

РОЗДІЛ 2. Розробка і реалізація алгоритму оптимізації роботи трансформаторів

2.1. Алгоритм оптимізації комутаційного стану трансформаторів

В підрозділі 1.3 показано теоретичне обґрунтування економічної роботи двохтрансформаторної підстанції. На рис. 2.1 показано розширений ряд можливих варіантів трансформаторних підстанцій.

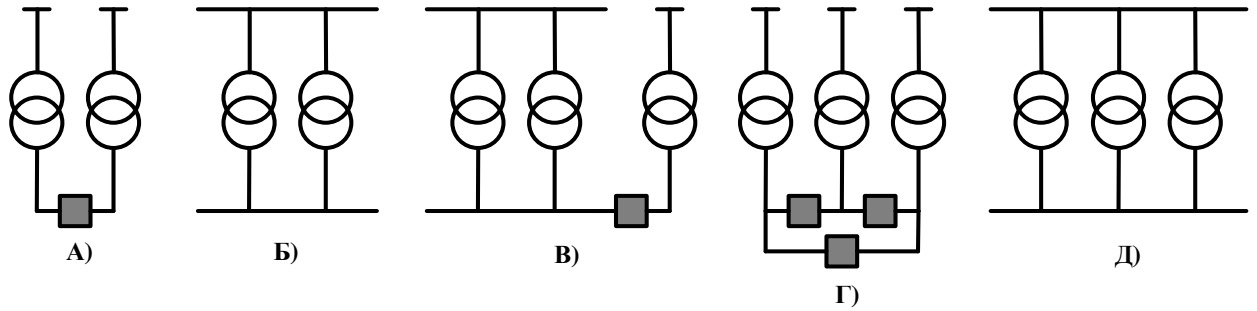


Рисунок 2.1 - Варіанти трансформаторних підстанцій

На рис. 2.1 а), б) показано двохтрансформаторні підстанції з роздільною і паралельною роботою трансформаторів, варіанти в), г), д) представляють трансформаторні підстанції з різними режимами роботи. Можливе подальше ускладнення варіантів у напрямку збільшення кількості трансформаторів і міжсекційних з'єднань.

Розглянемо залежність кількості варіантів комутаційного стану трансформаторів від їх кількості і від кількості міжсекційних з'єднань. Позначимо цифрою «1» включений трансформатор, «0» - виключений, $\widehat{01}$ або $\underline{100}$ – міжсекційне з'єднання секції відключеного трансформатора з секцією включеного трансформатора:

2 трансформатори: 01, 10, 11 (3 варіанти)

3 трансформатори:

001	010	$\widehat{011}$	100	$\widehat{101}$	$\widehat{110}$	111	(7 варіантів)
		$\underline{011}$		$\underline{101}$	$\underline{110}$		+ (3 варіанти)

4 трансформатори:

0001	0010	$\widehat{0011}$	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111	(15 варіантів)
		$\widehat{0011}$	-----	-----	$\widehat{0111}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
		$\widehat{0011}$	-----	-----	$\widehat{0111}$	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
		$\widehat{0011}$	-----	-----		-----	-----				-----				+(26 варіантів)

Таким чином, загальний алгоритм пошуку комутаційного стану трансформаторів повинен включати формальний перебір «маски» працюючих трансформаторів (0100, 1100, 1010 ...), в якому кількість варіантів в залежності від кількості трансформаторів обчислюється за виразом: $K_{VT} = 2^{kt} - 1$, де K_t – кількість трансформаторів, а також перебір варіантів міжсекційних з'єднань, формальна реалізація якого значно складніша. Для перебору варіантів міжсекційних з'єднань можна запропонувати аналогічний принцип «маски», тобто, наприклад, для трьох міжсекційних з'єднань виконується послідовний підбір маски (001, 010, 011, ...), де 0 і 1 позначають відключене і включене міжсекційне з'єднання. Але підбір маски міжсекційних з'єднань повинен супроводжуватись аналізом появи секцій без живлення або включення секцій на паралельну роботу, що є некоректним варіантом. Кількість варіантів обчислюється за формулою: $K_{VS} = 2^{ks}$, де K_s – кількість міжсекційних з'єднань. За даних умов алгоритм оптимізації комутаційного стану трансформаторів показано на рис. 2.2.

K_p, K_t, K_s – відповідно кількість підстанцій, трансформаторів і міжсекційних з'єднань;

$\Delta P_1, \Delta P_2$ – розрахункові втрати в трансформаторах або в мережі в цілому;

T1, T2, ... - перелік трансформаторів;

CB1, CB2, ... - перелік секційних вимикачів.

Розрахункові втрати $\Delta P_1, \Delta P_2$ можна обчислювати за формулами, наведеними в підрозділі 1.3, або виконувати розрахунок режиму і втрат у всій мережі. Перший спосіб здається простішим і ефективнішим за витратами часу, однак він має суттєві недоліки:

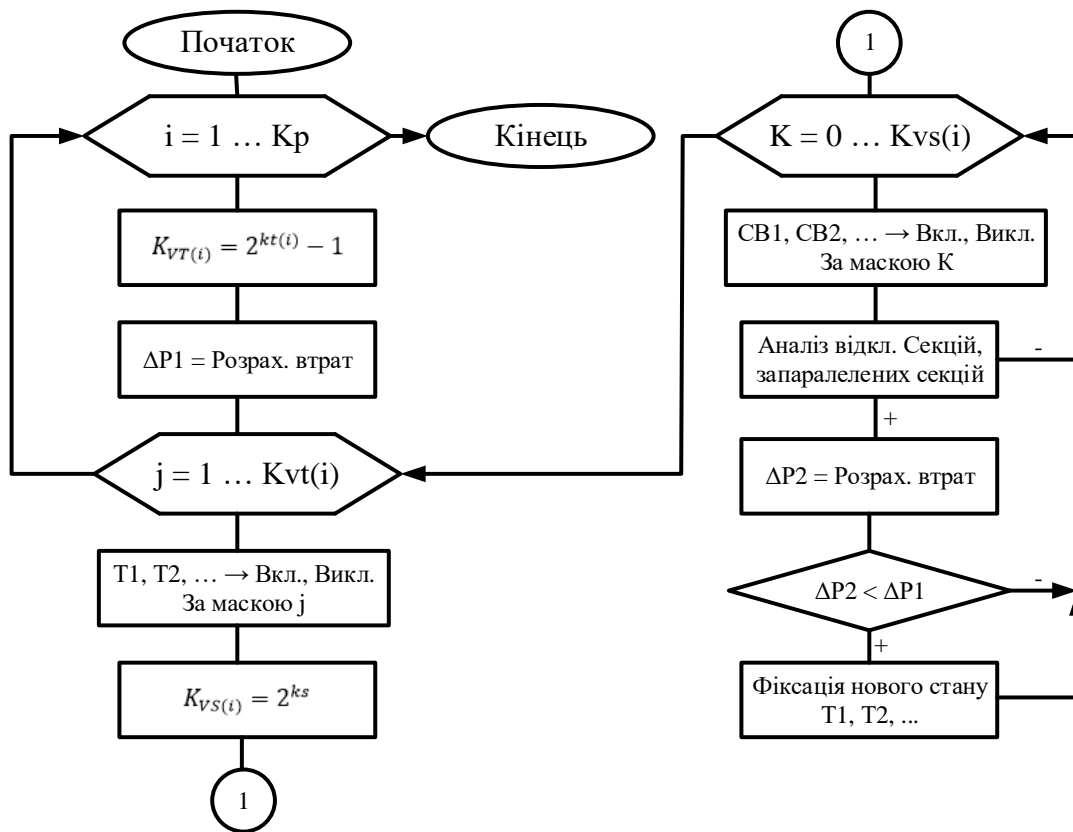
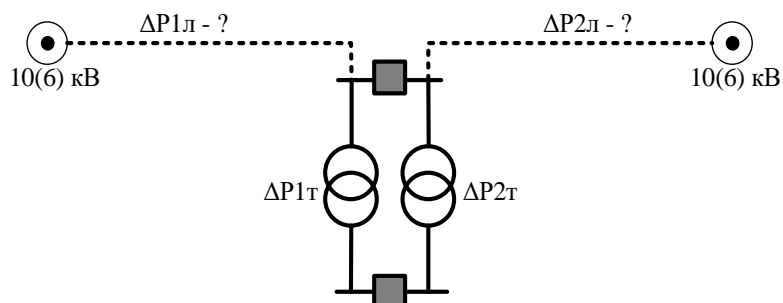


Рисунок 2.2 - Загальний алгоритм оптимізації комутаційного стану трансформаторів

- Необхідно заздалегідь визначити навантаження окремого трансформатора, що можливо тільки за умови якщо секції низької напруги є тупиковими вузлами з власними навантаженнями;
- Необхідно відслідковувати паралельну роботу трансформаторів, і, відповідно розраховувати окремі потоки для кожного з них;
- Не враховуються втрати у живлячих лініях за наявності двостороннього живлення ТП (рис. 2.3):



$\Delta P_{1л}, \Delta P_{2л}$ – втрати у живлячих лініях

Рисунок 2.3 - Двостороннє живлення ТП

Втрати неробочого ходу можуть суттєво відрізнятись в залежності від реальних рівнів напруг. Наприклад, в таблиці 2.1 показано втрати неробочого ходу $\Delta P_{\text{нх}}$ трансформатора ТМ-400/10/0,4 для рівнів напруг з відхиленням $\pm 5\%$:

Таблиця 2.1. Втрати неробочого ходу

$U_{\text{н}}$, кВ	10,5	10	9,5
$\Delta P_{\text{нх}}$, кВт	1158	1050	948
Похибка, %	+10,3	0	-9,7

Тобто при коливанні напруги $\pm 5\%$ маємо похибку $\pm 10\%$, що може суттєво вплинути на кінцеві результати.

Таким чином доводиться робити висновок про необхідність розрахунку режиму всієї мережі для обчислення різниці втрат різних комутаційних станів трансформаторів.

Для практичної реалізації задачі дипломного проекту обмежимося варіантами двотрансформаторних підстанцій (рис. 2.1 а)) оскільки варіанти б), в), г), д) в реальних мережах зустрічаються досить рідко.

Для прискорення варіантних розрахунків відключення трансформатора будемо задавати гілкою з великим опором, наприклад, $R = X = 10^7$ Ом, а провідність прирівнювати нулю. При цьому відпадає необхідність перебудови моделі схеми при переключеннях трансформаторів, тобто маємо постійний склад вузлів і гілок, а відключення імітуємо зміною опору.

На рис. 2.4 показано алгоритм оптимізації комутаційного стану для двохтрансформаторних ТП. Індокси i_1, i_2, i_3 є посиланнями на вихідну базу опорів гілок схеми.

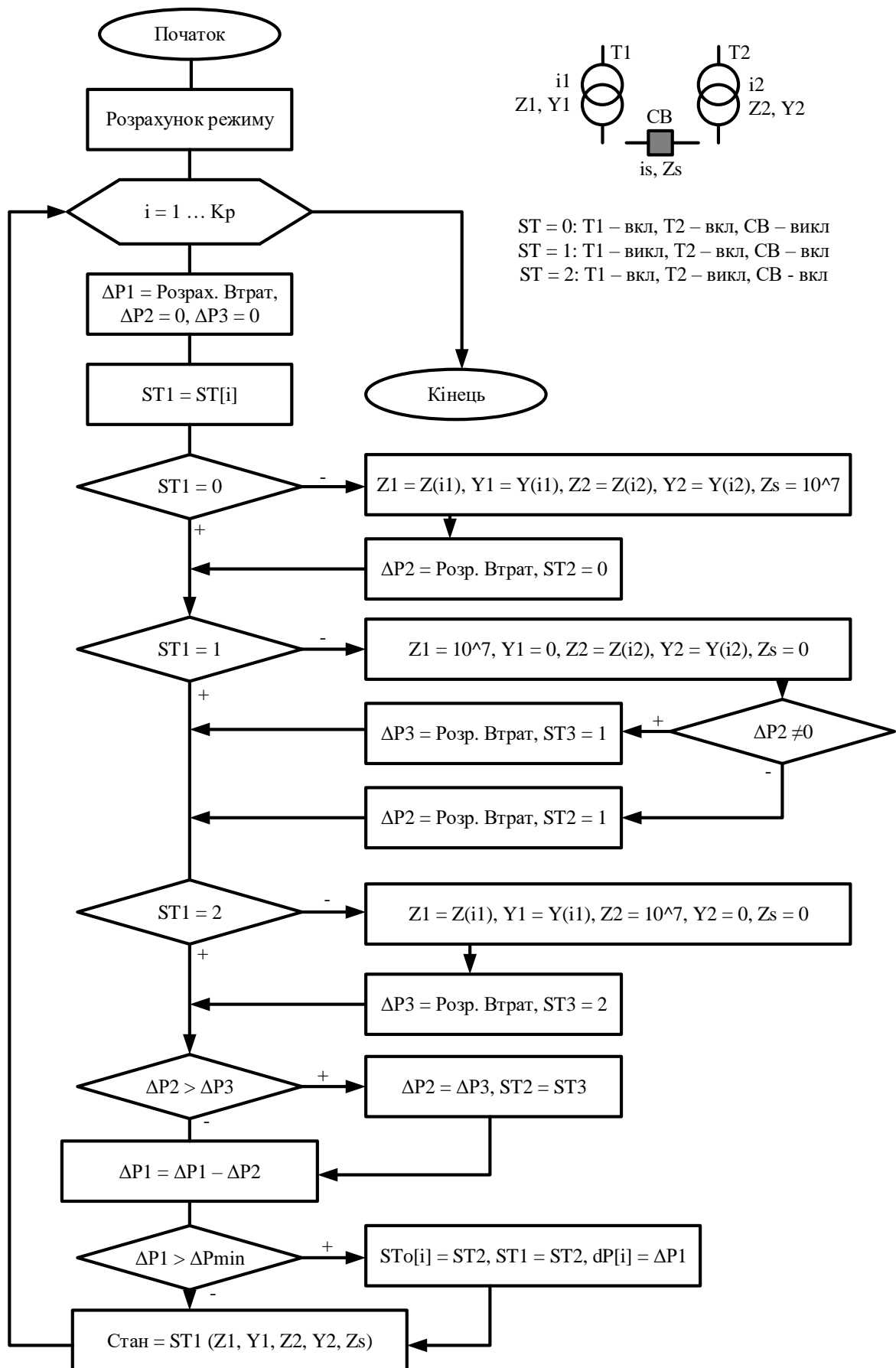


Рисунок 2.4 - Алгоритм оптимізації комутаційного стану двохтрансформаторної підстанції

В алгоритмі на рис. 2.4 за умови паралельної роботи трансформаторів індекс $i_s = 0$, і, відповідно, значення Z_s використовується за умови $i_s \neq 0$. Значення K_p представляє кількість записів двотрансформаторних підстанцій. Формат таблиці двотрансформаторних підстанцій для алгоритму рис. 2.4 представимо наступним чином:

Таблиця 2.2 Формат таблиці двотрансформаторних підстанцій

Підстанція	i_1	i_2	i_s	ST	ST _o	dP

K_p						

де i_1, i_2, i_s – індекси посилань на базу гілок розрахункової схеми – відповідно на трансформатори T1, T2 і на міжсекційне з'єднання;

ST, ST_o – початковий і оптимальний стани трансформаторів (0, 1, 2);

dP – економія втрат (кВт).

Доцільно розробити алгоритм автоматичного пошуку і заповнення таблиці 2.2.

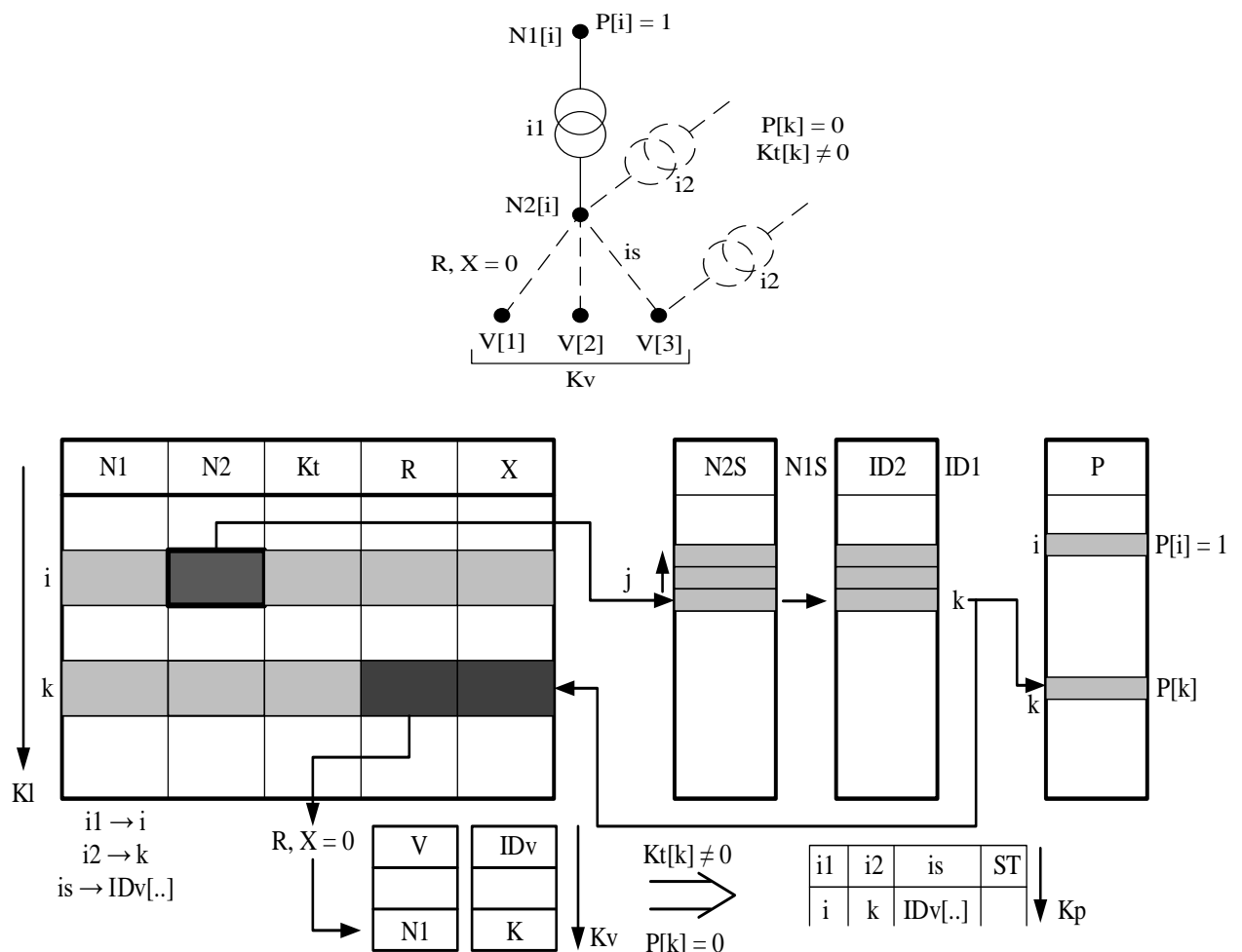


Рисунок 2.5 – Постановка алгоритму пошуку пар трансформаторів

$N1, N2, R, X, K_t$ – вихідні масиви початку і кінця гілки, активного і реактивного опору, і коефіцієнт трансформації;

$N1S, ID1, N2S, ID2$ – упорядковані масиви $N1, N2$ і посилання на вихідну індексацію;

P – ознака того, що трансформатор вже обрано в пару;

$i = 1 .. K_l$ – цикл за гілками схеми;

$j = \text{Find}(N2[i], N2S)$ – пошук номеру у впорядкованому масиві $N2S$;

$k = ID2[j]$ – вибірка вихідного індексу 1 таблиці гілок в масиві P_i

K_v, V, ID_v – кількість міжсекційних з'єднань, їх номери і посилання на дані таблиці гілок.

Алгоритм автоматичного пошуку пар трансформаторів показано на рис. 2.6.

В частині 1) виконуються початкові дії: пересилання масивів $N1, N2$, в $N1S, N2S$, заповнення масивів $ID1, ID2$ вихідними індексами, занулення масиву P і результуючої кількості пар трансформаторів K_p , сортування масивів $N1S, N2S$ і відповідно $ID1, ID2$.

В частині 2) організовується основний цикл по гілках схеми ($1...K_l$), виконується перевірка включення трансформатора в пару ($P[i] = 0 \ \& \ K_t[i] \neq 0$), і при виконанні цієї умови фіксація $P[i] = 1$, занулення K_v .

В частині 3) виконується пошук $N2[i]$ у впорядкованому масиві $N2S$ і, якщо знайдена незайнята трансформаторна гілка ($P[k] = 0, K_t[k] \neq 0$) то в таблицю 2.2 додається черговий запис, або, якщо знайдено міжсекційне з'єднання ($R, X[k] = 0$), то доповнюється масив V і ID_v .

В частині 4) також доповнюються масиви міжсекційних з'єднань, але пошук ведеться по масиву $N1S$.

В частині 5) організовується цикл по міжсекційним з'єднанням ($n = 1 .. K_v$), і, за умови знаходження незайнятої трансформаторної гілки ($P[k] = 0 \ \& \ K_t[k] = 0$) доповнюється таблиця 2.2.

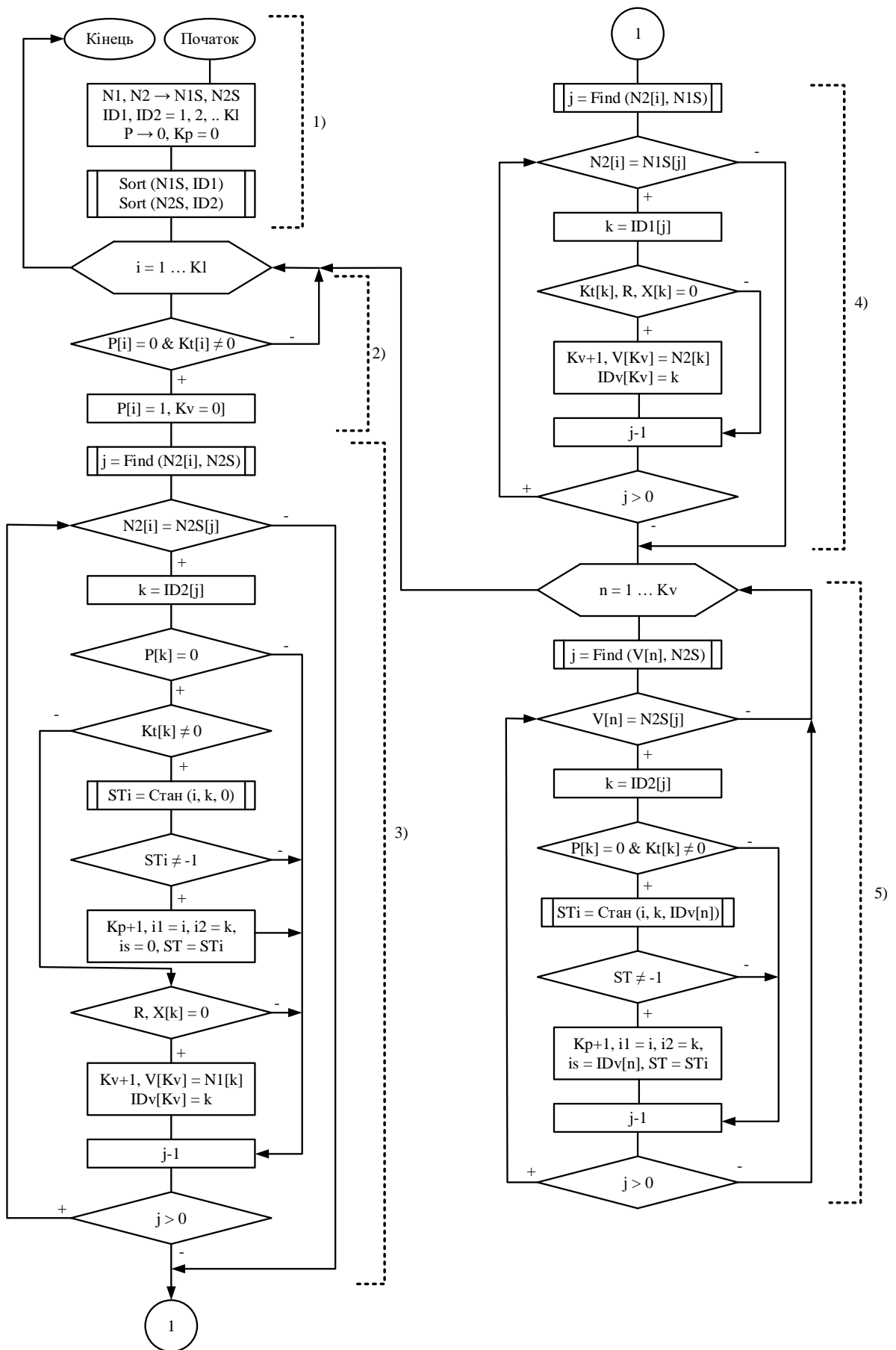


Рисунок 2.6 – Алгоритм автоматичного пошуку пар трансформаторів

2.2. Оптимізація комутаційного стану трансформаторів в комплексі РАОТВ

В комплексі РАОТВ реалізовано алгоритми автоматичного пошуку двотрансформаторних підстанцій і алгоритм оптимізації комутаційного стану трансформаторів, що наведені в підрозділі 2.1. Також враховано обмеження за номінальною потужністю трансформаторів, тобто функція оптимізації має вигляд:

$$F = \Delta P + (\Delta S_1 + \Delta S_2) * k_{ш} \quad (2.1)$$

де ΔP – втрати активної потужності, кВт;

$\Delta S_1, \Delta S_2$ – перевищення номінальної потужності трансформаторів, кВА

$k_{ш}$ – коефіцієнт штрафу.

Реалізація представлена в інтерактивному вікні:

№	Un	Подстанция	T1	Марка	%	х.х.	к.з.	T2	Марка	%	х.х.	к.з.	I1	I2	Iv	ST	ST0	dP, кВт
1	10	3	T1	TM-1000/10/0,4	12	2,701	0,139	T2	TM-1000/10/0,4				2	4	6	3	2	2,632
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		

Рисунок 2.7 – Вікно інтерактивного вигляду програмної реалізації алгоритму оптимізації комутаційного стану трансформаторів в комплексі РАОТВ

Далі докладно представлена інформація по кожному з елементів інтерфейсу:

1. Панель управління

Представляє собою набір кнопок (рис. 2.8), що включають в себе:

- Старт – початок процесу автоматичної оптимізації комутаційного стану трансформаторів;

- Результати – перегляд журналу виконаних змін в схемі під час процесу автоматичної оптимізації комутаційного стану трансформаторів;
- Печать – вивід результатів процесу автоматичної оптимізації комутаційного стану трансформаторів на друк;
- Запись – застосування виконаних комутаційних змін до схеми;
- Выход – завершення роботи з програмою.

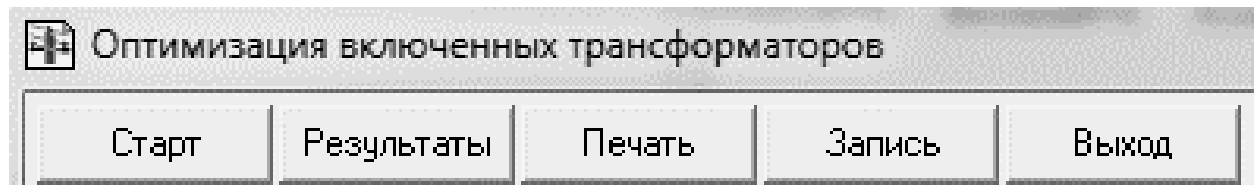


Рисунок 2.8 – Панель управління

2. Панель інтерактивної зміни комутаційного стану

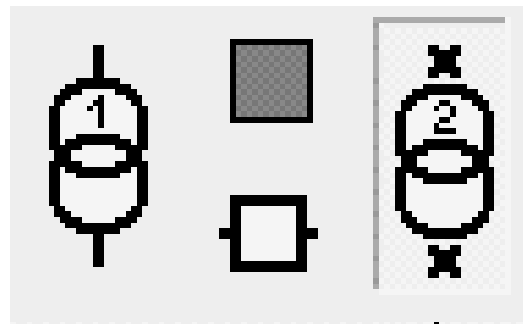


Рисунок 2.9 – Панель інтерактивної зміни комутаційного стану

На рис. 2.9 зображена інтерактивна модель двохтрансформаторної підстанції, яка містить такі елементи:

- Трансформатори – при натисканні на один із них відбувається виведення його з роботи (на малюнку відображається у вигляді хрестиків зі сторін низької та високої напруги трансформатору);
- Шиноз'єднувальний вимикач – при виведенні одного з трансформаторів з роботи вмикається для живлення навантаження на шинах виведеного трансформатору;
- Індикатор оптимального положення – набуває зеленого кольору, якщо перемикання принесло ефект зменшення втрат; набуває

червоного кольору, якщо після ефекту зменшення втрат відбувається їх збільшення.

3. Поле економії втрат

В полі dP (рис 2.10) відображається інформація по втратам. При виконанні перемикання відображаються нові втрати в схемі. А в дужках отримана економія порівняно з вихідним варіантом.

dP = 2,840 (2,632) кВт 2,632 кВт

Рисунок 2.10 – Поле економії втрат

4. Поле інформації про обладнання

Відображається інформація про знайдені двохтрансформаторні підстанції (рис. 2.11), а саме:

- U_H - номінальна напруга;
- Подстанция - номер підстанції;
- T1 - назва першого трансформатору;
- Марка - марка першого трансформатору;
- % - завантаження першого трансформатора у %;
- х.х - втрати холостого ходу першого трансформатору;
- к.з - втрати короткого замикання першого трансформатору;
- T2 - назва другого трансформатору;
- Марка - марка другого трансформатору;
- % - завантаження другого трансформатора у %;
- х.х - втрати холостого ходу другого трансформатору;
- к.з - втрати короткого замикання другого трансформатору;
- I1, I2, Iv - індекси посилянь на гілки розрахункової схеми;
- ST - вихідне положення ТП;
- ST_О - оптимальне положення ТП;
- dP - економія втрат.

№	Ун	Подстанция	T1	Марка	%	х.х.	к.з.	T2	Марка	%	х.х.	к.з.	I1	I2	Iv	ST	STo	dP,кВт	▲	
1	10	3	T1	TM-1000/10/0,4	12	2,701	0,139	T2	TM-1000/10/0,4				2	4	6	3	2	2,632		
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				

Рисунок 2.11 – Поле інформації про обладнання

2.3. Контрольні розрахунки

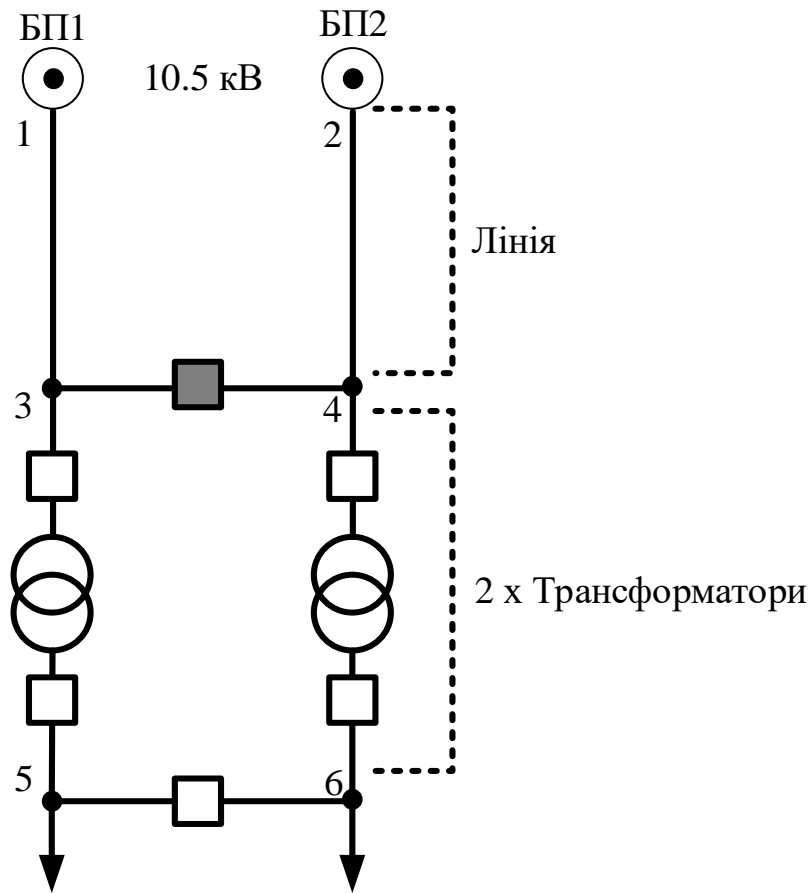


Рисунок 2.12 – Схема контрольного прикладу

Схема контрольного прикладу (рис. 2.12) складається з двох балансуючих пунктів – БП1 та БП2, двотрансформаторної підстанції, яка отримує живлення по лініям від балансуючих пунктів. Лінії повітряні, марки АС-35, протяжністю 5000 м. На шинах низької напруги трансформаторів присутнє навантаження, що представляє собою побутових споживачів розподільчих мереж.

Параметри лінії, які розглядаються в контрольному прикладі:

- $R, X = 0$
- $R, X = 5000 * АС-35$

Параметри трансформатору ТМ-1000/10/0.4, який розглядається в контрольному прикладі наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Параметри трансформатору ТМ-1000/10/0.4

Параметри	До 1970 року випуску	Після 1970 року випуску
$\Delta P_{кз}$, кВт	15	12,2
$\Delta P_{хх}$, кВт	5,1	2,45
$U_{кз}$, %	6,5	5,5
$I_{хх}$, %	5,5	1,4

Трансформатори, які випускалися після 1970 року характеризувалися переходом на новий технологічний процес виробництва. За рахунок цього вдалося домогтися зменшення втрат холостого майже в 2 рази.

Оскільки можливі випадки встановлення на ТП трансформаторів різного року виробництва, то необхідно провести контрольні розрахунки і для такого випадку.

Загалом, проведемо контрольні розрахунки для трьох випадків:

- Лінія R, X = 0, 2xТМ-1000
- Лінія R, X = 5000*АС-35, 2xТМ-1000
- Лінія R, X = 0, ТМ-1000, ТМ(до 1970)-1000

1) В першому випадку лінія відсутня - R, X = 0, досліджуємо режими роботи двох однакових трансформаторів 2xТМ-1000. Результати розрахунків представлені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Результати розрахунків

$P_{НАВ}$ (5 %)	ΔP_1	$\Delta P_{Т1}$	$\Delta P_{Л1}$	ΔP_2	$\Delta P_{Т2}$	$\Delta P_{Л2}$	Опт	%
50 (7%)	5,472	5,472	0	2,840	2,840	0	2,632	48
100 (12 %)	5,681	5,681	0	3,262	3,262	0	2,419	43
150 (18 %)	6,031	6,031	0	3,939	3,939	0	2,058	34
200 (23 %)	6,525	6,525	0	4,980	4,980	0	1,545	24
250 (29 %)	7,163	7,163	0	6,289	6,289	0	0,874	12
300 (35 %)	7,947	7,947	0	7,908	7,908	0	0,039	0,5

Як видно з результатів, такий режим роботи досліджуваної підстанції є оптимальним з точки зору економії втрат і доцільності впровадження даних заходів.

- 2) Лінія R, X = 5000*AC-35, 2xTM-1000. В даному досліді буде перевірено вплив живлячих ліній на режими роботи трансформаторів. Результати представлені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Результати розрахунків

$P_{\text{НАВ}} (5 \%)$	ΔP_1	ΔP_{T1}	$\Delta P_{Л1}$	ΔP_2	ΔP_{T2}	$\Delta P_{Л2}$	Опт	%
50 (7%)	6,444	5,441	1,003	4,072	2,813	1,259	2,372	44
100 (12 %)	7,502	5,626	1,876	6,175	3,218	2,957	1,327	24
130 (16 %)	8,467	5,806	2,661	8,132	3,608	4,524	0,335	6

За результатами розрахунку можна зробити висновок, що живлячі лінії досить суттєво впливають на режим роботи ТП і зменшують можливість для маневру в зміні комутаційного стану встановлених трансформаторів. Вже при завантаженні трансформатору на 16%, економічна ефективність такого заходу стає надто малою, щоб працювати в такому режимі.

- 3) Лінія R, X = 0, TM-1000, TM(до 1970)-1000. В даному досліді буде перевірено режим роботи ТП, коли встановлено два трансформатори однакової номінальної потужності, але різного року випуску.

Таблиця 2.6. Результати розрахунків

$P_{\text{НАВ}} (5 \%)$	ΔP_1	ΔP_{T1}	$\Delta P_{Л1}$	ΔP_2	ΔP_{T2}	$\Delta P_{Л2}$	Опт	%
50 (7%)	8,401	8,401	0	2,840	2,840	0	5,561	66
100 (12 %)	8,635	8,635	0	3,262	3,262	0	5,373	62
150 (18 %)	9,026	9,026	0	3,973	3,973	0	5,053	56
200 (23 %)	9,577	9,577	0	4,980	4,980	0	4,597	48
250 (29 %)	10,290	10,290	0	6,289	6,289	0	4,001	39
300 (35 %)	11,167	11,167	0	7,908	7,908	0	3,259	29
350 (41 %)	12,210	12,210	0	9,844	9,844	0	2,366	19
400 (47 %)	13,421	13,421	0	12,106	12,106	0	1,315	10
450 (53 %)	14,803	14,803	0	14,702	14,702	0	0,101	0,7

Данна ситуація є актуальною, оскільки провівши аналіз досліджуваних районних мереж, стає зрозуміло, що досить велика кількість двохрансформаторних ТП обладнані застарілими трансформаторами. Вони характеризуються більшими втратами холостого ходу. Як видно з таблиці результатів, ефективність заходів по зміні комутаційного стану трансформаторів зберігається навіть при 45% завантаженні.

Висновок. В даному розділі були приведені розроблені алгоритми оптимізації комутаційного стану двохрансформаторної підстанції та автоматичного пошуку пар трансформаторів. Для алгоритму було розроблено інтерактивний графічний інтерфейс з інтуїтивним керуванням. Роботу комплексу було перевірено на прикладі. Були відпрацьовані 3 варіанти контрольних розрахунків при різних конфігураціях мережі.