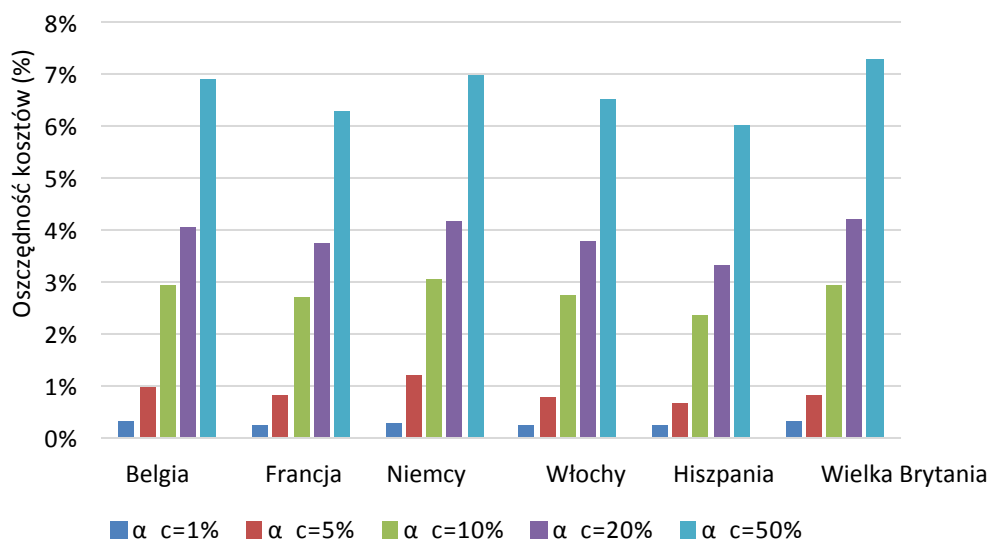
Dodatkowo, zgodnie z opisem w sekcji 3.3, ceny energii oraz dystrybucji energii zależą od lokalizacji. To właśnie z tych powodów bada się alternatywne scenariusze dotyczące zakresu elastyczności charakteryzującego zapotrzebowanie przemysłowe w systemie, poziom wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych oraz uwzględnia kraj, w którym zlokalizowany jest badany odbiorca przemysłowy. Dla każdego z tych scenariuszy różnice w całkowitych kosztach energii elektrycznej ponoszonych przez badanego odbiorcę przemysłowego między scenariuszem odniesienia  $\alpha_c = 0\%$  (który odpowiada sytuacji, gdy taki odbiorca nie wykazuje żadnej elastyczności) a każdym ze scenariuszy, w których odbiorca charakteryzuje się pewną dodatnią elastycznością ( $\alpha_c = 1\%$ ,  $\alpha_c = 5\%$ ,  $\alpha_c = 10\%$ ,  $\alpha_c = 20\%$  i  $\alpha_c = 50\%$ ) stanowią odzwierciedlenie oszczędności kosztów, które odbiorca może uzyskać dzięki stosowaniu elastyczności.

Na rysunku 15 przedstawiono takie oszczędności (w euro na rok) dla scenariusza zakładającego 30% OZE  $\alpha_s = 10\%$  oraz różnych scenariuszy uwzględniających elastyczność oraz lokalizację badanego odbiorcy. Na rysunku 16 przedstawiono te same oszczędności kosztów jako procentową wartość całkowitych kosztów energii elektrycznej w scenariuszu odniesienia  $\alpha_c = 0\%$ . Zgodnie z oczekiwaniami wyższe poziomy elastyczności (wyższe wartości  $\alpha_c$ ) oznaczają wzrost całkowitych oszczędności w przypadku danego odbiorcy — jest to spowodowane umocnieniem jego pozycji na rynku energii, bilansowania i zdolności wytwórczych.



**Rysunek 15.** Całkowite oszczędności (w EUR/rok) związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 30-procentowy udział OZE,  $\alpha_s = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące zakresu elastyczności i miejsca działania

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

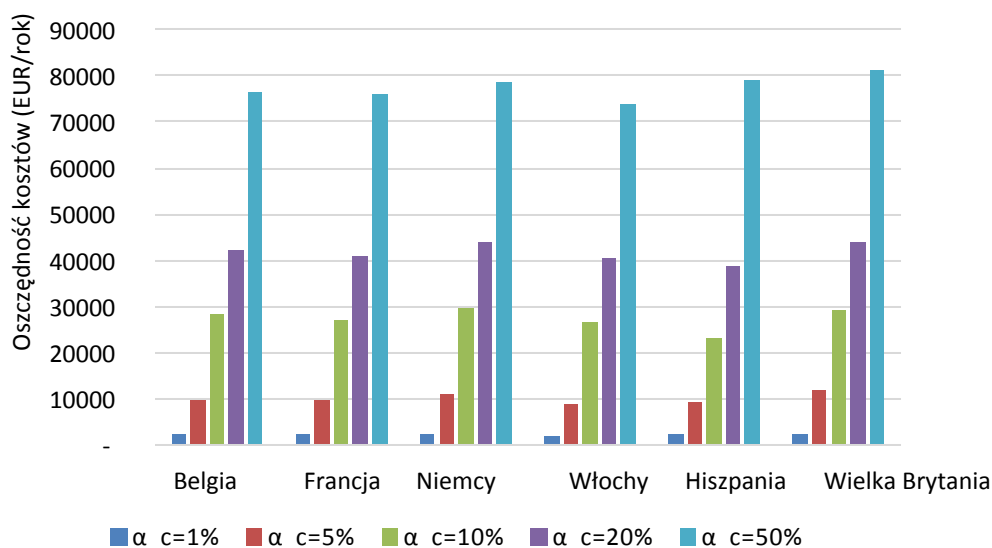


**Rysunek 16.** Całkowite oszczędności (w %) związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 30-procentowy udział OZE,  $\alpha_s = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące zakresu elastyczności i miejsca działania

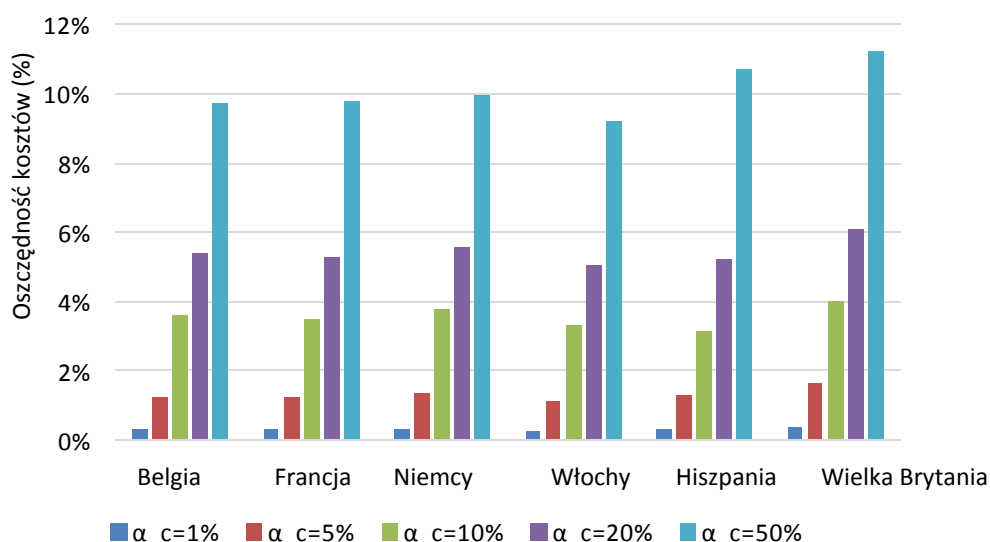
Na rysunkach 17 i 18 przedstawiono te same bezwzględne i procentowe oszczędności kosztów, tym razem w przypadku scenariusza zakładającego 60% OZE. Porównując te oszczędności z odpowiednimi oszczędnościami na rysunkach 15 i 16, można stwierdzić, że oszczędności kosztów dla każdego ze scenariuszy uwzględniających elastyczność i lokalizację badanego klienta są znacznie większe przy większym udziale energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych w systemie. Takiego wyniku należy oczekiwać, zakładając taką samą tendencję dla oszczędności kosztów w systemie zapewnianych przez FID (jak pokazano na rysunku 7 w rozdziale 4). Potwierdza on synergię między zwiększonym udziałem wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych a korzyściami z elastyczności zapotrzebowania przemysłowego, co stanowi główny rezultat projektu IndustRE.



## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym



**Rysunek 17.** Całkowite oszczędności (w EUR/rok) związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 60-procentowy udział OZE,  $\alpha_s = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące zakresu elastyczności i miejsca działania

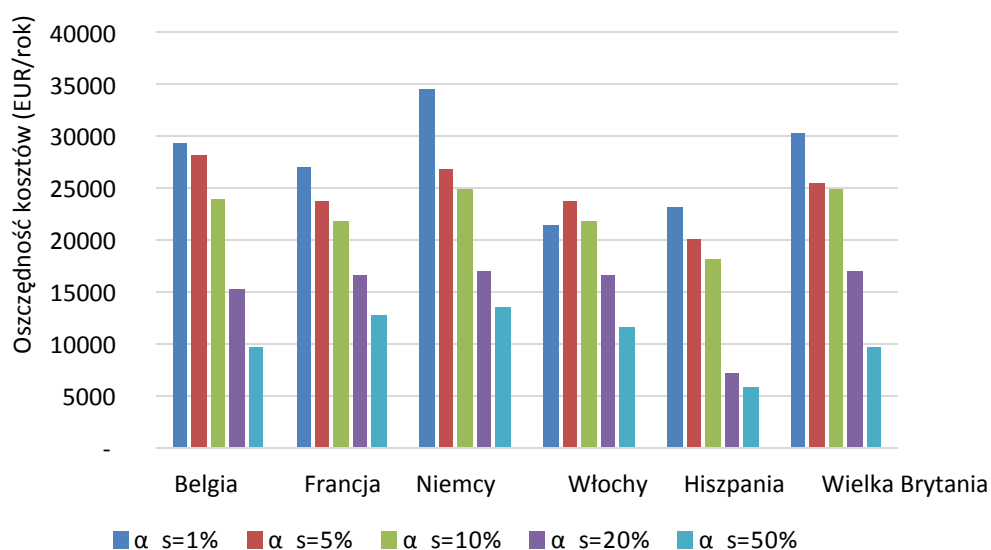


**Rysunek 18.** Całkowite oszczędności (w %) związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 60-procentowy udział OZE,  $\alpha_s = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące zakresu elastyczności i miejsca działania

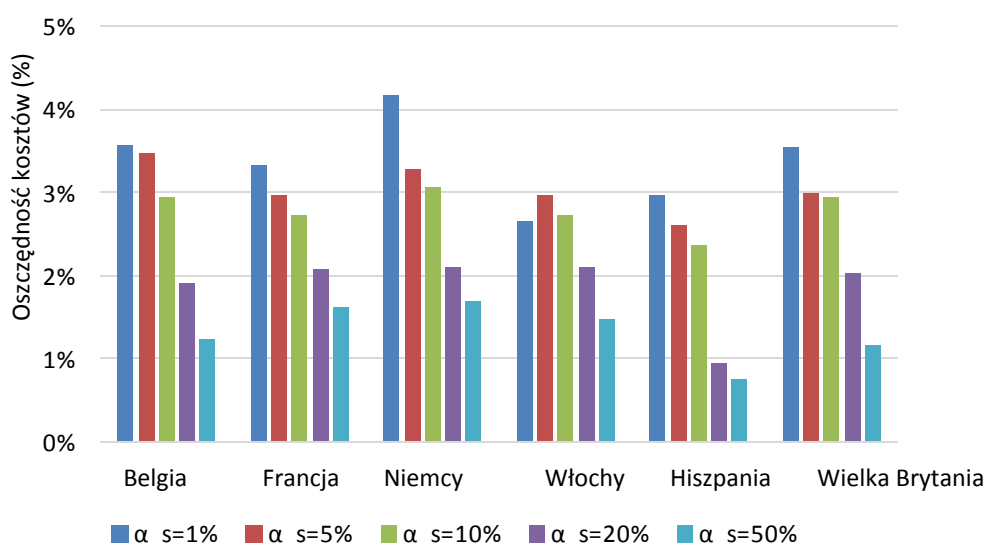
Na rysunkach 19–22 przedstawiono bezwzględne i względne oszczędności kosztów w przypadku stałego scenariusza  $\alpha_c = 10\%$  dla badanej elastyczności odbiorców oraz różnych scenariuszów dotyczących elastyczności charakteryzujących pozostałe zapotrzebowanie w systemie (inne niż badanego odbiorcy) oraz miejsca działania badanego odbiorcy. Rysunki 19 i 20 odpowiadają scenariuszowi 30% OZE, natomiast rysunki 21 i 22 — scenariuszowi 60% OZE. Oszczędności kosztów uzyskiwane przez badanego odbiorcę przemysłowego są redukowane wraz ze wzrostem elastyczności innych odbiorców przemysłowych w systemie. Wynik ten można wyjaśnić faktem, że badany odbiorca musi mocniej konkurować z innymi odbiorcami przemysłowymi na

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

rynkach energetycznym, bilansowania oraz magazynowania, co redukuje zyskowność świadczonych przez niego usług w systemie.

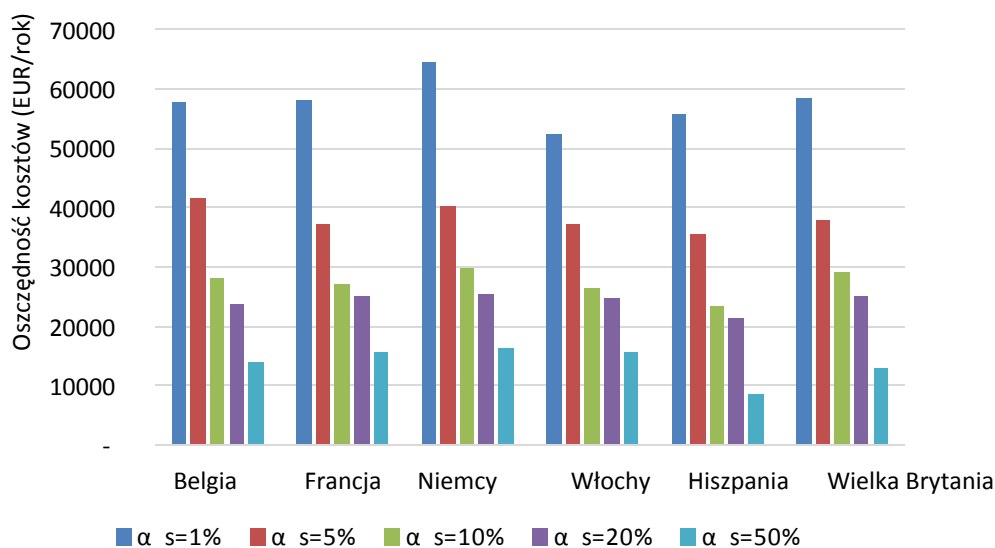


**Rysunek 19.** Całkowite oszczędności (w EUR/rok) związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 30-procentowy udział OZE,  $\alpha_c = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące miejsca działania oraz zakresu elastyczności charakteryzując pozostałą część zapotrzebowania przemysłowego w systemie

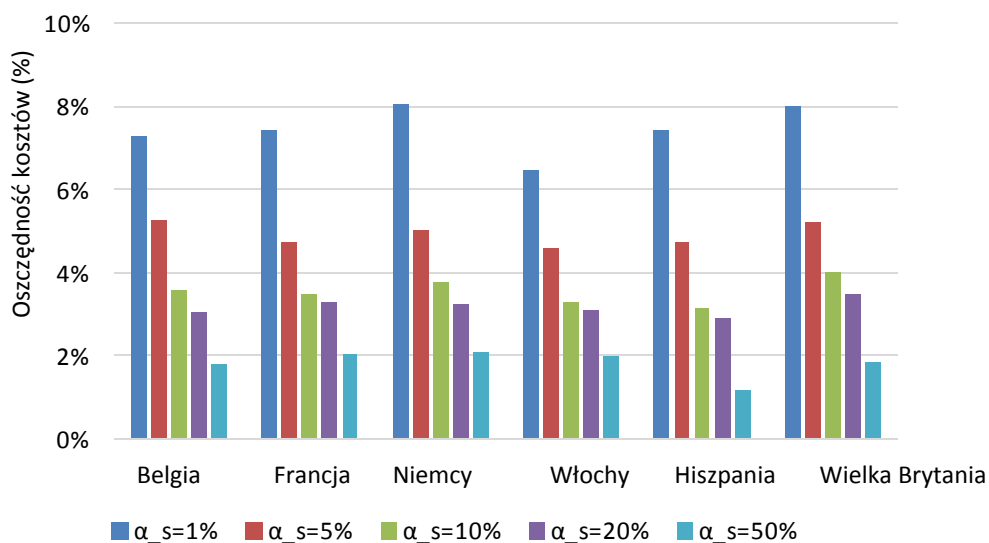


**Rysunek 20.** Całkowite oszczędności (w %) związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 30-procentowy udział OZE,  $\alpha_c = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące miejsca działania oraz zakresu elastyczności charakteryzując pozostałą część zapotrzebowania przemysłowego w systemie

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym



**Rysunek 21.** Całkowite oszczędności (w EUR/rok) związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 60-procentowy udział OZE,  $\alpha_c = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące miejsca działania oraz zakresu elastyczności charakteryzując pozostałą część zapotrzebowania przemysłowego w systemie



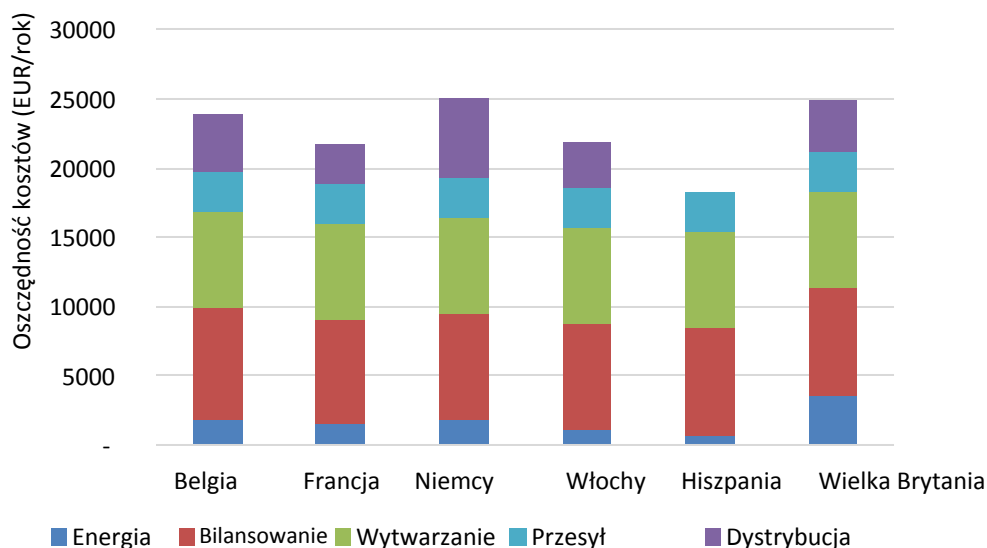
**Rysunek 22.** Całkowite oszczędności (w %) związane z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 60-procentowy udział OZE,  $\alpha_c = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące miejsca działania oraz zakresu elastyczności charakteryzując pozostałą część zapotrzebowania przemysłowego w systemie

Na rysunkach 23 i 24 pokazano rozkład całkowitych oszczędności kosztów u odbiorcy na różne strumienie wartości omówione w sekcji 3.3 dla scenariusza  $\alpha_c = 10\%$ ,  $\alpha_s = 10\%$  oraz różnych scenariuszy dotyczących lokalizacji odbiorcy. Rysunek 23 odpowiada scenariuszowi 30% OZE, natomiast rysunek 24 — scenariuszowi 60% OZE. Strumienie wartości wyglądają w sposób następujący:

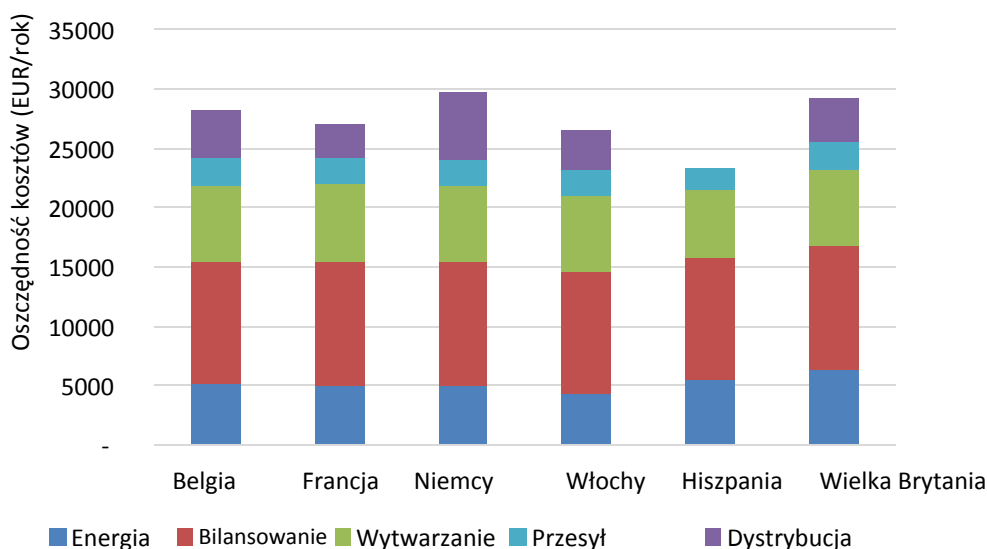
- **Oszczędność kosztów energii** (oznaczona kolorem ciemnoniebieskim)

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

- **Przychody z tytułu świadczenia usług bilansowania** (oznaczone kolorem czerwonym)
- **Przychody z tytułu usług wytwarzania energii** (oznaczone kolorem zielonym)
- **Przychody z tytułu usług przesyłu energii** (oznaczone kolorem niebieskim)
- **Przychody z tytułu usług dystrybucji energii** (oznaczone kolorem fioletowym)



**Rysunek 23.** Rozkład oszczędności (w EUR/rok) związanych z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 30-procentowy udział OZE,  $\alpha_c = 10\%$ ,  $\alpha_s = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące miejsca działania



**Rysunek 24.** Rozkład oszczędności (w EUR/rok) związanych z badanymi odbiorcami przemysłowymi w scenariuszu zakładającym 60-procentowy udział OZE,  $\alpha_c = 10\%$ ,  $\alpha_s = 10\%$  i różne scenariusze dotyczące miejsca działania

Porównanie poszczególnych scenariuszy pod kątem lokalizacji badanych odbiorców prowadzi do następujących wniosków:

## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

- W większości badanych scenariuszy odbiorca uzyskuje największe oszczędności kosztów, jeśli prowadzi działalność w Niemczech lub Wielkiej Brytanii. W przypadku Niemiec taki wynik jest rezultatem faktu, że odbiorca zyskuje największe przychody z tytułu usług dystrybucji energii (rysunki 23–24), co z kolei można wyjaśnić tym, że Niemcy charakteryzują się największymi oszczędnościami kosztów sieci dystrybucji energii dzięki stosowaniu elastyczności zapotrzebowania przemysłowego, co pokazano na rysunku 13. W przypadku Wielkiej Brytanii taki wynik jest rezultatem faktu, że odbiorca uzyskuje największe oszczędności kosztów na rynku energetycznym (rysunki 23–24), co z kolei można wyjaśnić tym, że Wielka Brytania ma ograniczone połączenia międzysystemowe z innymi krajami oraz ograniczoną liczbę elastycznych jednostek wytwórczych.
- W większości badanych scenariuszy odbiorca uzyskuje najmniejsze oszczędności kosztów, jeśli prowadzi działalność we Włoszech lub w Hiszpanii. W przypadku Włoch taki wynik jest rezultatem faktu, że odbiorca uzyskuje najmniejsze oszczędności kosztów na rynku energetycznym (zwłaszcza w scenariuszu 60% OZE, rysunek 24), co z kolei można wyjaśnić tym, że Włochy mają znaczną liczbę elastycznych jednostek wytwórczych (głównie hydroelektrownie). Ten sam czynnik ma zastosowanie w przypadku Hiszpanii (zwłaszcza w scenariuszu 30% OZE, rysunek 23), lecz także odbiorca zyskuje najmniejsze przychody z tytułu usług dystrybucji energii (rysunki 23–24), co z kolei można wyjaśnić tym, że Hiszpania charakteryzuje się najniższymi oszczędnościami kosztów sieci dystrybucji energii w wyniku stosowania elastyczności zapotrzebowania przemysłowego, co pokazano na rysunku 13.

## Wykaz źródeł

- [1] Komisja Europejska, Ramy polityki w zakresie klimatu i energii do roku 2020.  
[https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en)
- [2] Komisja Europejska, Ramy polityki w zakresie klimatu i energii do roku 2030.  
[https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en)
- [3] Eurostat, Statystyki emisji gazów cieplarnianych. [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse\\_gas\\_emission\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics)
- [4] Komisja Europejska, Mobilność i transport, pojazdy elektryczne.  
[https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/vehicles/road/electric\\_en](https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/vehicles/road/electric_en)
- [5] Komisja Europejska, Strategia UE w zakresie ogrzewania i chłodzenia.  
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1\\_EN\\_ACT\\_part1\\_v14.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v14.pdf)
- [6] D. Papadaskalopoulos, G. Strbac, P. Mancarella, M. Aunedi i V. Stanojevic, „Decentralized Participation of Flexible Demand in Electricity Markets – Part II: Application with Electric Vehicles and Heat Pump Systems,” IEEE Transactions on Power Systems, cz. 28, nr 4, str. 3667–3674, listopad 2013.
- [7] Projekt H2020 IndustRE, opracowanie 3.2, „Adapted methodology for optimal valorization of Flexible Industrial Electricity Demand”, czerwiec 2016.  
<http://www.industre.eu/downloads/category/project-results>
- [8] Projekt H2020 IndustRE, opracowanie 3.3, „Simplified assessment methodology for optimal valorization of Flexible Industrial Electricity Demand”, sierpień 2016.  
<http://www.industre.eu/downloads/category/project-results>
- [9] G. Strbac, M. Aunedi, D. Papadaskalopoulos, M. Qadrdan, R. Moreno, D. Pudjianto, P. Djapic, I. Konstantelos i F. Teng, „Modelling of Smart Low-Carbon Energy Systems”, Report for EPSRC wholeSEM project, <http://www.wholesem.ac.uk/documents/icl-modelsummary>
- [10] J.P. Green, S.A. Smith i G. Strbac, „Evaluation of electricity distribution system design strategies”, IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, cz. 146, nr 1, str. 53–60, styczeń 1999.
- [11] R. Moreno, R. Moreira i G. Strbac, „A MILP model for optimising multi-service portfolios of distributed energy storage”, Applied Energy, cz. 137, str. 554–566, styczeń 2015.
- [12] R. Moreira, R. Moreno i G. Strbac, „Synergies and Conflicts Among Energy Storage Services”, IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), kwiecień 2016.
- [13] L. Ollagnier, R. Moreira, D. Papadaskalopoulos i G. Strbac, „Optimal multi-service business models for electric vehicles”, IEEE PowerTech Conference, czerwiec 2017.



## D5.1: Ocena korzyści gospodarczych związanych z elastycznym zapotrzebowaniem przemysłowym

[14] Projekt H2020 IndustRE, opracowanie 2.1, „Main variations of business models for Flexible Industrial Demand combined with Variable Renewable Energy”, kwiecień 2015.

<http://www.industre.eu/downloads/category/project-results>

[15] Projekt H2020 IndustRE, opracowanie 2.2, „Regulatory and Market Framework Analysis”, lipiec 2015. <http://www.industre.eu/downloads/category/project-results>

[16] Projekt H2020 IndustRE, opracowanie 2.3, „Stakeholder Consultation Process”, luty 2016. <http://www.industre.eu/downloads/category/project-results>

[17] Projekt H2020 IndustRE, opracowanie 2.4, „Business models and market barriers”, marzec 2016. <http://www.industre.eu/downloads/category/project-results>

[18] Imperial College, NERA, DNV-GL, „Integration of Renewable Energy in Europe”, raport dla Komisji Europejskiej, czerwiec 2014. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/201406\\_report\\_renewables\\_integration\\_europe.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/201406_report_renewables_integration_europe.pdf)

[19] Komisja Europejska „Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A Policy Framework for Climate and Energy in the Period from 2020 to 2030”, styczeń 2014. [http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/ia\\_carried\\_out/docs/ia\\_2014/swd\\_2014\\_0015\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/ia_carried_out/docs/ia_2014/swd_2014_0015_en.pdf)

[20] Eurostat, Statystyki zużycia energii elektrycznej. <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=en&pco de=ten00094>