

Виконав: студент 1 курсу ОПП магістр,  
групи ЕСМ-15м  
спеціальності 8.05070102 – «Електричні системи і мережі»

Ковальчук Денис Павлович

магістерська кваліфікаційна робота на тему:

**ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ  
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ З УРАХУВАННЯМ ВТРАТ  
ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ**

Науковий керівник

кандидат технічних наук

Тептя Віра Володимирівна

# ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ З УРАХУВАННЯМ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

**Мета роботи:** підвищення ефективності виробництва і транспортування електричної енергії в електроенергетичній системі за рахунок вдосконалення існуючих методів та алгоритмів оптимального розподілу навантаження між джерелами електроенергії з урахуванням сучасних економічних умов.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі **основні задачі:**

- аналіз роботи ринку електричної енергії та його впливу на розрахунки нормальних режимів ЕЕС;
- аналіз ефективності наявних методів оптимального керування нормальними режимами ЕЕС для розв'язання задач в умовах балансуєчого ринку та електропостачання за двосторонніми договорами;
- дослідження та аналіз задач, пов'язаних з розподілом навантаження між електростанціями;
- математичне моделювання умов оптимального функціонування суб'єктів ринку електроенергії та моделювання процесу оптимального керування ними;
- удосконалення, на підставі принципу найменшої дії, методу оптимального розподілу навантаження між джерелами енергії за диференційованих критеріїв оптимальності;
- розроблення алгоритму визначення оптимальних станів ЕЕС з урахуванням режимних особливостей джерел електричної енергії.

# КЛАСИЧНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕНЬ МІЖ ЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ

Задача оптимізації формулюється таким чином:

$$Z = \int_0^T \sum_{i=1}^S z_i(t) dt = \int_0^T \sum_{i=1}^S c_i B_i [P_i(t)] dt \Rightarrow \min, \quad (1)$$

за умови

$$\sum_{i=1}^S P_i(t) - P_{\Sigma}(t) - \Delta P_{\Sigma}(t) = 0, \quad (2)$$

де  $B_i[P_i(t)]$  – витратна характеристика  $i$ -ої теплової станції;  $S$  – кількість електричних станцій, що входять в енергосистему;  $c_i$  – ціна однієї тони палива на  $i$ -ій станції;  $P_{\Sigma}(t)$  – сумарне навантаження ЕЕС, що припадає на сукупність станцій  $S$  заданої енергогенерувальної компанії;  $\Delta P_{\Sigma}(t)$  – сумарні втрати електроенергії в електричних мережах ЕЕС, зумовлені впливом сукупності  $S$  електростанцій.

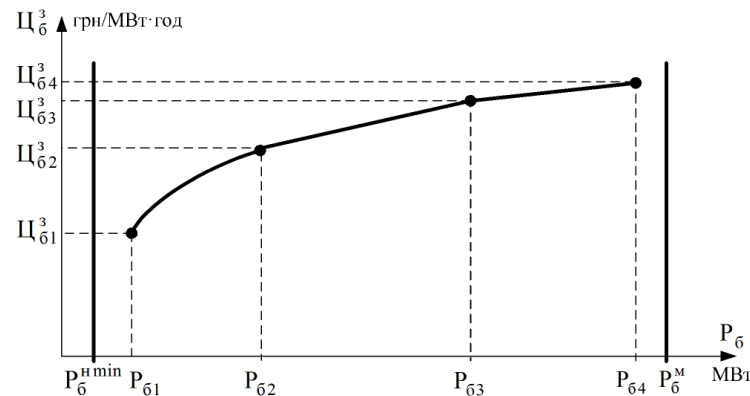


Рисунок 1 – Приклад побудови прирощених заявлених цін блока

# РОЗПОДІЛ НАВАНТАЖЕНЬ МІЖ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКОНОМІЧНИХ ОПОРІВ

Замінивши паливну складову витрат на виробництво електроенергії  $i$ -ої станції (за класичної постановки задачі розподілу навантажень) активним опором  $R_{ei}$ , вартість втрат електричної енергії в якому відповідає вказаній складовій витрат на виробництво електроенергії за аналогічний проміжок часу  $T$ , можна записати:

$$\begin{aligned} Z_{R_{ei}} &= Z_{B_i}, \\ Z_{R_{ei}} &= c_i \cdot \Delta P_i^{\text{ек}} \cdot T = \pi_i \cdot B_i(P_i) \cdot T, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $c_i$  – вартість втрат електроенергії для кожного джерела;  $\Delta P_i^{\text{ек}}$  – втрати активної потужності в елементі  $R_{ei}$  від перетоків потужності, зумовлених  $i$ -им джерелом  $P_i / \cos \varphi_i$ .

Значення втрат активної потужності:

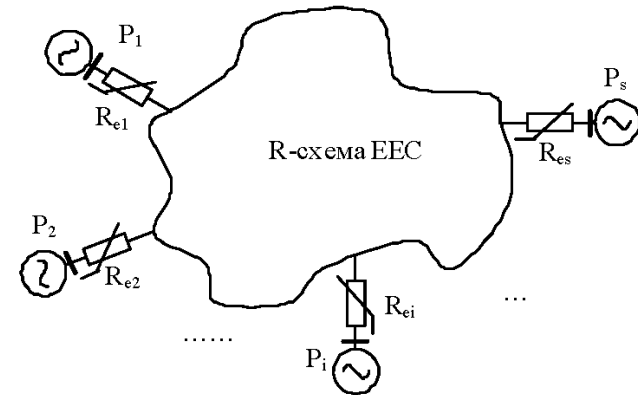
$$\Delta P_i^{\text{ек}} = \frac{P_i^2}{\cos^2 \varphi_i \cdot U_i^2} \cdot R_{ei}, \quad (4)$$

виходячи з чого,

$$Z_{R_{ei}} = c_i \frac{P_i^2}{\cos^2 \varphi_i \cdot U_i^2} \cdot R_{ei} T. \quad (5)$$

З розв'язку (3) і (5) випливає, що економічні опори для класичної задачі розподілу навантажень між ЕС визначаються за формулою:

$$R_{ei} = \frac{B_i(P_i) \cdot U_i^2 \cdot \cos^2 \varphi_i \cdot \pi_i}{c_i \cdot P_i^2}. \quad (6)$$



Якщо представити джерела електроенергії у заступній схемі ЕЕС їх економічними опорами (6), то задача оптимізації запишеться таким чином:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P^{\text{ек}} &= \sum_{i=1}^S 3R_{ei} I_i^2 \Rightarrow \min; \\ P_i &= \sqrt{3} \dot{U}_i \hat{J}_i - jQ_i; \\ \sum_{i=1}^S P_i - P_{\Sigma} - \Delta P_{\Sigma} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де  $I_i$  – струм, що протікає у вітці з економічним опором.

# КРИТЕРІЙ ОПТИМАЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕНЬ В УМОВАХ ОПТОВОГО РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Функція мети для розв'язання задачі забезпечення максимальної ефективності ринку електроенергії

$$Z = \int_0^T \left( \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in M_j} P_{j,i}(t) \right] \rho_{\text{ЕГК}_j} + \Delta P_{\Sigma}(t) \rho_{\text{ОР}} - \sum_{i=1}^K P_{\text{СП}_i}(t) \rho_{\text{СП}_i} \right) dt \Rightarrow \min, \quad (8)$$

за умови

$$\sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in M_j} P_{j,i}(t) \right] - \sum_{i=1}^K P_{\text{СП}_i}(t) - \Delta P_{\Sigma}(t) = 0, \quad (9)$$

де  $N$  – кількість енергогенерувальних компаній (ЕГК), що представлені на ринку і здійснюють керування ЕС з множини  $M_j$ , генерація яких підлягає оптимізації згідно технічних обмежень;  $K$  – кількість споживачів, які отримують електричну енергію на РЕ за ціновими замовленнями;  $\rho_{\text{ЕГК}_j}$  – ціна 1 кВт·год відпущеної електроенергії  $j$ -ої енергогенерувальної компанії;  $P_{\text{СП}_i}$  – замовлена електрична потужність  $i$ -го споживача протягом періоду  $T$ ;  $\rho_{\text{СП}_i}$  – ціна 1 кВт·год електроенергії для  $i$ -го споживача;  $\Delta P_{\Sigma}(t)$  – сумарні втрати в мережах системного оператора.

Якщо за незалежні змінні для розв'язання задачі (8) приймати лише потужності ЕС  $P_{j,i}$  з множини  $M_j$ , то функція мети приймає вигляд

$$Z = \int_0^T \left( \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in M_j} P_{j,i}(t) \right] \rho_{\text{ЕГК}_j} + \Delta P_{\Sigma}(t) \rho_{\text{ОР}} \right) dt \Rightarrow \min, \quad (10)$$

або з урахуванням адресності постачання електроенергії електричних станцій заданим споживачам за двосторонніми договорами

$$Z = \int_0^T \left( \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in M_j} P_{j,i}(t) \right] \rho_{\text{ЕГК}_j} + \sum_{j=1}^N \left\{ \sum_{i \in M_j} \Delta P [P_{j,i}(t)] \right\} \rho_{\text{ОР}} \right) dt \Rightarrow \min, \quad (11)$$

де  $\sum_{j=1}^N \left\{ \sum_{i \in M_j} \Delta P [P_{j,i}(t)] \right\} = \Delta P_{\Sigma}(t)$  – втрати потужності в електричних мережах, які представляються у вигляді складових  $\Delta P [P_{j,i}(t)]$ ;  $\Delta P [P_{j,i}(t)]$  – частка втрат потужності в електромережі, зумовлених транспортуванням електроенергії від  $i$ -го джерела;  $\rho_{\text{ОР}}$  – ціна оптового ринку за 1 кВт·год електроенергії.

# КРИТЕРІЙ ОПТИМАЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕНЬ В УМОВАХ РИНКУ ДВОСТОРОННІХ ДОГОВОРІВ

Задача оптимізації формулюється таким чином:

$$Z = \int_0^T \left( \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in \mathbf{M}_j} P_{j,i}(t) \right] \pi_{\text{ЕГК}_j} + \sum_{k=1}^N \Delta P_{\text{вз}_k}(t) \pi_{\Delta P_{\text{вз}_k}} - \sum_{i=1}^K P_{\text{СП}_i}(t) \pi_{\text{СП}_i} \right) dt \Rightarrow \min, \quad (12)$$

за умови

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{ч}}} P_{\text{ч}_k}(t) + \sum_{j=1}^N P_j(t) - \sum_{i=1}^K P_{\text{СП}_i}(t) - \Delta P_{\Sigma}(t) = 0, \quad (13)$$

де  $\Delta P_{\text{вз}_k}(t)$  – втрати від взаємних перетоків, зумовлених передачею електроенергії від джерел до споживачів за двосторонніми договорами;  $\pi_{\Delta P_{\text{вз}_k}}$  – ціна 1 кВт·год втрат електроенергії від взаємних перетоків, зумовлених передачею електроенергії від джерел до споживачів за двосторонніми договорами;  $P_{\text{ч}_k}(t)$  – потужність станцій, які є опорними по частоті і не входять до переліку джерел, що підлягають оптимізації;  $N_{\text{ч}}$  – кількість станцій, опорних по частоті;  $\Delta P_{\Sigma}(t)$  – сумарні втрати в електричних мережах.

# КРИТЕРІЙ ОПТИМАЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕНЬ В УМОВАХ РИНКУ ДВОСТОРОННІХ ДОГОВОРІВ

## Розподіл навантажень в системі з традиційними джерелами електроенергії

Якщо станції є самостійними суб'єктами господарювання, але залишаються елементами ЕЕС і при цьому враховується адресний характер постачання електроенергії від них до споживачів, критерієм оптимальності є мінімум витрат на закупівлю електроенергії на електричних станціях та компенсацію вартості втрат у мережах енергоринку

$$Z = \int_0^T \left( \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in \mathbf{M}_j} P_{j,i}(t) \beta_{j,i}(t) \right] + \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in \mathbf{M}_j} \Delta P [P_{j,i}(t)] \right] \right) \Pi_{OP} dt \rightarrow \min, \quad (14)$$

за умови

$$\sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in \mathbf{M}_j} P_{j,i}(t) \right] - \sum_{i=1}^K P_{СП\_i}(t) - \Delta P_{\Sigma}(t) = 0, \quad (15)$$

де  $\beta_{j,i}(t)$  – вартість 1 кВт·год електроенергії, відпущеної з шин  $i$ -го джерела  $j$ -ої енергогенерувальної компанії в заданий момент часу  $t$ .

## Розподіл навантажень в розподільних мережах з розосередженими джерелами електроенергії

Задача оптимізації добових режимів (на інтервалі часу  $[t_0; t_k]$ ) для забезпечення максимальних надходжень  $H$  від реалізації електроенергії за умов багатоступеневого тарифу енергоринку  $\Pi_i(t)$  та технічних обмежень з боку окремих джерел електроенергії:

$$H = \int_{t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^S \Pi_i(t) P_i(t) dt \rightarrow \max, \quad (16)$$

за умови

$$\sum_{i=1}^S P_i(t) - P_{\Sigma}(t) - \Delta P_{\Sigma}(t) = 0. \quad (17)$$

# СТРУКТУРА ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЕС ЗА РІЗНИХ УМОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ З РІЗНОТИПНИМИ  
ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

*Критерії оптимальності*

Централізоване  
керування

Мінімум сумарних  
витрат умовного  
палива в ЕЕС з  
урахуванням  
технічних  
обмежень

$$Z = \int_0^T \sum_{i=1}^S z_i(t) dt = \int_0^T \sum_{i=1}^S \alpha_i B_i [P_i(t)] dt \Rightarrow \min$$

Оптовий ринок  
електроенергії

Мінімум  
сумарних  
витрат на  
виробництво  
електроенергії

$$Z = \int_0^T \sum_{i=1}^S P_i \beta_i dt \Rightarrow \min$$

Мінімум  
сумарних  
витрат на  
транспортуван  
ня та розподіл  
електроенергії

$$Z = \int_0^T \left( \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in M_j} P_{j,i}(t) \right] \alpha_{\text{ЕГК}_j} + \Delta P_{\Sigma}(t) \alpha_{\text{ОП}} - \sum_{i=1}^K P_{\text{СП}_i}(t) \alpha_{\text{СП}_i} \right) dt \Rightarrow \min$$

Балансуючий ринок електроенергії  
та електропостачання за двосторонніми договорами

Мінімум сумарних  
витрат на  
транспортування та  
розподіл електроенергії  
з урахуванням  
адресності витрат

$$Z = \int_0^T \left( \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{i \in M_j} P_{j,i}(t) \right] \alpha_{\text{ЕГК}_j} + \sum_{k=1}^N \Delta P_{\text{ВЗ}_k}(t) \alpha_{\Delta P_{\text{ВЗ}_k}} - \sum_{i=1}^K P_{\text{СП}_i}(t) \alpha_{\text{СП}_i} \right) dt \Rightarrow \min$$

Максимум надходжень від  
реалізації електроенергії за умов  
багатоступеневого тарифу  
енергоринку  $\alpha_i(t)$  та технічних  
обмежень з боку окремих джерел  
електроенергії

$$H = \int_0^T \sum_{i=1}^S \alpha_i(t) P_i(t) dt \rightarrow \max$$

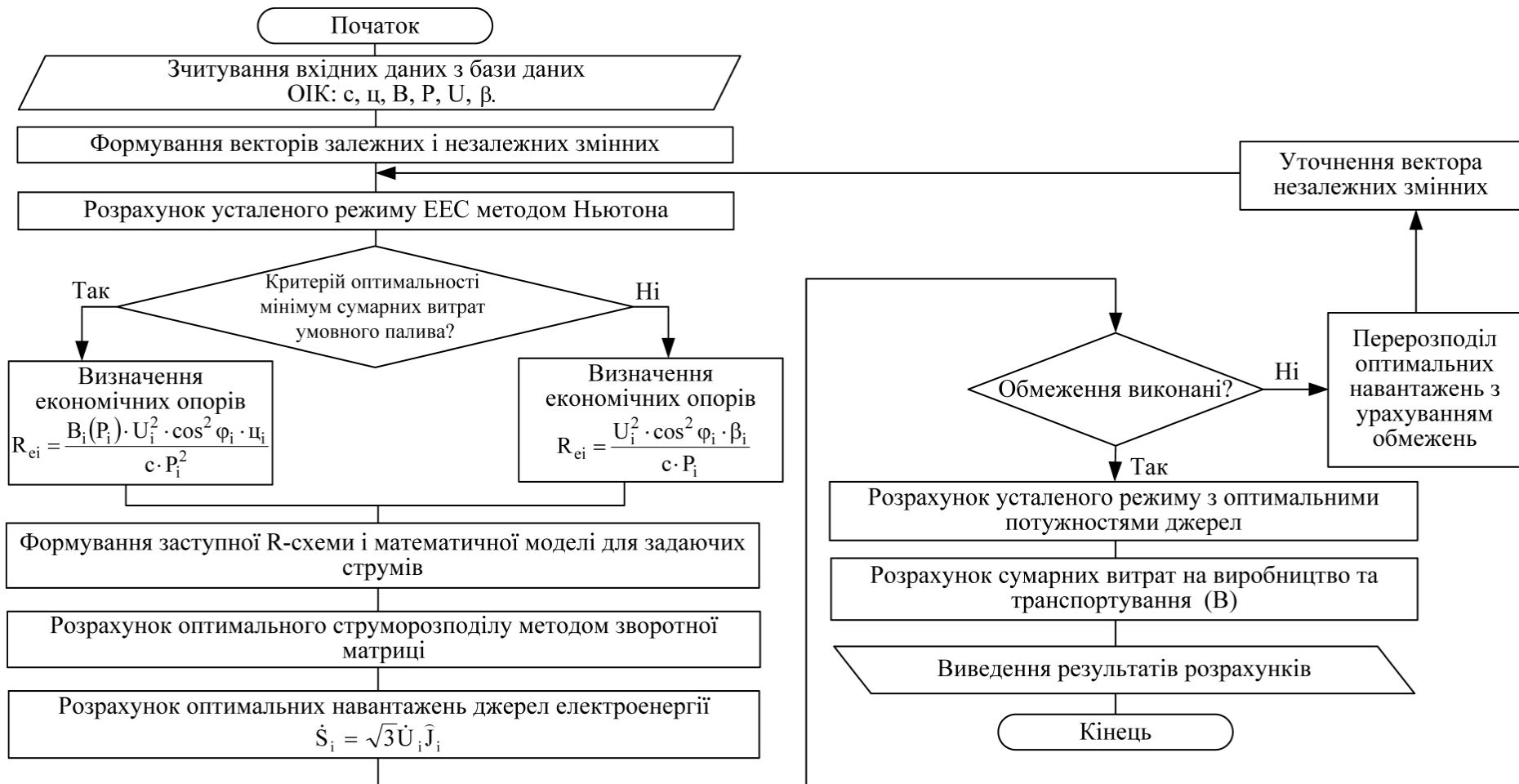


# ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЕКОНОМІЧНИХ ОПОРІВ ЗА РІЗНИХ КРИТЕРІЇВ ОПТИМАЛЬНОСТІ

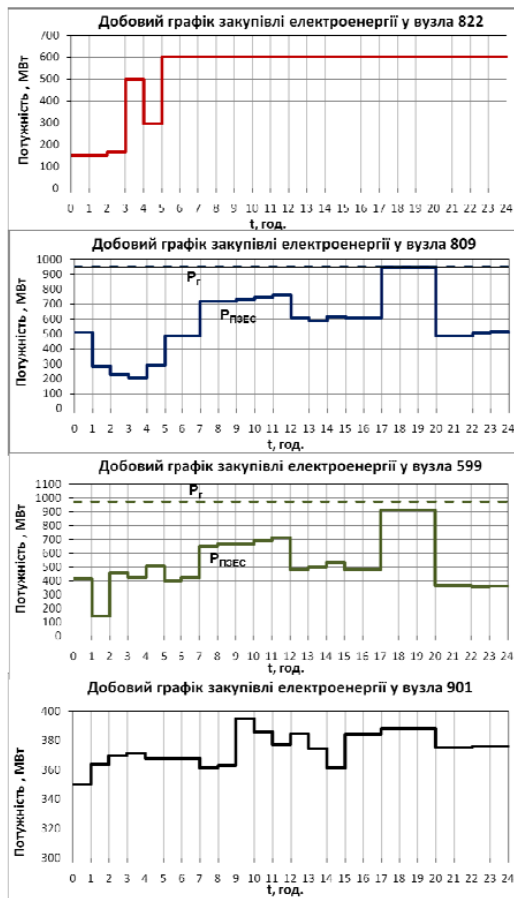
Критерій оптимальності		
Мінімум сумарних витрат умовного палива в ЕЕС	Мінімум сумарних витрат на виробництво електроенергії	Мінімум сумарних витрат на виробництво і транспортування електроенергії з урахуванням адресності втрат
$R_{ei} = \frac{B_i(P_i) \cdot U_i^2 \cdot \cos^2 \varphi_i \cdot c_i}{c_i \cdot P_i^2}$	$R_{ei} = \frac{U_i^2 \cdot \cos^2 \varphi_i \cdot \beta_i}{c_i \cdot P_i}$	$R_{ei} = R_{\text{екв}_i} (k_{\text{ц}_i} + k_{\Delta P_i}),$ $R_{\text{екв}_i} = \frac{U_i^2 \cdot \cos^2 \varphi_i}{P_i};$ $k_{\text{ц}_i} = \frac{\beta_i}{c_i}; k_{\Delta P_i} = \frac{\Delta P_i}{P_i}$

де  $R_{\text{екв}_i}$  – еквівалентний опір  $i$ -го генератора у заступній схемі ЕЕС;  $k_{\text{ц}_i}$  – ціновий коефіцієнт, що визначає співвідношення вартості електроенергії  $i$ -ої ЕС до вартості втрат електроенергії у електричних мережах (або оптової ціни енергоринку);  $k_{\Delta P_i}$  – коефіцієнт адресних втрат, що, може бути визначений на підставі параметрів режиму ЕЕС і є умовно постійним протягом періоду часу  $T$ ;  $\Delta P_i$  – втрати в мережах, обумовлені транспортуванням електроенергії від  $i$ -го джерела.

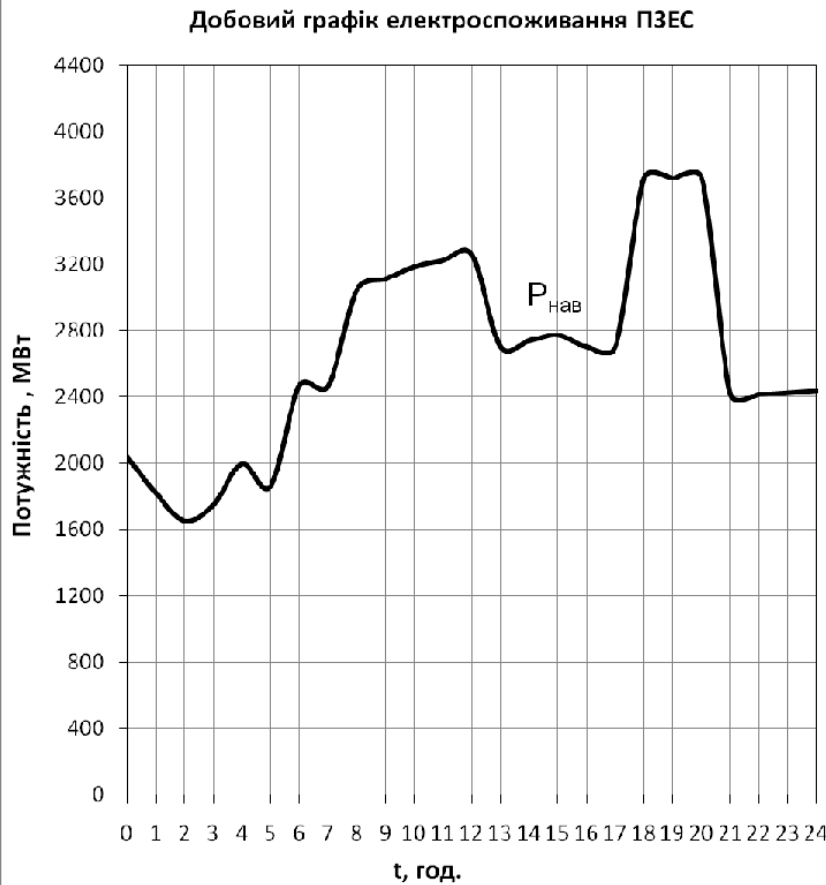
# АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ МІЖ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ В ЕЕС



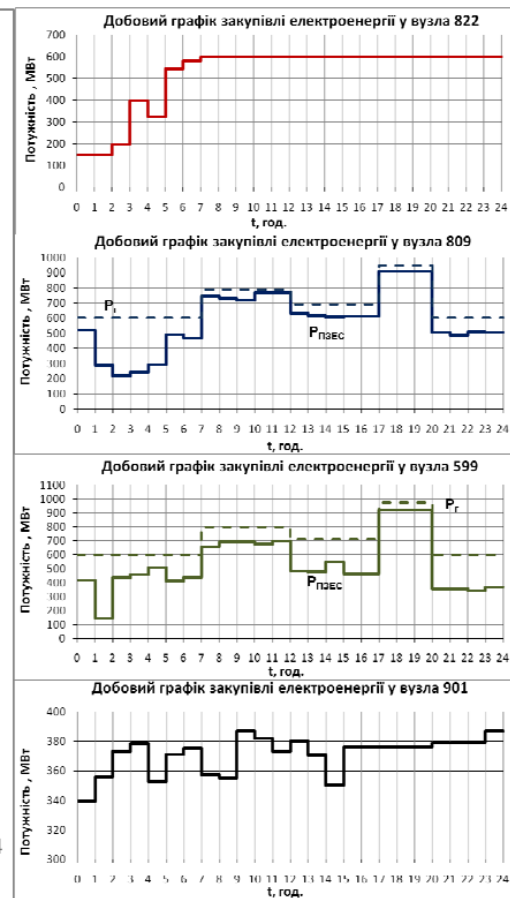




а)



б)



в)

Рисунок 6 – Добовий графік електроспоживання ПЭС (б) та оптимальні добові графіки закупівлі електроенергії у генерувальних вузлів 822, 809, 599 та 901 без (а) та з (в) урахуванням регулювання на АЕС (критерій оптимальності – мінімум витрат на закупівлю та транспортування електроенергії)

# ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ З УРАХУВАННЯМ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Таким чином, **наукова новизна** роботи полягає у тому, що вдосконалено метод комплексної оптимізації нормальних режимів електроенергетичних систем на основі принципу найменшої дії, в якому в математичній моделі враховуються особливості функціонування балансуючого ринку електроенергії та електропостачання за двосторонніми договорами, що дає змогу більш адекватно планувати режими генерування електроенергії та формувати оптимальні керувальні впливи.

У магістерській роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності виробництва і транспортування електроенергії в електроенергетичній системі, що полягає у виборі оптимального складу енергогенерувального обладнання з урахуванням сучасних умов функціонування балансуєчого ринку електричної енергії та електропостачання за двосторонніми договорами.

Отримані такі нові результати:

1. Встановлено, що в сучасних умовах експлуатації з переходом на нові ринкові відносини змінилась постановка задачі оптимізації та виникла необхідність у нових критеріях оптимальності функціонування джерел електричної енергії в ЕЕС. Використання їх дозволить підвищити ефективність виробництва та транспортування електроенергії в електроенергетичній системі.

2. Розроблено математичні моделі та алгоритми оптимального розподілу навантаження між джерелами за різних критеріїв оптимальності.

3. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методу і алгоритмів перевірена та підтверджена результатами оптимізаційних розрахунків режимів Південно-Західної електроенергетичної системи. Використання запропонованих критеріїв оптимальності в методах оптимального розподілу навантаження між джерелами енергії дозволить підвищити ефективність функціонування суб'єктів енергоринку і додатково знизити сумарні витрати на закупівлю та транспортування електроенергії на 0,4-0,8%.