

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# МЕТОДИ СИНТЕЗУ СТРУКТУР ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

**Комп'ютерний практикум**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»  
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Укладачі: А. О. Абрамова, С. О. Примиська

Електронне мережеве навчальне видання

Київ  
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО  
2024

УДК 004.94  
А12

Укладачі: *Абрамова Алла Олександрівна*, канд. техн. наук, доц.  
*Примиська Світлана Олексіївна*, канд. техн. наук, ст. викл.

Рецензент *Джигирей Ірина Миколаївна*, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор *Складанний Денис Миколайович*, канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол №7 від 09.05.2024 р.)  
за поданням вченої ради інженерно-хімічного факультету  
(протокол № 4 від 29.04.2024 р.)*

А12 **Методи синтезу структур технологічних систем** [Електронний ресурс] : комп'ютерний практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації» спец. 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А. О. Абрамова, С. О. Примиська. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 73 с.

Навчальний посібник розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Навчальний посібник призначений для виконання практичних робіт з дисципліни «Методи синтезу структур технологічних систем», що викладається згідно з учбовим планом бакалаврської підготовки інженерно-хімічного факультету. Видання забезпечує вивчення студентами теоретичного матеріалу, представлено приклади виконання практичних робіт та буде корисним для самостійної роботи.

УДК 004.94

Реєстр. № НП 23/24-469. Обсяг 1,3 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>4</b>
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА 1. ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>5</b>
1.1 Короткі теоретичні відомості .....	5
1.2 Завдання та зміст звіту .....	8
1.3 Хід виконання на прикладі.....	8
Контрольні питання до практичної роботи № 1 .....	10
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА 2. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ ГРАФОАНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ.....</b>	<b>11</b>
2.1 Короткі теоретичні відомості .....	11
2.2 Завдання та зміст звіту .....	15
2.3 Хід виконання на прикладі.....	16
Контрольні питання до практичної роботи №2.....	19
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА 3. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ ЗА ЕВРИСТИЧНИМИ ПРАВИЛАМИ .....</b>	<b>20</b>
3.1 Короткі теоретичні відомості .....	20
3.2 Завдання та зміст звіту .....	22
3.3 Хід виконання на прикладі.....	23
Контрольні питання до практичної роботи №3.....	26
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА 4. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН.....</b>	<b>27</b>
4.1 Короткі теоретичні відомості .....	27
4.2 Завдання та зміст звіту .....	30
4.3 Хід виконання на прикладі.....	31
Контрольні питання до практичної роботи №4.....	38
<b>ПРАКТИЧНА РОБОТА 5. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПІНЧ-АНАЛІЗУ .....</b>	<b>39</b>
5.1 Короткі теоретичні відомості .....	39
5.2 Завдання та зміст звіту .....	41
5.3 Хід виконання на прикладі.....	41
Контрольні питання до практичної роботи №5.....	46
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>47</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>49</b>
ДОДАТОК А. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ №1 .....	49
ДОДАТОК Б. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНИХ РОБІТ №2-5 .....	55
ДОДАТОК В. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 2 В EXCEL .....	61
ДОДАТОК Г. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 3 В EXCEL.....	66
ДОДАТОК Д. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 4 В EXCEL .....	68
ДОДАТОК Е. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 5 В EXCEL.....	71

## Вступ

Синтез оптимальної структури технологічних систем, що застосовується практично в будь-якому виробництві, є ключовою задачею з позицій енергозбереження. Знання сучасних методів синтезу оптимальних технологічних систем при рішенні практичних задач корисно в теперішній час.

*Метою* даної дисципліни є формування комплексу знань, умінь та досвіду, необхідних для використання сучасних методів синтезу оптимальних систем теплообміну та вміння їх застосовувати при рішенні практичних задач.

*Предметом вивчення* дисципліни є системи теплообміну.

У процесі вивчення дисципліни студент оволодіє знаннями з методів синтезу оптимальних структур технологічних систем.

Навчальний посібник розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Навчальний посібник призначений для виконання практичних робіт з дисципліни «Методи синтезу структур технологічних систем та забезпечує вивчення студентами теоретичного матеріалу, представлено приклади виконання практичних робіт та буде корисним для самостійної роботи.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА 1. ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДНИХ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

*Мета:* набути навичок виконувати ексергетичний аналіз складних хіміко-технологічних систем.

### 1.1 Короткі теоретичні відомості

Застосування ексергетичного підходу найбільш ефективно при аналізі хіміко-технологічних систем (ХТС), що мають велику кількість джерел та стоків енергії. Термодинамічну ефективність системи визначають як відношення кількості ексергії відведених із системи цільових продуктів до ексергії витраченої сировини та енергії:

$$\eta_c = \frac{\sum E_{eux}}{\sum E_{ex}} \quad (1.1)$$

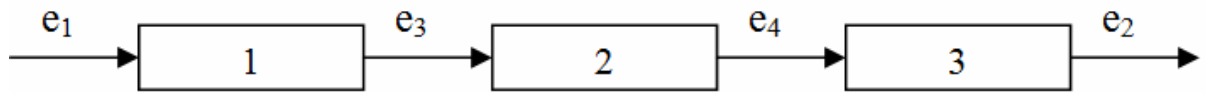
Рівняння ексергетичного балансу для ХТС:

$$\sum_{i=1}^N E_{exi} = \sum_{j=1}^M E_{euj} + \sum_{k=1}^L D_k \quad (1.2)$$

Для дослідження термодинамічної досконалості ХТС слід встановити зв'язок загального показника якості системи  $\eta_c$  із характеристиками її окремих елементів. Ефективність окремого елемента ХТС оцінюється з допомогою коефіцієнту ексергетичних втрат  $\eta_E$  і коефіцієнту інтенсивності  $\eta_N$ .

Вигляд функціонального зв'язку буде різнитися в залежності від структури системи. Найпростішим варіантом організації структури ХТС є послідовне, паралельне, з рециклом (як по матеріальному, так і по енергетичному потоці). Технологічна схема зазвичай включає в себе набір подібних з'єднань елементів. Нижче представлено вирази залежностей коефіцієнту ефективності  $\eta_c$  від внутрішніх характеристик системи для різних типів з'єднань.

### Послідовне з'єднання елементів ХТС



$$\begin{aligned}\eta_c &= e_2 / e_1 \\ e_3 &= e_1(1 - \eta_{D1}) = \alpha_{13} e_1 \\ e_4 &= e_3(1 - \eta_{D2}) = \alpha_{34} e_3 \\ e_2 &= e_4(1 - \eta_{D3}) = \alpha_{42} e_4\end{aligned}\quad (1.3)$$

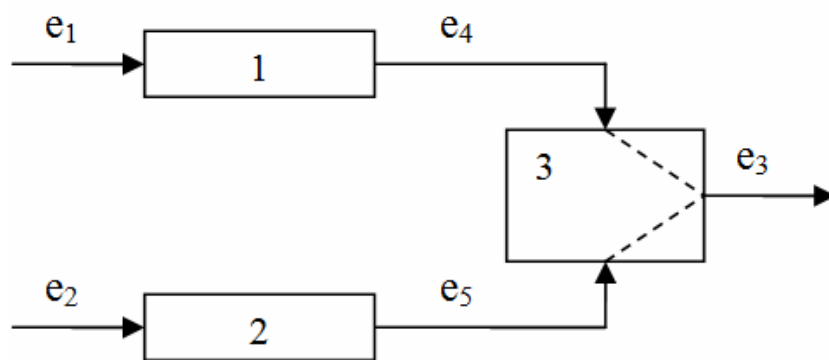
Тут  $\alpha_{ij}$  коефіцієнт передачі ексергетичного потоку, який є функцією локальних ексергетичних характеристик елемента.

$$\eta_c = \alpha_{13} \alpha_{34} \alpha_{42}.$$

Для  $N$  послідовних елементів, коефіцієнт ефективності дорівнює добутку коефіцієнта передачі всіх елементів, з яких складається дана ХТС:

$$\eta_c = \prod \alpha_k.$$

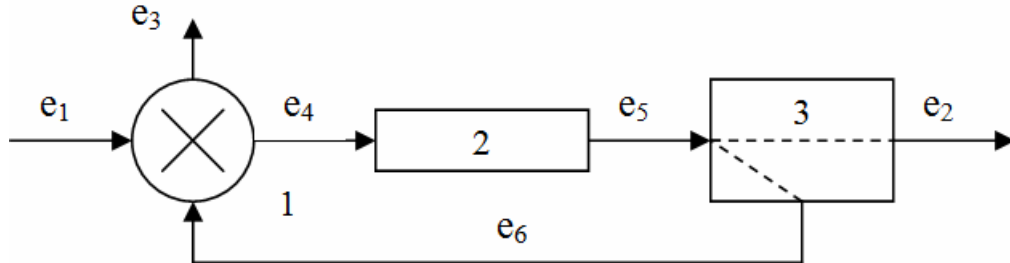
### Паралельне з'єднання елементів ХТС



$$\begin{aligned}\eta_c &= e_3 / (e_1 + e_2) \\ e_4 &= e_1(1 - \eta_{D1}) = \alpha_{14} e_1 \\ e_5 &= e_2(1 - \eta_{D2}) = \alpha_{25} e_2 \\ e_3 &= e_4(1 - \eta_{D3}) + e_5(1 - \eta_{D3}) = \alpha_{43} e_4 + \alpha_{53} e_5 \\ \eta_c &= \alpha_{14} \alpha_{43} e_1 / (e_1 + e_2) + \alpha_{25} \alpha_{53} e_2 / (e_1 + e_2)\end{aligned}\quad (1.4)$$

Таким чином, коефіцієнт ефективності для паралельного з'єднання елементів визначається як сума їх коефіцієнтів ефективності.

### З'єднання елементів ХТС з рециклом по енергетичному потоку

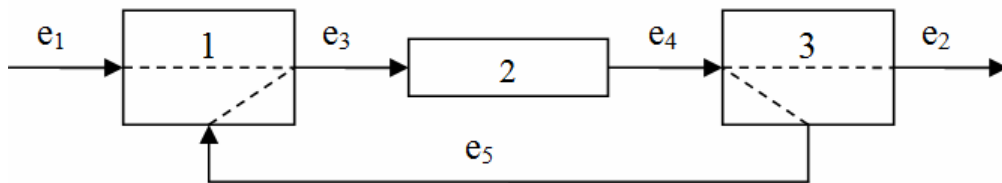


$$\begin{aligned}
 \eta_c &= (e_3 + e_2) / e_1 \\
 e_5 &= e_4(1 - \eta_{D2}) = \alpha_{45}e_4 \\
 e_2 &= e_5(1 - \beta) = \alpha_{52}e_5 \\
 e_6 &= e_5\beta = \alpha_{56}e_5 \\
 \beta &= e_6 / e_5
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

$$\begin{aligned}
 e_4 &= e_1(1 - \eta_{D1} - \eta_{N1}) - e_6(\eta_{D1} + \eta_{N1}) = \alpha_{14}e_1 - \alpha_{64}e_6 \\
 e_3 &= e_1\eta_{N1} + e_6(1 + \eta_{D1}) = \alpha_{13}e_1 + \alpha_{63}e_6 \\
 \eta_c &= \alpha_{13} + \alpha_{14}\alpha_{63} / (1 - \alpha_{64}\alpha_{45}\alpha_{56}) + \alpha_{14}\alpha_{45}\alpha_{52} / (1 - \alpha_{64}\alpha_{45}\alpha_{56})
 \end{aligned}$$

де  $\beta$  - доля ексергії вихідного потоку, що повертається на вхід системи

### З'єднання елементів ХТС з рециклом по матеріальному потоку



$$\begin{aligned}
 \eta_c &= e_2 / e_1 \\
 e_4 &= e_3(1 - \eta_{D2}) = \alpha_{34}e_3 \\
 e_2 &= e_4(1 - \beta) = \alpha_{42}e_4 \\
 e_5 &= e_4\beta = \alpha_{45}e_4 \\
 \beta &= e_5 / e_4 \\
 e_3 &= e_1(1 - \eta_{D1}) + e_5(1 - \eta_{D1}) = \alpha_{13}e_1 + \alpha_{53}e_5 \\
 \eta_c &= \alpha_{13}\alpha_{34}\alpha_{42} / (1 - \alpha_{45}\alpha_{53}\alpha_{34})
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

При визначенні схем з рециклом необхідно враховувати величину  $1/(1 - p_k)$ , де  $p_k$  – ефективність, рівна добутку усіх коефіцієнтів передач замкнутого контуру. Застосовуючи сформульовані правила для розрахунку ефективності послідовного, паралельного з'єднання елементів та схем з рециклом, можна розрахувати термодинамічну ефективність довільної ХТС.

Слід зазначити, що не дивлячись на очевидні переваги ексергетичного методу аналізу, його застосування обмежується рішенням технологічних задач, що містять лише однотипні апарати.

## 1.2 Завдання та зміст звіту

Згідно із заданим індивідуальним завданням (Додаток А) провести ексергетичний аналіз даної ХТС (номери блоків та потоків входу та виходу проставити самостійно).

*Зміст звіту:*

1. Титульний аркуш
2. Назва та мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Завдання
5. Хід виконання із результатами запису термодинамічної ефективності ХТС.
6. Висновок.

## 1.3 Хід виконання на прикладі

Провести ексергетичний аналіз заданої ХТС (рис.1.1.)

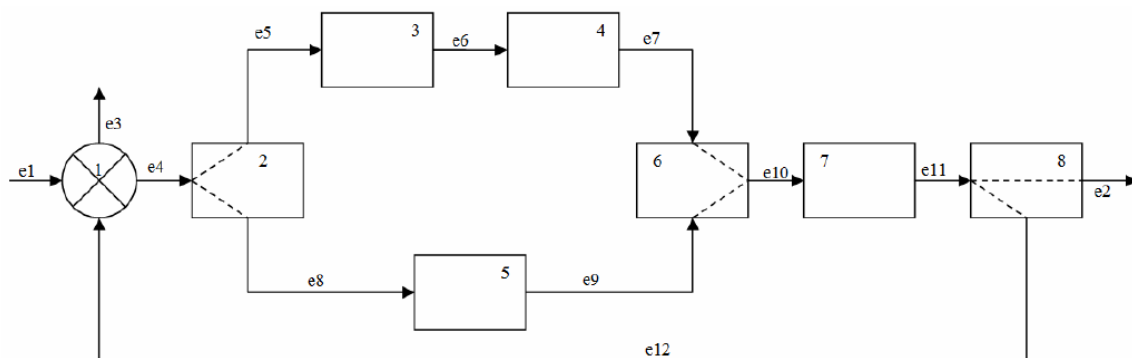


Рис.1.1 Задана ХТС

$$\eta = (e_3 + e_2) / e_1$$

$$e_5 = \alpha_{4,5} * e_4$$

$$e_6 = \alpha_{5,6} * e_5$$

$$e_7 = \alpha_{6,7} * e_6$$

$$e_8 = \alpha_{4,8} * e_4$$

$$e_9 = \alpha_{8,9} * e_8$$

$$e_{10} = \alpha_{7,10} * e_7 + \alpha_{9,10} * e_9$$

$$e_{11} = \alpha_{10,11} * e_{10}$$

$$e_{12} = \alpha_{11,12} * e_{11}$$

$$e_2 = \alpha_{11,2} * e_{11}$$

$$e_3 = \alpha_{1,3} * e_1 + \alpha_{12,3} * e_{12}$$

$$e_4 = \alpha_{1,4} * e_1 + \alpha_{12,4} * e_{12}$$

Виразимо  $e_1$  через  $e_4$ :

$$e_1 = (e_4 - \alpha_{12,4} * e_{12}) / \alpha_{1,4}$$

Термодинамічна ефективність ХТС:

$$\begin{aligned} \eta_c &= \frac{\alpha_{1,3} \cdot e_1 + \alpha_{12,3} \cdot e_{12} + \alpha_{11,2} \cdot e_{11}}{e_4 - \alpha_{12,4} \cdot e_{12}} \cdot \alpha_{1,4} = \frac{\alpha_{1,3} \cdot e_4 - \frac{\alpha_{1,3} \cdot \alpha_{12,4} \cdot e_{12}}{\alpha_{1,4}} + \alpha_{12,3} \cdot e_{12} + \alpha_{11,2} \cdot e_{11}}{e_4 - \alpha_{12,4} \cdot e_{12}} \cdot \alpha_{1,4} = \\ &= \frac{\alpha_{1,3} \cdot e_4 - \alpha_{1,3} \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} \cdot e_{10} + \alpha_{12,3} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} \cdot e_{10} + \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{10,11} \cdot e_{10}}{e_4 - \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} \cdot e_{10}} = \\ &= \left| \frac{e_{10} = \alpha_{7,10} \cdot e_7 + \alpha_{9,10} \cdot e_9 = \alpha_{7,10} \cdot \alpha_{6,7} \cdot e_6 + \alpha_{9,10} \cdot \alpha_{8,9} \cdot e_8 = e_4 \cdot (\alpha_{7,10} \cdot \alpha_{6,7} \cdot \alpha_{5,6} \cdot \alpha_{4,5} + \alpha_{9,10} \cdot \alpha_{8,9} \cdot \alpha_{4,8})}{A = (\alpha_{7,10} \cdot \alpha_{6,7} \cdot \alpha_{5,6} \cdot \alpha_{4,5} + \alpha_{9,10} \cdot \alpha_{8,9} \cdot \alpha_{4,8})} \right| = \\ &= \frac{\alpha_{1,3} \cdot e_4 - e_4 \cdot A \cdot \alpha_{1,3} \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} + e_4 \cdot A \cdot \alpha_{12,3} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} + e_4 \cdot A \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{10,11}}{e_4 - e_4 \cdot A \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11}} = \\ &= \frac{\alpha_{1,3} + A \cdot (\alpha_{12,3} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11} + \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{1,4} \cdot \alpha_{10,11} - \alpha_{1,3} \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11})}{1 - A \cdot \alpha_{12,4} \cdot \alpha_{11,2} \cdot \alpha_{10,11}} \end{aligned}$$

### **Контрольні питання до практичної роботи № 1**

1. Що таке ексергія?
2. В чому полягає ексергетичний метод термодинамічного аналізу?
3. В чому полягає топологічний метод термoeкономiчного аналізу?
4. Як будуються топологічні моделі розподілу витрат?
4. Як розраховується ексергії типових хімічних процесів?
5. Як розраховується ексергія за методом Шаргута?

## ПРАКТИЧНА РОБОТА 2. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ ГРАФОАНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ

*Мета:* набути навичок синтезу оптимальної структури системи теплообміну графоаналітичним методом.

### 2.1 Короткі теоретичні відомості

В основі методу лежать наступні допущення:

1. Коефіцієнт теплопередачі  $K_T$  приймається постійним для всіх теплообмінників внутрішньої підсистеми.
2. У внутрішній підсистемі використовуються кожухотрубні теплообмінники з поверхнею теплообміну  $F_{Ti}$ :

$$F_{Ti} = \frac{Q_{Ti}}{K_i \cdot \Delta t_{cp}^i} \quad (2.1)$$

де  $Q_{Ti}$  - теплове навантаження  $i$ -го теплообмінника;  $\Delta t_{cp}^i$  - середня рушійна сила процесу теплопередачі.

3. Вартість  $i$ -го теплообмінного апарата є лінійною функцією від поверхні теплообміну:

$$Z_{k.t.}^i = \alpha (F_{Ti})^b, \quad b = 1 \quad (2.2)$$

Тепер задача синтезу внутрішньої підсистеми може бути сформульована в такий спосіб: для заданого загального теплового навантаження визначити структуру взаємозв'язку технологічних потоків і розподіл теплового навантаження в системі так, щоб загальна поверхня теплообміну була мінімальною.

Для визначення необхідних умов оптимальності структури потоків розглянемо кілька теорем.

### *Теорема 1*

Нехай:

1. число гарячих потоків, холодних потоків і теплообмінників однаково:

$$m = n = N;$$

1) теплове навантаження всіх теплообмінників однакове:

$$Q_{T1} = Q_{T2} = \dots = Q_{TN} = Q_S / N,$$

і всі теплообмінники здатні забезпечити передачу питомого теплового навантаження в бажаному напрямку;

2) водянні еквіваленти однакові для всіх гарячих і холодних потоків;

3) кожен потік вступає в теплообмін один і тільки один раз. Тоді для оптимальності структури взаємозв'язку технологічних потоків необхідно, щоб гарячі й холодні потоки вступали в теплообмін послідовно в порядку спадання їхніх початкових температур.

Наслідок. Нехай:

1.  $m \neq n \neq N$  і  $N \leq \min\{m, n\}$ ;

2. кожен потік піддається теплообміну тільки один раз;

3. потоки в порядку зменшення їхніх початкових температур:

$$\begin{aligned} T_1^H &> T_2^H > \dots > T_m^H \\ t_1^H &> t_2^H > \dots > t_m^H \end{aligned}$$

Тоді для оптимальності структури теплової системи необхідно, щоб перший гарячий потік взаємодіяв з  $[n - (N-1)]$  холодним потоком, другий гарячий потік - з  $[n - (N-2)]$  холодним потоком і т.д.

Таким чином, оптимальною буде структура:

$$(T_1, X_{n-(N-1)}), (T_2, X_{n-(N-2)}) \dots (T_N, X_{n-(N-N)}) \dots$$

### ***Теорема 2***

Якщо один гарячий і один холодний потоки вступають у теплообмін більш ніж один раз в апаратах з однаковим тепловим навантаженням, то оптимальна структура теплової системи повинна бути протиточною. У цій структурі загальна поверхня не залежить від числа апаратів і дорівнює поверхні теплообмінника, що сприймав би все теплове навантаження. Загальна поверхня теплообміну не залежить від розподілу теплового навантаження в протиточній структурі.

### ***Теорема 3***

Нехай один гарячий й один холодний потоки відповідно розбиваються на декілька підпотоків, і кожен підпотік вступає в теплообмін один і тільки один раз. Тоді необхідною умовою оптимальності структури теплової системи є рівність витрат і теплового навантаження підпотоків:

$$G_{Xi} / G_X = G_{Gi} / G_G = Q_{Ti} / G_S, \quad (i = 1, 2, 3 \dots k)$$

Загальна поверхня теплообміну не залежить від кількості апаратів і дорівнює поверхні теплообмінника, що працює під загальним тепловим навантаженням. Для рішення задачі синтезу теплової системи вводиться графічне представлення ентальпії вихідних гарячих і холодних технологічних потоків у вигляді діаграм ентальпії потоків (ДЕП). На вертикальних осях ДЕП (рис. 2.1) відкладаються початкові та кінцеві температури вихідних потоків, причому початок температурних шкал для гарячих і холодних потоків рознесено таким чином, щоб всі гарячі потоки розташовувались вище горизонтальної осі та всі холодні – нижче за неї.

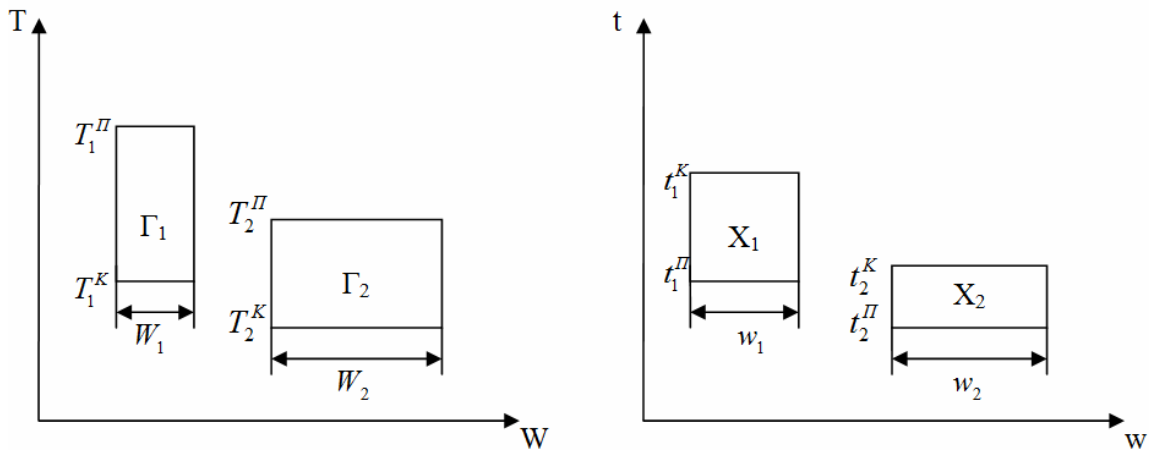


Рис. 2.1. Ентальпійна діаграма вихідних технологічних потоків

По горизонтальній осі відкладаються водянні еквіваленти вихідних технологічних потоків. Початок горизонтальної шкали для кожного потоку розташовується окремо. У такий спосіб на діаграмі кожному потоку відповідає окремий блок. Площа цього блоку дорівнює кількості тепла, яку необхідно передати потоку або відібрати від потоку, щоб його температура досягла необхідного кінцевого значення. Блоком, що відповідають потокам, які вступають у взаємний теплообмін, привласнюються однакові номери. Очевидно, що однойменні блоки повинні мати однакові площі.

Блоки можна ділити на частині як горизонтально, так і вертикально. Горизонтальне розділення блоків означає збільшення числа апаратів у синтезованій тепловій системі, а вертикальне розділення блоків відповідає розділенню потоків на підпотоки.

З теорем 1 – 3 випливає, що якщо структура системи задовольняє рішення загальної задачі, те ДЕТ повинна мати наступні властивості:

- 1) блоки, що відповідають гарячим і холодним потокам, розташовуються у порядку спадання їхніх початкових температур;
- 2) кінцева температура  $j$ -го «гарячого» блоку не може бути нижче початкової температури  $(j + 1)$ -го блоку, а початкова температура  $i$ -го «холодного» блоку не може бути нижче кінцевої температури  $(i+1)$ -го блоку;

3) якщо загальне теплове навантаження системи менше, ніж кількість тепла, яку необхідно як передати холодним потокам, так і відібрати у гарячих потоків, то частина «холодних» блоків з найвищою температурою повинна вступити у взаємний теплообмін.

Задача синтезу оптимальної структури внутрішньої підсистеми формулюється в такий спосіб: за допомогою ДЕП задані параметри вихідних потоків і загальна кількість тепла  $Q_s$ , що передається у внутрішній підсистемі. Необхідно побудувати систему теплообмінників мінімальної сумарної поверхні, здатних передати кількість тепла  $Q$ .

Задача синтезу внутрішньої підсистеми вирішується в результаті перетворення температурно - ентальпійної діаграми, що відповідає вихідній задачі, у діаграму оптимальної структури теплової системи.

## 2.2 Завдання та зміст звіту

Згідно із заданим індивідуальним завданням (Додаток Б) побудувати ентальпійну діаграму технологічних потоків, за якою провести аналізування та синтезувати оптимальну технологічну схему внутрішньої підсистеми. Проаналізувати отримані результати. Отриманий результат відобразити у вигляді оптимальної схеми теплообміну. Для виконання використати MS Excel, Word.

*Зміст звіту:*

1. Титульний аркуш
2. Назва та мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Завдання
5. Хід виконання із результатами (скріншоти)
6. Висновок.

### 2.3 Хід виконання на прикладі

Як приклад розглянемо етапи перетворення вихідної ДЕП при рішенні задачі синтезу оптимальної внутрішньої підсистеми для чотирьох вихідних потоків, параметри яких представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Параметри стану вихідних технологічних потоків

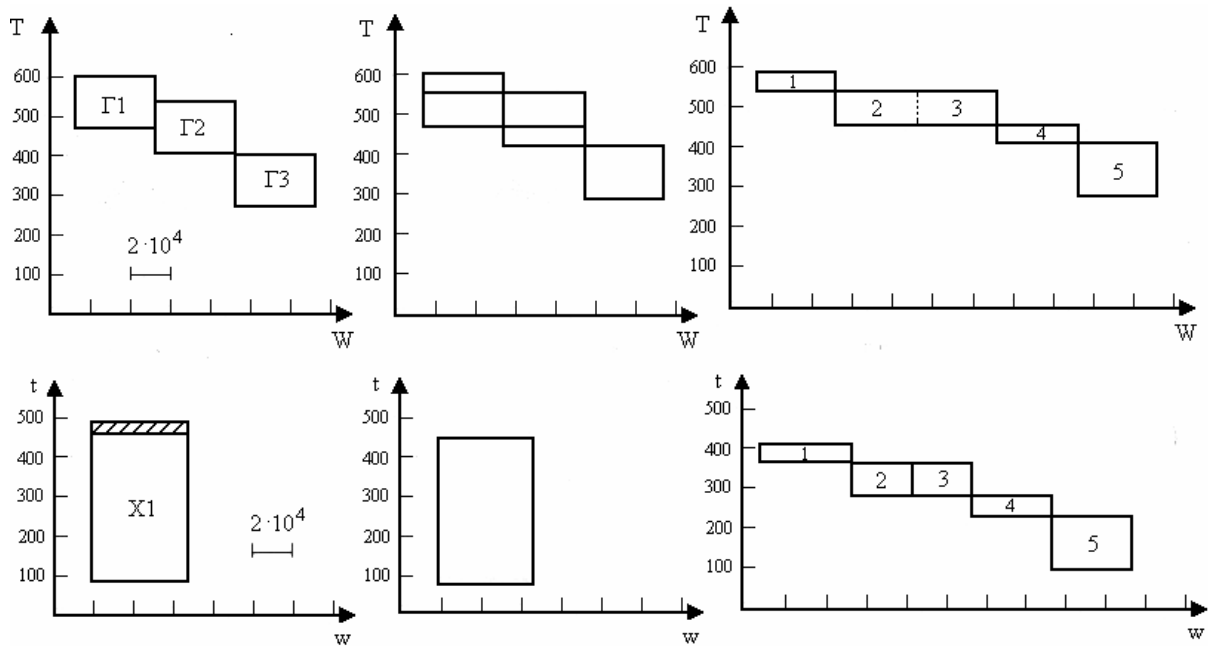
Потоки	Температура, °C		Водяної еквівалент, $W \cdot 10^{-3}$ ,
	початкова	кінцева	
Гарячий Г1	600	450	45
Гарячий Г2	550	400	40
Гарячий Г3	400	250	40
Холодний Х1	50	450	50

Побудова ДЕП відповідній оптимальній структурі, здійснюється по наступних етапах (рис. 2.2):

1) Будують діаграму для вихідних потоків, розташовуючи холодні й гарячі потоки в порядку спадання їх початкових температур.

2) У верхній частині блоків гарячих потоків і нижньої частини блоків холодних потоків виділяється площа, рівна  $Q_s$  - кількості тепла, що передається у внутрішній підсистемі.

(У прикладі  $Q_s = \sum Q_{Gi} = 1,875$  кВт). Частини блоків, що не потрапили в окрему область (на рис. 2.2а заштриховані), тимчасово відкидаються. Це кількість тепла, що буде передано в зовнішній підсистемі і на аналіз внутрішньої підсистеми не вплине.



*Рис. 2.2.* Етапи синтезу внутрішньої системи  
(номера прямокутників – номери теплообмінників)

3) Частина блоків, що залишилися, діляться горизонтальними лініями на рівні температурних меж інших блоків; частини блоків, що відповідають різним вихідним потокам, які розташовані на одному температурному інтервалі, поєднуються в один блок. Вертикальні межі, що відповідають розмежуванню різних потоків, зберігаються у вигляді пунктирних ліній (див. рис. 2.2 б).

4) Зрівнюються за ентальпіями верхній гарячий і холодний блоки. Для чого з більшого блоку відрізається високотемпературна частина, рівна площі меншого блоку, інша частина зміщується. Якщо один з менших блоків складається з декількох вихідних частин, то блок, що зрівнюється, ділиться вертикально на такі ж по площі частини. Відповідним частинам блоків приписуються однакові номери (див. рис. 2.2в).

5) По отриманій діаграмі будується оптимальна технологічна схема внутрішньої підсистеми (рис. 2.3).

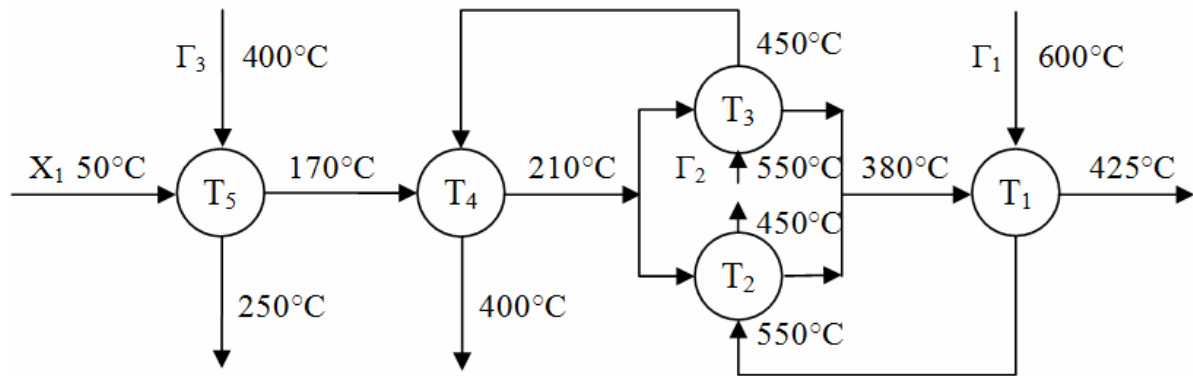


Рис. 2.3. Оптимальна структура внутрішньої підсистеми

Для тих потоків, які не досягли необхідної кінцевої температури, необхідно підібрати відповідні холодильники й нагрівачі. У розглянутому прикладі перший холодний потік нагрівається в зовнішній підсистемі від температури 425 до 450 С. Однак завершення синтезу внутрішньої й зовнішньої підсистем ще не означає завершення синтезу всієї системи, тому що оптимальне значення  $Q_s$  поки не знайдене.

Рішення задачі синтезу оптимальної структури являють собою ітераційний процес. При завершенні синтезу внутрішньої і зовнішньої підсистем кінцеві значення температур приймаються за постійні, а величини теплового навантаження й частки розподілу потоків є оптимізуєчими змінними.

До переваг розглянутого методу синтезу оптимальних теплових систем варто віднести його простоту та наочність. Метод дозволяє значно поліпшити існуючі схеми теплових систем.

У той же час графоаналітичний метод має ряд недоліків, обумовлених прийнятими вихідними допущеннями. Так, відомо, що вартість теплообмінників зростає пропорційно зростанню їх поверхні в ступені 0.6- 0.7, тоді як у теплообмінниках внутрішньої підсистеми вона дорівнює одиниці. Це приводить до появи у внутрішній підсистемі більшої кількості теплообмінників малої площі.

Отримана технологічна схема характеризується надмірною складністю, що призводить до великого збільшення капітальних й експлуатаційних витрат на монтаж теплової системи (40% від вартості теплообмінників) і електроенергію,

необхідну для перекачування рідин, які в процесі синтезу не враховуються. Щоб уникнути такого ефекту, пропонується поєднувати близькі температурні рівні, однак цього може виявитися недостатньо.

Поряд із цим, необхідно відзначити наступне. На підставі теорем 2 й 3 будь-який теплообмінник в оптимальній структурі може бути замінений будь-якою кількістю паралельних прямоточних й (або) протиточних апаратів без зміни загальної поверхні теплообміну, що припускає множинність рішення. Саме їй і обумовлений ітераційний процес синтезу.

Для вибору оптимальної структури може бути використаний додатковий критерій - *мінімальна кількість апаратів*. Якщо теплообмінник, включений в оптимальну структуру, занадто великий для реалізації, він може бути розділений на декілька теплообмінників з меншою поверхнею теплопередачі, після чого необхідно знову провести оптимізацію зміненої структури.

Приклад виконання у програмі Excel наведено у додатку В.

### **Контрольні питання до практичної роботи №2**

1. Які є основні теореми графоаналітичного методу синтезу теплообмінних систем?
2. Як виконується алгоритм графоаналітичного методу синтезу теплообмінних систем?
3. Як визначається теорема 1?
4. Як визначається теорема 2?
5. Як визначається теорема 3?

## ПРАКТИЧНА РОБОТА 3. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ ЗА ЕВРИСТИЧНИМИ ПРАВИЛАМИ

*Мета:* набути навичок синтезу оптимальної структури системи теплообміну за евристичними правилами.

### 3.1 Короткі теоретичні відомості

Задача синтезу теплових систем розв'язується формуванням множини можливих комбінацій початкових гарячих і холодних потоків для проведення операцій теплообміну, що фізично реалізуються, в теплообмінному апараті. Для цього будують таблицю пар взаємодіючих потоків, виходячи з умови передачі максимально можливої кількості тепла в одному теплообмінному апараті при мінімально допустимій різниці температур на кінцях теплообмінника  $t_{\min} = 20^{\circ}\text{C}$ . З таблиці пар за допомогою того або іншого евристичного правила вибирається пара потоків, що вступатимуть у взаємний теплообмін. Якщо в результаті теплообміну дані потоки досягли заданих кінцевих температур, то вони виключаються з розгляду. У іншому разі початковим температурам цих потоків привласнюються значення кінцевих температур результуючих потоків, після чого таблиця пар перебудовується і вибирається нова пара потоків. Дана операція проводиться до тих пір, поки не залишиться потоків, здатних вступити у взаємний теплообмін або всі потоки досягнуть необхідних кінцевих температур. Модуль теплообмінника будується таким чином:

- 1) якщо  $T_j^0 - t_i^0 < \Delta t_{\min}$ , то теплообмін не можливий:  $Q_T = 0$ ,  $T_j^1 = T_j^0$ ,  $t_i^1 = t_i^0$ ;
- 2) якщо  $T_j^K - t_i^0 < \Delta t_{\min}$ , то  $T_j^1 = t_i^0 + \Delta t_{\min}$ , інакше  $T_j^1 = T_j^K$ ;
- 3) якщо  $T_j^0 - t_i^K < \Delta t_{\min}$ , то  $t_i^1 = T_j^0 - \Delta t_{\min}$ , інакше  $t_i^1 = t_i^K$ ;
- 4)  $Q_X = \omega_i(t_i^1 - t_i^0)$ ,  $Q_T = W_j(T_j^0 - T_j^1)$ ,  $Q_T = \min(Q_X, Q_T)$ ;
- 5)  $t_i^1 = t_i^0 + Q_T / \omega_i$ ,  $T_j^1 = T_j^0 - Q_T / W_j$ ;
- 6)  $F_T = Q_T / (K_T \Delta t_{\text{ср}})$ ,  $З_{к.т} = \alpha F_T^B$ .

Модуль холодильника:

- 1)  $Q = W_j (T_j^0 - T_j^K);$
- 2) якщо  $T_j^0 - t_X^K < \Delta t_{\min}$ , то  $t_X^1 = T_j^0 - \Delta t_{\min}$ , інакше  $t_X^1 = t_X^K$ ;
- 3)  $F_X = Q / (K_X \Delta t_{\text{сер}})$ ,  $3_{K.T} = \alpha F_X^B$
- 4)  $3_{E.X} = \tau Q C_X / (c_X (t_X^1 - t_X^H))$ ,

де  $T_j^0$  – температура  $j$ -го холодного потоку на вході в холодильник;  $K_X$  – коефіцієнт теплопередачі в холодильнику, значення якого задане;  $3_{E.X}$  – експлуатаційні витрати на холодоагент.

Модуль нагрівача:

- 1)  $Q = \omega_i (t_i^K - t_i^0);$
- 2)  $\Delta t_0 = T_r - t_i^0$ ,  $\Delta t_1 = T_r - t_i^K$ ;
- 3)  $F_H = Q / (K_H \Delta t_{\text{сер}})$ ,  $3_{K.H} = \alpha F_H^B$ ;
- 4)  $3_{E.H} = \tau Q C_H / \lambda$ ,

де  $t_i^0$  – температура  $i$ -го холодного потоку на вході в нагрівач;  $K_H$  – коефіцієнт теплопередачі в нагрівачі, значення якого задане;  $3_{E.H}$  – експлуатаційні витрати на теплоагент;  $T_r$  – температура теплоагенту.

Приведені річні витрати для системи теплообміну:

$$3_{п.г} = 3 + 3', \quad (3.1)$$

де

$$3 = c \sum_{l=1}^N 3_{K.T}^l; \quad 3' = 3'_K + 3'_E; \quad 3_{K.T}^l = a(F_{T_l})^B; \quad 3'_K = c \left( \sum_{l=1}^{N_X} 3_{K.X}^l + \sum_{l=1}^{N_H} 3_{K.H}^l \right); \quad 3_{K.X}^l = a(F_{X_l})^B;$$

$$3_{K.H}^l = a(F_{H_l})^B; \quad 3'_E = \tau \left( \sum_{l=1}^{N_X} \frac{Q_l C_X}{c_X (t_X^K - t_X^H)} + \sum_{l=1}^{N_H} \frac{Q_l C_H}{\lambda} \right);$$

Тут  $3_{п.г}$  – приведені річні витрати;  $3$  – витрати на внутрішню систему, грн. / год.;  $3'$  – витрати на зовнішню систему, грн. / год.;  $3'_K$  – капітальні витрати на зовнішню систему, грн. / год.;  $3'_E$  – експлуатаційні витрати на зовнішню систему, грн. / год.;  $c$  – нормативний коефіцієнт амортизації, 1/год;  $N$ ,  $N_X$ ,  $N_H$  – кількість теплообмінників, холодильників і нагрівачів;  $3_{K.T}^l$ ,  $3_{K.X}^l$ ,  $3_{K.H}^l$  – капітальні витрати

на  $l$ -й теплообмінник, холодильник і нагрівач;  $a, b$  – вартісні коефіцієнти,  $a > 0$ ;  $0 < b < 1$ ;  $F_T, F_{X_l}, F_{H_l}$  – поверхні теплообміну  $l$ -го теплообмінника, холодильника і нагрівача,  $m^2$ ;  $\tau$  – час роботи системи, рік/рік;  $Q_l$  – кількість тепла, яке передається в  $l$ -му холодильнику або нагрівачі, Дж / год.;  $C_x, C_r$  – ціни холодо- і теплоагенту, грн. / кг;  $c_x$  – теплоємність холодоагенту, Дж / (кг · К);  $t_x^K, t_x^P$  – початкова і кінцева температури холодоагенту;  $\lambda$  – питома теплота паротворення теплоагенту, Дж / кг.

### 3.2 Завдання та зміст звіту

За наданим індивідуальним завданням (Додаток Б) провести аналізування технологічних потоків та синтезувати оптимальну технологічну схему внутрішньої підсистеми. Проаналізувати отримані результати. Отриманий результат відобразити у вигляді оптимальної схеми теплообміну.

Синтез оптимальної структури системи теплообміну провести за наступними евристичними правилами:

**Правило 1.** Обрати для теплообміну гарячий потік з **найбільш високою температурою на вході** у теплообмінник та холодний – з **найбільш високою на виході** з теплообмінника;

**Правило 2.** Обрати для теплообміну холодний потік з **найбільш низькою температурою на вході** і гарячий потік з **найбільш високою температурою на виході** з теплообмінника.

Для виконання використати MS Excel, Word.

*Зміст звіту:*

1. Титульний аркуш
2. Назва та мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Завдання
5. Хід виконання із результатами (приклад оформлення скріншоту виконання практичної роботи з представлено у додатку Г).
6. Висновок.

### 3.3 Хід виконання на прикладі

Проведемо розрахунки системи теплообміну згідно із **правилом 1**.

Таблиця 3.1. Параметри стану технологічних потоків

Потоки	Температура, К		Водяний еквівалент, кВт / К
	початкова	кінцева	
Холодний	300	410	11
Холодний	330	400	8
Холодний	340	395	6
Гарячий	500	410	11
Гарячий	450	380	9
Гарячий	455	400	8

*Перший етап синтезу.* Застосуємо евристику **правило № 1**. Згідно неї потрібно вибрати холодний 1 та гарячий 1 потоки. Як видно з наведеної таблиці (табл. 3.2), холодний потік досягає своєї вихідної температури, а тому його із подальшого розгляду можна виключити.

Таблиця 3.2. Перший етап синтезу

РЯДОК	№ хол. пот.	$T_{ВХ}$	$T_{ВИХ}$	№ гар. пот.	$T_{ВХ}$	$T_{ВИХ}$
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>300</b>	<b>410</b>	<b>1</b>	<b>500</b>	<b>410</b>
<b>2</b>	2	330	400	1	500	410
<b>3</b>	3	340	395	1	500	410
<b>4</b>	1	300	410	2	450	380
<b>5</b>	2	330	400	2	450	380
<b>6</b>	3	340	395	2	450	380
<b>7</b>	1	300	410	3	455	400
<b>8</b>	2	330	400	3	455	400
<b>9</b>	3	340	395	3	455	400

*Другий етап синтезу.* Потрібно вибрати **1** холодний та **3** гарячий потоки. Як видно з наведеної таблиці (табл. 3.3), холодний потік досягає своєї вихідної температури, а тому його із подальшого розгляду можна виключити.

*Таблиця 3.3.* Другий етап синтезу

холодні потоки	температура, К		гарячі п.	температура, К	
	поч.	кін.		поч.	кін.
1	390	410	2	450	380
2	330	400	2	450	380
3	340	395	2	450	380
<b>1</b>	<b>390</b>	<b>410</b>	<b>3</b>	<b>455</b>	<b>400</b>
2	330	400	3	455	400
3	340	395	3	455	400

*Третій етап синтезу.* Потрібно вибрати 2 холодний та 2 гарячий потоки.

*Таблиця 3.4.* Третій етап синтезу

холодні потоки	температура, К		$\Delta T$ , К	W, кВт/К	Q <sub>х</sub> , кВт	гарячі потоки	температура, К	
	поч.	кін.					поч.	кін.
<b>2</b>	<b>330</b>	<b>400</b>	<b>70</b>	<b>8</b>	<b>560</b>	<b>2</b>	<b>450</b>	<b>380</b>
3	340	395	55	6	330	2	450	380
2	330	400	70	8	560	3	427,5	400
3	340	395	55	6	330	3	427,5	400

Четвертий етап синтезу.

Таблиця 3.5. Четвертий етап синтезу

холодні потоки	температура, К		$\Delta T$ , К	W, кВт/К	Qх, кВт	гарячі п.	температура, К	
	поч.	кін.					поч.	кін.
3	340	395	55	6	330	2	387,777	380
3	340	395	55	6	330	3	427,5	400
Початкові темп	376,666						400	

П'ятий етап синтезу.

Таблиця 3.4. П'ятий етап синтезу

холодні потоки	температура, К		$\Delta T$ , К	W, кВт/К	Qх, кВт	гарячі п.	температура, К	
	поч.	кін.					поч.	кін.
3	376,666667	395	18,33333	6	110	2	387,777	380
	388,33217						380	

холодні потоки	температура, К		$\Delta T$ , К	W, кВт/К	Qх, кВт	F	Вартість, ум.од
	поч.	кін.					
3	388,332167	395	6,667833	6	40,007	24	3365,8654

**Розраховані зведені витрати  $Z=18387,6216$**

Оптимальна схема теплообміну показана на рис. 3.1.

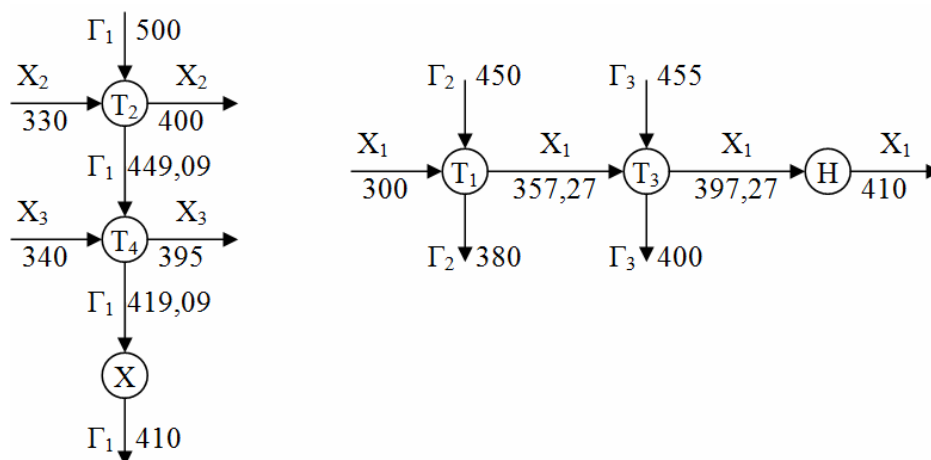


Рис. 3.1. Оптимальна схема теплообміну

### **Контрольні питання до практичної роботи №3**

1. Як формулюється постановка задачі синтезу теплообмінної системи?
2. Які є модулі для розрахунку теплообмінників?
3. Як графічно зображується системи теплообмінну?
4. Які евристичні правила використані у практичній роботі?
5. Як розрахувати зведені витрати?

## ПРАКТИЧНА РОБОТА 4. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

*Мета:* набути навичок синтезу оптимальної структури системи теплообміну на основі теорії нечітких множин.

### 4.1 Короткі теоретичні відомості

В процесі синтезу оптимальної структури системи теплообміну використовують наступні евристичні правила.

**Правило 1.** Для теплообміну вибираються холодний і гарячий потоки, що мають найбільші початкові температури, якщо виконуються наступні критерії:

а) різниця зазначених температур  $K_{11}$  наближається до найбільшого можливого значення:

$$K_{11} = (T_{z.n.} - T_{x.n.}) \rightarrow \max ; \\ (K_{11} > \Delta T; \Delta T = 20)$$

б) зміна температури гарячого потоку  $K_{12}$  не дуже велика:

$$K_{12} = \left( T_{z.n.} - T_{z.d.} \right) - \text{не дуже велика.}$$

де  $\Delta T$  – припустима різниця температур на кінцях протиточного теплообмінного апарата. Звичайно приймають при розрахунках  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ .  $T_{z.d.}$  – досягнута температура гарячого потоку.

**Правило 2.** Для теплообміну вибирають холодний потік, що має максимальну кінцеву температуру, і гарячий потік, що має максимальну початкову температуру, якщо виконані наступні критерії:

а) різниця зазначених температур прагне до максимуму:

$$K_{21} = (T_{z.n} - T_{x.k.}) \rightarrow \max; \quad (K_{21} > \Delta T)$$

б) якщо при теплообміні досягнута температура гарячого потоку наближається до своєї заданої кінцевої температури:

$$K_{22} = (T_{z.d.} - T_{z.k.}) \rightarrow \min$$

в) якщо при теплообміні досягнута температура холодного потоку  $T_{x.d.}$  наближається до своєї заданої початкової температури:

$$K_{23} = (T_{x.d.} - T_{x.n.}) \rightarrow \min$$

Розрахунок досягнутих температур здійснюється за наступним алгоритмом:

1. Обчислити кількість переданої теплоти:

$$Q_z = W_z \cdot (T_{z.n.} - T_{z.k.}); \quad Q_x = W_x \cdot (T_{x.k.} - T_{x.n.}).$$

2. Знайти мінімальне значення  $Q$ :

$$Q = \min(Q_z, Q_x).$$

3. Порівняти водяні еквіваленти. Якщо  $W_z > W_x$ , то виконати пункт 6, інакше пункт 4.

4. Обчислити припустиму кількість переданої теплоти:

$$Q_d = \frac{(T_{z.n.} - T_{x.k.} - \Delta T)}{\frac{1}{W_z} - \frac{1}{W_x}}$$

5. Якщо  $Q_d < Q$ , то прийняти  $Q = Q_d$ .

6. Обчислити досягнуті температури потоків:

$$T_{z.d.} = T_{z.n.} - \frac{Q}{W_z}; \quad T_{x.d.} = T_{z.k.} - \frac{Q}{W_x}.$$

**Правило 3.** Для теплообміну вибираються холодний потік з найменшою початковою температурою й гарячий потік з найменшою кінцевою температурою, якщо виконуються наступні критерії:

а) різниця зазначених температур  $K_{31}$  наближається до найбільшого можливого значення:

$$K_{31} = (T_{z.k.} - T_{x.n.}) \rightarrow \max; \quad (K_{31} > \Delta T)$$

б) досягнута температура гарячого потоку  $T_{г.д}$  наближається до своєї заданої початкової температури:

$$K_{32} = (T_{z.n.} - T_{z.d.}) \rightarrow \min$$

в) досягнута температура холодного потоку  $T_{х.д}$  наближається до своєї заданої кінцевої температури:

$$K_{33} = (T_{x.k.} - T_{x.d.}) \rightarrow \min.$$

Розрахунок досягнутих температур для правил 1 і 3 здійснюється за алгоритмом, схожим на алгоритм розрахунку цих величин за правилом 2.

При моделюванні нечітких понять («більше», «менше», «ближче» і т.п.) використовують функції приналежності  $i$ -го правила для критерію  $j$ :

$$F_{ij}(x) = (1 + mx^n)^{-1}; \quad G_{ij}(x) = 1 - (1 - mx^n)^{-1}$$

де  $x$  – чисельне значення одного із критеріїв  $K_{ij}$ ,  $m$  і  $n$  – емпіричні коефіцієнти для обчислення функції приналежності (значення  $m$  і  $n$  приведені у табл. 4.1).

### ***Нечіткий алгоритм синтезу оптимальної структури систем теплообміну:***

1. Введення вихідних даних.
2. Вибір трьох пар потоків, які відповідають першому, другому й третьому правилам.

3. Для кожної обраної пари потоків здійснюють розрахунок теплообмінної апаратури і температур, що досягаються.

4. Для обраних варіантів теплообміну обчислюють функції приналежності  $F_{ij}$ .

5. Для кожного правила знаходять мінімальне значення функції приналежності:

$$\begin{aligned} F_1 &= \min (G_{11}, F_{12}); \\ F_2 &= \min (G_{21}, F_{22}, F_{23}); \\ F_3 &= \min (G_{31}, F_{32}, F_{33}) \end{aligned}$$

6. Визначають максимальне із трьох мінімальних значень функцій приналежності:

$$P = \max(F_1, F_2, F_3).$$

7. Знаходять ту пару потоків, які відповідають значенню  $P$ .

8. Якщо для цієї пари один з потоків досяг заданої температури, то його виключають із подальшого розгляду. У протилежному випадку привласнюються нові значення температур.

Якщо в системі ще є гарячі та холодні потоки, то алгоритм триває з пункту 2. У протилежному випадку переходять до синтезу зовнішньої системи теплообмін.

#### 4.2 Завдання та зміст звіту

За наданим індивідуальним завданням (Додаток Б) та таблицею 4.1 провести аналіз технологічних потоків та синтезувати оптимальну технологічну схему внутрішньої підсистеми. Проаналізувати отримані результати. Отриманий результат відобразити у вигляді оптимальної схеми теплообміну. Для виконання використати MS Excel, Word.

*Зміст звіту:*

1. Титульний аркуш
2. Назва та мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.

4. Завдання
5. Хід виконання із результатами (скріншоти).
6. Висновок.

### 4.3 Хід виконання на прикладі

Синтез оптимальної структури системи теплообміну проводиться за допомогою трьох евристичних правил:

- ПРАВИЛО 1. Для теплообміну вибираються холодний і гарячий потоки, що мають найбільші початкові температури.
- ПРАВИЛО 2. Для теплообміну вибирають холодний потік, що має максимальну кінцеву температуру, та гарячий, що має максимальну початкову температуру.
- ПРАВИЛО 3. Для теплообміну вибираються холодний потік з найменшою початковою температурою та гарячий з найменшою кінцевою температурою.

**Нечіткий алгоритм синтезу оптимальної структури систем теплообміну:**

- 1) Введення вихідних даних.
- 2) Вибір трьох пар потоків, які відповідають першому, другому та третьому правилам.
- 3) Для кожної обраної пари потоків здійснюють розрахунок теплообмінних апаратів і температур, що досягаються.
- 4) Для обраних варіантів теплообміну обчислюють функції приналежності.
- 5) Для кожного правила знаходять мінімальне значення функції приналежності.
- 6) Визначають максимальне із трьох мінімальних значень функцій приналежності.
- 7) Знаходять ту пару потоків, які відповідають максимальному значенню.

8) Якщо для цієї пари один з потоків досяг заданої температури, то його виключають із подальшого розгляду. У протилежному випадку привласнюються нові значення температур.

Якщо в системі ще є гарячі та холодні потоки, то алгоритм триває з пункту 2. У протилежному випадку переходять до синтезу зовнішньої системи теплообміну.

Таблиця 4.1. Значення коефіцієнтів  $m$  і  $n$  для обчислення функції приналежності

ПРАВИЛО	КРИТЕРІЙ F	$m$	$n$	ФУНКЦІЯ
1	1	$3,66 * 10^{-12}$	5,87	$G(x)$
	2	$8,93 * 10^{-6}$	2,41	$F(x)$
2	1	$2,881 * 10^{-2}$	0,839	$G(x)$
	2	$1,398 * 10^{-3}$	3,221	$F(x)$
	3	$1,398 * 10^{-3}$	3,221	$F(x)$
3	1	$2,881 * 10^{-2}$	0,839	$G(x)$
	2	$1,398 * 10^{-3}$	3,221	$F(x)$
	3	$1,398 * 10^{-3}$	3,221	$F(x)$

Задані параметри стану технологічних потоків (табл. 4.2) взято для прикладу виконання. Необхідно скористатися додатком Б.

Таблиця 4.2. Вихідні дані для синтезу теплової системи

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

**Перший етап синтезу теплової системи**

За правилом 1 вибираємо для теплообміну холодний і гарячий потоки, що мають максимальні початкові температури:

**гарячий потік 2** (473 K → 343 K),

**холодний потік 2** (378 ← 438 K).

Розраховуємо кількості теплоти:

$$Q_{г.} = 12(473 - 343) = 12 \cdot 130 = 1560 \text{ кВт};$$

$$Q_{х.} = 12(438 - 378) = 12 \cdot 60 = 720 \text{ кВт};$$

$$Q = \min(1560; 720) = 720 \text{ кВт}.$$

У процесі теплообміну гарячий потік буде охолоджений тільки до температури:

$$T_{г.д.} = 473 - 720 / 12 = 413 \text{ K}.$$

Це досягнуте значення температури тут і далі вказується в дужках на схемі теплообміну:

$$(413) \quad 343 \leftarrow 473$$

$$378 \rightarrow 438$$

Розраховуємо чисельні значення функцій приналежності:

$$K_{11} = (T_{г.н.} - T_{х.н.})$$

$$G_{11} = 1 - \frac{1}{1 - m * (K_{11})^n} = 3.04$$

$$K_{12} = (T_{г.н.} - T_{г.д.})$$

$$F_{12} = \frac{1}{1 + m * (K_{12})^n} = .0.85$$

Користуючись правилом 2, змушені вибрати ті ж два потоки. Розрахунок досягнутих температур показує, що гарячий потік при цьому буде недоохолоджений на 70 К.

Рахуємо  $K_{21}, K_{22}, K_{23}$  та  $G_{21}, F_{22}, F_{23}, F_{min}$ .

За правилом 3 вибираємо для теплообміну холодний потік з найменшою початковою температурою й гарячий потік з найменшою кінцевою температурою:

$$343 \leftarrow 473 \text{ (433)}$$

$$293 \rightarrow 393$$

Розрахунок досягнутих температур показує, що гарячий потік при цьому буде нагрітий на 30 К.

Рахуємо  $K_{31}, K_{32}, K_{33}$  та  $G_{31}, F_{32}, F_{33}, F_{min}$ .

Використовуючи нечіткий алгоритм синтезу теплообмінної системи, знаходимо:

$$F_1 \text{ min} = 0.85;$$

$$F_2 \text{ min} = -1.319;$$

$$F_3 \text{ min} = -3.29$$

$$P \text{ max} = 0.85.$$

Цьому значенню  $P$  відповідає варіант теплообміну за правилом 1 (рис. 4.1).

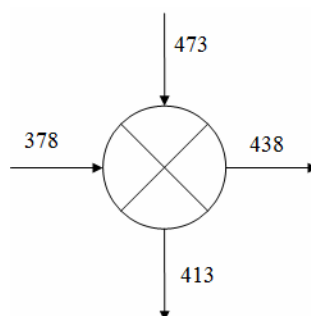


Рис. 4.1. Перший етап синтезу теплової системи

**Другий етап синтезу теплової системи**

Вихідні потоки перед другим етапом синтезу показано на рис. 4.2.

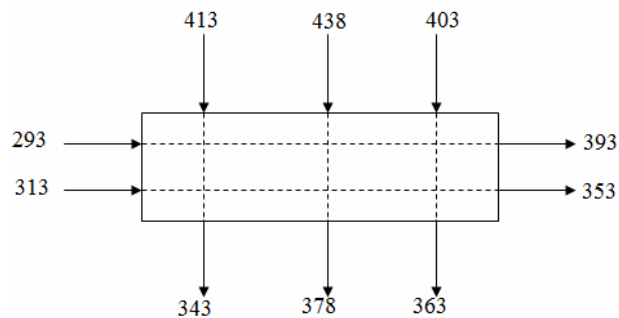


Рис. 4.2. Вихідні потоки теплообмінної системи перед другим етапом синтезу

**Користуючись правилом 1**, отримуємо схему теплообміну:

$$(410.6) \quad 378 \leftarrow 438$$

$$313 \rightarrow 353$$

Розраховуємо чисельні значення функцій приналежності.

**Користуючись правилом 2**, схема теплообміну має вигляд:

$$378 \leftarrow 438$$

$$(333) \quad 293 \rightarrow 393$$

**За правилом 3** вибираємо для теплообміну холодний потік з найменшою початковою температурою й гарячий потік з найменшою кінцевою температурою:

$$343 \leftarrow 413$$

$$293 \rightarrow 393 \quad (363)$$

Цьому значенню  $P$  відповідає варіант теплообміну за **правилом 1** (рис. 4.3).

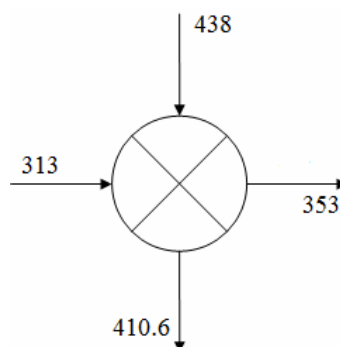


Рис. 4.3. Другий етап синтезу теплової системи

### Третій етап синтезу теплової системи

Вихідні потоки перед третім етапом синтезу показано на рис. 4.4.

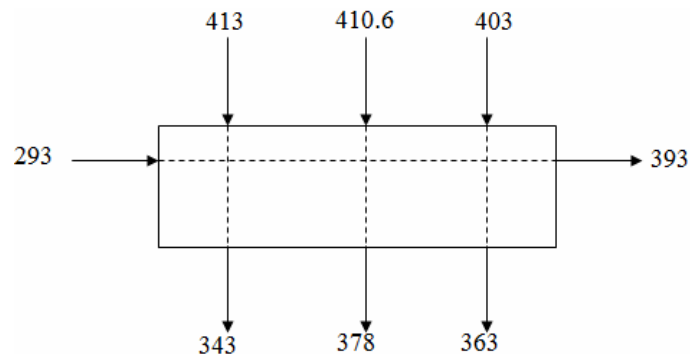


Рис. 4.4. Вихідні потоки теплообмінної системи перед третім етапом синтезу

Користуючись правилом 1, отримуємо схему теплообміну:

$$343 \leftarrow 413$$

$$293 \rightarrow 393 \quad (363)$$

Користуючись правилом 2, схема теплообміну має вигляд:

$$343 \leftarrow 413$$

$$(323) \quad 293 \rightarrow 393$$

За правилом 3 вибираємо для теплообміну холодний потік з найменшою початковою температурою й гарячий потік з найменшою кінцевою температурою:

$$343 \leftarrow 413$$

$$293 \rightarrow 393 \quad (363)$$

Розрахунок досягнутих температур показує, що гарячий потік при цьому буде нагрітий на 30 К.

$$P = 0.8.$$

Цьому значенню  $P$  відповідає варіант теплообміну за правилом 1 (рис. 4.5).

### Четвертий етап синтезу теплової системи

Вихідні потоки перед четвертим етапом синтезу показано на рис. 4.6.

Застосування перших і других правил приведе до одній і тій же схемі теплообміну. Теплообмін за третім правилом не можливий, тому що  $\Delta T < 20 \text{ K}$ .

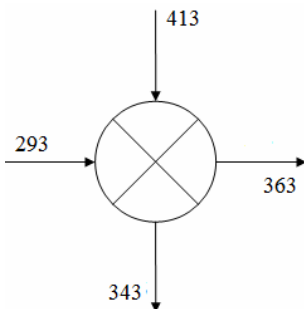


Рис. 4.5. Третій етап синтезу теплової системи:

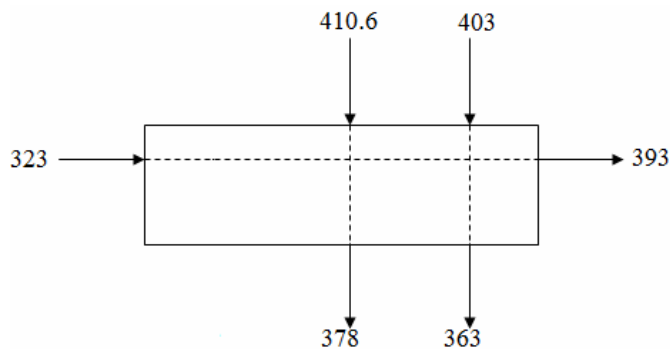


Рис. 4.6. Вихідні потоки теплообмінної системи перед четвертим етапом синтезу

Результати четвертого етапу синтезу теплової системи показано на рис.4.7.

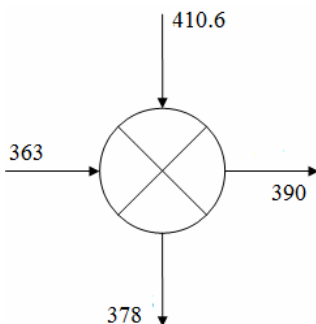


Рис. 4.7. Четвертий етап синтезу теплової системи

Оптимальна схема теплообміну показана на рис. 4.8.

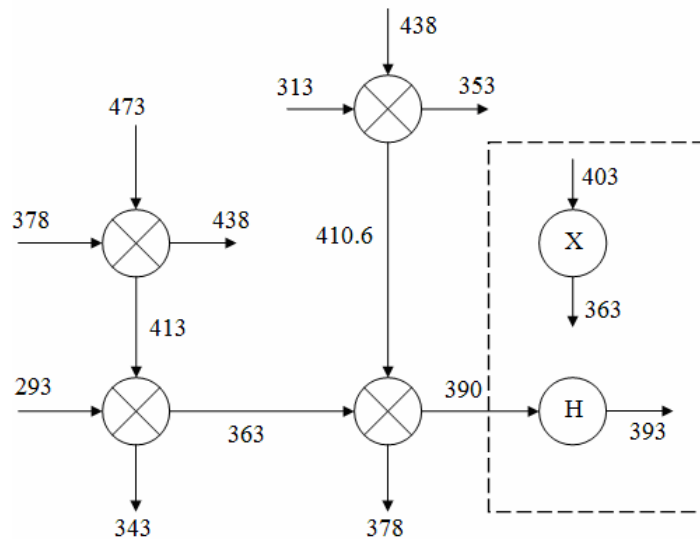


Рис. 4.8. Оптимальна схема теплообміну

Приклад виконання у програмі Excel наведено у додатку Д.

#### Контрольні питання до практичної роботи №4

1. Що таке функція приналежності для нечітких множин?
2. Як розрахувати функція приналежності для нечітких множин?
3. Які є етапи синтезу оптимальної структури ХТС за методом нечітких множин?
4. Який алгоритм розрахунку кінцевих температур потоків на кожному із етапів?

## **ПРАКТИЧНА РОБОТА 5. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПІНЧ-АНАЛІЗУ**

*Мета:* набути навичок синтезу оптимальної структури системи теплообміну на основі теорії пінч-аналізу.

### **5.1 Короткі теоретичні відомості**

В даний час найбільшим науковим інтересом є новий напрямок оптимальної організації ХТС, що називається пінч-аналізом в основі якого використовуються ексергетичні, ексергоекономічні або економічні критерії. Такий підхід до оптимальної організації систем домінує в науковій практиці.

Основними етапами аналізу пінч-аналізу стосовно ХТС є:

- 1 - вибірка необхідних вихідних даних (Data Extraction);
- 2 – завдання цілей (Targeting);
- 3 - проектування (Design);
- 4 - оптимізація (Optimization), в якій ХТС покращується.

Найбільш трудомісткі етапи в аналізі пінч-аналізі є проектування та оптимізація.

Пінч-аналіз (англ. pinch - звуження) - це методологія мінімізації споживання енергії хімічних процесів шляхом термодинамічного обчислення доцільної цільової енергії (або мінімуму споживання енергії) та її досягнення, шляхом оптимізації тепла рекуперації системи, енергопостачання та умов експлуатації. Пінч-аналіз також відомий як процес інтеграції, теплової інтеграції, інтеграції енергії або пінч-технології.

Початкові дані для процесу представлені у вигляді набору енергетичних потоків або залежностей теплового навантаження (кВт) при температурі ( $^{\circ}\text{C}$ ). Ці дані поєднуються для всіх потоків на підприємстві, щоб надати композитні криві, одну для всіх гарячих потоків (тепло, що віддається) та одну для всіх холодних потоків (тепло, що потребується). Суть найбільшого зближення

гарячої та холодної композитної кривої називається точкою Пінча (або просто Пінч). Для гарячої та для холодної композитної кривої температура Пінча буде індивідуальною. У області Пінча найвищі обмеження накладаються на процес проектування оптимальної системи передачі тепла. Таким чином, знайшовши цю точку і запустивши з нього конструкцію, можна досягти цільових значень енергії за допомогою теплообмінників, передаючи тепло між гарячими та холодними потоками у двох незалежних підсистемах, вище і нижче Пінча. На практиці, під час аналізу Пінча існуючого процесу, досить часто між гарячим потоком є перехресне нагрівання з температурою над Пінчем та холодним потоком нижче Пінча. Усунення таких зв'язків та створення альтернатив дозволяє покращити процес та досягти енергетичних цілей.

Метод Пінч-аналізу передбачає можливість вдосконалення початкового варіанту ХТС шляхом повернення до проектування реактора або системи поділу для досягнення оптимальної теплової інтеграції потоків. Найбільш відпрацьований метод Пінч-аналізу для оптимізації систем теплопередачі. Початковими даними для оптимізації системи теплообміну є дані матеріального та теплового балансів. Більше того, для кожного технологічного потоку визначається початкова температура  $T_S$ ; цільова (кінцева) температура  $T_T$  (до якої потік необхідно нагрівати або охолодити); теплоємність  $C_p$ , зміна ентальпії (тепла)  $H$ .

На наступному етапі на першому наближенні вибирається мінімальна різниця температури. Для проектування, визначальним при виборі цього значення є тип теплообмінника та характеристики потоків. Зазвичай типові значення мініимальної різниці температур позначаються в різних літературних джерелах. Оптимізація системи передачі тепла базується на мінімізації збитків ексергії та мінімум капітальних витрат. Щоб мінімізувати втрату ексергії, використовується метод теплових діаграм у координатах ККД Карно або ентальпія – температура.

## 5.2 Завдання та зміст звіту

За наданим індивідуальним завданням (Додаток Б) вивчити:

- ✓ представлення теплових потоків процесу у вигляді складених кривих
- ✓ методику побудови мережі теплообмінників з максимальною рекуперацією тепла при заданому значенні.

Для заданих викладачем теплових потоків побудувати складені криві та визначити точку Пінча. Проаналізувати отримані результати. Для виконання використати MS Excel, Word.

*Зміст звіту:*

7. Титульний аркуш
8. Назва та мета роботи.
9. Короткі теоретичні відомості.
10. Завдання
11. Хід виконання із результатами (скріншоти).
12. Висновок.

## 5.3 Хід виконання на прикладі

Тепловий потік характеризують його початкова  $T_n$ , °C і кінцева  $T_k$ , °C температури, масова витрата  $G$ , кг/с теплоносія, теплоємність  $C_p$  кДж / (кг·°C). Можна обчислити потокову теплоємність (водяний еквівалент)  $C_p$ , кВт/°C:

$$C_p = G \cdot C_p, \quad (5.1)$$

та зміну ентальпії потоку в його температурному інтервалі (зміна теплоємності технологічного потоку в межах зміни його температури):

$$\Delta H = \int_{T_n}^{T_k} C_p \times dT. \quad (5.2)$$

Якщо  $C_p = \text{const}$ , то:

$$\Delta H_1 = C_{p1} \cdot (T_K - T_{II}), \quad (5.3)$$

Розглянемо порядок побудови мережі теплообмінників на прикладі.  
Початкові дані представлені в табл. 5.1.

Будуємо температурно – ентальпійну діаграму (рис. 5.1):

$$\Delta H_1 = C_{P1} \cdot (T_K - T_{II}) = 1,5(400 - 150) = 375$$

$$\Delta H_2 = 1,3(300 - 110) = 247$$

$$\Delta H_3 = 1,0(410 - 120) = 290$$

$$\Delta H_4 = 2,0(340 - 110) = 460$$

Таблиця 5.1. Параметри стану технологічних потоків

Потоки	Температура, °С		Водяний еквівалент, кВт / °С
	початкова	кінцева	
Холодний	150	400	1,5
Холодний	110	300	1,3
Гарячий	410	120	1,0
Гарячий	340	110	2,0

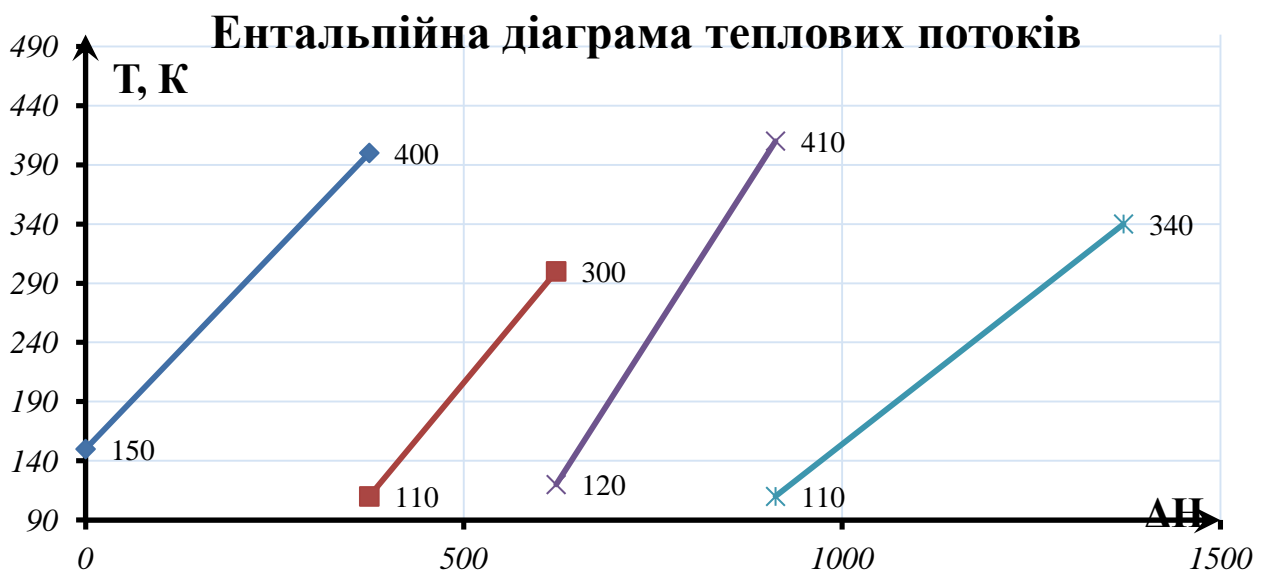


Рис. 5.1. Температурно-ентальпійна діаграма теплових потоків

Для побудови складеної кривої для потоків, що охолоджуються («гарячої» складеної кривої), розташуємо початкові та кінцеві температури гарячих потоків за зростанням та розіб'ємо їх на інтервали та визначимо їх довжини. Отже:

1. (110 120), довжина інтервалу = 10;
2. (120 340), довжина інтервалу = 220;
3. (340 410), довжина інтервалу = 70.

Просумуємо для кожного інтервалу значення потокових теплоємкостей, температурні межі яких включає даний інтервал:

$$C_{PH1} = C_{P4} = 2,0$$

$$C_{PH2} = C_{P3} + C_{P4} = 2,0 + 1,0 = 3,0$$

$$C_{PH3} = C_{P3} = 1,0$$

Використовуючи співвідношення (5.3), розраховуємо  $\Delta H_H$  :

$$\Delta H_{H1} = C_{PH1} \cdot \Delta T_{H1} = 2,0 \cdot 10 = 20$$

$$\Delta H_{H2} = C_{PH2} \cdot \Delta T_{H2} = 3,0 \cdot 220 = 660$$

$$\Delta H_{H3} = C_{PH3} \cdot \Delta T_{H3} = 1,0 \cdot 70 = 70$$

Повторюємо процедуру для побудови «холодної» складеної кривої.

Отже, інтервали:

1. (110 150), довжина інтервалу = 40;
2. (150 300), довжина інтервалу = 150;
3. (300 400), довжина інтервалу = 100.

Значення потокових теплоємкостей:

$$C_{PH1} = C_{P2} = 1,3$$

$$C_{PH2} = C_{P1} + C_{P2} = 1,5 + 1,3 = 2,8$$

$$C_{PH3} = C_{P1} = 1,5$$

Значення  $\Delta H_H$  :

$$\Delta H_{H1} = C_{PH1} \cdot \Delta T_{H1} = 40$$

$$\Delta H_{H2} = CP_{H2} \cdot \Delta T_{H2} = 150$$

$$\Delta H_{H3} = CP_{H3} \cdot \Delta T_{H3} = 100$$

Після виконання розрахунків, будуюмо «гарячу» та «холодну» складені криві (рис. 5.2).

При проектуванні мереж теплообмінників можна задати необхідну величину  $\Delta T_{\min}$  таким чином, щоб мінімальна температурна різниця кожного теплообмінника мережі не перевищувала  $\Delta T_{\min}$ . Для прикладу, що розглядається, задамося  $\Delta T_{\min} = 20$ . Розташуємо «гарячу» та «холодну» складені криві таким чином, щоб відстань між ними по осі  $T$  було не менше за  $\Delta T_{\min} = 20$ .

При цьому відстань на вісі  $H$  між складеними кривими на «гарячому» та «холодному» кінцях відповідає мінімальній кількості енергії, щонеобхідно для нагріву та охолодження системи. Точка, в якій відстань між вкладеними кривими дорівнює  $\Delta T_{\min}$  називається «**точкою пінча**».

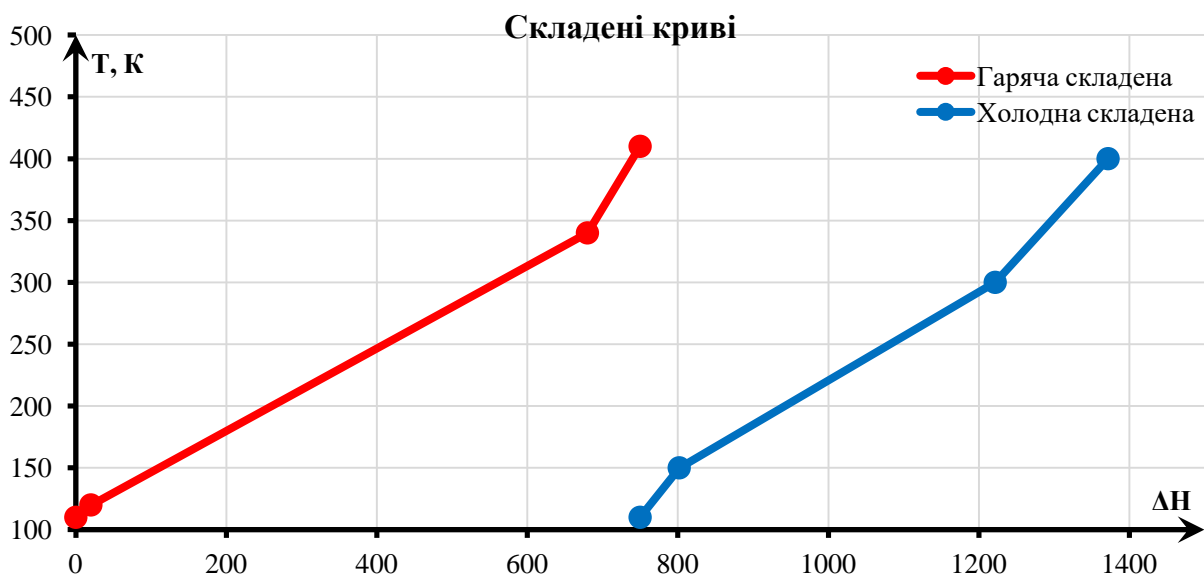


Рис. 5.2. Складені криві

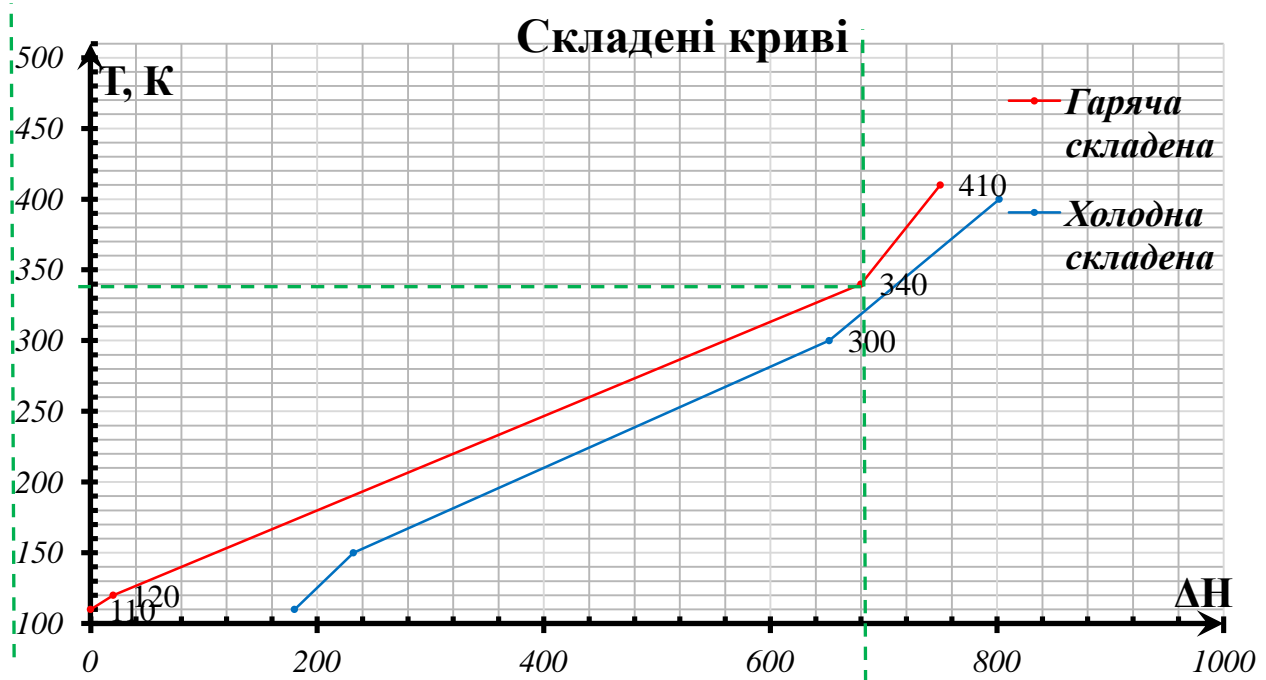


Рис. 5.3. Зсув складених кривих для  $\Delta T_{\min} = 20$

Температури у точці Пінча для  $\Delta T_{\min} = 20$  складають:

- Для «гарячої» кривої  $340^{\circ}\text{C}$ ;
- Для «холодної» кривої  $320^{\circ}\text{C}$ .

Вибір значення  $\Delta T_{\min}$  базується на компромісі між капітальними витратами та витратами на додаткову енергію, що знадобиться для функціонування системи, тобто є задачею оптимізації з обмеженнями.

Для обраного значення  $\Delta T_{\min}$  можна визначити мінімальне значення додаткової енергії для нагріву та охолодження потоків системи та побудувати сіткову діаграму потоків, використання якої значно полегшує побудову мережі теплообмінників.

Для потоків з прикладу, що розглядається, сіткова діаграма має вигляд (рис. 5.4).

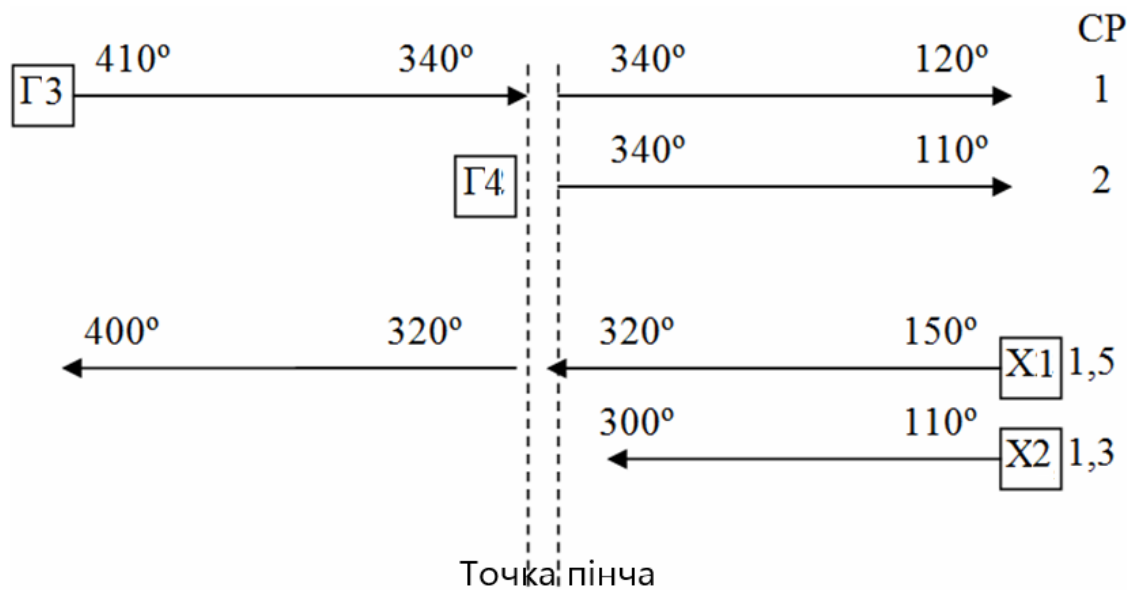


Рис. 5.4. Сіткова діаграма потоків теплообмінної системи

Приклад виконання у програмі Excel наведено у додатку Е.

### Контрольні питання до практичної роботи №5

1. Що таке тепломісткість теплового потоку?
2. Як будується температурно - ентальпійна діаграма теплового потоку?
3. Які правила побудови пінч-діаграми?
4. Як визначається точка Пінча?
5. Як знаходяться складові кривих теплових потоків системи?

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

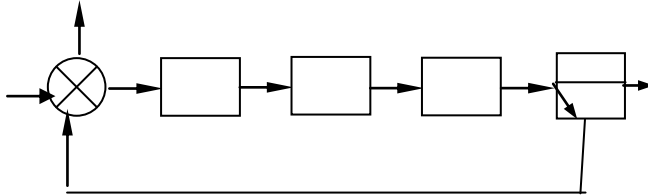
1. Процеси та апарати хімічної технології : підручник : у 2-х частинах : пер. з рос. / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО [та ін.] ; за ред. Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО ; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т "Харківський політехн. ун-т". – Харків: НТУ "ХП", 2007.
2. Семенишин Є. М. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів / Є. М. Семенишин, М. С. Мальований // Навч. Посібник. – Львів: Видавництво НУ «ЛП», 2005. – 420 с.
3. Комп'ютерне моделювання у хімічній технології : навч. посібник : для студ. хім. спец. / Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, Т. Г. БАБАК, О. О. ГОЛУБКІНА, Є. Д. ПОНОМАРЕНКО, А. В. САТАРІН ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХП», 2011. – 606 с. – Бібліогр.: с. 597–599.
4. Моделювання складних систем і процесів : навчальний посібник для студентів старших курсів і аспірантів університетів / В.П. Мельник. – Івано-Франківськ : НАІР, 2018. – 258 с. : іл.
5. Чеботарьов В. О. Основи теплообміну: навч. посібник для студ. техн. вузів / В.О. Чеботарьов, С.Н. Файнзільберг. – К. : Вища школа, 1973. – 260 с.
6. Дешко В. І. Ексергетичний аналіз систем створення теплового комфорту у будівлях : монографія / В.І. Дешко, В.А. Волощук, Н.А. Буяк ; Міністерство освіти і науки України, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 167 с.
7. Моделювання складних систем і процесів : навчальний посібник для студентів старших курсів і аспірантів університетів / В.П. Мельник. - Івано-Франківськ : НАІР, 2018. – 258 с. : іл.
8. Зорін Ю. М. Методи та алгоритми обчислень : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями "Комп'ютерна інженерія" та "Програмна інженерія" / Ю.М. Зорін, В.П. Тарасенко М-во освіти і науки України, НТУУ "КПІ". - Київ : Видавництво "Корнійчук", 2016. – 168 с.

9. Сухий М. П., Карпенко О.О. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів. Укр. держ. хіміко-технолог. ун-т. – Дніпропетровськ : УДХТУ, 2006. 206 с.
10. Теплотехніка: Підручник для втузів / Б.Х. Драганов, А.А. Долинський, А.В. Міщенко та ін.; За ред. Б.Х. Драганова. К.: ІНК ОС, 2005. 504 с.
11. Конспект лекцій з курсу "Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів" для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / Уклад.: Л.В. Іванченко, В.Я. Кожухар, Л.В. Тимошевська, національний ун-т "Одеська політехніка". Одеса, 2022. 92 с.
12. Конспект лекцій з дисципліни «Теоретичні основи технології неорганічних виробництв» ч. 1. Для здобувачів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», Укладачі: Белянська О.Р.. Кам'янське: ДДТУ, 2022. 73 с.
13. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів : навчальний посібник. Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів : Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2005. 407 с. : іл.
14. Моделювання енергозберігаючих та екологічних систем: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» / Уклад.: Бугаєва Л.М., Безносик Ю.О., Приміська С.О. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 52 с.

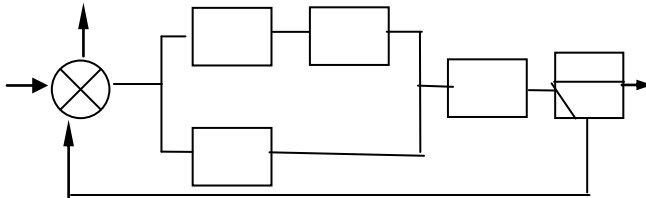
## Додатки

ДОДАТОК А. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНОЇ  
РОБОТИ №1

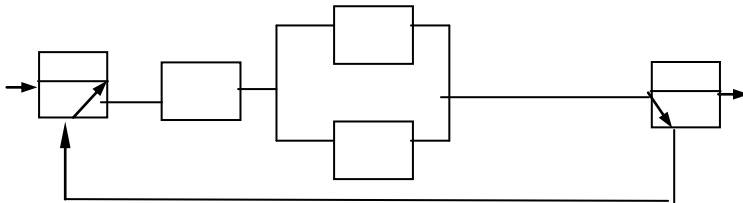
Варіант 1.



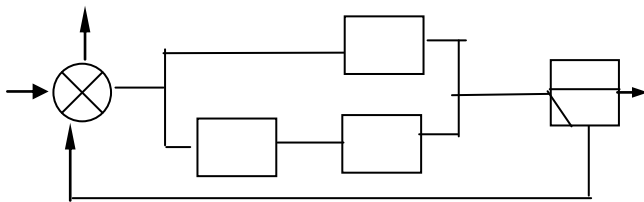
Варіант 2.



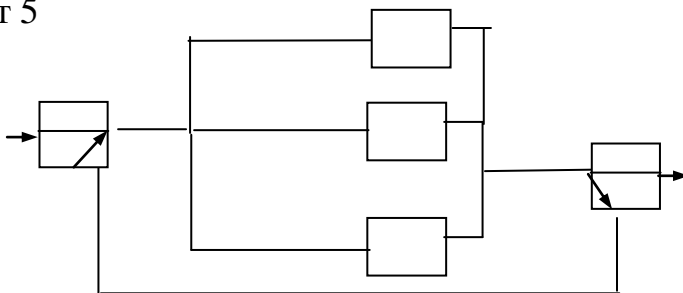
Варіант 3.



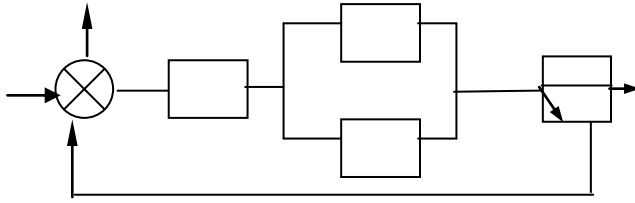
Варіант 4.



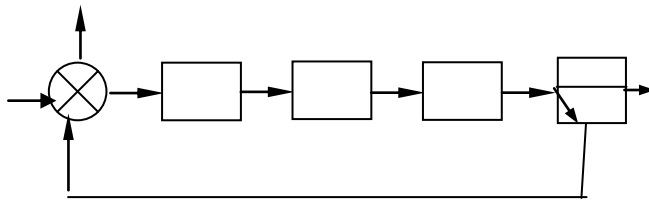
Варіант 5



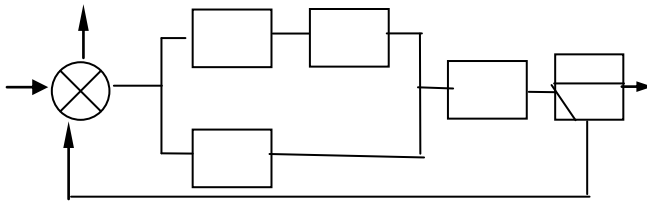
Вариант 6.



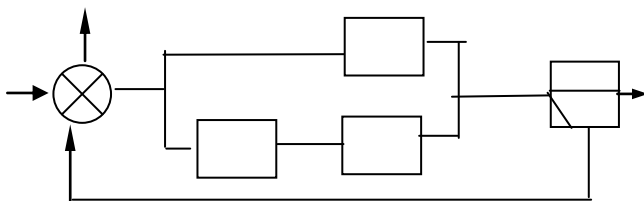
Вариант 7.



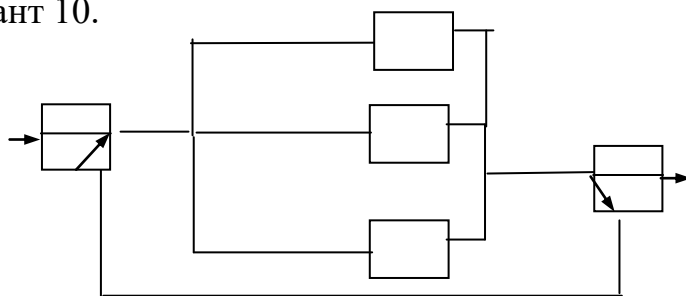
Вариант 8.



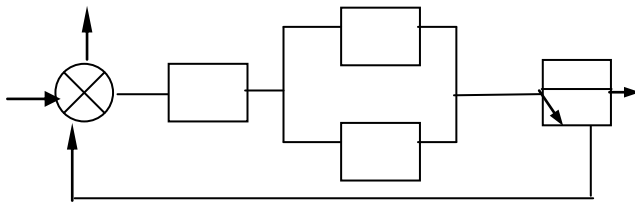
Вариант 9.



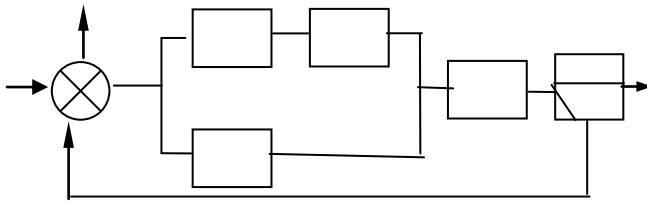
Вариант 10.



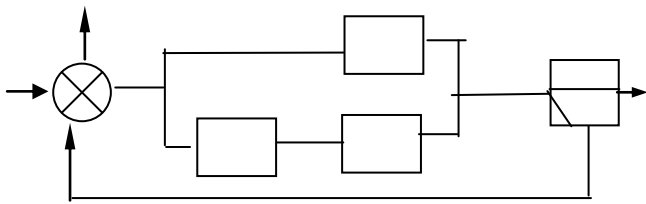
Варіант 11.



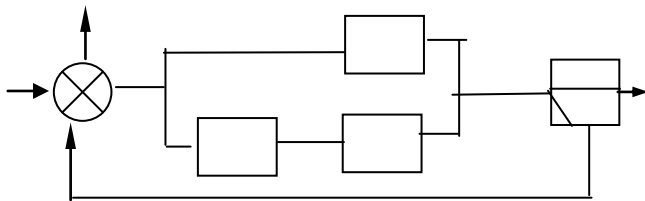
Варіант 12.



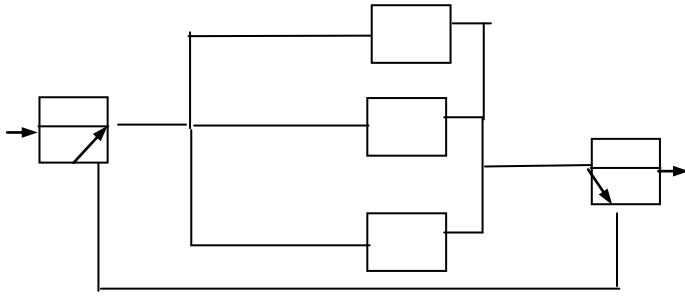
Варіант 13.



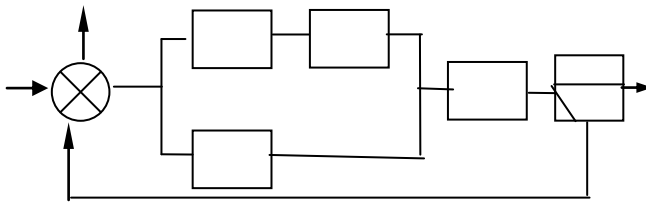
Варіант 14.



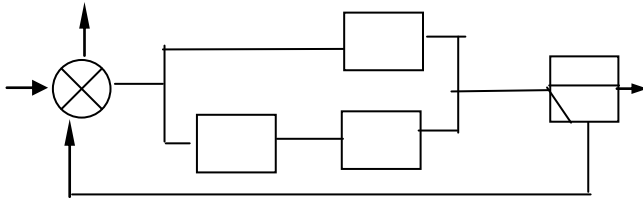
Вариант 15



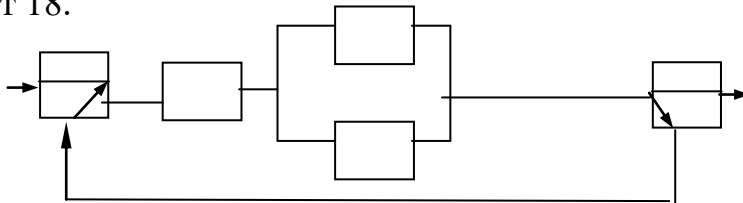
Вариант 16.



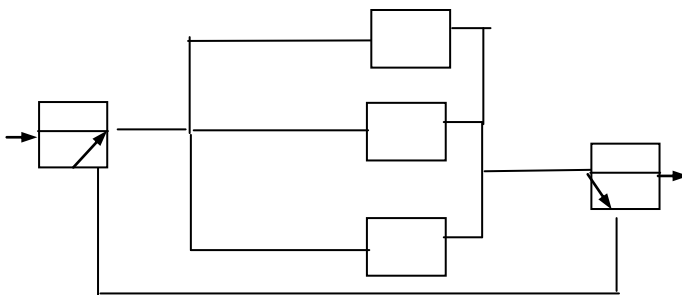
Вариант 17.



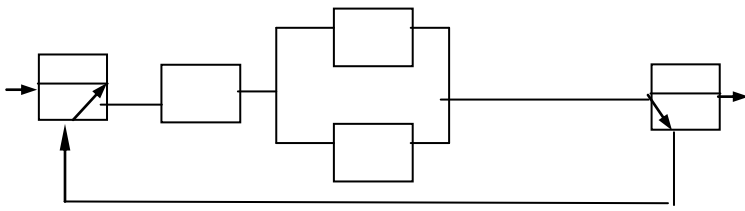
Вариант 18.



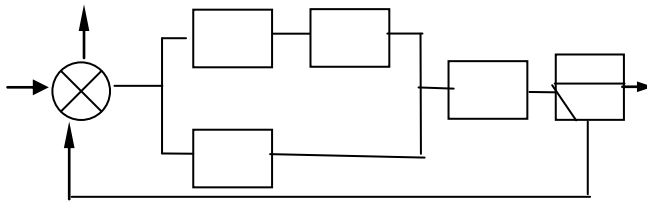
Вариант 19.



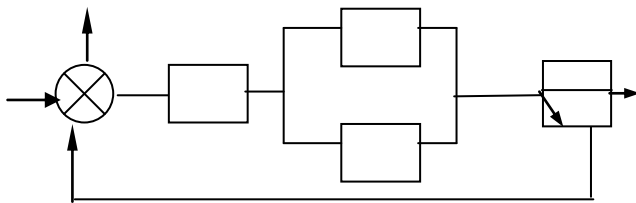
Вариант 20.



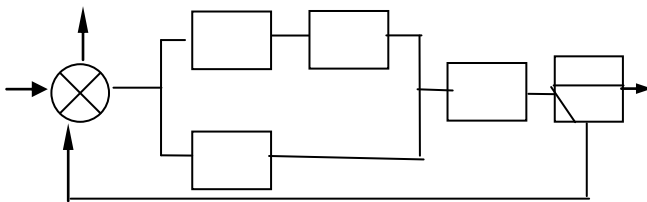
Вариант 21.



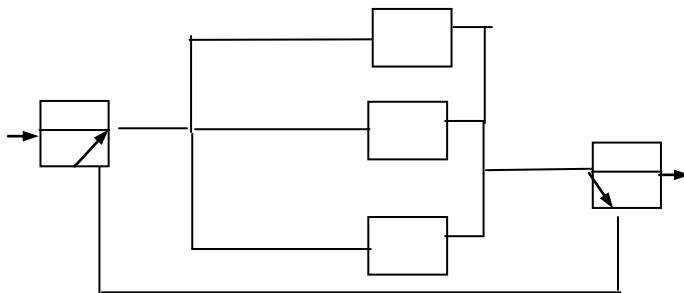
Вариант 22.



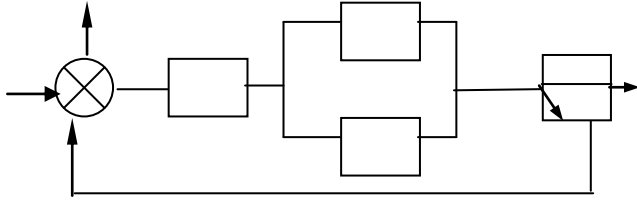
Вариант 23.



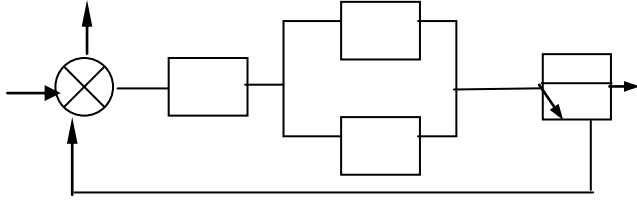
Вариант 24.



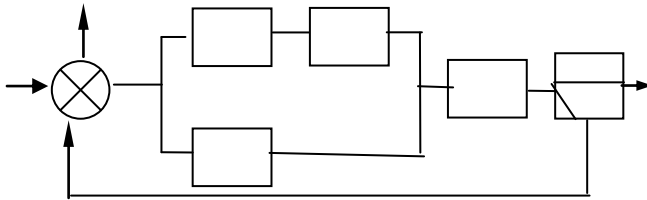
Варіант 25.



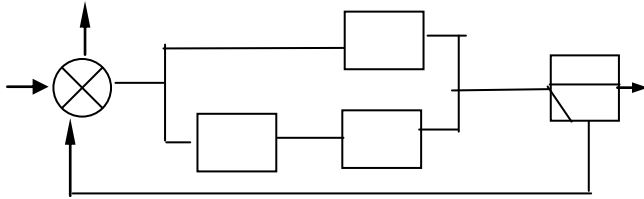
Варіант 26.



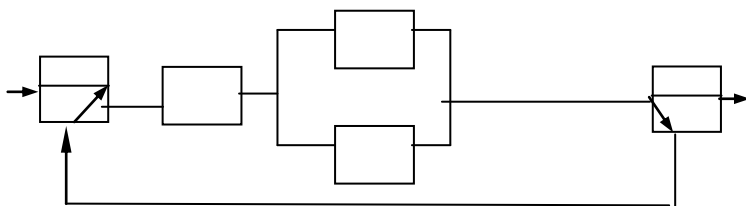
Варіант 27.



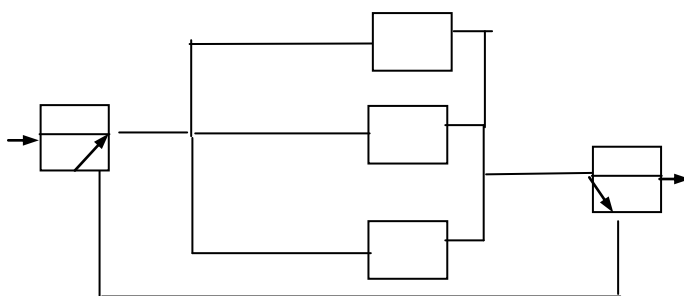
Варіант 28.



Варіант 29.



Варіант 30



## ДОДАТОК Б. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО ПРАКТИЧНИХ РОБІТ №2-5

### **ВАРІАНТ 1**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	20	500	50	700	500	45
2				650	400	40
3				400	100	40

### **ВАРІАНТ 2**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

### **ВАРІАНТ 3**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	10	450	50	700	500	45
2				600	350	40
3				350	100	40

### **ВАРІАНТ 4**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

### **ВАРІАНТ 5**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	35	550	50	650	500	45
2				600	300	40
3				300	80	40

**ВАРІАНТ 6**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	300	410	11	500	410	11
2	330	400	8	450	380	9
3	340	395	6	455	400	8

**ВАРІАНТ 7**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

**ВАРІАНТ 8**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	45	555	50	660	500	45
2				610	350	40
3				350	80	40

**ВАРІАНТ 9**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	25	255	50	660	500	45
2				610	350	40
3				350	80	40

**ВАРІАНТ 10**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	351	443	13	523	393	13
2	432	488	13	482	420	10
3	363	403	7	451	400	7

**ВАРІАНТ 11**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	290	393	12	473	343	12
2	375	430	12	430	370	9
3	300	350	6	400	360	6

**ВАРІАНТ 12**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

**ВАРІАНТ 13**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	20	500	50	700	500	45
2				650	400	40
3				400	100	40

**ВАРІАНТ 14**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

**ВАРІАНТ 15**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	10	450	50	700	500	45
2				600	350	40
3				350	100	40

**ВАРІАНТ 16**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

**ВАРІАНТ 17**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	35	550	50	650	500	45
2				600	300	40
3				300	80	40

**ВАРІАНТ 18**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	300	410	11	500	410	11
2	330	400	8	450	380	9
3	340	395	6	455	400	8

**ВАРІАНТ 19**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

**ВАРІАНТ 20**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	45	555	50	660	500	45
2				610	350	40
3				350	80	40

**ВАРІАНТ 21**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	25	255	50	660	500	45
2				610	350	40
3				350	80	40

**ВАРІАНТ 22**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	351	443	13	523	393	13
2	432	488	13	482	420	10
3	363	403	7	451	400	7

**ВАРІАНТ 23**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	352	443	13	523	393	13
2	432	488	10	482	420	12
3	363	404	7	451	400	7

**ВАРІАНТ 24**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

**ВАРІАНТ 25**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	20	500	50	700	500	45
2				650	400	40
3				400	100	40

**ВАРІАНТ 26**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

**ВАРІАНТ 27**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	10	450	50	700	500	45
2				600	350	40
3				350	100	40

**ВАРІАНТ 28**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

**ВАРІАНТ 29**

Номер	Гарячі потоки			Холодні потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	35	550	50	650	500	45
2				600	300	40
3				300	80	40

**ВАРІАНТ 30**

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К	Температура		Водяний еквівалент, кВт/К
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

## ДОДАТОК В. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 2 В EXCEL

Номер	Холодні потоки			Гарячі потоки		
	Температура		Водяний еквівалент	Температура		Водяний еквівалент
	Початкова	Кінцева		Початкова	Кінцева	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

Побудова ДЕП відповідній оптимальній структурі, здійснюється по наступних етапах:

1) Будують діаграму для вихідних потоків, розташовуючи холодні й гарячі потоки в порядку спадання їх початкових температур.

2) У верхній частині блоків гарячих потоків і нижньої частини блоків холодних потоків виділяється площа, рівна  $Q_s$  - кількості тепла, що передається у внутрішній підсистемі (рис.В.1).

Частини блоків, що не потрапили в окрему область, тимчасово відкидаються. Це кількість тепла, що буде передано в зовнішній підсистемі і на аналіз внутрішньої підсистеми не вплине.

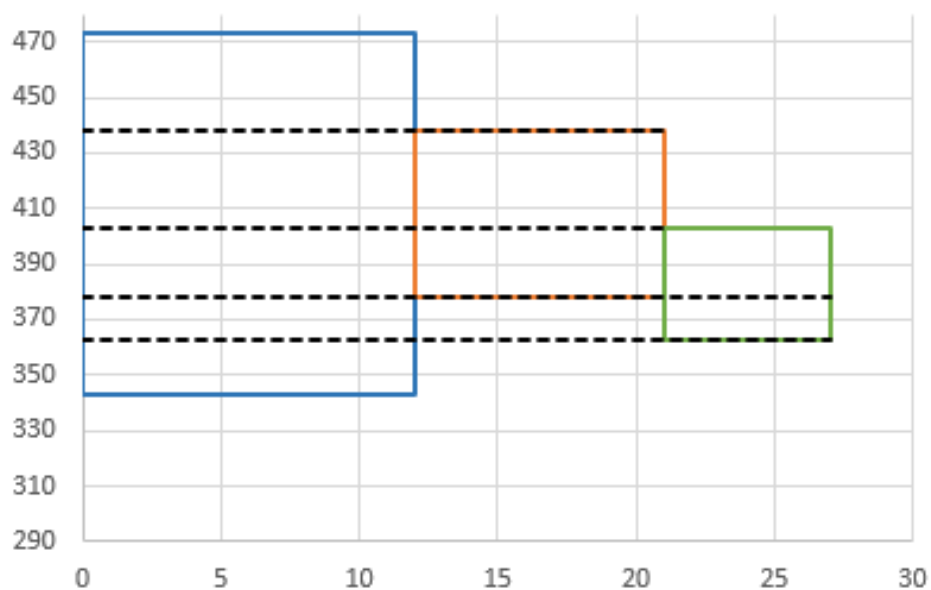


Рис.В.1

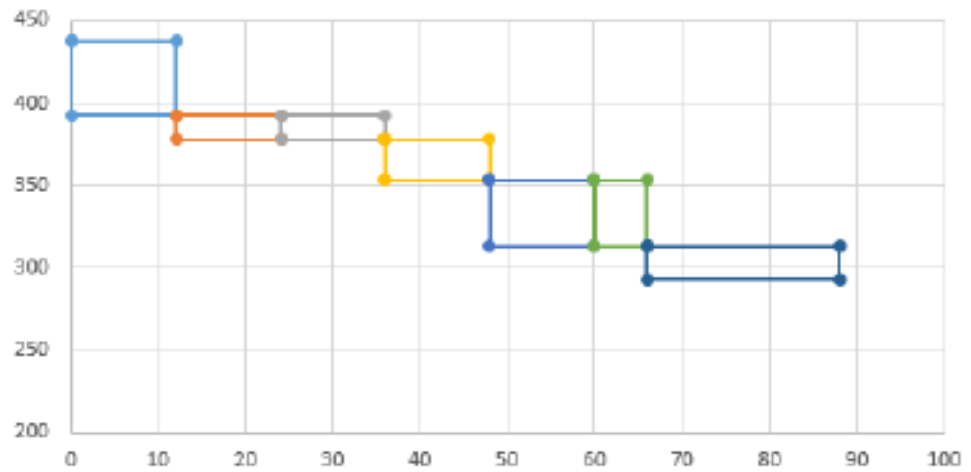
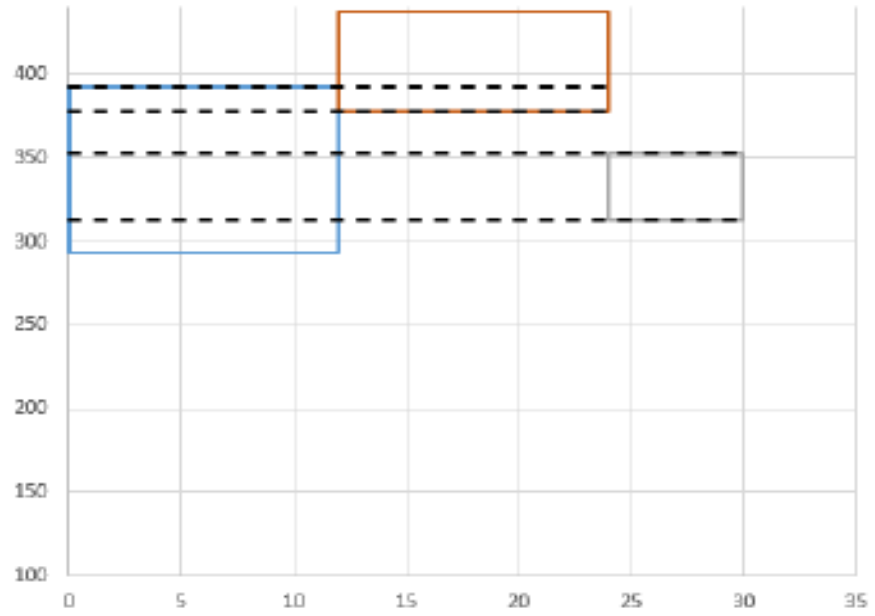
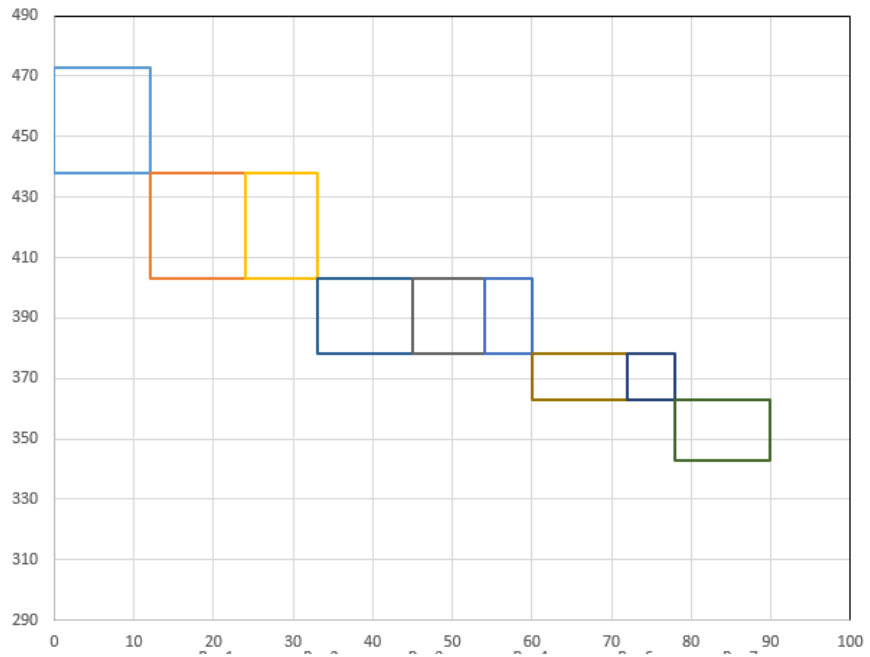


Рис.В.2. Етапи синтезу внутрішньої системи (холодний потік)

3) Розраховуємо площі підблоків:

Для гарячих потоків:

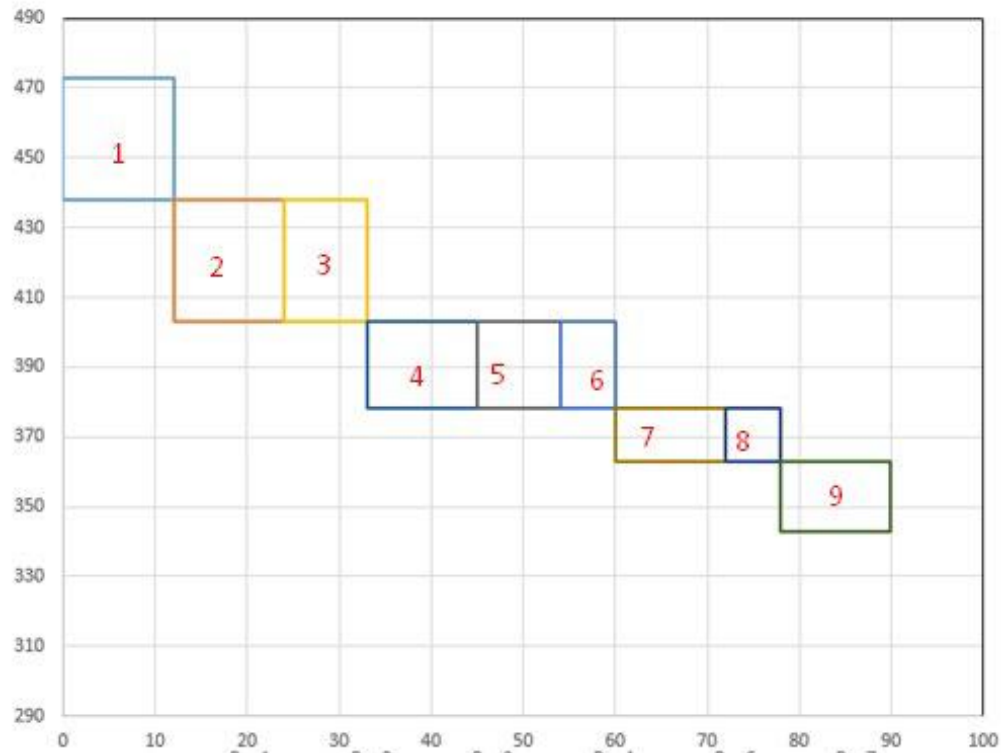
S1	420
S2	420
S3	315
S4	300
S5	225
S6	450
S7	180
S8	90
S9	240
S	2640

Для холодних потоків:

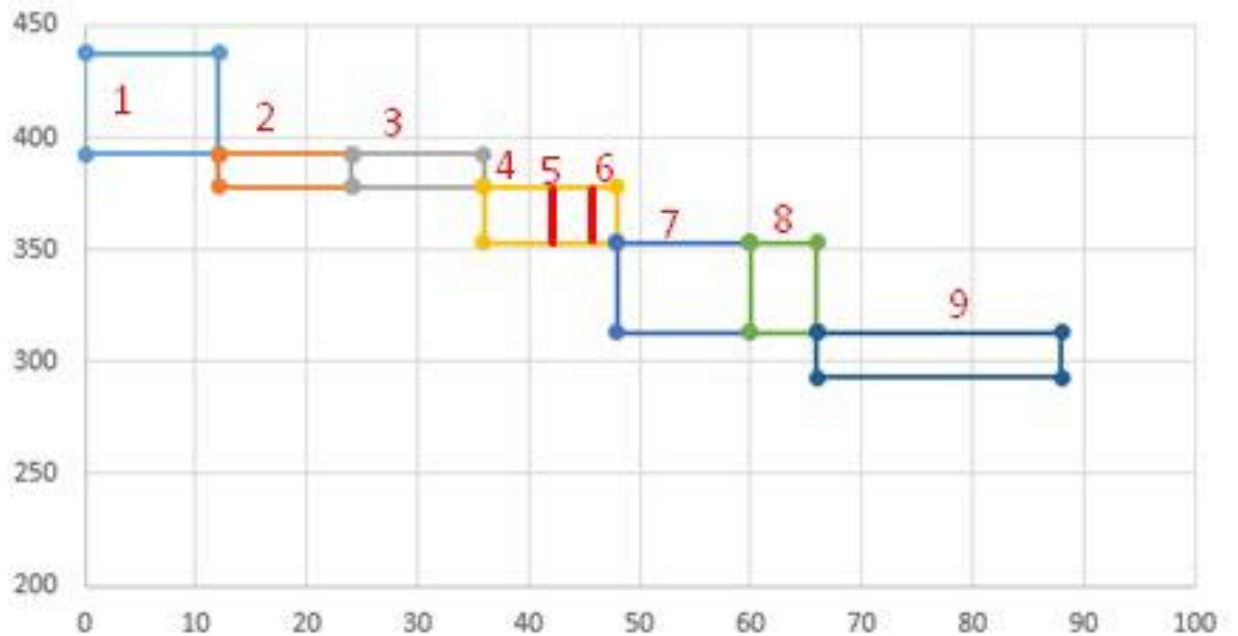
S1	540
S2	180
S3	180
S4	300
S5	480
S6	240
S7	240
S	2160

Для рівності потоків видаляємо блок 2. Після цього розділяємо певні блоки та отримуємо наступні блоки:

для гарячих потоків:



для холодних потоків



По отриманій діаграмі будується оптимальна технологічна схема внутрішньої підсистеми (рис. В.3).

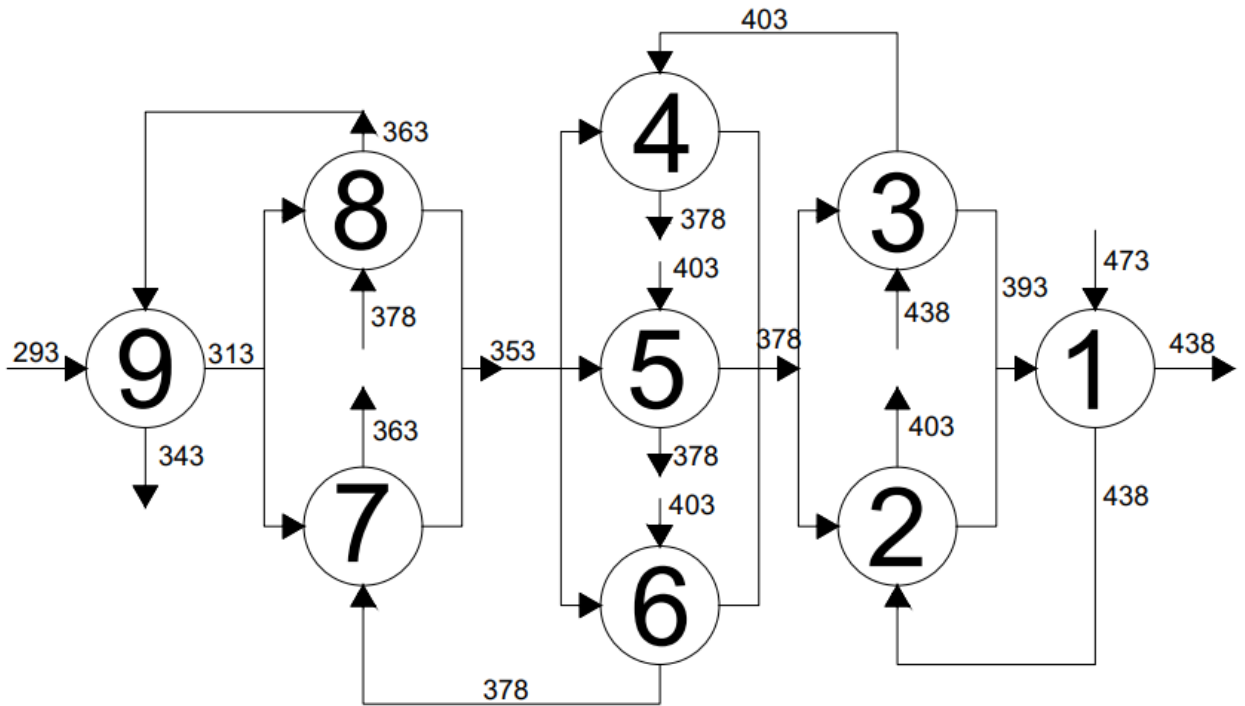


Рис. В.3. Оптимальна структура внутрішньої підсистеми

Для тих потоків, які не досягли необхідної кінцевої температури, необхідно підібрати відповідні холодильники й нагрівачі.

## ДОДАТОК Г. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ З В EXCEL

Перший етап

холодні потоки	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Qx, кВт	гарячі п.	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Qx, кВт	Qmin
	поч.	кін.					поч.	кін.				
1	300	410	110	11	1210	1	500	410	90	11	990	990
2	330	400	70	8	560	1	500	410	90	11	990	560
3	340	395	55	6	330	1	500	410	90	11	990	330
1	300	410	110	11	1210	2	450	380	70	9	630	630
2	330	400	70	8	560	2	450	380	70	9	630	560
3	340	395	55	6	330	2	450	380	70	9	630	330
1	300	410	110	11	1210	3	455	400	55	8	440	440
2	330	400	70	8	560	3	455	400	55	8	440	440
3	340	395	55	6	330	3	455	400	55	8	440	330
Початкові темп для наступного етапу	390						410					

Евристика 1 гарячий потік з максимальною температурою на вхід, холодний потік з максимальною температурою на вхід

Перший гарячий потік виключаємо, бо він досягає своєї вихідної температури (410=410)

Порядок заповнення таблиці

1. Введемо початкові дані температур, водних еквівалентів (Усі МОЖЛИВІ КОМБІНАЦІЇ ПОТОКІВ)

 $\Delta T$  - різниця температур кін-поч2. Рахуємо  $Q_x = W_x(t_1 - t_0)$   $Q_r = W_r(t_2 - t_1)$ 3. Рахуємо  $Q_r = \min(Q_x, Q_r)$ 4. Рахуємо  $F_{r,n} = Q_r / (k_n \Delta t_{op})$   $Kr=0,25$  кВт/м<sup>2</sup>К

$$\Delta t_{op} = \frac{(500 - 410) - (410 - 300)}{\ln((500 - 410) / (410 - 300))}$$

$\Delta t_{op}$  - середньогарифмічна різниця температурна кінцях теплообмінника

5. Рахуємо вагість

Вагісні коефіцієнти

$$\beta_{K,M} = \alpha F_{r,n}$$

b=0,6

$$t_1' = t_1'' + Q_r / W_{r,n} = 390$$

6. Розрахувати наступні початкові температури

Другий етап  $T_1' = T_1'' - Q_r / W_{r,n} = 410$ 

холодні потоки	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Qx, кВт	гарячі п.	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Qx, кВт	Qmin
	поч.	кін.					поч.	кін.				
1	390	410	20	11	220	2	450	380	70	9	630	220
2	330	400	70	8	560	2	450	380	70	9	630	560
3	340	395	55	6	330	2	450	380	70	9	630	330
1	390	410	20	11	220	3	455	400	55	8	440	220
2	330	400	70	8	560	3	455	400	55	8	440	440
3	340	395	55	6	330	3	455	400	55	8	440	330
Початкові темп для наступного етапу	410						427,5					

Евристика 1 гарячий потік з максимальною температурою на вхід, холодний потік з максимальною температурою на вхід

Перший холодний потік виключаємо, бо він досягає своєї вихідної температури (410=410)

Третій етап

холодні потоки	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Qx, кВт	гарячі п.	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Qx, кВт	Qmin
	поч.	кін.					поч.	кін.				
2	330	400	70	8	560	2	450	380	70	9	630	560
3	340	395	55	6	330	2	450	380	70	9	630	330
2	330	400	70	8	560	3	427,5	400	27,5	8	220	220
3	340	395	55	6	330	3	427,5	400	27,5	8	220	220
Початкові темп для наступного етапу	400						387,777778					

Другий холодний потік виключаємо, бо він досягає своєї вихідної температури (410=410)

Четвертий етап

холодні потоки	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Q <sub>х</sub> , кВт	гарячі п.	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Q <sub>г</sub> , кВт	Q <sub>min</sub>
	поч.	кін.					поч.	кін.				
3	340	395	55	6	330	2	387,7777778	380	7,777778	9	70	70
3	340	395	55	6	330	3	427,5	400	27,5	8	220	220
Початкові темп для наступного етапу	376,6666667						400					

Третій гарячий потік виключаємо, бо він досягає своєї вихідної температури (400=400)

П'ятий етап

холодні потоки	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Q <sub>х</sub> , кВт	гарячі п.	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Q <sub>г</sub> , кВт	Q <sub>min</sub>
	поч.	кін.					поч.	кін.				
3	376,6666667	395	18,33333	6	110	2	387,777	380	7,777	9	69,999	69,999
	388,3321667						380					

Другий гарячий потік виключаємо, бо він досягає своєї вихідної температури (380=380)

*Третій холодний потік не досягає температури, буде нагріватись в зовнішній підсистемі*

холодні потоки	температура, К		$\Delta T, K$	W, кВт/К	Q <sub>х</sub> , кВт	F	Вартість, умод
	поч.	кін.					
3	388,3321667	395	6,667833	6	40,007	24	3365,865436

Зведені шн 18387,62155

## ДОДАТОК Д. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 4 В EXCEL

### Практична робота 4

Помір	Контур	m	n	ФУНКЦІЯ
1	1	3,7E-12	5,87	G(x)
	2	8,9E-06	2,41	F(x)
2	1	0,02881	0,839	G(x)
	2	0,0014	3,221	F(x)
	3	0,0014	3,221	F(x)
3	1	0,02881	0,839	G(x)
	2	0,0014	3,221	F(x)
	3	0,0014	3,221	F(x)

Помір	Холодий потік			Гарячий потік		
	Температура		Водний еквів.	Температура		Водний еквів.
	Початок	Кінець		Початок	Кінець	
1	293	393	12	473	343	12
2	378	438	12	438	378	9
3	313	353	6	403	363	6

$$F_i = \min(G_{i1}, F_{i2})$$

$$F_i = \min(G_{i1}, F_{i2}, F_{i3})$$

$$F_i = \min(G_{i1}, F_{i2}, F_{i3})$$

$$F_i(x) = (1 + mx^n)^{-1}; \quad G_i(x) = 1 - (1 - mx^n)^{-1}$$

#### Етап 1

##### 1. Складати усі комбінації потоків.

Користуючись ПРАВИЛОМ 1 - ОБІРАЄМО гарячий потік з максимальною температурою на вході, холодний потік з максимальною температурою на вході

#### Результат F, G

холодий потік	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Q <sub>х</sub> , кВт	гарячий п.	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Q <sub>г</sub> , кВт	Q <sub>min</sub>	T <sub>г1</sub>	T <sub>г2</sub>	G	F12	F <sub>min</sub>	F <sub>max</sub>	
	поч.	кін.					поч.	кін.											
1	293	393	100	12	1200	1	473	343	130	12	1560	1200							
1	293	393	100	12	1200	2	438	378	60	9	540	540							
1	293	393	100	12	1200	3	403	363	40	6	240	240							
2	378	438	60	12	720	1	473	343	130	12	1560	720	413	283	3,047517	0,85304975	0,853049749		
2	378	438	60	12	720	2	438	378	60	9	540	540							
2	378	438	60	12	720	3	403	363	40	6	240	240							
3	313	353	40	6	240	1	473	343	130	12	1560	240							
3	313	353	40	6	240	2	438	378	60	9	540	240							
3	313	353	40	6	240	3	403	363	40	6	240	240							
Критерій для розрахунку G11 - K11					9,2														
Критерій для розрахунку F12 - K12					6,0														

2. Користуючись правилом 2 ОБІРАЄМО гарячий потік з максимальною температурою на вході, холодний потік з максимальною температурою на вході

холодий потік	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Q <sub>х</sub> , кВт	гарячий п.	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Q <sub>г</sub> , кВт	Q <sub>min</sub>	T <sub>г1</sub>	T <sub>г2</sub>	G	F22	F23	F <sub>min</sub>	F <sub>max</sub>
	поч.	кін.					поч.	кін.											
2	378	438	60	12	720	1	473	343	130	12	1560	720	413	283	3,047517	0,85304975		0,853049749	
2	378	438	60	12	720	1	473	343	130	12	1560	720	413	283	-1,319519	0,00001485		-1,319519171	
1	293	393	100	12	1200	1	473	343	130	12	1560	1200							
1	293	393	100	12	1200	2	438	378	60	9	540	540							
1	293	393	100	12	1200	3	403	363	40	6	240	240							
2	378	438	60	12	720	2	438	378	60	9	540	540							
2	378	438	60	12	720	3	403	363	40	6	240	240							
3	313	353	40	6	240	1	473	343	130	12	1560	240							
3	313	353	40	6	240	2	438	378	60	9	540	240							

3	313	353	40	6	240	3	403	363	40	6	240	240								
Критерий для розраховки G21 - K21		3,5																		
Критерий для розраховки F22 - K22		7,0																		
Критерий для розраховки F23 - K23		-0,5																		

3. Користуючись таблицю 3

Таблиця 3

ОБІТРАСМЮ гарячий потік з мінімальною температурою на виході, холодний потік з мінімальною температурою на виході

заголовок потоку	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Q <sub>г</sub> , кВт	град. ч.п.	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Q <sub>г</sub> , кВт	Q <sub>мін</sub>	T <sub>гв</sub>	T <sub>хв</sub>	G	F32	F33	F <sub>мін</sub>	F <sub>макс</sub>	
	поч.	кін.					поч.	кін.												
2	378	438	60	1,2	720	1	473	343	130	12	1560	720	413	283	3,047517	0,85304975		0,853049749		
2	378	438	60	1,2	720	1	473	343	130	12	1560	720	413	283	-1,319599	0,00081485		-1,319599371		
1	293	393	100	1,2	1200	1	473	343	130	12	1560	1200	373	243	-3,297832	0,00025845	70,-05	-3,297831976	0,85305	
1	293	393	100	1,2	1200	2	438	378	60	9	540	540								
1	293	393	100	1,2	1200	3	403	363	40	6	240	240								
2	378	438	60	1,2	720	2	438	378	60	9	540	540								
2	378	438	60	1,2	720	3	403	363	40	6	240	240								
3	313	353	40	6	240	1	473	343	130	12	1560	240								
3	313	353	40	6	240	2	438	378	60	9	540	240								
3	313	353	40	6	240	3	403	363	40	6	240	240								
Критерий для розраховки G31 - K31		5,0																		
Критерий для розраховки F32 - K32		10,0																		
Критерий для розраховки F33 - K33		15,0																		

2 етап

1 границя витікання, 2 границя витікання, 3 границя балансу

заголовок потоку	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Q <sub>г</sub> , кВт	град. ч.п.	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Q <sub>г</sub> , кВт	Q <sub>мін</sub>	T <sub>гв</sub>	T <sub>хв</sub>	G	F32	F33	F <sub>мін</sub>	F <sub>макс</sub>	
	поч.	кін.					поч.	кін.												
2	378	438	60	1,2	720	1	473	343	130	12	1560	720	413	283	3,047517	0,85304975		0,853049749		
2	378	438	60	1,2	720	1	473	343	130	12	1560	720	413	283	-1,319599	0,00081485		-1,319599371		
1	293	393	100	1,2	1200	1	473	343	130	12	1560	1200	373	243	-3,297832	0,00025845	70,-05	-3,297831976	0,85305	
3	313	353	40	6	240	2	438	378	60	9	540	240	411,33	338	1,158962	0,9761787		0,976178701		
1	293	393	100	1,2	1200	2	438	378	60	9	540	540	378	337	-2,360289		1	-2,360289100		
1	293	393	100	1,2	1200	1	413	343	70	12	840	840	343	273	-3,297832	0,00081485	0,000144	-3,297831976	0,97618	
1	293	393	100	1,2	1200	3	403	363	40	6	240	240								
2	378	438	60	1,2	720	2	438	378	60	9	540	540								
2	378	438	60	1,2	720	3	403	363	40	6	240	240								
3	313	353	40	6	240	1	473	343	130	12	1560	240								
3	313	353	40	6	240	2	438	378	60	9	540	240								
3	313	353	40	6	240	3	403	363	40	6	240	240								
Критерий для розраховки G11 - K11		12,0																		
Критерий для розраховки F12 - K12		26,66667																		

9-0

$$W_2 < W_K \quad Q_2 = \frac{(T_{гв} - T_{хв} - \Delta T)}{\frac{1}{W_2} - \frac{1}{W_K}}$$

Критерий для розраховки G21 - K21		4,5																		
Критерий для розраховки F22 - K22		0																		
Критерий для розраховки F23 - K23		4,0																		

Критерий для розраховки G31 - K31		5,0																		
Критерий для розраховки F32 - K32		7,0																		
Критерий для розраховки F33 - K33		12,0																		

3 етап

1 границя витікання, 2 границя витікання, 3 границя балансу

точка	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Qв, кВт	газ/ч.п.	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Qв, кВт	Qmin	Tга	Tсл	G	F32	F33	Fmin	Fmax
	поч.	сб.					поч.	сб.											
2	378	438	60	1,2	720	1	475	343	130	12	1560	720	413	283	3,047517	0,85304975		0,853049749	
2	378	438	60	1,2	720	1	475	343	130	12	1560	720	413	283	-1,319509	0,00081485	-	-1,319509371	
1	293	393	100	1,2	1200	1	475	343	130	12	1560	1200	373	243	-3,297832	0,00025845	76,405	-3,297831976	0,853045
3	313	353	40	6	240	2	438	378	60	9	540	240	411,33	338	1,154963	0,9761787	-	0,976178701	
1	293	393	100	1,2	1200	2	438	378	60	9	540	540	378	333	-2,360289		1	-2,360289096	
1	293	393	100	1,2	1200	1	413	343	70	12	840	840	343	273	-3,297832	0,00081485	0,002405	-3,297831976	0,97618
1	293	393	100	1,3	1500	1	413	343	70	13	910	910	343	273	1,205546	0,80014816	-	0,800148162	
1	293	393	100	1,3	1500	1	413	343	70	13	910	910	343	273	-4,552119		1	-4,552118501	
1	293	393	100	1,3	1500	1	413	343	70	13	910	910	343	273	-3,297832	0,00081485	0,00144	-3,297831976	0,80015
Критерий для розраховки G11 -K11																		12,0	
Критерий для розраховки F12 - K12																		7,0	
Критерий для розраховки G21 -K21																		2,0	
Критерий для розраховки F22 - K22																		0	
Критерий для розраховки F23 - K23																		-20	
Критерий для розраховки G31 -K31																		5,0	
Критерий для розраховки F32 - K32																		7,0	
Критерий для розраховки F33 - K33																		12,0	

точка	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Qв, кВт	газ/ч.п.	температура, К		ΔT, К	W, кВт/К	Qв, кВт	Qmin	Tга	Tсл	G	F32	F33	Fmin	Fmax
	поч.	сб.					поч.	сб.											
2	378	438	60	1,2	720	1	475	343	130	12	1560	720	413	283	3,047517	0,85304975		0,853049749	
2	378	438	60	1,2	720	1	475	343	130	12	1560	720	413	283	-1,319509	0,00081485	-	-1,319509371	
1	293	393	100	1,2	1200	1	475	343	130	12	1560	1200	373	243	-3,297832	0,00025845	76,405	-3,297831976	0,853045
3	313	353	40	6	240	2	438	378	60	9	540	240	411,33	338	1,154963	0,9761787	-	0,976178701	
1	293	393	100	1,2	1200	2	438	378	60	9	540	540	378	333	-2,360289		1	-2,360289096	
1	293	393	100	1,2	1200	1	413	343	70	12	840	840	343	273	-3,297832	0,00081485	0,002405	-3,297831976	0,97618
1	293	393	100	1,3	1500	1	413	343	70	13	910	910	343	273	1,205546	0,80014816	-	0,800148162	
1	293	393	100	1,3	1500	1	413	343	70	13	910	910	343	273	-4,552119		1	-4,552118501	
1	293	393	100	1,3	1500	1	413	343	70	13	910	910	343	273	-3,297832	0,00081485	0,00144	-3,297831976	0,80015
1	273	393	120	1,2	1440	2	411,3333	378	33,333	9	300	300	378	353	1,059923	0,95999372	-	0,95999372	
1	273	393	120	1,2	1440	2	411,3333	378	33,333	9	300	300	378	353	-0,494045		-	-0,494044987	
1	273	393	120	1,2	1440	3	403	363	40	6	240	240	363	343	4,399065	0,0049217	0,002405	0,002404722	0,95999
Критерий для розраховки G11 -K11																		138,3333	
Критерий для розраховки F12 - K12																		33,33333	
Критерий для розраховки G21 -K21																		18,33333	
Критерий для розраховки F22 - K22																		0	
Критерий для розраховки F23 - K23																		8,0	
Критерий для розраховки G31 -K31																		9,0	
Критерий для розраховки F32 - K32																		4,0	
Критерий для розраховки F33 - K33																		5,0	

## ДОДАТОК Е. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ 5 В EXCEL

### ПРАКТИЧНА РОБОТА 5

Виконати для  $dT=10$  (виконано для  $dT=20$ )

Потоки	Температура, К		Водяний еквівалент, кВт/К	dH	Tк-Tп	Номери потоків
	початкова	кінцева				
Холодні	150	400	1,5	375	375	1
	110	300	1,3	247	622	2
Гарячі	410	120	1	290	912	3
	340	110	2	460	1372	4

Будуємо ентальпійну діаграму

x1	150	0
	400	375
x2	110	375
	300	622
г3	120	622
	410	912
г4	110	912
	340	1372



Для побудови складеної кривої для потоків, що охолоджуються («гарячі» складеної кривої), розташуємо початкові та кінцеві температури гарячих потоків за зростанням та розіб'ємо їх на інтервали та визначимо їх довжини:

№	Потоки		Довжина інтервалу	Гарячі	Срі	номер потоку
1	110	120	10			
2	120	340	220			
3	340	410	70			

№	Формула	СPh	dT	dH
1	$CP_{H1} = CP_4$	2	10	20
2	$CP_{H2} = CP_3 + CP_4$	3	220	660
3	$CP_{H3} = CP_3$	1	70	70

Для складеної кривої

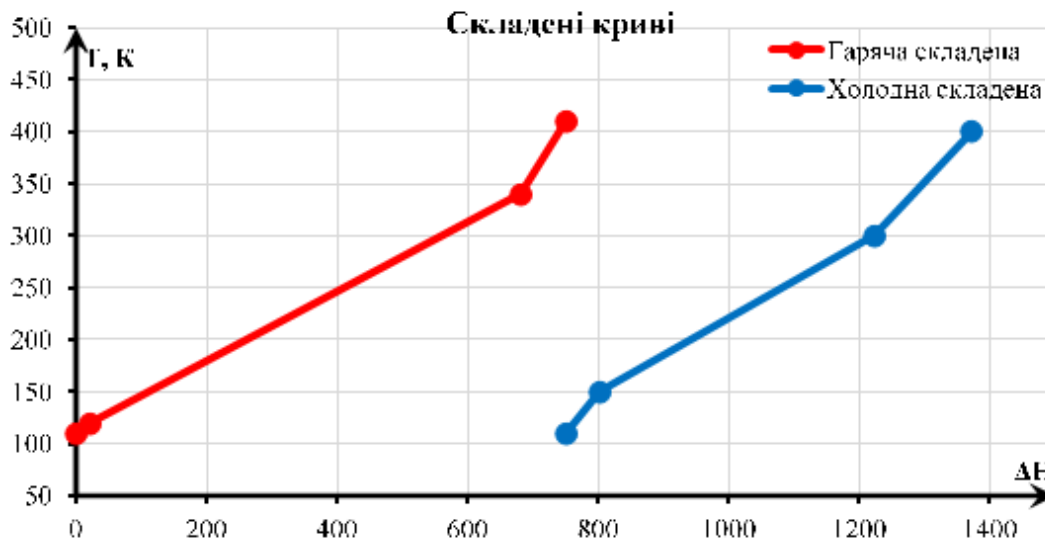
dH	T
0	110
20	120
680	340
750	410

№	Потоки		Довжина інтервалу	Холодні	Срі	i
1	110	150	40			
2	150	300	150			
3	300	400	100			

№	Формула	СPh	dT	dH
1	$CP_{H1} = CP_2 =$	1,3	40	52
2	$CP_{H2} = CP_1 + CP_2$	2,8	150	420
3	$CP_{H3} = CP_1$	1,5	100	150

Для складеної кривої

dH	T
750	110
802	150
1222	300
1372	400



Побудуємо складену криву, потрібно здвинути холодну складену криву по осі  $\Delta H$  на таку відстань, щоб виконувалась умова  $dT=20$

при  $dH_{\text{початкове}}=150$  графіки перетинаються у точці пінча для гарячого теплоносія - 340 при  $dH=180$  графіки розташовані на відстані 20С за умовою один від одного, тоді можна

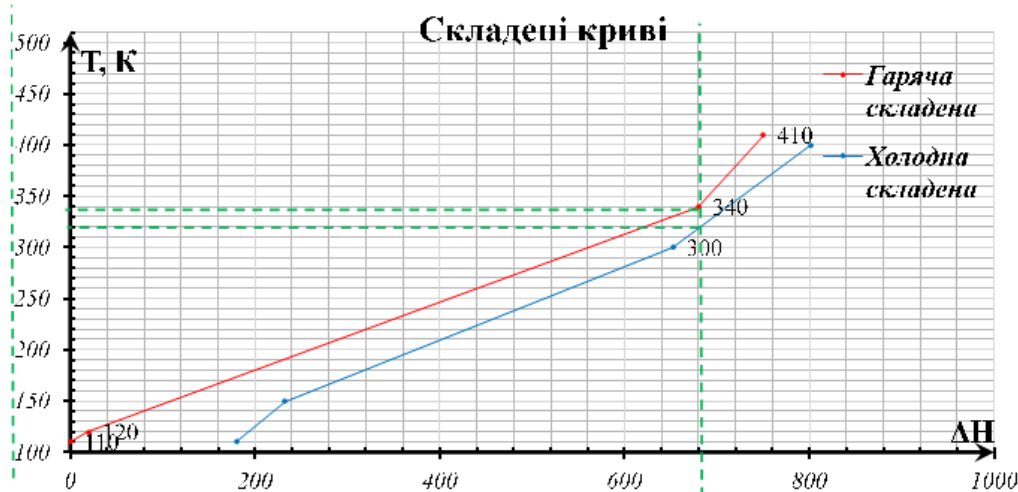
**Складені криві із визначенням точки ПНЧА**

**Для складеної кривої гарячий**

$\Delta H$	T
0	110
20	120
680	340
750	410

**Для складеної кривої холодний**

$\Delta H$	T
180	110
232	150
652	300
802	400



**Різниця  $dT=20$**

Точка пінча  $T=340$  для гарячого,  $T=320$  для холодного

**Будуємо сіткову діаграму**

Зверху розташовані гарячі по токи, знизу в порядку нагрівання - холодні.

