

**Удосконалення роботи ринку електроенергії та інтеграція  
з енергооб'єднанням європейських країн ENTSO-E**

# ***Комплексний підхід до резервування ЕЕС з відновлюваними джерелами енергії***

---

*ЛЕЖНЮК ПЕТРО ДЕМ'ЯНОВИЧ, Д.Т.Н., ПРОФЕСОР ВІННИЦЬКОГО НТУ*

*КОМАР В'ЯЧЕСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ, Д.Т.Н., ПРОФЕСОР ВІННИЦЬКОГО НТУ*

*РУБАНЕНКО ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА, ДОКТОРАНТКА ВІННИЦЬКОГО НТУ,*

*ЛЕСЬКО ВЛАДИСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ, К.Т.Н., ДОЦЕНТ ВІННИЦЬКОГО НТУ,*

*КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ І СИСТЕМ*

# Тенденції до зміни вст ановленої пот ужност і ВДЕ в умовах реалізації ст рат егії декарбонізації

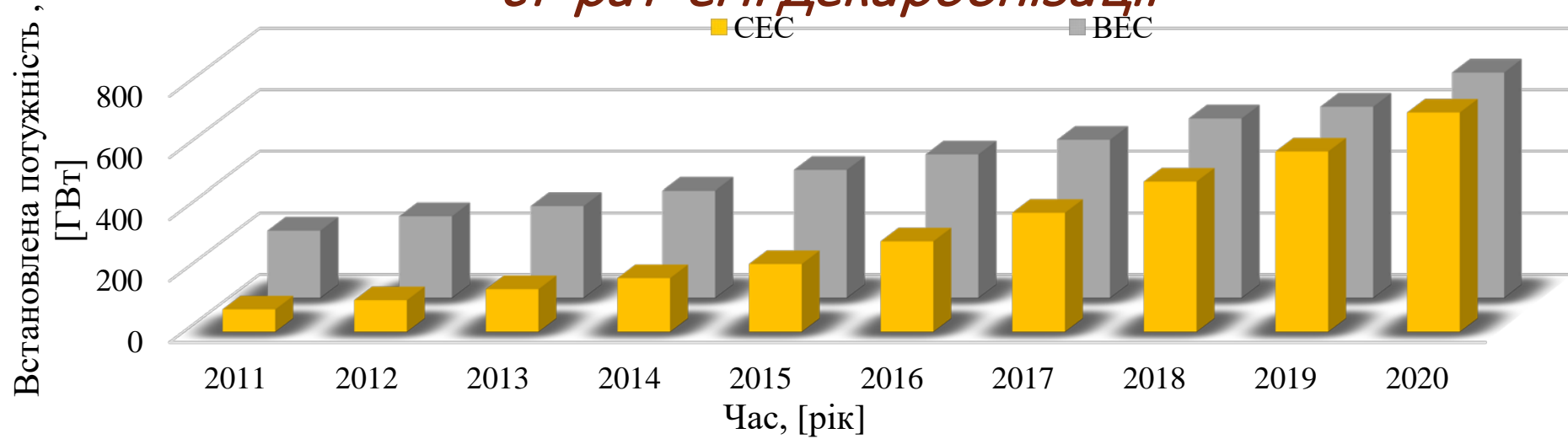


Рис. 2.1. Встановлена потужність CEC і BEC в світі за даними IRENA.

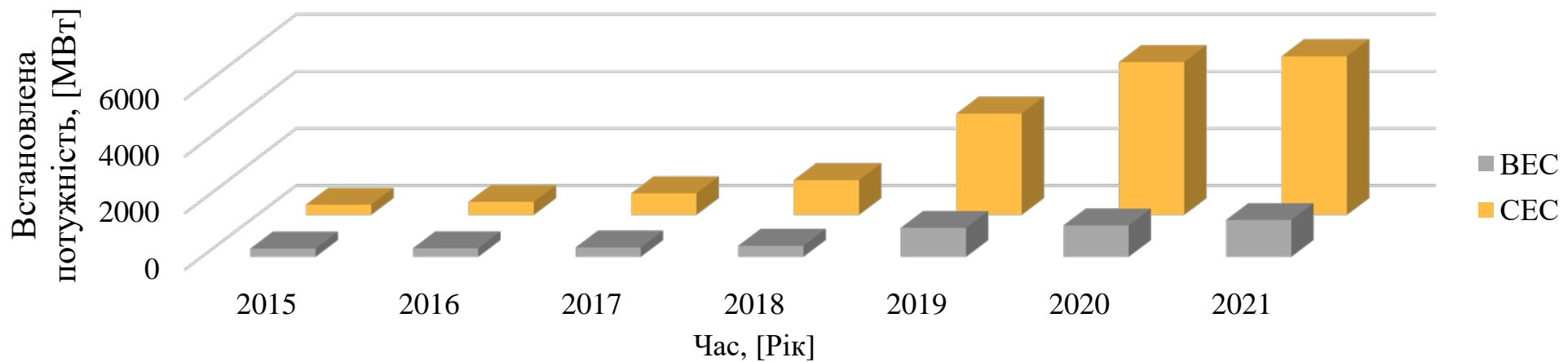


Рис. 2.2. Встановлена потужність ВДЕ в Україні за 2015 – 2021 рр. за даними УКРЕНЕРГО.

# 1.5. Формування критерію оптимальності при керуванні ЕЕС з ВДЕ з врахуванням резервування

$$P_{ЦЖ}(t) + \sum_{i=1}^n P_i(t) - \sum_{j=1}^m P_{ТПj}(t) - \Delta P(t) \pm P_{нак.}(t) = 0, \quad (3.1)$$

де  $P_{ЦЖ}(t)$  – потужність, що передається в ЕЕС від централізованих джерел електроенергії;

$P_i(t)$  – генерування ВДЕ в ЕЕС;

$P_{ТПi}(t)$  – навантаження трансформаторних підстанцій;

$n$  – кількість ВДЕ в ЕЕС;

$m$  – кількість підстанцій;

$P_{нак.}(t)$  – потужність накопичувачів.

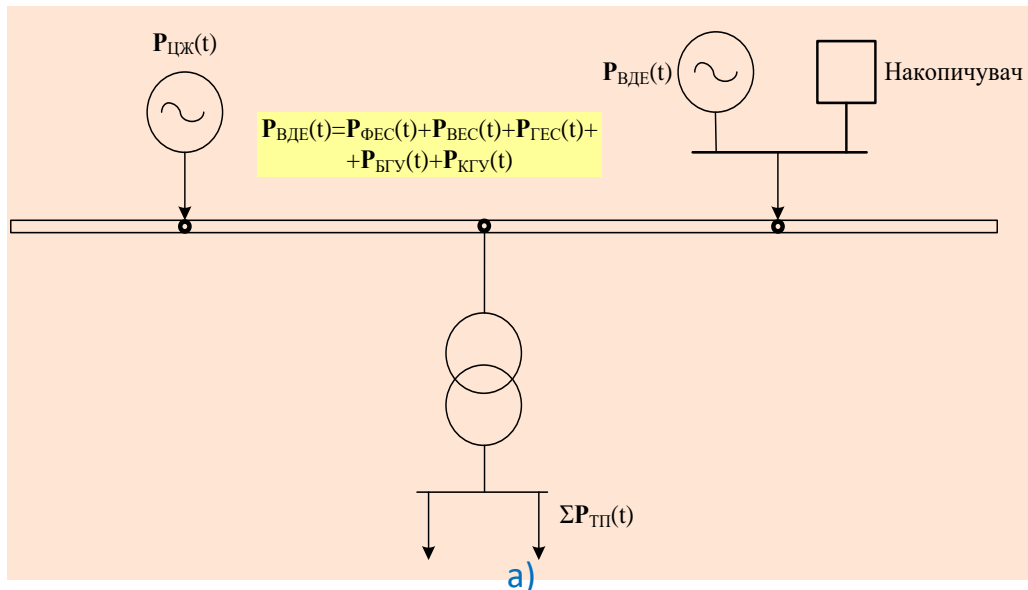


Рис. 3.1 Формування критерію оптимальності

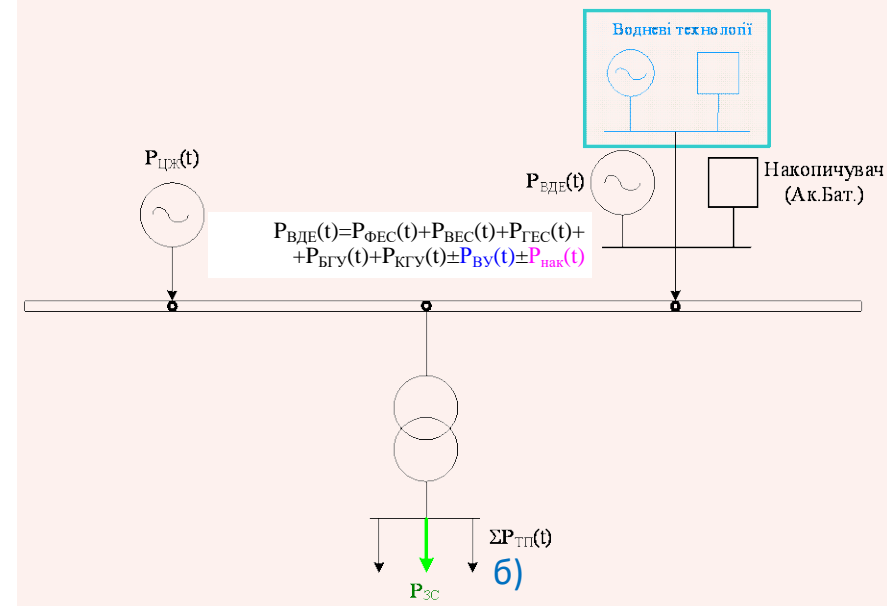


Рис. 3.2. Баланс потужності в електричних мережах: типовий а); з урахуванням сучасних тенденцій: встановлення зарядних станцій для електромобілів ( $P_{ЗС}$ ) та застосування водневих технологій і сучасних накопичувачів б).

## Задача опт імізації резервування

Задача оптимізації резервування ставиться як

$$B_{\Sigma} = B_x(P_x) + B_v(P_v) + B_z(P_z) + B_c(P_c) + B_n(P_n) \rightarrow \min \quad (4.1)$$

де  $B_x(P_x)$  – витрати на резервування накопичувачами хімічного типу;

$B_v(P_v)$  – витрати на водневі технології;

$B_z(P_z)$  – витрати, зв'язані з використанням біогазових технологій як резерву;

$B_c(P_c)$  – витрати на користування системним резервом, це є фактично компенсація за утримання резерву на завантаження для енергоагрегатів ТЕС

$$B_c = \begin{cases} P_c \cdot (v_p^c - dv_n), v_p^c \rangle dv_n \\ 0, v_p^c \langle dv_n \end{cases} \quad (4.2)$$

$v_p^c$  – гранична ціна системи, яка формується для розрахункової години на оптовому ринку електроенергії;

$dv_n$  – прирощена ціна палива, що визначається на основі похідної функції витрат палива на виробництво електроенергії за рівнем навантаження агрегату електростанції та вартості потрібного палива;

$B_n(P_n)$  – витрати на запаси пропускної спроможності ліній електропередачі;

# Резервування накопичувачами хімічного типу

Потреба України в резервуванні протягом 2021-2023 роках становить 1500 МВт, щодо батарейних систем накопичення електроенергії. Витрати на резервування накопичувачами хімічного типу включають в себе витрати встановлення:

$$B_x(P_x) = \epsilon_{P_x}^{num.} P_x \quad (5.1)$$

$\epsilon_{P_x}^{num.}$  – питомі витрати на накопичувач певної ємності, грн./кВт·год.

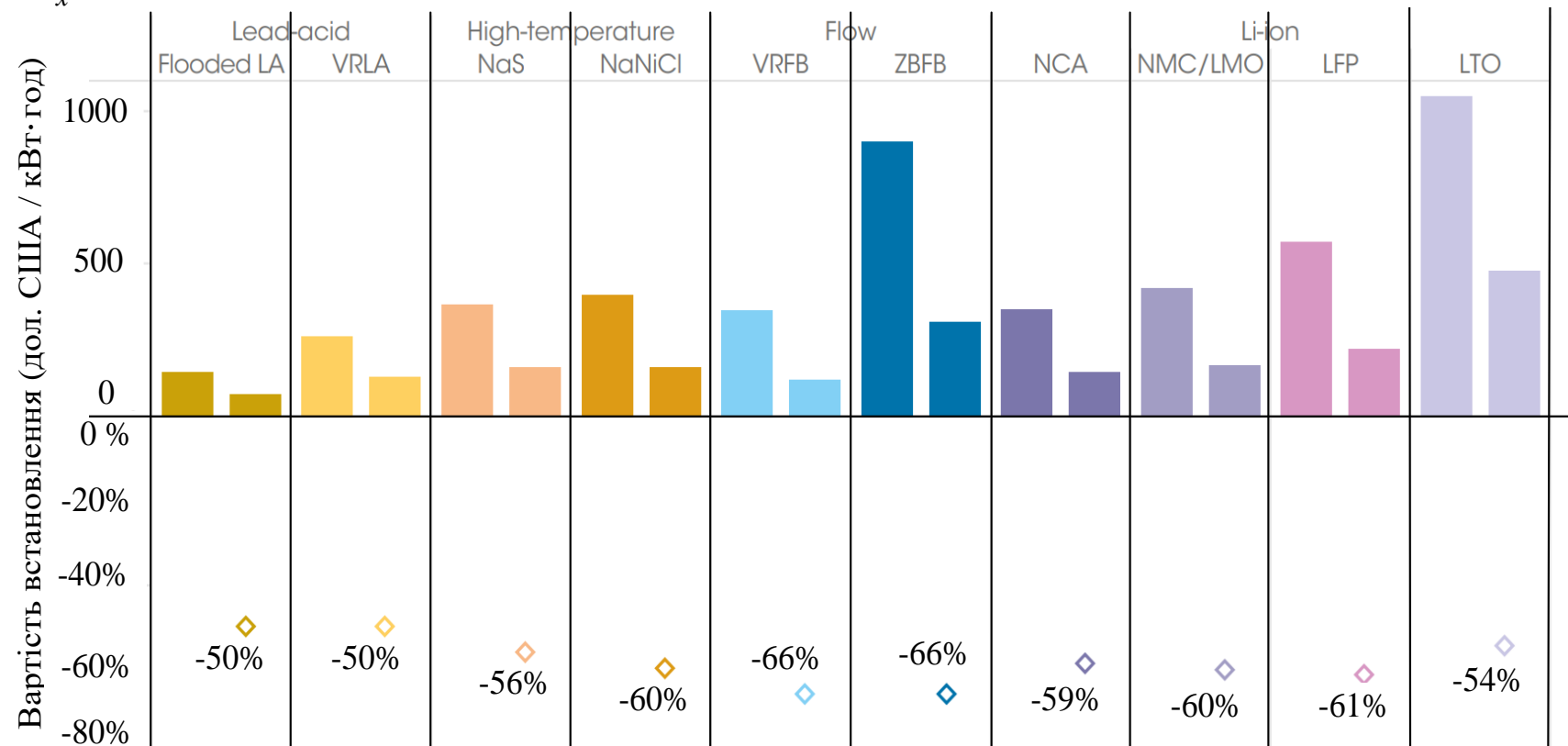


Рис. 5.1. Прогнозування зменшення вартості встановлення акумуляторної система зберігання електроенергії, 2016-2030 pp.: LA – lead-acid – свинцево-кислотна акумуляторна батарея (АК); VRLA – valve-regulated lead-acid – свинцево-кислотна АК з егульований клапаном; NaS – sodium sulphur – натрієво-сірчана АК; NaNiCl – sodium nickel chloride – хлоридно-нікеле-натрієва АК; VRFB – vanadium redox flow battery – окислювально-відновна АК ванадієвого типу; ZBFB – zinc bromine flow battery – цинково-бромовна АК; NCA – nickel cobalt aluminum – нікель-кобальт-алюмінієва АК; NMC / LMO – nickel manganese cobalt oxide/lithium manganese oxide – нікель-марганець-кобальт-оксидова / літій-оксид марганцева АК; FP – lithium iron phosphate – літій-фосфатно-залізна АК; LTO – lithium titanate – літій титанатова АК.

## Резервування накопичувачами водневого типу та біогазовими установками

Витрати на водневі технології визначаються як:

$$B_v(P_v) = v_{P_v}^{num.} P_v \quad (6.1)$$

де  $v_{P_v}^{num.}$  – питомі витрати на водневі технології, 800 \$/кВт·год;

На формування питомих витрат генерування електроенергії з використанням біогазових установок впливає тип і відстань бази сировини (економічно доцільною відстанню для доставки сировини є дистанція до 20 км для рідкої сировини і до 50 км – для сухої). Вартість 1 кВт встановленої потужності суттєво залежить від розміру і типу сировини, тобто чим більший проєкт, тим дешевше і в середньому становить 1500 € за 1 кВт встановленої потужності. Витрати, зв'язані з використанням біогазових технологій як резерву, визначаються:

$$B_z(P_z) = v_{P_z}^{num.} P_z \quad (6.2)$$

де  $v_{P_z}^{num.}$  – питомі витрати на біогазові технології.

Витрати на користування системним резервом:

$$B_c(P_c) = v_{P_c}^{num.} P_c \quad (6.3)$$

Оскільки будь який зі способів резервування генерування ВДЕ призводить до зміни потоків потужності ЛЕП, то для цього може бути недостатньо пропускної здатності частини ліній. Потрібно передбачити витрати на збільшення пропускної здатності електричної мережі:

$$B_n(P_n) = v_{P_n}^{num.} P_n \quad (6.4)$$

## Задача опт імїзації вит рат на резервування крит еріальним мет одом

$$B_{\Sigma} = B_x(P_x) + B_v(P_v) + B_z(P_z) + B_c(P_c) + B_n(P_n) \rightarrow \min \quad (4.1)$$

$P_x, P_v, P_z, P_c, P_n$  – відповідно оптимальні значення потужностей, які визначаються з кожного зі способів резервування.

**Критерії подібності, які є ваговими коефіцієнтами, дозволяють визначити співрозмірність між способами резервування.**

$$\pi_x + \pi_v + \pi_z + \pi_c + \pi_n = 1 \quad (7.2)$$

$\pi$  – критерії подібності (вагові коефіцієнти) відповідно витрат на способи резервування ЕЕС з ВДЕ .

$$\pi_i = B_i(P_i) / B_{\Sigma} \quad (7.3)$$

## ВИСНОВКИ

- Серед особливостей ВДЕ в ЕЕС є їх вплив на режимну та балансову надійність. Оскільки ВЕС і ФЕС як елементи забезпечення балансової надійності характеризуються нестабільністю генерування, то в ЕЕС обов'язковим має бути резервування. Це може бути резерв від наявних джерел гарантованого генерування, в першу чергу блоків теплової генерації з регульовальним діапазоном 30–50%, а також індивідуальні або групові накопичувачі електроенергії (гідроакумулюючі станції, хімічне акумулювання, водневі технології, біогазові технології та інші способи). Ефективними також можуть бути організаційні та технічні заходи з узгодження графіків електроспоживання і генерування ВДЕ, включно і обмеження на вироблену ними електроенергію.
- Питання дослідження чутливості витрат на компенсацію нестабільності генерування ВДЕ шляхом резервування потужності до зміни оптимальних значень потужностей, які визначаються з кожного зі способів резервування є актуальним і потребує детального дослідження. Результати оптимізації, отримані у вигляді критеріальних залежностей, дозволяють аналізувати співрозмірність і чутливість складових цільової функції, в нашому випадку витрат на компенсації нестабільності генерування ВДЕ. Результати співрозмірності дають можливість ранжувати способи компенсації за витратами, а чутливість – раціонально, найбільш ефективно використовувати потужності різних способів підчас експлуатації.



# Визначення оптимальних витрат на резервування нестабільності генерування відновлювальних джерел енергії

---

*ЛЕЖНЮК ПЕТРО ДЕМ'ЯНОВИЧ, Д.Т.Н., ПРОФЕСОР ВІННИЦЬКОГО НТУ  
РУБАНЕНКО ОЛЕНА ОЛЕКСАНДРІВНА, ДОКТОРАНТКА ВІННИЦЬКОГО НТУ*

# Математична критеріальна модель витрат на 1 кВт резервування за сценарієм, по якому використовуються хімічні накопичувачі

$$B = \frac{C_1}{P_x} + C_2 P_c + C_3 P_n + C_4 \frac{P_x^2}{P_c^{-2} \cdot P_n} \quad (2.1)$$

де  $C_1, C_2, C_3, C_4$  – узагальнені константи, що містять вихідні дані вирішуваної задачі.

Перша складова рівняння враховує питомі витрати на реалізацію резервування з використанням системи хімічних накопичувачів електроенергії; другий, третій, четвертий компоненти враховує витрати на електричні мережі. Запропоноване рівняння відповідає умові канонічності, так  $m=n+1$ .

Ортонормована система рівнянь:

$$\begin{cases} -\pi_1 + 2\pi_4 = 0 \\ \pi_2 - 2\pi_4 = 0 \\ \pi_3 - \pi_4 = 0 \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\pi_1 = \pi_2 = \frac{2}{6} \quad \pi_3 = \pi_4 = \frac{1}{6}$$

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{2}{6} = \frac{C_1}{P_x} \\ \pi_2 = \frac{2}{6} = C_2 \cdot P_c \\ \pi_3 = \frac{1}{6} = C_3 \cdot P_n \\ \pi_4 = \frac{1}{6} = \frac{C_4 \cdot P_x^2}{P_c^{-2} \cdot P_n} \end{cases}$$

$$B = 3 \left( 4 \cdot C_1^2 \cdot C_2^2 \cdot C_3 \cdot C_4 \right)^{\frac{1}{6}}$$

$$P_x = \left( \frac{C_1^4}{4C_2^2 \cdot C_3 \cdot C_4} \right)^{\frac{1}{6}}$$

$$P_c = \left( \frac{4C_1^2 \cdot C_3 \cdot C_4}{C_2^4} \right)^{\frac{1}{6}}$$

$$P_n = \left( \frac{C_1^2 \cdot C_2^2 \cdot C_4}{16 \cdot C_2^5} \right)^{\frac{1}{6}}$$

В критеріальній формі запису вираз витрат:

$$B_* = \frac{\pi_1}{P_{x^*}} + \pi_2 P_{c^*} + \pi_3 P_{n^*} + \pi_4 \frac{P_{x^*}^2}{P_{c^*}^2 \cdot P_{n^*}} \quad (2.3)$$

Виокремомо складову витрат на резервування накопичувачами хімічного типу (перший член) та складову, яка характеризує витрати на користування системним резервом та витрати на збільшення запасу пропускної спроможності ліній електропередачі (другий член):

$$B_* = 0,333 \cdot P_{x^*}^{-1} + 0,667 \cdot \left( 0,5 \cdot P_{c^*} + 0,25 \cdot P_{n^*} + 0,25 \cdot P_{x^*}^2 \cdot P_{c^*}^{-2} \cdot P_{n^*} \right)$$

Якщо прийняти за базисні певні значення констант ( $C_1, \dots, C_4$ ), то набудуть вигляду:

$$P_{ex^*} = \left( \frac{C_{1^*}^4}{4C_{2^*}^2 \cdot C_{3^*} \cdot C_{4^*}} \right)^{\frac{1}{6}}$$

$$P_{ec^*} = \left( \frac{4C_{1^*}^2 \cdot C_{3^*} \cdot C_{4^*}}{C_{2^*}^4} \right)^{\frac{1}{6}}$$

$$P_{n^*} = \left( \frac{C_{1^*}^2 \cdot C_{2^*}^2 \cdot C_{4^*}}{16 \cdot C_{2^*}^5} \right)^{\frac{1}{6}}$$

$$B_* = 3 \left( 4 \cdot C_{1^*}^2 \cdot C_{2^*}^2 \cdot C_{3^*} \cdot C_{4^*} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (2.4)$$

$$C_{i^*} = \frac{C_i}{C_{i0}}, \quad i = \overline{1,4}$$

# Аналіз чутливості витрат

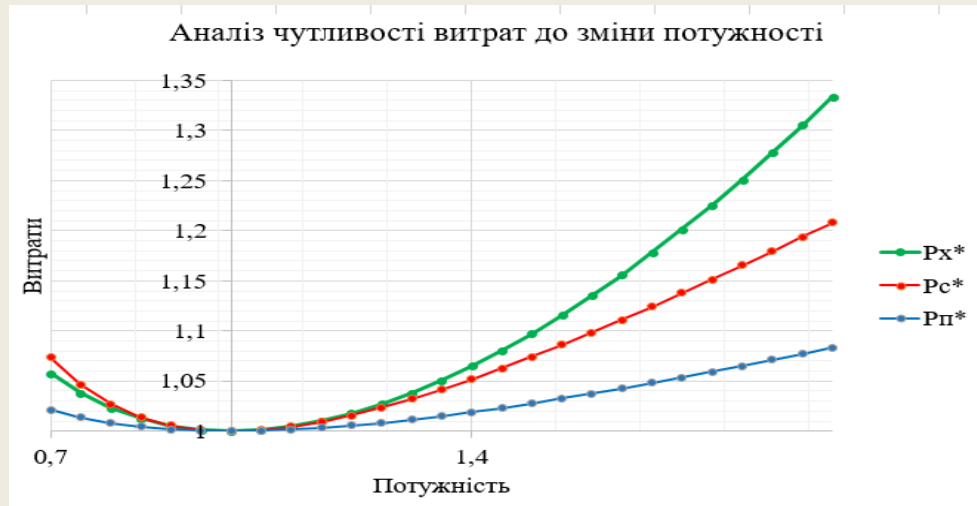


Рис. 3.1. Чутливість витрат: до зміни потужності накопичувачів хімічного типу (зелена крива); до зміни потужності системного резерву (червона крива) та до зміни потужності пропускної здатності ліній електропередачі (синя крива).

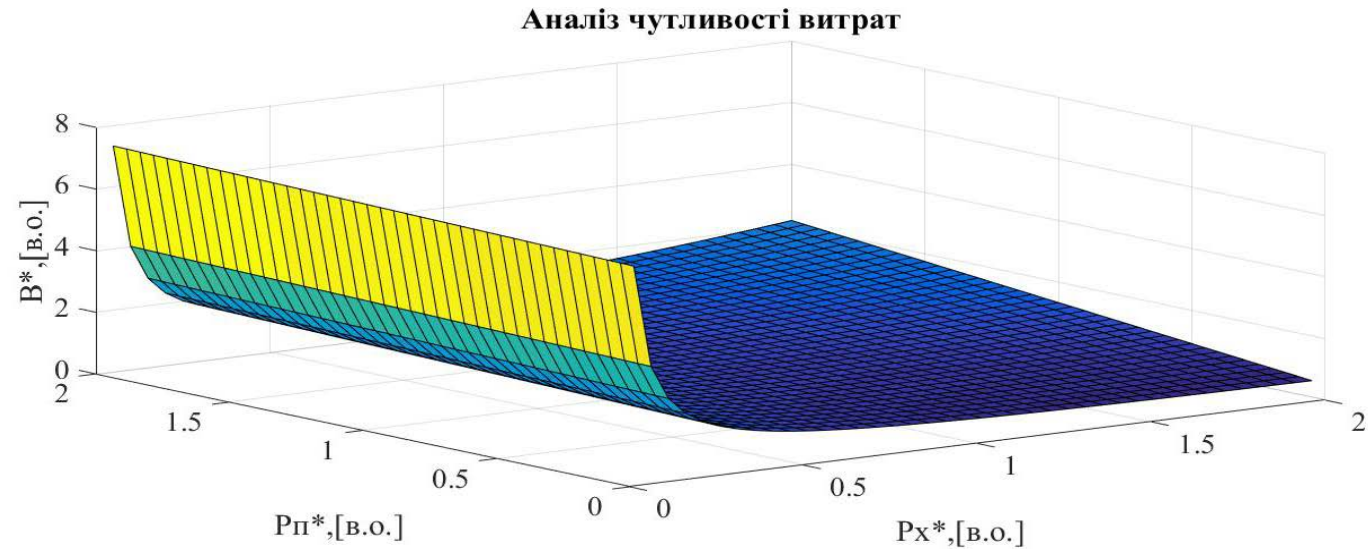


Рис. 3.3. Чутливість витрат до одночасної зміни потужності накопичувачів хімічного типу та до зміни пропускної здатності ЛЕП.

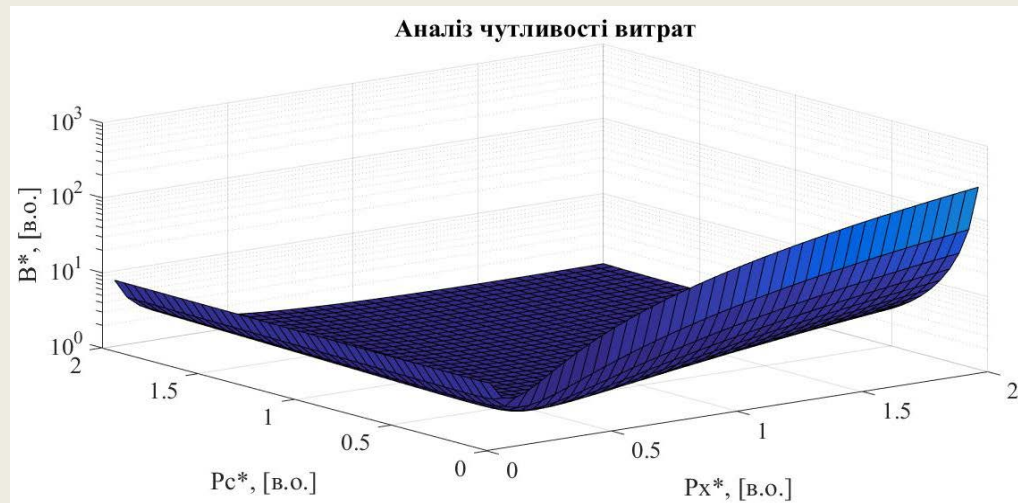


Рис. 3.2. Чутливість витрат до одночасної зміни потужності накопичувачів хімічного типу та потужності системного резерву.

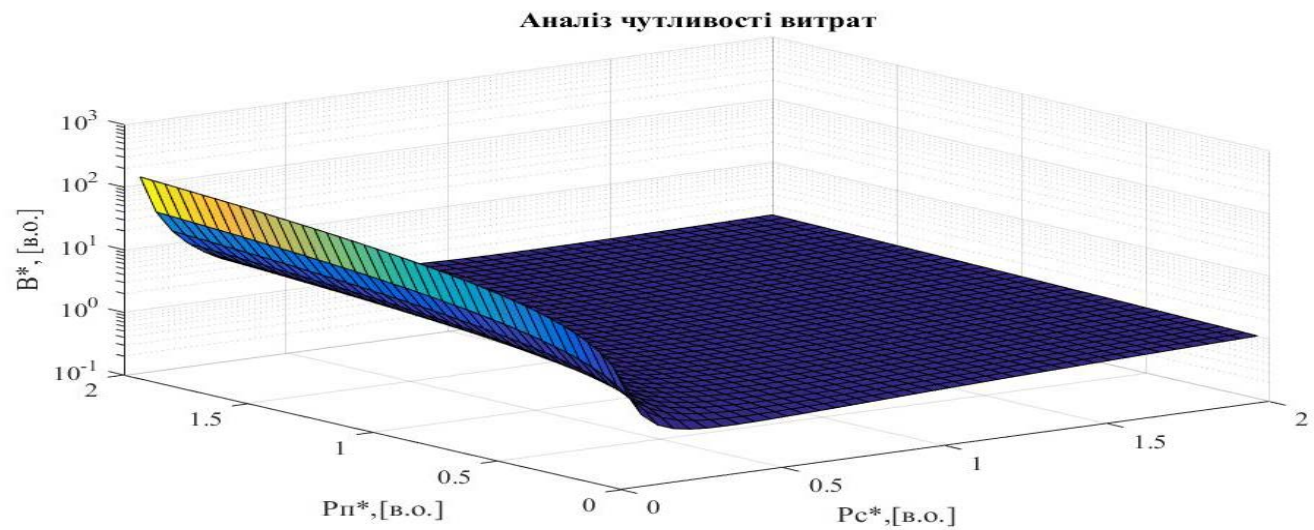


Рис. 3.4. Чутливість витрат до одночасної зміни пропускної здатності ЛЕП та потужності системного резерву.

## Аналіз чутливості витрат у [%]



а)



б)

Рис. 4.1. Чутливість витрат зміни потужності накопичувачів хімічного типу а) та потужності системного резерву б).

Також критеріальне рівняння дозволяє визначити зміни питомих витрат при зміні тієї чи іншої потужності, що оптимізується, тобто дослідити **економічну стійкість витрат** до зміни параметрів:

- якщо  $P_x$  потужність накопичувачів хімічного типу збільшиться на 50 % то значення витрат збільшиться на **9,7 %**,
  - а якщо вдвічі – то значення витрат збільшиться на 33 %,
  - якщо  $P_c$  – збільшиться на 50 %, то значення витрати збільшиться на 7,4 %,
  - якщо  $P_n$  – збільшиться на 50 %, то значення витрат збільшиться на 2,8 %.
- Даний аналіз дозволяє зробити висновок, що розподіл витрат для досліджуваного сценарію резервування більш чутливий до вибору потужності накопичувачів хімічного типу та вибору потужності системного резерву.

**Математична критеріальна модель витрат на 1 кВт резервування за сценарієм, по якому використовуються хімічні накопичувачі та біогазові установки.**

$$B_* = \left[ (b_1 + b_2 P_x + b_3 P_c) \cdot P_n + b_3 \left( \frac{P_c}{P_x} \right)^2 \left( \frac{P_n}{P_c} \right) \right] + \left[ b_5 + b_6 P_c + b_7 P_c P_x + b_8 P_x P_n + b_9 \frac{P_n P_c}{P_x} \right] \quad (5.1)$$

де  $b_1$ - $b_9$  – узагальнені константи, що містять вихідні дані вирішуваної задачі.

$$\begin{aligned} C_1 &= b_2 P_n + b_7 P_c + b_8 P_n \\ C_2 &= b_9 P_c P_n \\ C_3 &= b_4 P_c^2 P_n \\ C_4 &= b_3 P_n \end{aligned} \quad (5.2)$$

Запишемо (5.1) з врахуванням (5.2)

$$B = C_1 P_x + C_2 P_x^{-1} + C_3 P_x^{-2} P_c^{-1} + C_4 P_c \quad (5.3)$$

Враховуючи умову ортогональності та нормування, система рівнянь відносно критеріїв подібності записується у вигляді:

$$\begin{cases} \pi_1 - \pi_2 - 2\pi_3 = 0 \\ -\pi_3 + \pi_4 = 0 \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \end{cases} \quad (5.4)$$

Запишемо для останньої системи рівнянь відповідну матрицю показників  $\alpha$ :

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \alpha' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Тоді матриця, що складається з векторів нормалізації та нев'язки записується у вигляді:

$$\beta = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \beta' = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Вектори нормалізації  $\beta_0$  і нев'язки  $\beta_1$  визначаються як:

$$\beta_0 = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \\ 1/4 \\ 1/4 \end{bmatrix}; \beta_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - 2 \cdot \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \\ 1/4 \\ 1/4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1/2 \\ -1/2 \end{bmatrix}. \quad (5.6)$$

Оскільки незалежною змінною є  $\pi_2$ , то вектор критеріїв подібності запишеться у вигляді:  $\pi = \beta_0 + \beta_1 \pi_2$ .

З врахуванням числових значень  $\beta_0$  і  $\beta_1$  вектор критеріїв подібності запишеться:

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{b_9}{4(b_3 b_4)^{\frac{1}{2}} + 2b_9} \\ \frac{(b_3 b_4)^{\frac{1}{2}}}{4(b_3 b_4)^{\frac{1}{2}} + 2b_9} \\ \frac{(b_3 b_4)^{\frac{1}{2}}}{4(b_3 b_4)^{\frac{1}{2}} + 2b_9} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

**Продовження 6.3. Математична критеріальна модель питомих витрат на 1 кВт резервування за сценарієм, по якому використовуються хімічні накопичувачі та біогазові установки.**

Визначимо оптимальне значення вектор  $\pi$ . Для цього запишемо рівняння відносно базового критерію  $\pi_2$ :

$$\left(\frac{1}{2}\right)^0 \pi_2^1 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2}\pi_2\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2}\pi_2\right)^{\frac{1}{2}} = C_1^0 C_2^1 C_3^{-1/2} C_4^{-1/2} \Rightarrow \pi_2 = \frac{C_2}{4C_3^{-1/2} C_4^{-1/2} + 2C_2} \quad (6.1)$$

Підставивши в останній вираз значення коефіцієнтів  $C$ , отримаємо:

$$\pi_2 = \frac{b_9}{4b_3^{1/2} b_4^{1/2} + 2b_9}. \quad (6.2)$$

Мінімальне значення витрат визначимо, скориставшись виразом:

$$B_{\min} = \left(\frac{C_1}{\pi_{10}}\right)^{\pi_{10}} \left(\frac{C_2}{\pi_{20}}\right)^{\pi_{20}} \left(\frac{C_3}{\pi_{30}}\right)^{\pi_{30}} \left(\frac{C_4}{\pi_{40}}\right)^{\pi_{40}}. \quad (6.3)$$

$$B_{\min} = 2 \left( (b_7 P_c + (b_2 + b_8) P_n) P_n \cdot P_c \left( 2(b_3 b_4)^{\frac{1}{2}} + b_9 \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.4)$$

$$B_* = \pi_1 P_{x^*} + \pi_2 P_{x^*}^{-1} + \pi_3 P_{x^*}^{-2} P_{z^*}^{-1} + \pi_4 P_{z^*} \quad (6.5)$$

$$B_* = 0,5 P_{x^*} + 0,142 P_{x^*}^{-1} + 0,179 P_{x^*}^{-2} P_{z^*}^{-1} + 0,179 P_{z^*} \quad (6.6)$$

$$B_* = \frac{B_{x^*}}{B_{\min}}; P_{x^*} = \frac{P_x}{P_{x_{\text{опт}}}}; P_{z^*} = \frac{P_z}{P_{z_{\text{опт}}}} \quad (6.7)$$

## Аналіз чутливості витрат

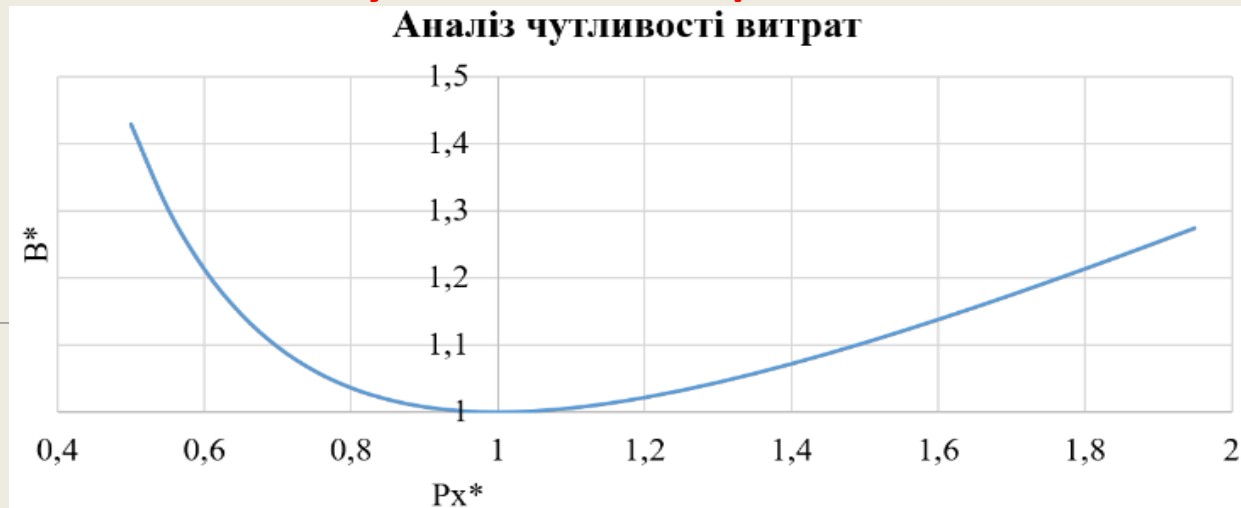


Рис. 7.1. Чутливість витрат до зміни потужності хімічних накопичувачів

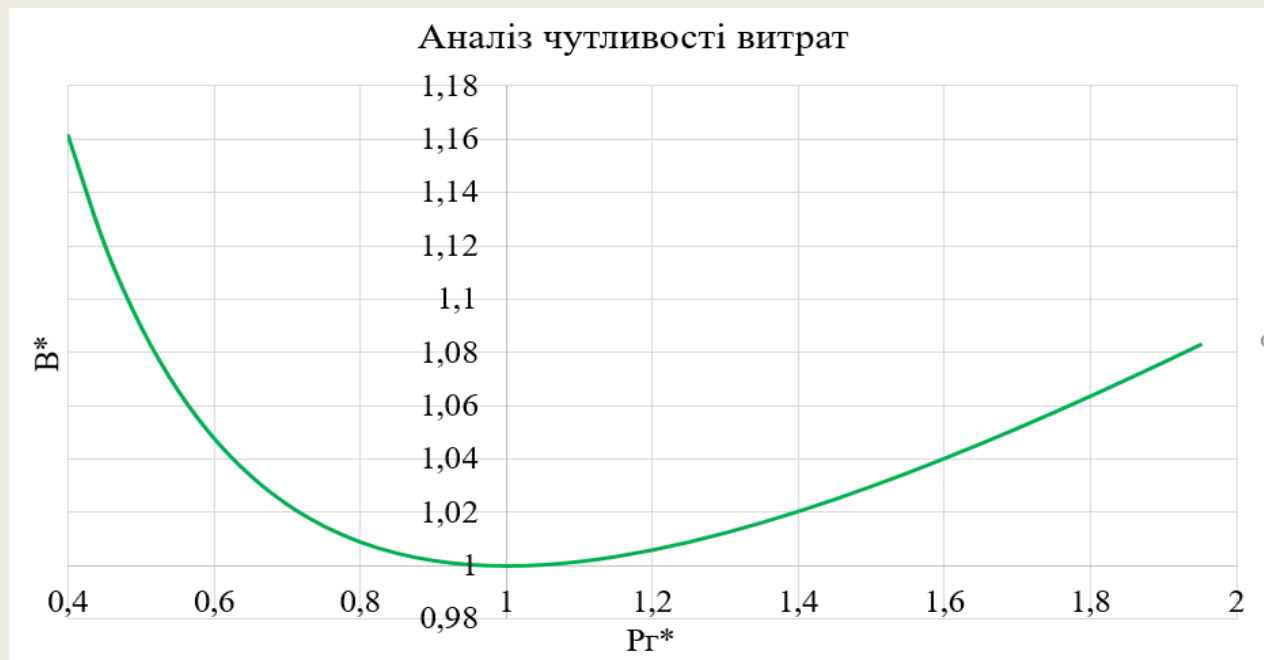


Рис. 7.2. Чутливість витрат до зміни потужності біогазових установок



# ВИСНОВКИ

---

- ❑ Якщо для компенсації нерівномірності графіків генерування ВДЕ за критерій оптимальності вибрано мінімальні витрати на створення системи резервування, то для обрання оптимального способу резервування можливо і доцільно використовувати один з методів теорії подібності – критеріальний метод.
- ❑ Критеріальний метод дозволяє за мінімального об'єму інформації отримати відносну оцінку способів резервування у вигляді критеріїв подібності або вагових коефіцієнтів.
- ❑ Критеріальні залежності витрат на способи резервування заявлених графіків генерування ВДЕ дозволяють оцінювати їх співрозмірність, чутливість до змін умов експлуатації, а також обґрунтовувати вибір доцільних способів резервування в різних комбінаціях.



---

**Дякую за увагу!**