

# ШЛЯХ ДО 100% ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ В УКРАЇНІ

Wärtsilä Energy

Київ  
Лютий 2020 р.



# ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПЕРЕХІД ДО 2050

ЦЕ РЕАЛІСТИЧНО? СКІЛЬКИ ЦЕ КОШТУВАТИМЕ?  
ЯКИЙ КІНЦЕВИЙ РЕЗУЛЬТАТ?

Два сценарії:

1. **Найдешевша енергосистема**
  2. **100% відновлювана енергосистема**
- Схожі результати
  - Нема нового будівництва традиційної потужності
  - Багато СЕС, ВЕС, батарей, маневреної генерації
  - Природний газ замінюється синтетичним
  - Встановлена потужність зростає до 107 ГВт та 124 ГВт відповідно до сценарію





## ПОПЕРЕДНЄ ДОСЛІДЖЕННЯ - 2018

- Високоточна хронологічна модель диспетчеризації ОЕС України
- Пошук короткотермінових рішень: оптимальний обсяг маневреної газової генерації для балансування ВДЕ
- → Вигоди для країни від побудови 2 ГВт маневреної газової потужності
  - Повніше використання вітрової і сонячної потужності 65 → 90 %
  - €300 млн річної економії
  - Більше виробництво атомної енергії (2 млрд кВт \* год)
  - Викиди CO<sub>2</sub> 34 → 25 млн тон (26,5 %)
  - Уможливлення подальшого росту ВДЕ
- Модель **не визначала** оптимального довгострокового плану розвитку енергосистеми України







## ПОТОЧНА СИТУАЦІЯ

### Енергосистема


- Напевне найбільш негнучка система у світі
- Застарілі вугільні та атомні станції

### Відновлювані джерела

- Вже впливають на стійкість системи
- Диспетчерські обмеження неминучі
- Але чи будуть нові інвестиції?

### Джерела маневреності – нема стимулів до інвестування

- Ринок електроенергії все ще регульований
- Механізмів підтримки нема



ЯК ЦЕ  
ВЛАДНАТИ?

## ЗЕЛЕНИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПЕРЕХІД

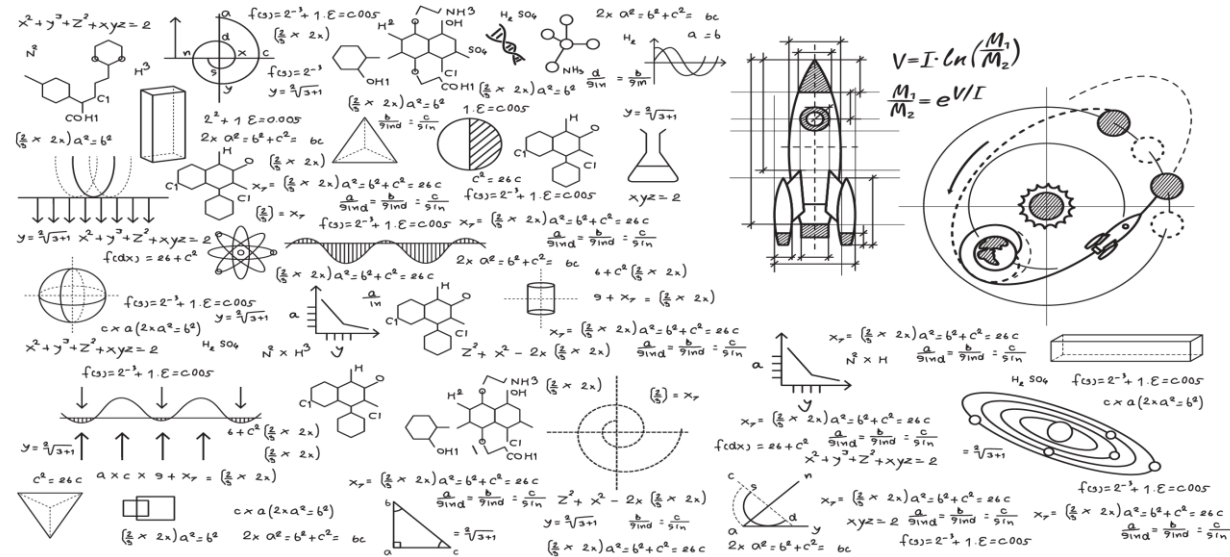
- Зобов'язання щодо ВДЕ в Угоді про Асоціацію
- Мінекоенерго оголосило Концепцію енергетичного переходу до 2050 р.
- Намір рухатись у контексті Європейської зеленої угоди
- Уряд зобов'язався розробити довгострокову енергетичну стратегію
- Галузь очікує на державну політику щодо розвитку ВДЕ та засобів балансування

# ЙДЕМО ДО 100% ВДЕ....?



## Зараз ми у захваті від того, що на світі повно **оцих візонерів**

### ...але вам знадобиться дещо з цього...



The collage contains various mathematical and scientific elements:

- Formulas:  $x^2 + y^2 + z^2 + xyz = 2$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $f(x) = 2^{-x}$ ,  $y = \sqrt[3]{3+1}$ ,  $(\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2$ ,  $2^x \cdot 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $2x \cdot a^2 = b^2 + c^2 = bc$ ,  $(\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2 + c^2 = 26c$ ,  $c^2 = 26c$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $x \cdot y \cdot z = 2$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $x_p = (\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2 + c^2 = 26c$ ,  $\frac{a}{91nd} = \frac{b}{91nd} = \frac{c}{91n}$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $x_p = (\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2 + c^2 = 26c$ ,  $\frac{a}{91nd} = \frac{b}{91nd} = \frac{c}{91n}$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $c \times a (2x a^2 = b^2)$ ,  $H_2 SO_4$ ,  $N^2 \times H^3$ ,  $x_p = (\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2 + c^2 = 26c$ ,  $\frac{a}{91nd} = \frac{b}{91nd} = \frac{c}{91n}$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $c \times a (2x a^2 = b^2)$ ,  $(\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2$ ,  $2x \cdot a^2 = b^2 + c^2 = bc$ ,  $\frac{a}{91nd} = \frac{b}{91nd} = \frac{c}{91n}$ ,  $(\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2 + c^2 = 26c$ ,  $y = \sqrt[3]{3+1}$ ,  $(\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2 + c^2 = 26c$ ,  $\frac{a}{91nd} = \frac{b}{91nd} = \frac{c}{91n}$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $x_p = (\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2 + c^2 = 26c$ ,  $\frac{a}{91nd} = \frac{b}{91nd} = \frac{c}{91n}$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $c \times a (2x a^2 = b^2)$ ,  $(\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2$ ,  $2x \cdot a^2 = b^2 + c^2 = bc$ ,  $\frac{a}{91nd} = \frac{b}{91nd} = \frac{c}{91n}$ ,  $(\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2 + c^2 = 26c$ ,  $x \cdot y \cdot z = 2$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $x_p = (\frac{2}{3} \times 2x) a^2 = b^2 + c^2 = 26c$ ,  $\frac{a}{91nd} = \frac{b}{91nd} = \frac{c}{91n}$ ,  $f(x) = 2^{-x} + 1 \cdot E = c \cdot 0.005$ ,  $\frac{a}{91nd} = \frac{b}{91nd} = \frac{c}{91n}$

Diagrams include:

- A rocket launch diagram with formula  $V = I \cdot \ln(\frac{M_1}{M_2})$  and  $\frac{M_1}{M_2} = e^{V/I}$ .
- A diagram of a satellite or probe orbiting Earth.
- A diagram of a multi-planet system.
- Chemical structures of organic molecules.
- Geometric shapes like triangles and spheres.
- Graphs and plots showing curves and data points.



# ДОВГОСТРОКОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ В УКРАЇНІ 2020 - 2050



Wärtsilä є світовим лідером у моделюванні енергосистем з великою часткою ВДЕ



Потужний програмний комплекс для симуляції енергосистем

Визначення найоптимальнішої за собівартістю стратегії розвитку енергосистеми чи варіантів покриття навантажень на певному часовому горизонті за певними вхідними даними

**PLEXOS** знаходить для ОЕС України оптимальний шлях до кінцевої мети – 100% відновлюваної енергосистеми



# МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ У PLEXOS

## ВХІДНІ ДАНІ

### Дані системи:

- Види палива
- Погодинний попит + швидкість зростання попиту
- Необхідні резерви
- Система передачі

### Дані по генеруючих потужностях:

- Електростанції з параметрами
- Обмеження диспетчеризації
- Профілі навантаження ВДЕ/ГЕС

### Кандидати:

- Потенційні кандидати для нового будівництва з CAPEX /характеристиками

### Сценарії:

- Цілі по CO<sub>2</sub>
- Здешевлення ВДЕ
- Політичні рішення по системі
- Вимушене будівництво

## МОДЕЛЬ

Вхідні дані та визначені сценарії формують математичну задачу для платформи PLEXOS



## Оптимізація системи за допомогою PLEXOS

Вирішувач комплексу PLEXOS оптимізує, тобто знаходить найдешевше рішення для визначених сценаріїв. Враховуються всі задані обмеження реального часу. Погодинне покриття та нові потужності

## ВИХІДНІ ДАНІ

### На виході

- Погодинна диспетчеризація енергії
- Обсяг резервів
- Змінні, умовно постійні, капітальні витрати
- Споживання палива
- Викиди (CO<sub>2</sub>)
- Надійність системи
- Потреба в новій потужності

- Приведена вартість e/e за життєвий цикл
- Чиста дисконтована вартість системи
- Інше...





## ВАЖЛИВЕ ЗАУВАЖЕННЯ

Коли в енергосистемі зростає частка ВДЕ

- Вітер і сонце виробляють все більше електроенергії
- Велика мінливість виробітку в залежності від погоди

Змінюється роль газових та вугільних ТЕС

- Виробляють решту електроенергії
- Зменшується КВВП. Балансування вітру та сонця



- **НЕОБХІДНО** включати до моделі динамічні характеристики і обмеження вугільних та газових ТЕС, наприклад,
  - Тривалість пуску та зупинки (хвилин)
  - Швидкість навантаження та розвантаження (МВт/хв.)
  - Найменше стійке навантаження (%)
  - Мінімальний час роботи та зупинки (хв.)
- Інакше коректність результатів різко падає при зростанні частки ВДЕ!





# ШЛЯХ ДО 100 ВХІДНІ ДАНІ МОДЕЛІ



# ВХІДНІ ДАНІ



## Встановлена теплова потужність

| Характеристика                                 | Одиниці    | АЕС     | Вуг. ТЕС | Вуг. ТЕЦ | Газ. ТЕЦ |
|--|------------|---------|----------|----------|----------|
| Ген. одиниці                                   |            | 15      | 72       | -        | -        |
| Одинична потужність                            | MW         | 390-950 | 65-750   | -        | -        |
| Загальна потужність                            | GW         | 13.1    | 17.2     | 1.1      | 3.0      |
| Мінімальне стійке навантаження                 | %          | 95      | 70       | 70       | 70       |
| Питома витрата палива при повному навантаженні | GJ/MWh     | 11.0    | 12.4     | 11.5     | 8.6      |
| Питома витрата палива при навантаженні 50%     | GJ/MWh     | -       | 14.4     | 13.0     | 11.3     |
| Змінні експлуат. витрати                       | \$/MWh     | 5.0     | 5.6      | 7.0      | 7.0      |
| Вартість пуску                                 | \$/start   | 1000000 | 3000     | 3041     | 31643    |
| Вартість навантаження                          | \$/MW      | 200     | 25       | 25       | 25       |
| Вартість розвантаження                         | \$/MW      | 200     | 25       | 25       | 25       |
| Постійні експлуат. витрати                     | \$/kW/year | 85.0    | 10.8     | 27.5     | 27.5     |
| Час простоїв через ремонт                      | %          | 16.7    | 9.0      | 13.0     | 13.0     |
| Час аварійних відключень                       | %          | 2.5     | 1.4      | 2.5      | 2.5      |

## Інша встановлена потужність

|                        | Одиниці | ГЕС  | ГАЕС |
|------------------------|---------|------|------|
| Встановлена потужність | МВт     | 4500 | 1500 |
| Ємність накопичення    | ГВт год | 1    | 8    |

| Паливо  | Ціна \$/ГДж |
|---------|-------------|
| Вугілля | 2.7         |
| Уран    | 0.6         |
| Газ     | 8.8         |
| Біомаса | 4.0         |

Джерело: Укренерго, генеруючі компанії

# КАНДИДАТИ НА НОВУ ПОТУЖНІСТЬ

Flexos може додати будь-який обсяг потужності цих технологій до енергосистеми, якщо це економічно доцільно

## Теплові кандидати

|                       | Одиниці    | Нові двигуни | Нові АЕС | Нові ПГУ | Нові ГТУ | Нові паротурб біо | Нові паротурб вугільні | Нові паротурб газові |
|-----------------------|------------|--------------|----------|----------|----------|-------------------|------------------------|----------------------|
| Вартість будівн.      | \$/kW      | 750          | 5500     | 1200     | 700      | 2000              | 1500                   | 1800                 |
| Вартість капіталу     | %          | 10           | 10       | 10       | 10       | 10                | 10                     | 10                   |
| Економ. строк служби  | років      | 20           | 20       | 20       | 20       | 20                | 20                     | 20                   |
| Змінні експл. витрати | \$/MWh     | 5            | 5        | 6        | 6        | 25                | 25                     | 25                   |
| Пост. Експл витрати   | \$/kW/year | 11           | 85       | 15       | 11       | 15                | 18                     | 15                   |

**BEC LCOE у 2020 р.: 45 USD/MWh**

**CEC LCOE у 2020 р.: 70 USD/MWh**

**КВВП: BEC 38.5%, CEC 14.9%**

**Середньозважена вартість капіталу 13%**

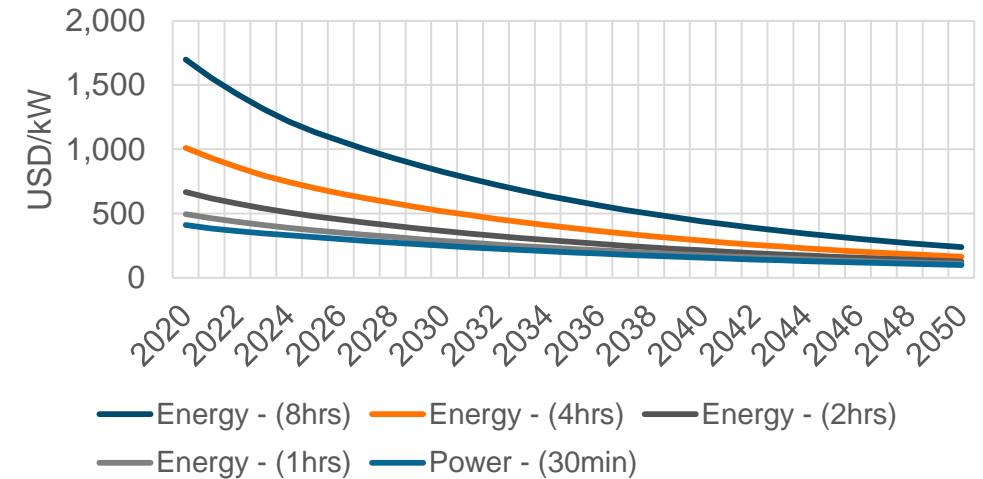
**Економічний строк служби 20 років**

**Прогноз вартості технологій: Bloomberg для CEC і BEC (для Німеччини)**

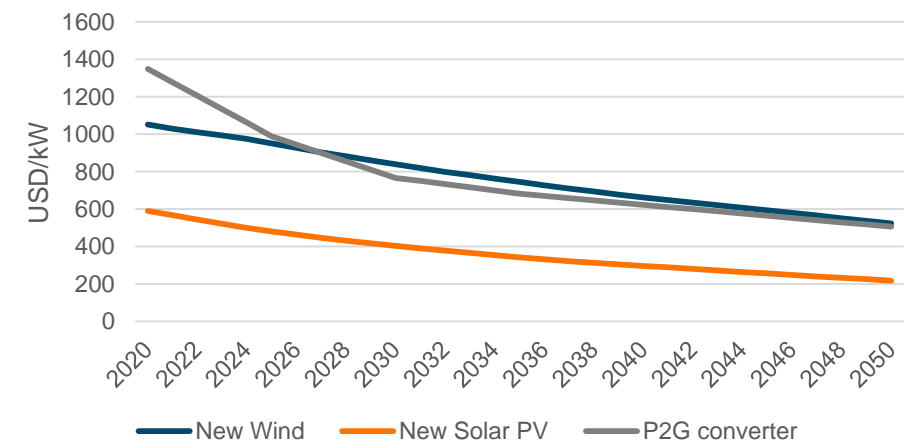
**Прогноз для P2G: Lappeenranta University**

## Капітальна вартість технологій

### Батареї



### BEC, CEC & P2G



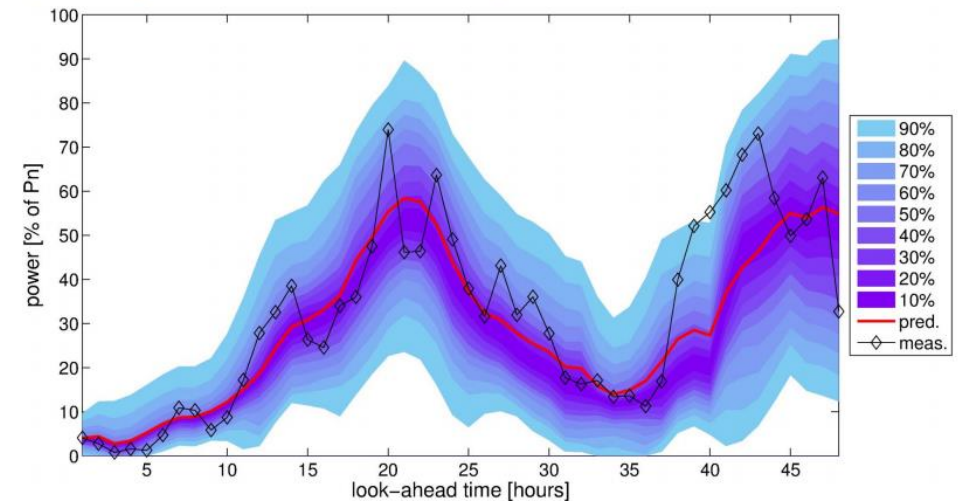
# ОПЕРАЦІЙНІ РЕЗЕРВИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Довгострокова модель розширення Plexos включає операційні резерви

- **Первинні та вторинні резерви**
  - Заміщення найбільшого блоку
  - Первинний резерв надається генераторами, що обертаються
  - Вторинний резерв може надаватися генераторами без обертання, якщо час до синхронізації не більше 30 сек
- **Резерв похибки прогнозу ВДЕ**
  - 20% від поточного рівня виробітку ВЕС і СЕС (МВт)

Why Is Forecasting Crucial to Integrating Variable RE to the Grid?

*Operating with increased uncertainty...*



**Average day ahead error: 8%-10% for wind farm, 4% for system**  
**Ramp error: Over 50% for large ramps**

Source: Pierre Pinson, DTU, Denmark

Джерело: NREL report



**ШЛЯХ ДО 100**

**РЕЗУЛЬТАТИ  
МОДЕЛЮВАННЯ**



## ДВА СЦЕНАРІЇ НА 2020-2050

### Сценарій 1: Оптимізована собівартість

- Мінімізація загальних витрат енергосистеми
- Нема мети декарбонізації
- Нема цілей по ВДЕ

### Сценарій 2: 100% ВДЕ у 2050 р.

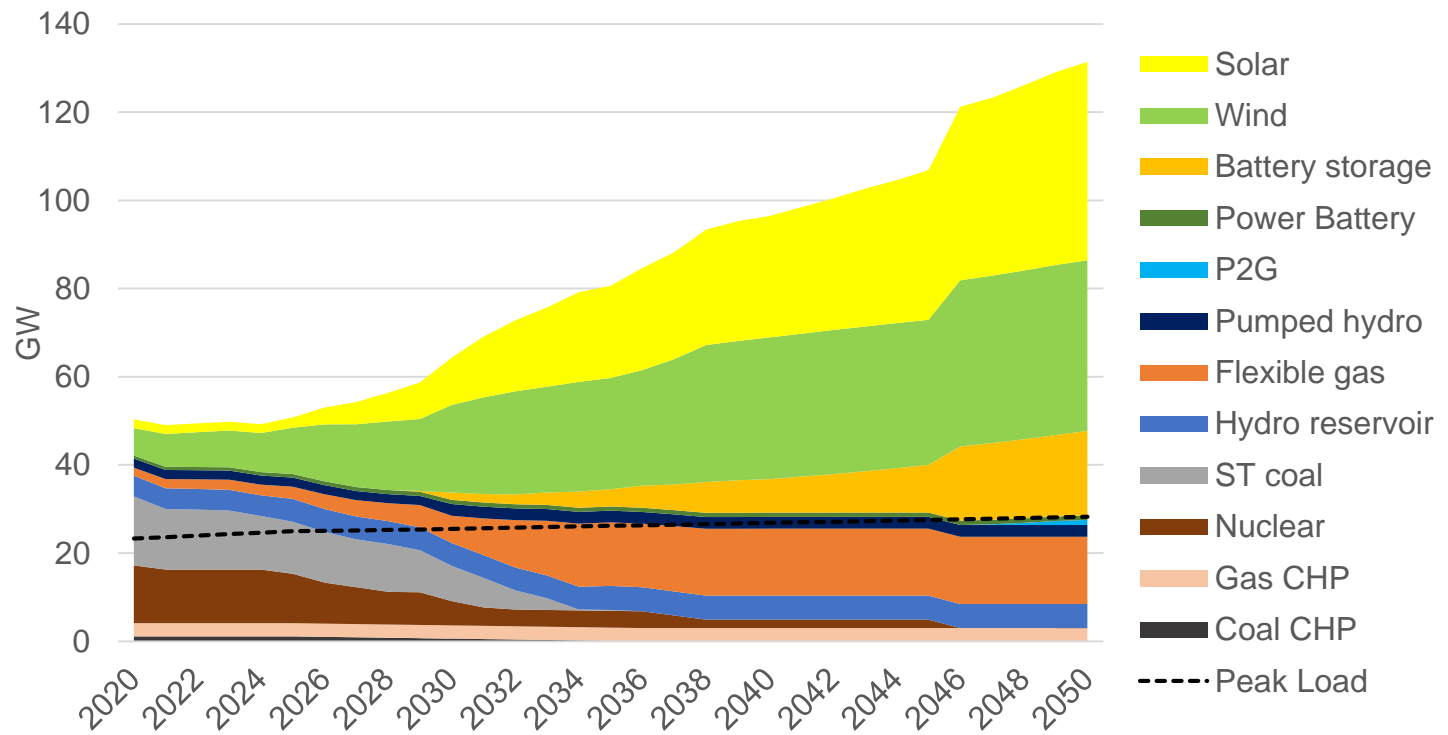
Викиди CO<sub>2</sub> на рівні системи досягають нуля до 2050 р.

### Спільні припущення для обох сценаріїв

- Існуючі блоки АЕС та ТЕС виводяться за планом (якщо є) або за очікуваним граничним терміном експлуатації
- Втрати в мережі та обсяги експорту виключені
- Plexos вільно обирає нову потужність поміж технологій-кандидатів
- Попит на всьому горизонті моделювання забезпечується з адекватними резервами

# СЦЕНАРІЙ 1: ОПТИМІЗОВАНА СОБІВАРТІСТЬ

## Розвиток потужностей ОЕС України до 2050 р.

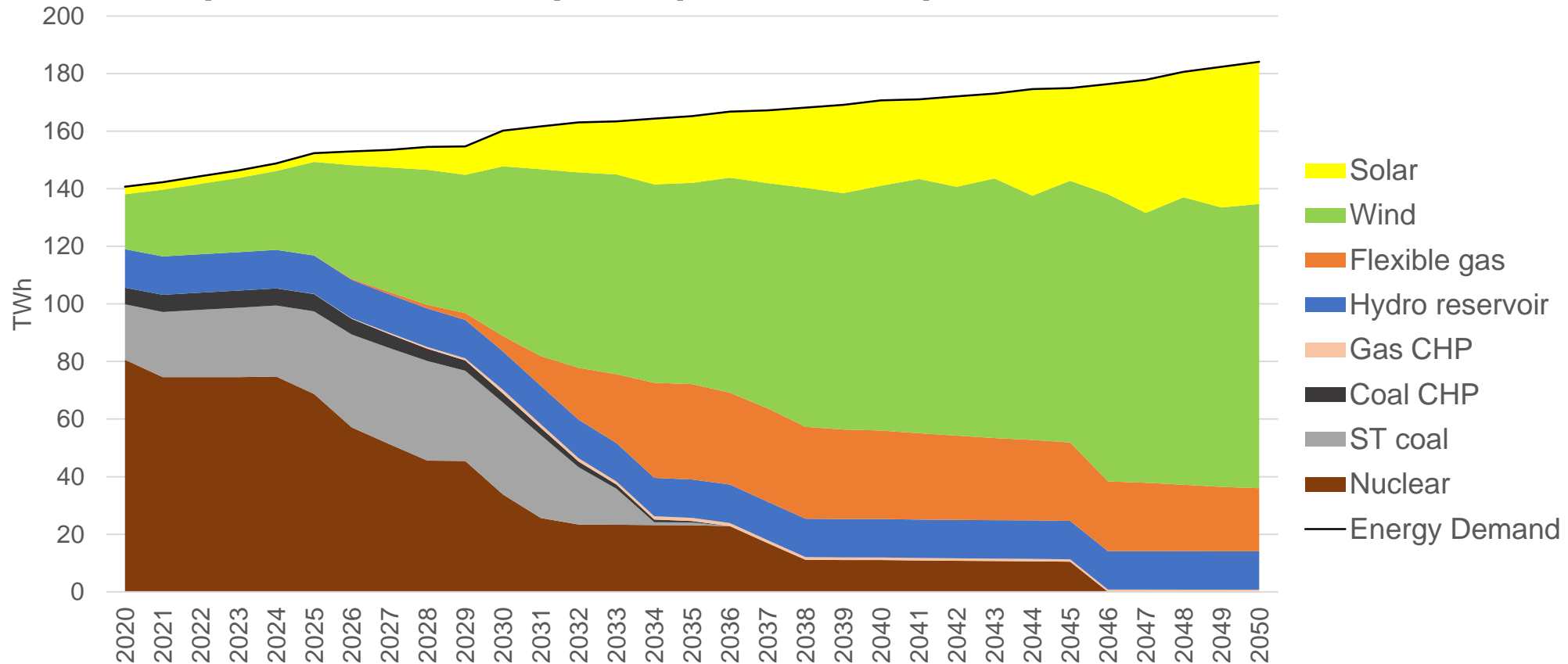


| Встановлена потужність, 2050   | ГВт        |
|--------------------------------|------------|
| СЕС                            | 45         |
| ВЕС                            | 39         |
| Маневрений газ                 | 15         |
| ГЕС                            | 6          |
| ТЕЦ газ                        | 3          |
| <b>Генерація загалом</b>       | <b>107</b> |
|                                |            |
| ГАЕС                           | 3          |
| P2G                            | 1          |
| Батареї ємності                | 19         |
| Батареї потужності             | 1          |
| <b>Перенос енергії загалом</b> | <b>24</b>  |
| <b>Система загалом</b>         | <b>131</b> |

- Це найдешевша енергосистема з усіх можливих на період до 2050 р.
- Вже зараз – будівництво 5 ГВт ВЕС, 2 ГВт маневреної газової потужності та 0,7 ПЦ батарей потужності
- Масштабне будівництво СЕС після 2025 р. через здешевшання СЕС і систем накопичення
- Швидке зростання ВДЕ та маневреного газу після 2030 р. розмір системи = 131 ГВт у 2050 р.

# СЦЕНАРІЙ 1: ОПТИМІЗОВАНА СОБІВАРТІСТЬ

## Виробництво електроенергії до 2050 р.

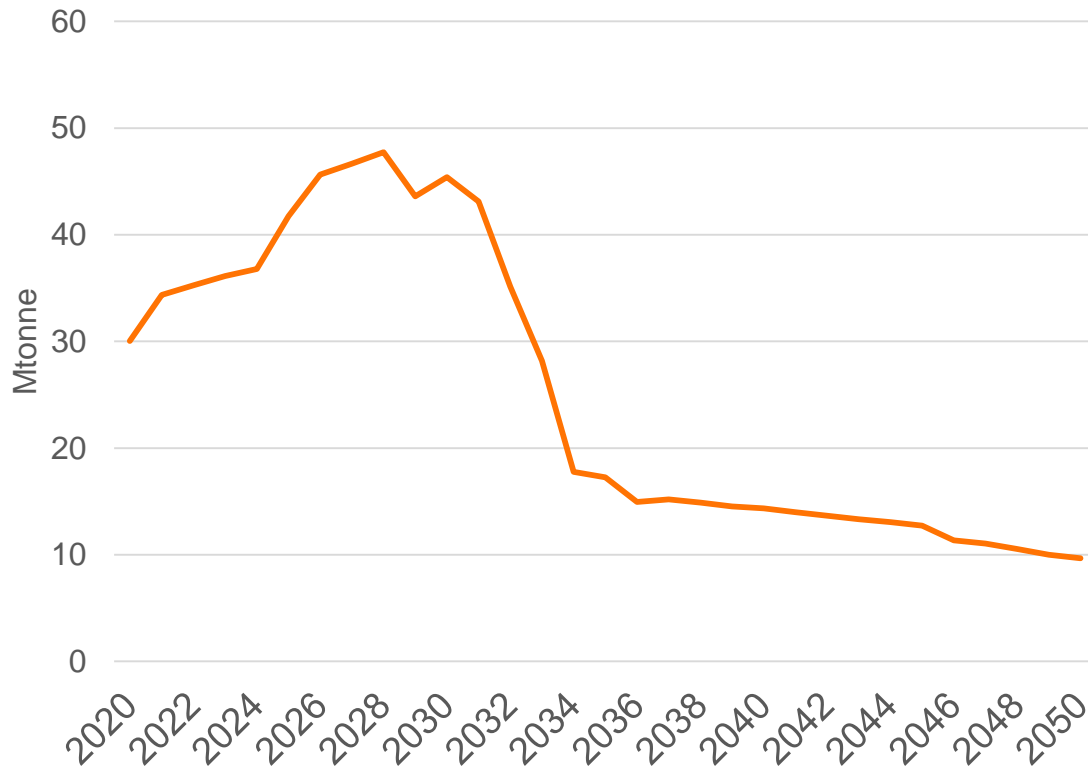


**Закриття АЕС викликає невелике зростання вугільної генерації на період до заміни базових потужностей маневреними газовими потужностями**



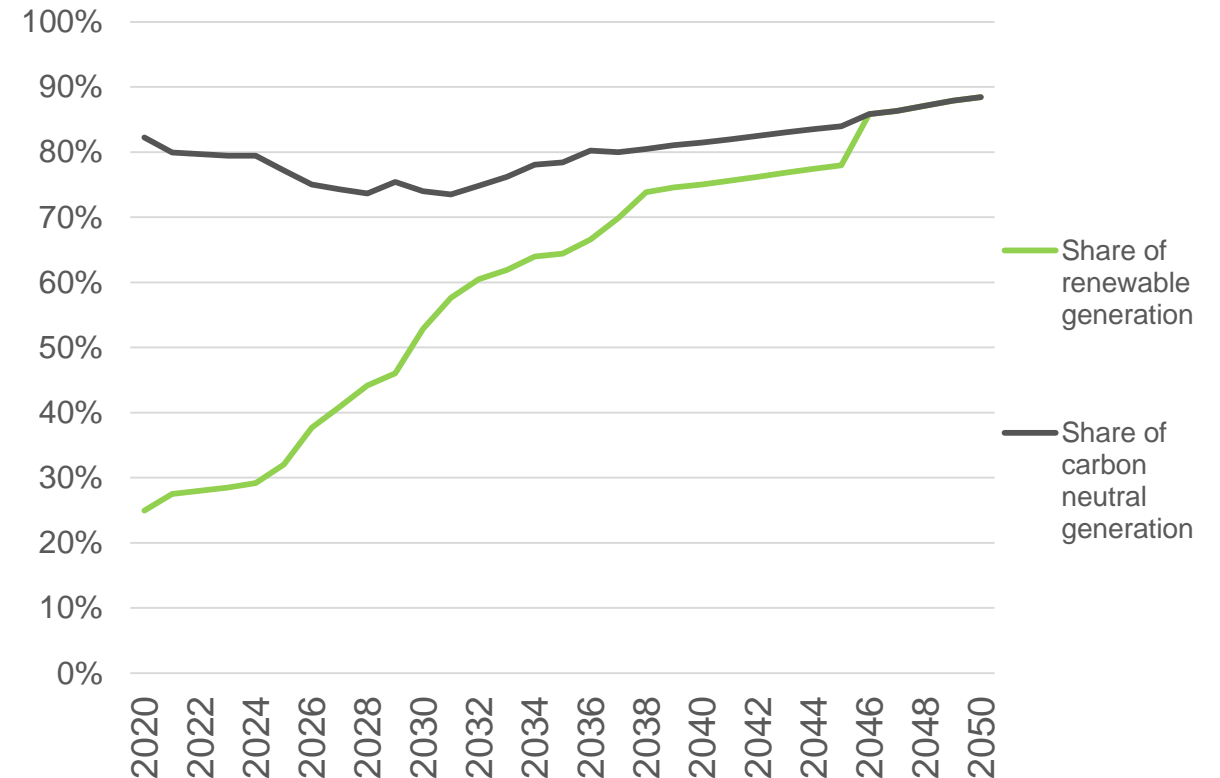
# СЦЕНАРІЙ 1: ОПТИМІЗОВАНА СОБІВАРТІСТЬ

## Річні викиди CO2



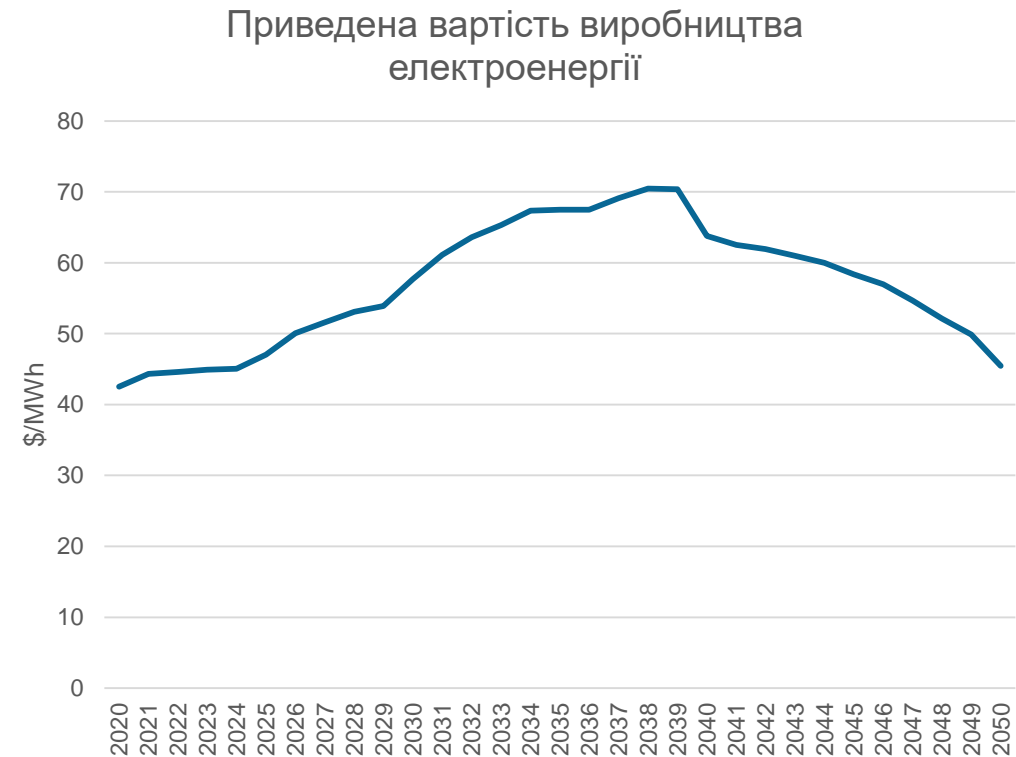
- На початку викиди зростають через збільшення вугільної генерації
- Після виводу ТЕС у 2035 р. викиди сильно зменшуються
- До 2050 р. викиди падають на 50% від рівня 2020 р.

## Частка відновлюваної енергії



До 2050 р. енергосистема з оптимальним за собівартістю складом обладнання може досягти лише 88% ВДЕ

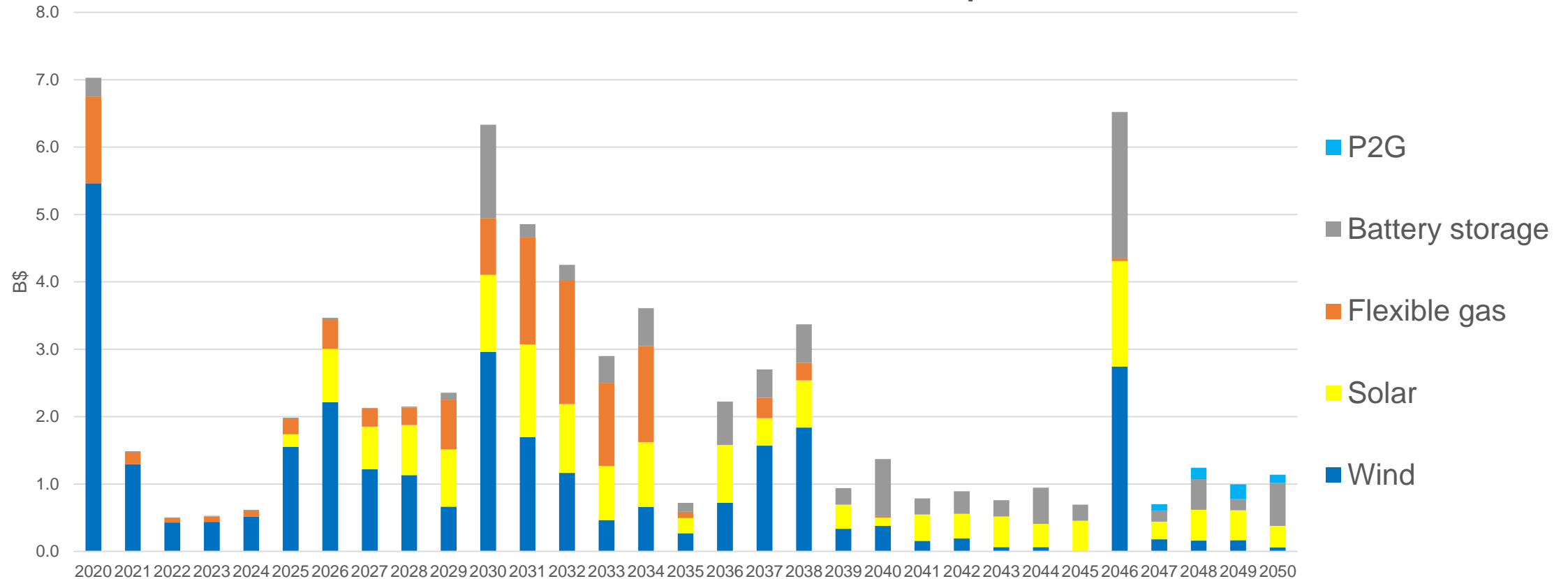
# СЦЕНАРІЙ 1: ОПТИМІЗОВАНА СОБІВАРТІСТЬ



- Капвитрати на нові потужності включені, але 0 (нуль) для існуючих станцій
- Великі інвестиції в нову потужність підвищують вартість генерації
- Зростання частки ВДЕ супроводжується поступовим падінням змінних витрат
- Частково компенсується зменшенням експлуатаційних витрат
- Собівартість виробництва електроенергії зростатиме у будь-якому випадку, коли амортизовані активи заміщуються новими

# СЦЕНАРІЙ 1: ОПТИМІЗОВАНА СОБІВАРТІСТЬ

## Річні капітальні інвестиції



- Економічно доцільно вже зараз будувати ВЕС, маневрений газ і батареї потужності
- Основні інвестиції у вітер мають відбутися до 2040 р.
- Великі інвестиції у сонце – після 2026 р, разом з батареями ємності. Затримка через падіння цін
- Закриття останніх блоків АЕС у 2045 р. викликає пік інвестицій

**ШЛЯХ ДО 100**

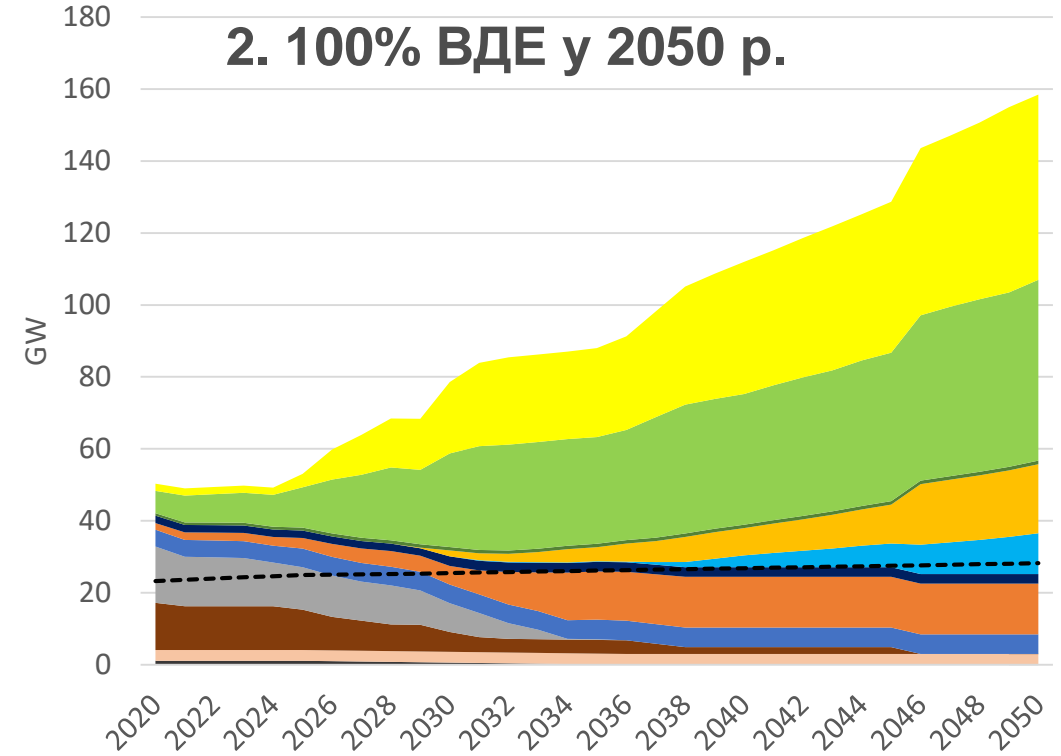
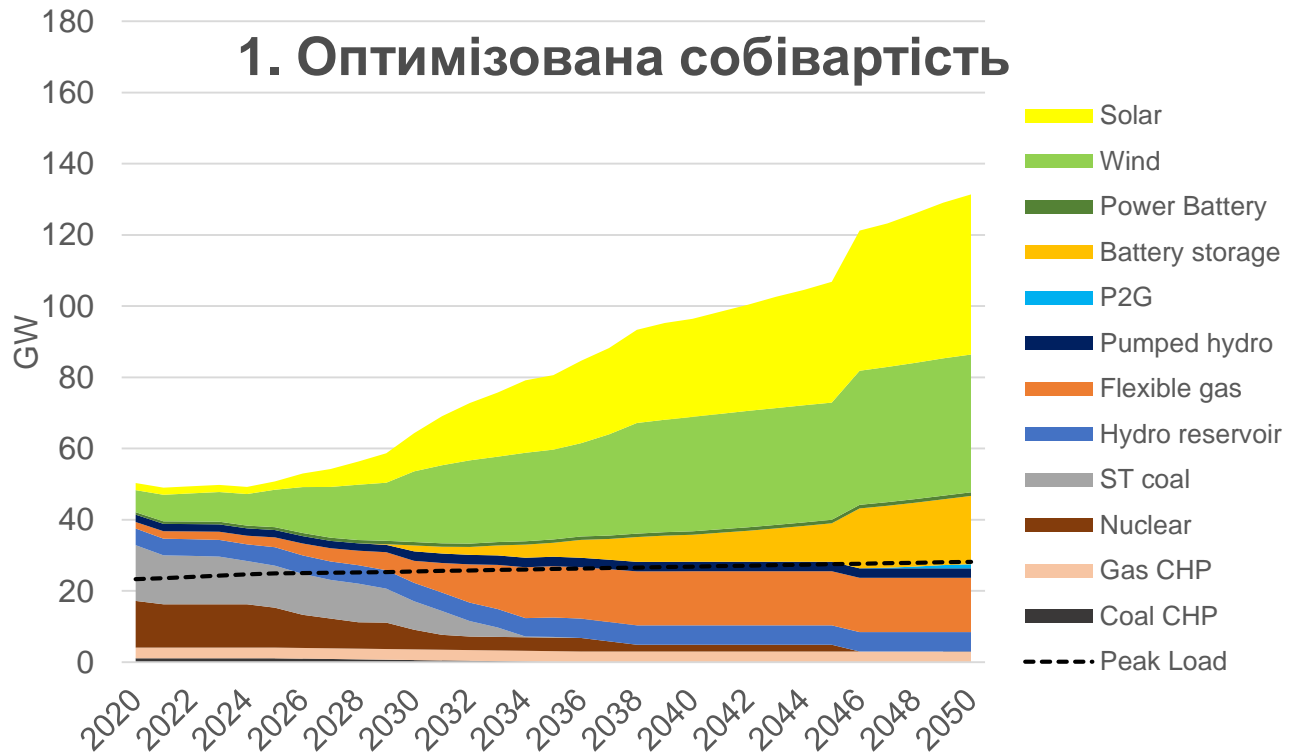
**СЦЕНАРІЙ 2. 100% ВДЕ У 2050**





# СЦЕНАРІЙ 2: 100% ВДЕ

## Розвиток потужностей ОЕС України до 2050 р.



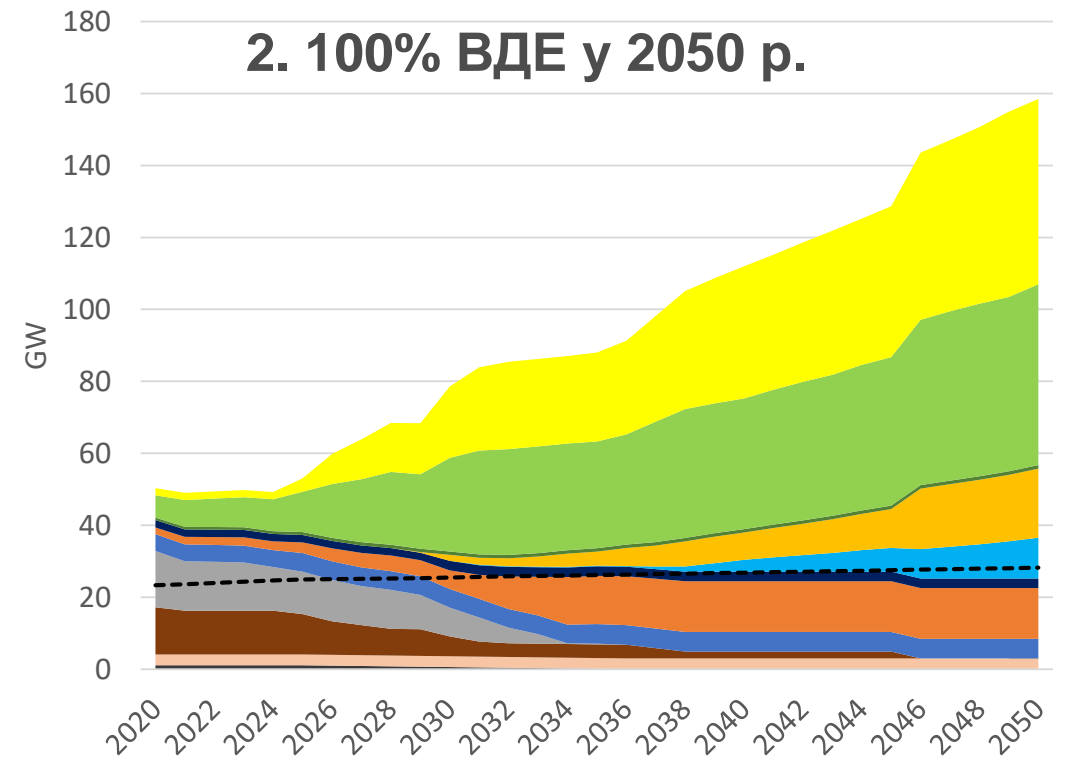
### Вуглецево-нейтральна система потребує:

- На 17 ГВт більше вітру і сонця
- Обсяг потужностей Power-to-gas достатній для виробництва палива для 100% безвуглецевої генерації

# СЦЕНАРІЙ 2: 100% ВДЕ

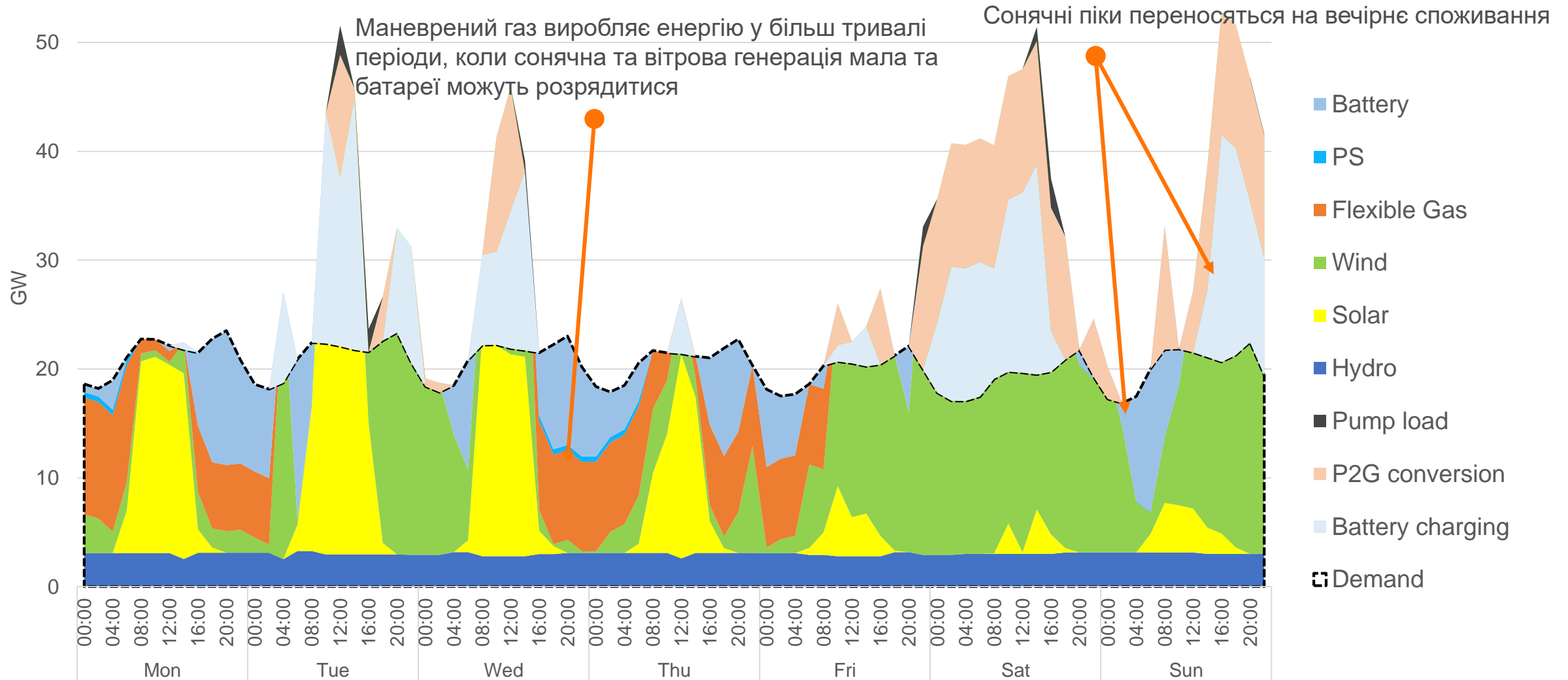
## Нові потужності

| Встановлена потужність, 2050   | Сценарій 1, ГВт | Сценарій 2, ГВт |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|
| СЕС                            | 45              | 51              |
| ВЕС                            | 39              | 50              |
| Маневрений газ                 | 15              | 14              |
| ГЕС                            | 6               | 6               |
| ТЕЦ газ                        | 3               | 3               |
| <b>Генерація загалом</b>       | <b>107</b>      | <b>124</b>      |
|                                |                 |                 |
| ГАЕС                           | 3               | 3               |
| P2G                            | 1               | 11              |
| Батареї ємності                | 19              | 23              |
| Батареї потужності             | 1               | 1               |
| <b>Перенос енергії загалом</b> | <b>24</b>       | <b>38</b>       |
| <b>Система загалом</b>         | <b>131</b>      | <b>162</b>      |



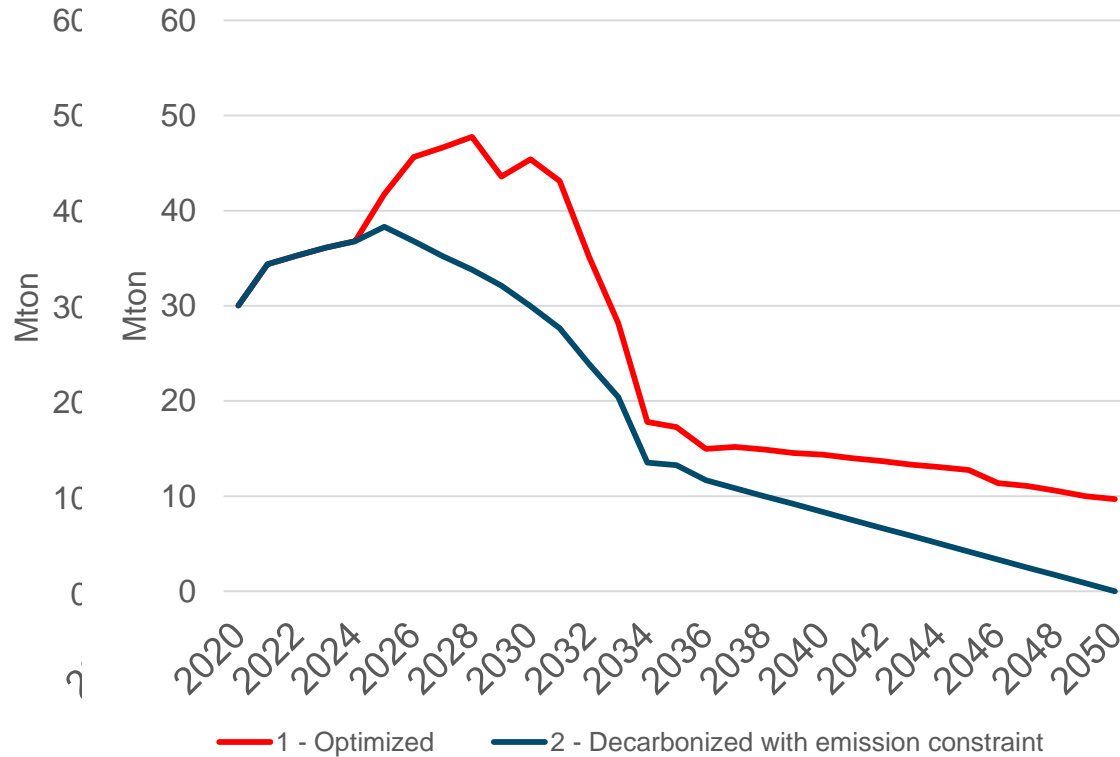
# СЦЕНАРІЙ 2: 100% ВДЕ

## Диспетчеризація одного тижня у 2050 р.

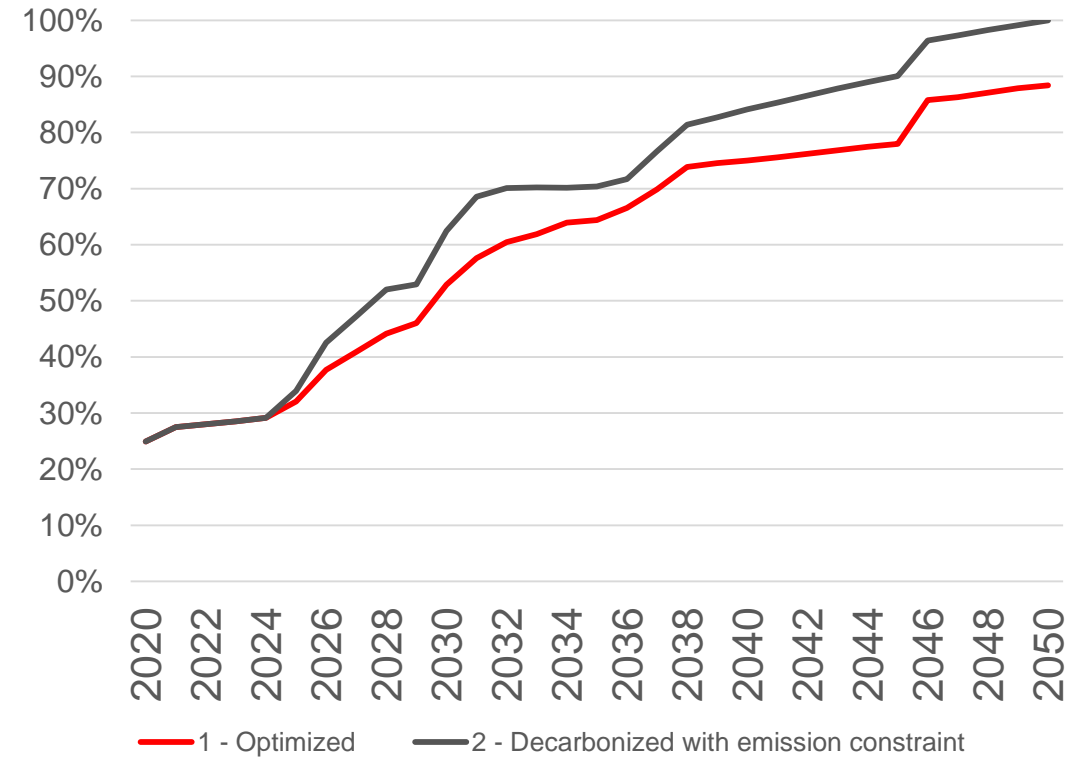


# ПОРІВНЯННЯ СЦЕНАРІЇВ

## Річні викиди



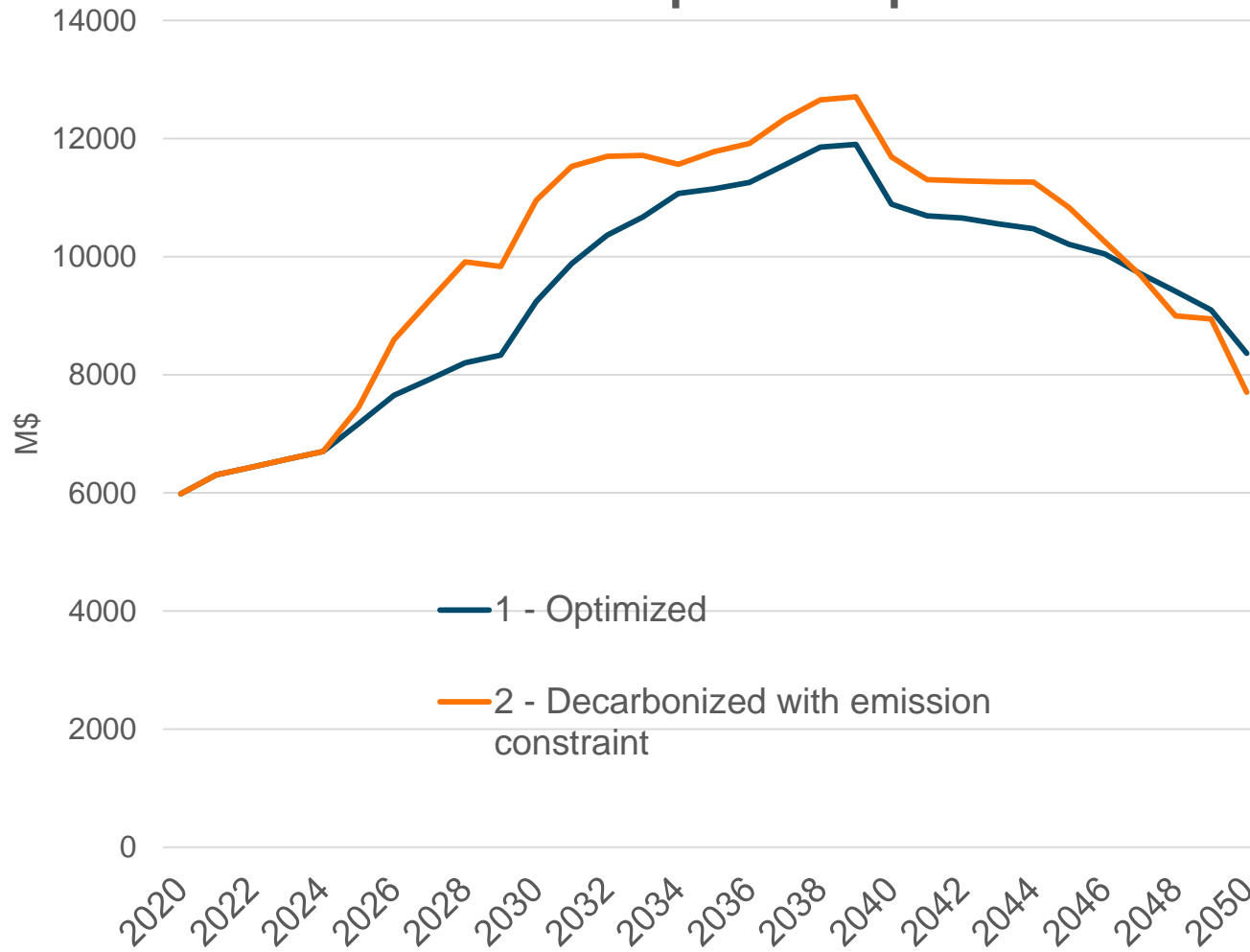
## Частка відновлюваної енергії





# ПОРІВНЯННЯ СЦЕНАРІЇВ

## Загальні витрати енергосистеми



Примусова декарбонізація енергосистеми до 2050 р. збільшує загальні видатки на **9%**

# R2X – СИНТЕТИЧНІ ВУГЛЕЦЕВО-НЕЙТРАЛЬНІ ПАЛИВА

## Рушійні сили

### Клімат і якість повітря

- Перехід до електрики як основного джерела енергії
- Повна електрифікація транспорту протягом 20 років неможлива (морський, авіаційний, вантажний автомобільний ...)
- Ресурси біопалива недостатні у глобальному масштабі

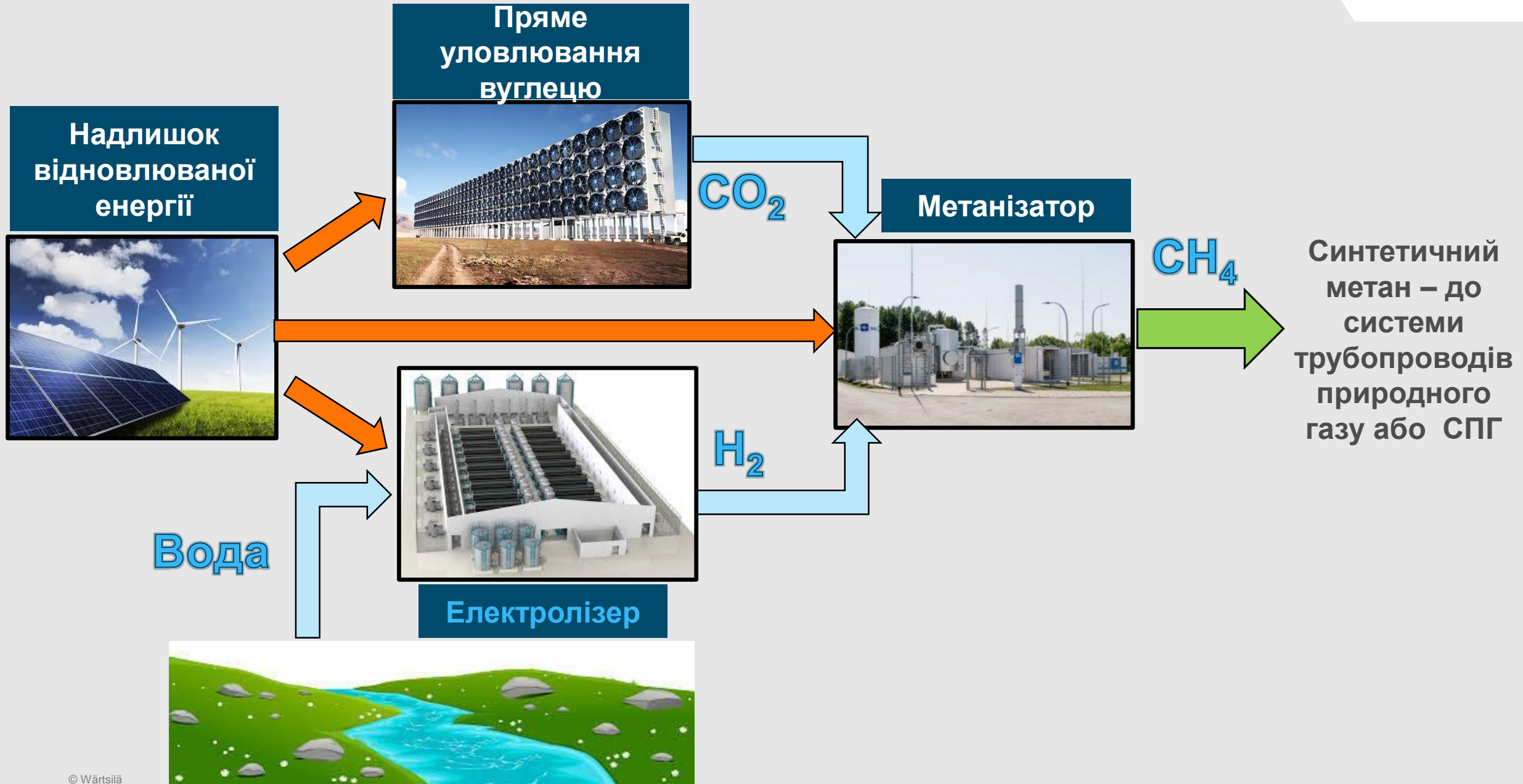
### Доступ до дешевої, вуглецево-нейтральної електроенергії (сонячної та вітрової)

- Уможлиблює дешеве виробництво водню

**Цілі 100% ВДЕ для країн, компаній і т. д.**



# ВИРОБНИЦТВО ВІДНОВЛЮВАНОВОГО ПАЛИВА (CH<sub>4</sub>)



## Що відбувається на ринку



BRITISH AIRWAYS



- Мета Shell стати найбільшою електричною компанією у світі (Financial Times 13.3.2019)
- Maersk shipping скорочує викиди до нуля в 2050 р.
- British Airways скорочує викиди вуглецю з 2020 р., IAG інвестує у відновлювані авіаційні палива
- Виробництво синтетичного керосину для Lufthansa
- Carbon Recycling International (CRI) підписала угоду про перший завод CO<sub>2</sub>-To-Methanol в Китаї потужністю 180 тис тон метанолу та СПГ на рік
- Shell, Neste, Wärtsilä, Finnair, St1, Kemira, Finnsementti та LUT University будують промисловий пілотний проект для палива P2X в Joutseno, Фінляндія

German gas industry targets 5 GW of power-to-gas capacity in five years



“ The only possible way to achieve the so much needed decarbonisation in our industry is by fully transforming to new carbon-neutral fuels and supply chains.



Søren Toft, Chief Operating Officer of Maersk

MAY 22, 2019  
AGREEMENT SIGNED FOR CRI'S FIRST CO<sub>2</sub>-TO-METHANOL PLANT IN CHINA



# R2X – СИНТЕТИЧНІ ВУГЛЕЦЕВО-НЕЙТРАЛЬНІ ПАЛИВА

## Ціни та строки

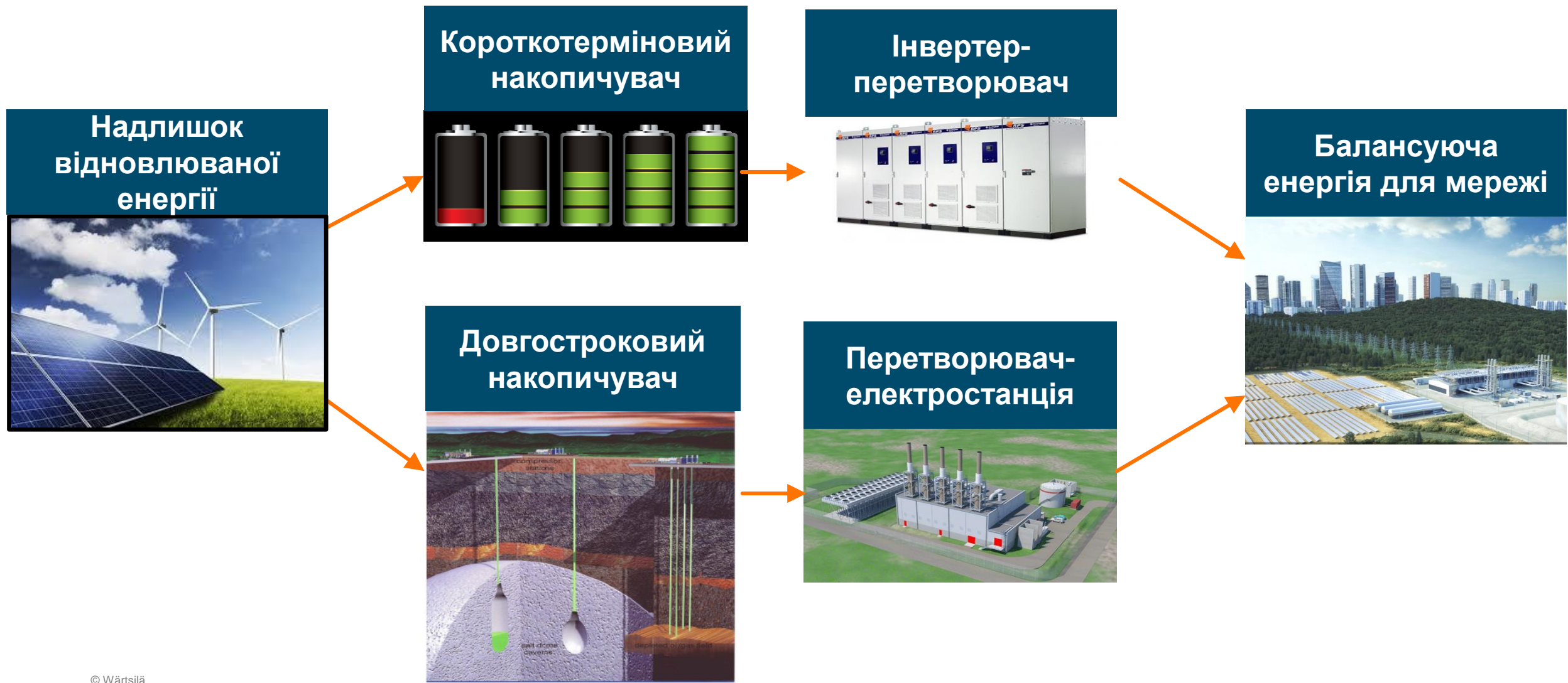
- **Ціни** (промислове виробництво)
  - Метан
    - Викопний (в ЄС) ~ 25 €/MWh
    - Відновлюваний ~ 65 €/MWh
  - Метанол
    - Викопний ~ 400 €/tn
    - Відновлюваний ~ 700 €/tn
  - Авіаційний керосин
    - Викопний ~ 700 €/tn
    - Відновлюваний ~ 2100 – 2800 €/tn <sup>1)</sup>
- **Строки**
  - Великий ринок палива буде створено протягом 2020-х



<sup>1)</sup> Andreas Teir, Renewable products -business area, development director



# ВУГЛЕЦЕВО-НЕЙТРАЛЬНЕ ПАЛИВО ЯК НАКОПИЧУВАЧ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ



# ШЛЯХ ДО 100 ПІДСУМКИ

- До 2050 р. оптимальна енергосистема досягає **88% ВДЕ**
- Найважливіші дії:
  - Термінове будівництво 2 ГВт маневреної газової генерації
  - 700 МВт батарей потужності
  - Великі інвестиції у ВДЕ і балансуючі потужності після 2025 р.
  - Інвестиції в акумуляторні системи після 2030 р.
  - **Жодної нової негнучкої теплової потужності!**
- Примусовий перехід до 100% ВДЕ потребує додатково:
  - На 17 ГВт СЕС і ВЕС
  - На 4 ГВт батарей
  - 10 ГВт Power-to-Gas
  - На 9% більше загальних видатків енергосистеми