

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних систем та станцій

Застосування принципу Гамільтона для комплексної оптимізації електроенергетичних систем

Виконав ст. гр. ЕСМ — 14 м
Дучков Є. В.

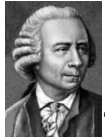
Вінниця - 2015



П'єр Луї Мопертюї (1698-1759)

$$I = mvs,$$

m — маса, v — швидкість, s — шлях, що проходить тіло.



Леонард Ейлер (1707-1783)

$$\int v \cdot ds = \min .$$



Жозеф Луї Лагранж (1736-1813)

$$\sum m_i \int v_i \cdot ds_i = \min .$$



Вільям Роуен Гамільтон (1805-1865)

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L \cdot dt,$$

де — L функція Лагранжа.



Михайло Васильович Остроградський (1801-1862)

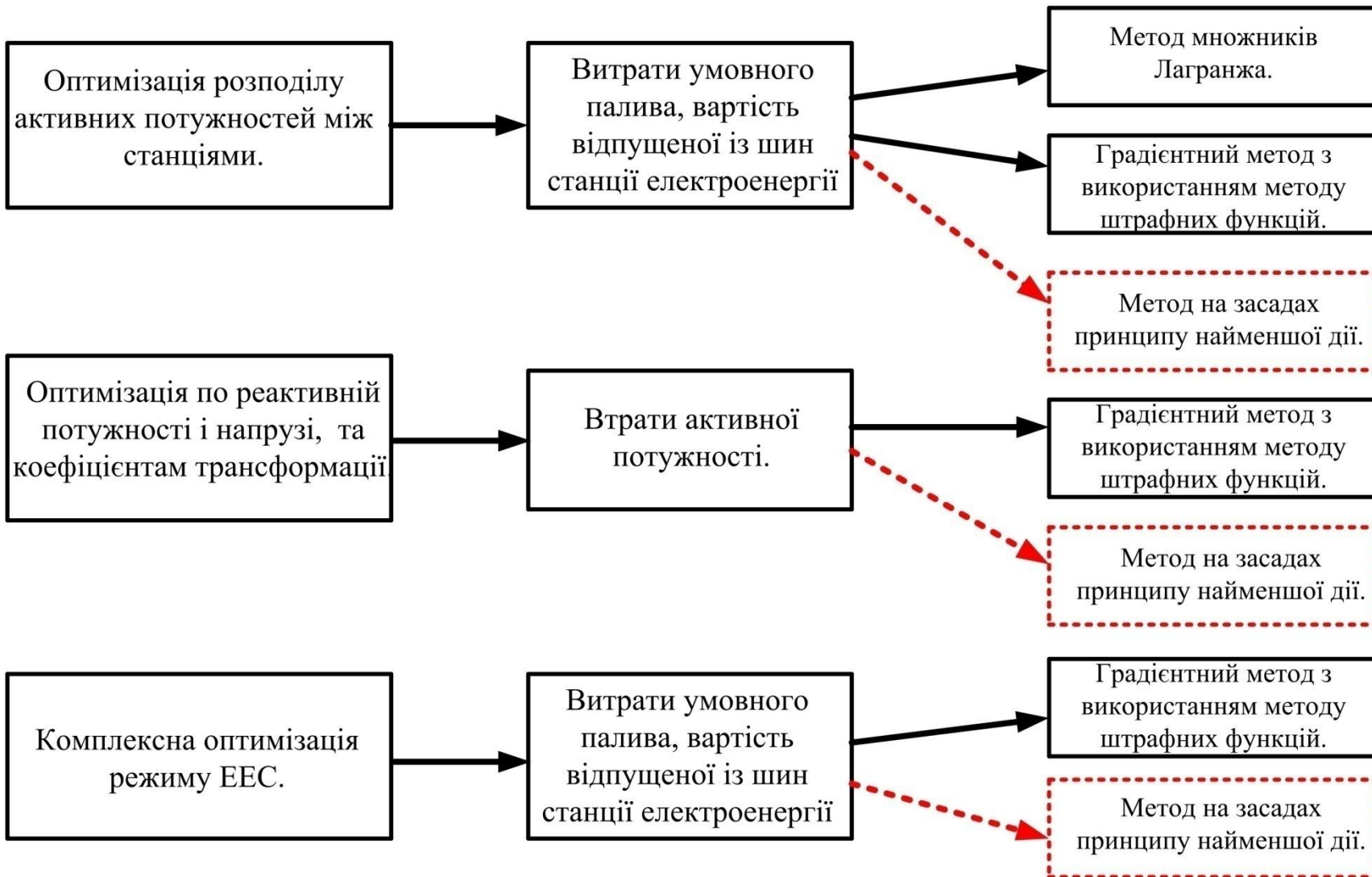
$$\delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} L \cdot dt = 0,$$

де δ — символ варіації функції.

Задачі оптимізації ЕЕС

Критерій оптимальності

Методи оптимізації



Таблиця 1. – ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ

Метод	Швидкість збіжності	Основні переваги	Основні недоліки
Зейделя	Повільна	Простота алгоритму, дуже малий обсяг пам'яті, малий час одного кроку	Ненадійна, а в ряді випадків повільна збіжність
З матрицею Z_u	Швидка	Швидкий розрахунок при незначних змінах схеми	Дуже великий обсяг пам'яті, необхідність обчислювати матрицю Z_u
Ньютона	Квадратична (як правило, швидше, ніж по методу з Z_u)	Швидка і надійна збіжність, невеличкий обсяг пам'яті при врахуванні слабкої заповненості	Складний алгоритм врахування слабкої заповненості; неможливо заздалегідь зазначити граничне число вузлів і віток системи, що розраховується
По параметру	Квадратична (не повільніше, ніж по методу Ньютона)	Найбільш надійна збіжність	Те ж
Гradientний	Повільна	Надійна збіжність при поганих початкових наближеннях. Можливість визначити мінімум суми квадратів небалансів, якщо розв'язку не існує	Повільна збіжність поблизу розв'язку. Швидкість збіжності сильно залежить від вибору кроку і вагових коефіцієнтів
Розрір контурів	Повільна	Використовуються властивості розімкнутих мереж	Число змінних і рівнянь більше, ніж при розв'язанні рівнянь вузлових напруг
ПНД	Швидка	Повна збіжність	Потребує дослідження

ПРИНЦИП НАЙМЕНШОЇ ДІЇ ЯК МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

Для електричних кіл по аналогії з механічною системою введені кінетична і потенційна енергії, дисипативна функція Релея, узагальнені сили, відповідні непотенційним і недисипативним силам. На основі цих функцій обчислюються рівняння Лагранжа, які є рівняннями стану електричного кола. Згідно інтегрального варіаційного принципу Гамільтона-Остроградського, що ґрунтується на ПНД, система характеризується функцією Лагранжа. Причому зміна стану системи між двома фіксованими положеннями завжди відбувається таким чином, що надається стаціонарне значення (зазвичай мінімум) функціоналу

$$\min Q = \int_{t_1}^{t_2} L(g, \dot{g}, t) dt, \quad \frac{\partial L}{\partial g} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{g}} \right) = 0.$$

де Q – дія, $L=K-P+D$; K – кінетична енергія системи; P – потенційна енергія системи; D – енергія сил зовнішньої та внутрішньої дисипації.

Необхідні і достатні умови стаціонарності цього функціоналу («інтеграла дії»), що визначаються методами варіаційного числення, полягають у виконанні рівняння Ейлера-Лагранжа.

Згідно принципу Гамільтона дія Q має на оптимальному шляху екстремальне в порівнянні з обхідними шляхами значення.

Охарактеризуємо всі можливі шляхи однопараметричним сімейством функцій $g_j = g_j(t, \alpha)$, $t_1 \leq t \leq t_2$, $|\alpha| \leq \beta < \infty$, $j = \overline{1, n}$, де значенню $\alpha=0$ відповідає прямий шлях, а значенням $\alpha \neq 0$ – обхідні шляхи. Тоді дія (1), очевидно, є функцією параметра α :

$$Q(\alpha) = \int_{t_1}^{t_2} L[g_j(t, \alpha), \dot{g}_j(t, \alpha), t] dt.$$

Варіація Q при варіюванні параметра α

$$\delta Q = \frac{\partial Q}{\partial \alpha} d\alpha = \int_{t_1}^{t_2} \delta L \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial L}{\partial g_j} \delta g_j + \frac{\partial L}{\partial \dot{g}_j} \delta \dot{g}_j \right) dt \quad \delta Q = \sum_{j=1}^n \frac{\partial L}{\partial \dot{g}_j} \delta g_j \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{g}_j} - \frac{\partial L}{\partial g_j} \right) \delta g_j \cdot dt$$

По побудові варіації $\delta g_j(a)$ дорівнюють нулю в моменти t_1 , t_2 , тобто рівний нулю перший член в правій частині. Для прямого шляху за визначенням справедливі рівняння Лагранжа, тому рівний нулю також і другий член.

Таким чином, на оптимальному шляху $\delta Q = 0$. У цьому полягає суть принципу Гамільтона. Він є принципом найменшої дії, оскільки дія уздовж оптимального шляху має найменше порівняно з обхідними шляхами значення. Для більш загальних систем схоже твердження називається принципом Гамільтона-Остроградського.

ПРИНЦИП НАЙМЕНШОЇ ДІЇ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ

Варіаційний підхід до аналізу електричних кіл ґрунтується на тому факті, що багато співвідношень для електричних кіл (і електромеханічних систем), у тому числі і **рівняння Кірхгофа**, можуть бути отримані як **наслідок принципу найменшої дії**.

Самооптимізація або **самоорганізація** системи це природна автоматика, властивість систем та їх частин самоналагоджуватися таким чином, що забезпечується підвищення їх рівня з переходом до найбільш енергетично вигідного стану, або найбільш вигідного режиму функціонування. Перехід системи з одного стану в інший підпорядкований **принципу найменшої дії**, який може бути сформульований наступним чином. **Після відхилення від оптимального стану функціонування** в системі виникає зустрічна, протилежно скерована дія, тобто **протидія**, яка **намагається повернути систему в оптимальний стан**. Отже для будь-якої системи в довільний момент її існування нормою є якісний оптимум, глибина якого визначається **мірою ідеальності системи**.

вираз всіх видів енергії системи для кожного з елементів:

- енергія магнітного поля індуктивних елементів (кінетична)

$$W_L = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^m L_{ks} \cdot i_{ks}^2 ;$$

- енергія, яка перетворюється на тепло (кінетична)

$$W_R = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^m R_{ks} \cdot i_{ks}^2 ;$$

- енергія електричного поля ємнісних елементів (потенційна)

$$W_C = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^m \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C_{ks}} (q_s + q_k)^2 ;$$

- енергія, що поступає від джерел енергії і поглинається електроспоживачами

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^m (\pm e_{ks} \cdot i_{ks}) .$$

Виразивши струм i через заряд q , після диференціювання для будь-якого замкненого контура можна отримати рівняння електричного стану

$$\sum_n \left[L_{ks} \frac{di_{ks}}{dt} + \frac{1}{C_{ks}} \int i_{ks} dt + R_{ks} \cdot i_{ks} \pm e_{ks} \cdot i_{ks} \right] = 0 ,$$

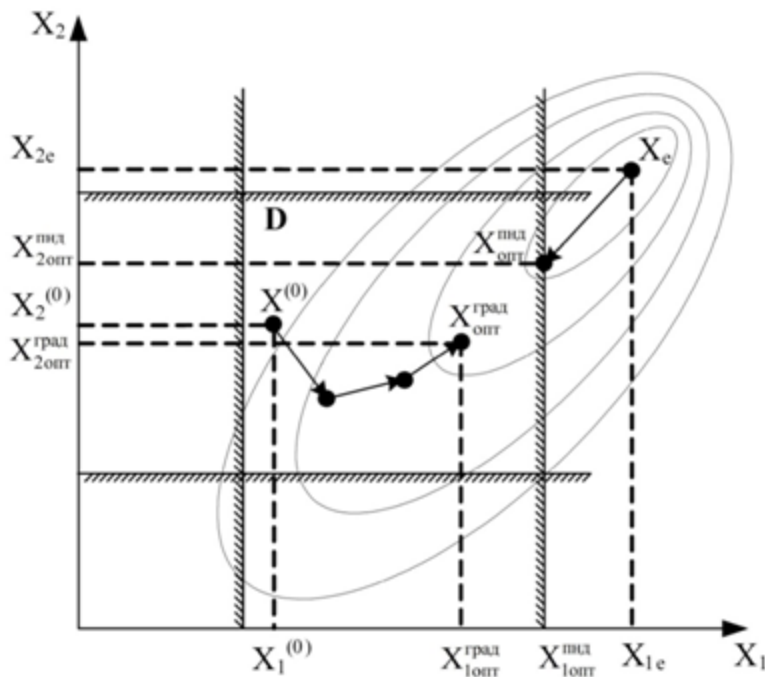
яке є рівнянням **другого закону Кірхгофа**, отриманим як наслідок ПНД, а записавши заряд ділянки контура як $(q_k + q_s)$ ми використали **перший закон Кірхгофа**.

ОПТИМІЗАЦІЯ НОРМАЛЬНИХ УСТАЛЕНИХ СТАНІВ ЕЕС

На практиці стани ЕЕС можуть змінюватися. Змінюються споживання і генерування електроенергії, топологія, параметри, тощо. Відповідно повинні здійснюватися оптимізуючі впливи, які мають вводити ЕЕС в область оптимальності. Ця задача може бути сформульована як задача наближення поточного стану ЕС з параметрами x і u до економічного з параметрами x_e і u_e :

$$F(x, u, t) \Rightarrow F(x_e, u_e, t)$$

за умов, що $x \in D_x$, $u \in D_u$,



$$\Delta P(x_{opt}^{grad}) \geq \Delta P(x_{opt}^{mid})$$

Рис. 1 - Схема пошуку оптимального стану системи

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ЕЕС ПО АКТИВНІЙ ПОТУЖНОСТІ І НАПРУЗІ

В опублікованих статтях по роботах кафедри показано, що задача оптимізації нормальних режимів електроенергетичної системи (ЕЕС) по активній потужності і напрузі може бути зведена до розрахунку економічного струморозподілу (за заступною R-схемою) з наступним введенням режиму в допустиму область. Як елемент електроенергетичної системи електрична станція в цьому обчислювальному процесі представляється економічним опором, який визначається

$$R_{ei} = \frac{B_i(P_i)U_i^2 u_i}{P_i^2 c},$$

де $B_i(P_i)$ – витратна характеристика і-ої станції; P_i – потужність і-ї станції; U_i – напруга на шинах і-ї станції; u_i – ціна тони умовного палива на і-й станції; c – вартість 1 кВт·год втрат електроенергії.

За опорами R_{ei} розміщуються джерела струму і в ітераційному процесі обчислень досягається баланс потужностей в ЕЕС і виконання всіх обмежень на параметри режиму.

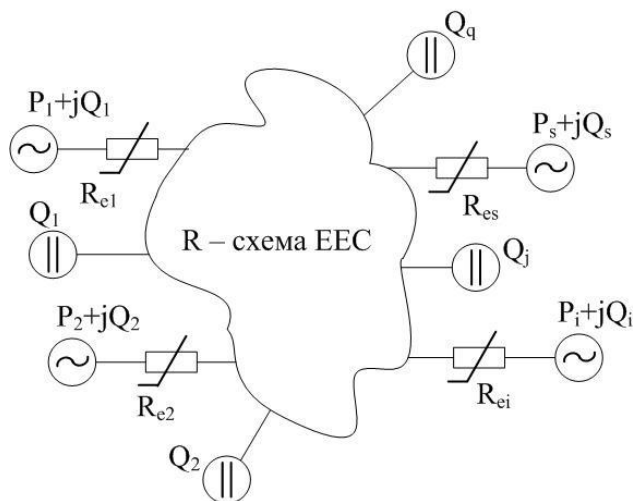


Рис. 2 - Заступна схема ЕЕС з економічними опорами

КОМПЛЕКСНА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЕС (без врахування вартості генерування реактивної потужності)

Розглянемо випадок роботи s джерел активної і реактивної потужності (це можуть бути електростанції або окремі агрегати) та q джерел реактивної потужності в ЕЕС з сумарним навантаженням $\sum P_n$ і $\sum Q_n$. Цільову функцію представимо як суму затрат на виробництво активної потужності, в тому числі на покриття втрат потужності в електричних мережах. Тоді задача оптимізації формулюється:

$$Z = \sum_{i=1}^s u_i B_i(P_i) \rightarrow \min \quad \left. \begin{array}{l} \text{за умов балансу потужностей в системі} \\ \sum_{i=1}^s P_i - \sum P_n - \Delta P(P_i, Q_i) = 0, \\ \sum_{i=1}^s Q_i + \sum_{j=1}^q Q_j - \sum Q_n - \Delta Q(P_i, Q_i) = 0. \end{array} \right\}$$

Подамо витрати на виробництво електроенергії як вартість втрат електроенергії в активному опорі R_{ei} за такий же проміжок часу. Тоді при роботі станції з постійним навантаженням на проміжку часу T можна записати:

$$Z = \sum_{i=1}^s u_i B_i(P_i) = \sum_{i=1}^s \Delta P_i c + \sum_{j=1}^q \Delta P_{Q_j} c \rightarrow \min \quad \text{за умов балансу потужностей в системі.}$$

Витрати, еквівалентні затратам на виробництво електроенергії на i -й станції, визначаються:

$$B_i(P_i) u_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \cdot R_{ei} c.$$

З останнього виразу визначається опір, вартість втрат в якому еквівалентна затратам на виробництво активної потужності на i -й станції, включаючи і активну потужність, що йде на покриття втрат від потоків реактивної потужності від i -ої станції Q_i :

$$R_{ei} = \frac{B_i(P_i) U_i^2 u_i}{(P_i^2 + Q_i^2) c}.$$

Якщо розмістити джерела електричної енергії за опорами, то таким чином оптимізуються витрати на виробництво електроенергії для покриття навантаження ЕЕС $\sum P_n$ і $\sum Q_n$, а також втрат активної потужності від перетоків активної і реактивної потужностей в системі. Якщо при цьому в розрахунковій моделі ЕЕС електричні мережі представлені заступною R-схемою, то оптимізуються також сумарні втрати потужності в ЕЕС. Тобто досягається комплексна оптимізація ЕЕС по активній і реактивній потужностях.

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ ГАМІЛЬТОНА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Метою даної роботи є зменшення витрат під час виробництва та транспортування електроенергії шляхом використання математичних моделей і методів оптимізації нормальних режимів електроенергетичних систем на основі принципу найменшої дії.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі основні завдання:

- аналіз методів математичного моделювання в задачах оптимального керування нормальними режимами ЕЕС;
- дослідження як проявляється ПНД в електротехніці;
- узагальнення можливостей і шляхів використання ПНД для моделювання оптимальних станів ЕЕС.

Об'єктом дослідження роботи є нормальні режими електроенергетичних систем.

Предметом дослідження є методи комплексної оптимізації нормальних режимів ЕЕС по активній і реактивній потужностях та способи оптимального керування потоками потужності у замкнених електричних мережах.

В роботі проведено розрахунок визначаючи можливість використовувати принцип найменшої дії для встановлення оптимального вузла підключення сонячних електричних станцій.

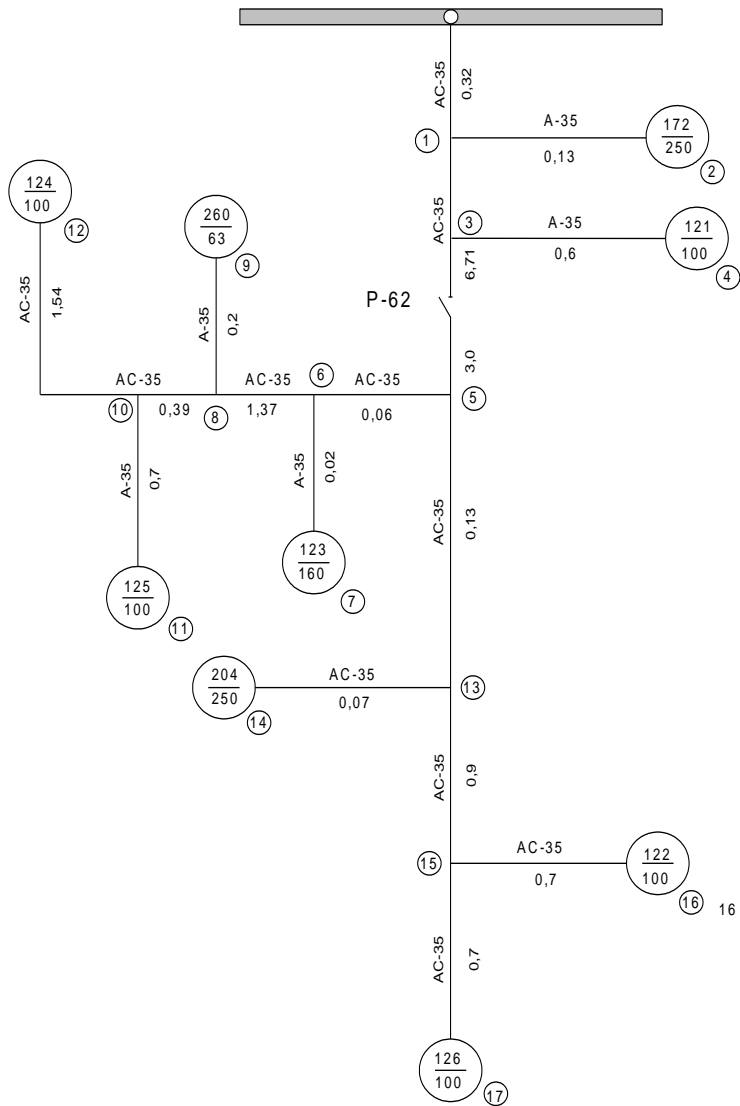
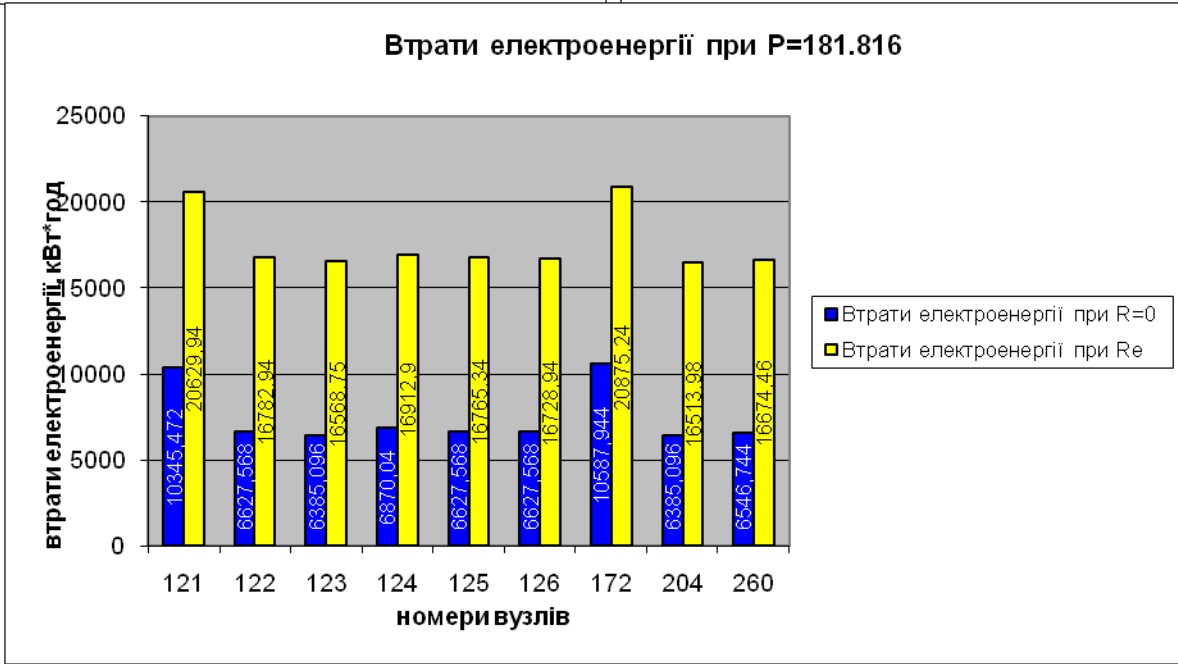
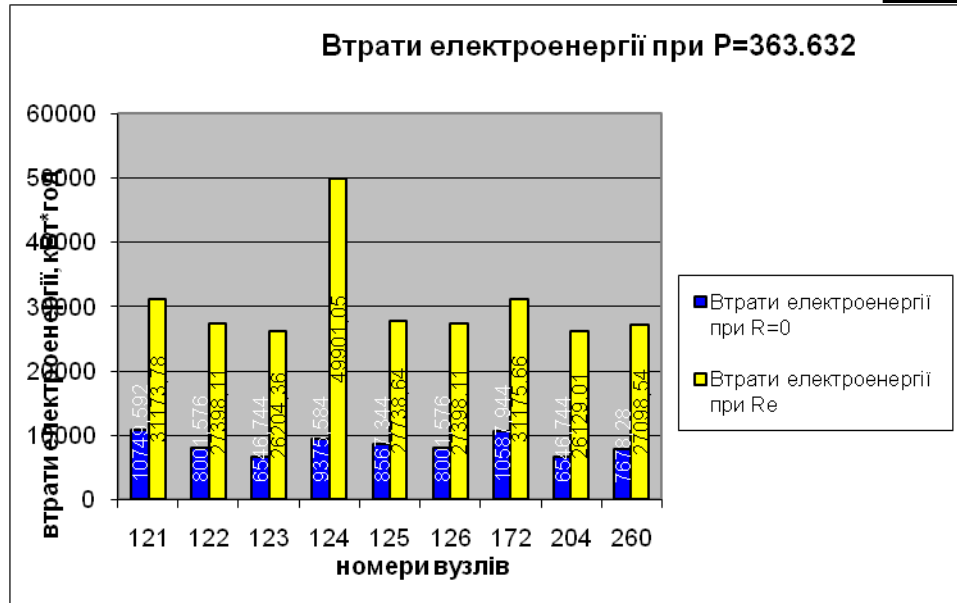
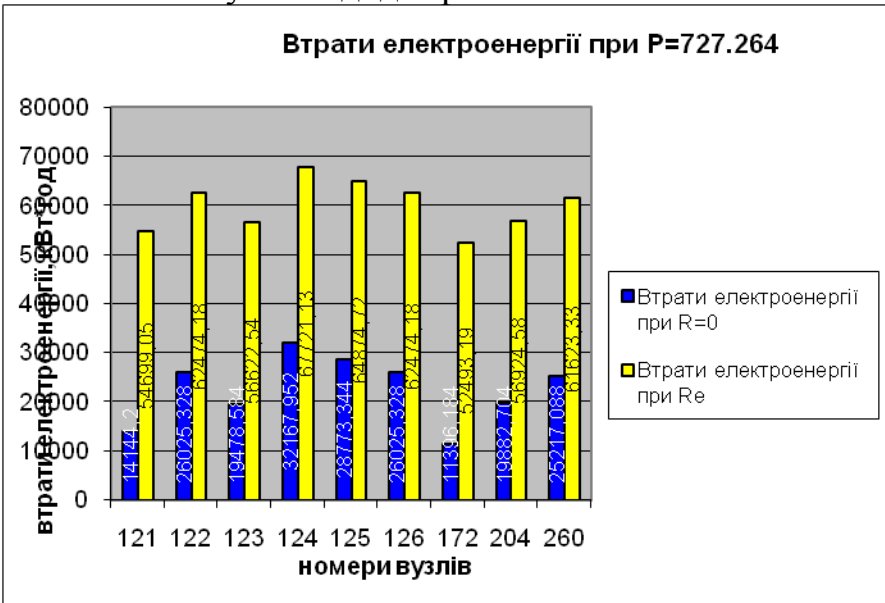


Рисунок 3 – Схема фідера “Луги”

Також були проведені розрахунки економічності підключення СЕС до даного фідера. Розрахунки показані у вигляді діаграм.



Виходячи з даних розрахунків можна зробити висновок, що найменші втрати досягаються у тому випадку коли СЕС підключене до вузла 204 при потужності СЕС 181,816 кВт.

Дані по розрахункам кожного варіанту приведені в таблиці нижче.

Номер вузла	Варіант підключення СЕС	Встановлена потужність	Капітальні витрати	Експлуатаційні витрати	Втрати потужності	Зміна втрат потужності	Зміна вартості втрат електро	Термін окупності
		Qв кВт	К тис.грн.	Е тис.грн.	ΔР кВт	dΔР кВт	ΔЕΔW тис.грн.	Т рік
2222(121)	Без СЕС	0	0	0	13,7	0	0	0
	Варіант 2222.1	182	210	21,84	12,8	0,9	49,518	7,58
	Варіант 2222.2	364	370	38,48	13,3	0,4	22,008	-22,46
	Варіант 2222.3	727,5	530	55,12	17,5	-3,8	-209,08	-2,006
8888(122)	Без СЕС	0	0	0	13,7	0	0	0
	Варіант 8888.1	182	210	21,84	8,2	5,5	302,61	0,74
	Варіант 8888.2	364	370	38,48	9,9	3,8	209,076	2,16
	Варіант 8888.3	727,5	530	55,12	32,2	-18,5	-1017,9	-0,49
3333(123)	Без СЕС	0	0	0	13,7	0	0	0
	Варіант 3333.1	182	210	21,84	7,9	5,8	319,116	0,7
	Варіант 3333.2	364	370	38,48	8,1	5,6	308,112	1,37
	Варіант 3333.3	727,5	530	55,12	24,1	-10,4	-572,21	-0,84
6666(124)	Без СЕС	0	0	0	13,7	0	0	0
	Варіант 6666.1	182	210	21,84	8,5	5,2	286,104	0,79
	Варіант 6666.2	364	370	38,48	11,6	2,1	115,542	4,8
	Варіант 6666.3	727,5	530	55,12	39,8	-26,1	-1436	-0,35
5555(125)	Без СЕС	0	0	0	13,7	0	0	0
	Варіант 5555.1	182	210	21,84	8,2	5,5	302,61	0,74
	Варіант 5555.2	364	370	38,48	10,6	3,1	170,562	2,80
	Варіант 5555.3	727,5	530	55,12	35,6	-21,9	-1204,9	-0,42
9999(126)	Без СЕС	0	0	0	13,7	0	0	0
	Варіант 9999.1	182	210	21,84	8,2	5,5	302,61	0,74
	Варіант 9999.2	364	370	38,48	9,9	3,8	209,076	2,16
	Варіант 9999.3	727,5	530	55,12	32,2	-18,5	-1017,9	-0,49
1111(172)	Без СЕС	0	0	0	13,7	0	0	0
	Варіант 1111.1	182	210	21,84	13,1	0,6	33,012	18,79
	Варіант 1111.2	364	370	38,48	13,1	0,6	33,012	-67,66
	Варіант 1111.3	727,5	530	55,12	14,1	-0,4	-22,008	-6,87
7777(204)	Без СЕС	0	0	0	13,7	0	0	0
	Варіант 7777.1	182	210	21,84	7,9	5,8	319,116	0,7
	Варіант 7777.2	364	370	38,48	8,1	5,6	308,112	1,37
	Варіант 7777.3	727,5	530	55,12	24,6	-10,9	-599,72	-0,8
4444(260)	Без СЕС	0	0	0	13,7	0	0	0
	Варіант 4444.1	182	210	21,84	8,1	5,6	308,112	0,73
	Варіант 4444.2	364	370	38,48	9,5	4,2	231,084	1,92
	Варіант 4444.3	727,5	530	55,12	31,2	-17,5	-962,85	-0,52

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ ГАМІЛЬТОНА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що показана доцільність і ефективність застосування принципу найменшої дії для моделювання оптимальних режимів електроенергетичних систем, що дозволяє використати здатність їх до самооптимізації під час розрахунків і практичної реалізації керуючих впливів. Зокрема:

– розвинуто метод оптимізації режимів електроенергетичної системи по активній і реактивній потужностях з використанням принципу найменшої дії, який зводиться до розрахунків режимів ЕЕС за її заступною R -схемою, де джерела електроенергії представлені характеристиками економічних опорів, що дає змогу формувати умови ефективнішого використання джерел активної та реактивної потужностей зі зменшенням втрат електроенергії в електричних мережах під час її транспортування.

ВИСНОВКИ

У роботі набула подальшого вирішення актуальна задача зменшення витрат на виробництво та транспортування електроенергії, яке полягає у доведенні доцільності й ефективності застосування принципу найменшої дії (ПНД) для моделювання оптимальних режимів електроенергетичних систем, що дозволяє задіяти здатність останніх до самооптимізації.

Отримані такі нові результати.

1. Проаналізовано дію і використання ПНД в різних галузях науки і техніки, в тому числі і в електротехніці, і показана можливість та доцільність застосування його для побудови методів оптимального керування режимами електроенергетичних систем, коли критерієм оптимальності є мінімум витрат на виробництво електроенергії та мінімум втрат електроенергії під час її транспортування.

2. Показано, що математична модель процесу оптимізації режимів ЕЕС може бути побудована на основі принципу Гамільтона. Це дає змогу визначити економічний режим ЕЕС і розробити на його основі метод оптимізації поточних режимів.

3. Показано, що принцип найменшої дії може бути використаний для оптимального керування режимами ЕЕС. Оптимальне керування режимом ЕЕС здійснюється таки чином, що поточні режими керуючими впливами наближаються до ідеального режиму.

4. Працездатність та ефективність розглянутих у роботі методів підтверджена результатами розрахунків тестової ЕЕС.

Дякую за увагу