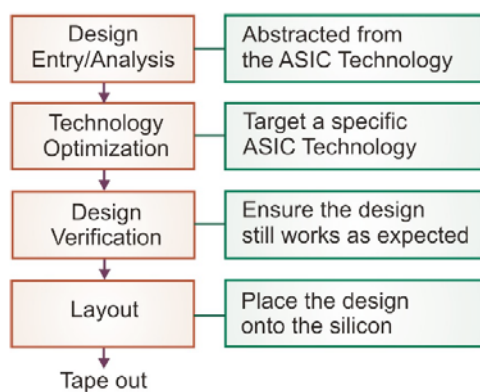


І. Фармага, О. Матвійків

Тепло- і масообмін в мікросистемах

Навчальний посібник



№530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR



Tempus

Навчальний посібник "**Тепло- і масообмін в мікросистемах**" створено для допомоги вищим навчальним закладам України впровадити нову магістерську навчальну програму "Проектування мікросистем".

Посібник "**Тепло- і масообмін в мікросистемах** " створено при підтримці Європейського Союзу за Спільним Європейським Проектом "Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design" (MastMST), ідентифікаційний номер 530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR.

Координатор проекту проф. Збігнєв Лісік, Технічний університет м.Лодзь, Польща.

Учасники проекту:

- Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна, координатор проф. Михайло Лобур.
- Київський Національний університет ім. Тараса Шевченка, м. Київ, Україна, координатор проф. Валерій Скришевський.
- Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, координатор проф. Володимир Хаханов.
- Донецький національний технічний університет, м. Красноармійськ, Україна, координатор проф. Володимир Святний.
- Технічний університет м.Ільменау, Німеччина, координатор проф. Іво Рангелов.
- Ліонський Національний інститут прикладних наук, Франція, координатор проф. Александра Апостолук
- Університет Павії, м.Павії, Італія, координатор проф. Паоло Ді Барба

Посібник схвалено редакційним комітетом (проф. Паоло Ді Барба (Університет Павії) - співголова, проф. Александра Апостолук(Ліонський Національний інститут прикладних наук) – співголова, члени: проф. Збігнєв Лісік(Технічний університет м.Лодзь), д-р Яцек Подгурські (Технічний університет м.Лодзь), Д-р Януш Возний (Технічний університет м.Лодзь), Д-р Валентин Іщук (Технічний університет м.Ільменау), Д-р Марія-Евеліна Могначі (Університет Павії), Д-р Роберто Галді (Університет Павії)) 6 травня 2016, м. Павія, Італія

Автори висловлюють глибоку вдячність керівництву вищеназваних університетів за всебічну підтримку Проекту.

Textbook "**Heat & Mass Transfer in Microsystems**" developed to help higher education institutions in Ukraine to introduce new master's educational program "Designing microsystems".

Textbook "**Heat & Mass Transfer in Microsystems**" was created with the support of the European Union within the Joint European Project "Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design" (MastMST), identification number 530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR.

Project Coordinator prof. Zbigniew Lisik, Lodz University of Technology, Lodz, Poland.

Учасники проекту:

- Lviv Politechnical National University, Lviv, Ukraine ,
Coordinator prof. Mykhailo Lobur.
- Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine,
Coordinator prof. Valeriy Skryshevsky.
- Kharkiv National University of Radioelectronics, Ukraine ,
Coordinator prof. Vladimir Hahanov.
- Donetsk National Technical University, Krasnoarmiysk,
Coordinator prof. Volodymyr Sviatny.
- Ilmenau University of Technology, Germany,
Coordinator prof. Ivo Rangelow.
- Lyon Institute of Applied Sciences, France,
Coordinator prof. Alexandra Apostoluk.
- University of Pavia, Italy,
Coordinator prof. Paolo Di Barba.

The Handbook was approved by Editorial Committee (prof. Paolo Di Barba (University of Pavia) - Co-Chair, prof. Alexandra Apostoluk (Lyon Institute of Applied Sciences) – Co-Chair, members: prof. Zbigniew Lisik (Lodz University of Technology), Dr Jacek Podgorski (Lodz University of Technology), Dr Janusz Wozny (Lodz University of Technology), Dr Valentyn Ishchuk (Ilmenau University of Technology), Dr Maria Evelina Mognaschi (University of Pavia), Dr Roberto Galdi (University of Pavia) May 6, 2016, Pavia, Italy.

The authors express their deep gratitude to the aforementioned universities for full support of the project.

Вступ

Курс «Процеси тепло- і масообміну в мікросистемах» розроблено для студентів спеціальності «Інформаційні технології проектування», спеціалізація – автоматизація проектування мікросистем.

Мета курсу: Вивчити фізичні основи і математичні моделі процесів теплопередачі та масо переносу в мікросистемах на основі аналізу конструктивних особливостей, умов експлуатації та функціонування, вимог до забезпечення схемо технічних, конструктивних, технологічних та функціональних характеристик.

Інформаційні технології проектування в сучасних умовах розгалужені на цілий ряд напрямків. Серед них можна виділити такі основні галузі:

- проектування інформаційних систем різноманітного призначення;
- розроблення механічних системи, електромеханічних, будівельних конструкцій та споруд автоматизованими засобами;
- проектування та супроводження геоінформаційних систем;
- системи автоматизованого проектування і технологічної підготовки виробництва пристроїв та систем радіотехніки, електроніки, засобів телекомунікацій.

Особливе місце посідає автоматизоване проектування, виготовлення та дослідження мікросистем, а саме мікроелектромеханічних пристроїв та систем, рідинних мікросистем. Цей напрямок ґрунтується на використанні методів, моделей, засобів, які розроблено у вище перелічених галузях. Однак використання мікро-, нано-технологій накладає свої вимоги. Зазнають змін структурні особливості систем проектування, методи моделювання, засоби досліджень.

Мікросистеми в даній книзі розглядаємо такі: мікроелектронні пристрої, мікроелектромеханічні пристрої, рідинні мікросистеми.

Традиційно, одним із важливих завдань проектування мікросистем є забезпечення необхідних функціональних та масогабаритних параметрів з врахуванням теплових режимів. Тому, безперечно важливим, є вивчення

процесів тепло- масо обміну в мікросистемах. Основною метою даного посібника є на основі розгляду фізичних та математичних основ тепло- масообміну засвоїти сучасні підходи аналізу цих процесів в мікросистемах.

Серед них є:

- методи побудови та формування геометричних та математичних моделей на основі системно-структурного аналізу;
- формування задач, правил та процедур, які дають змогу сформулювати задачу аналізу тепло- масообміну, а саме – розмірність, джерела тепловиділення, фізичні процеси,

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- БД – база даних
- ДВ – дистильована вода
- ЕОМ – електронна обчислювальна машина
- ІС – інтегральна мікросхема;
- МЕМС – мікроелектромеханічна система;
- МРС – мікрорідинна система;
- МС – мікросистема;
- ОЗП – оперативний запам'ятовувальний пристрій
- ОП – операційний підсилювач
- ПЗ – програмне забезпечення
- ПЗП – постійний запам'ятовувальний пристрій
- ПП – програмний продукт
- СУБД – система управління базами даних.

Зміст

1	Розроблення теплових моделей з застосуванням методів системно-структурного аналізу мікросистем	1
1.1	Аналіз конструкцій і теплових процесів в МСП.....	2
1.2	Методика автоматизованої побудови моделей теплових процесів в конструкціях МСП... ..	11
1.3	Особливості практичної реалізації методики автоматизованої побудови моделей теплових процесів в конструкціях МСП	19
1.4	Висновки	20
	Список літератури.....	20

1 Розроблення теплових моделей з застосуванням методів системно-структурного аналізу мікросистем

Для математичного моделювання в даний час характерна машинно-орієнтована формалізація і автоматизація як самої постановки задачі, так і всіх процедур, пов'язаних з їх реалізацією в обчислювальних системах. Обчислювальна техніка використовується не тільки на етапах рішення вже готових рівнянь, які описують об'єкт, але і на етапах теплофізичного обґрунтування математичного опису і постановки задачі. Реалізація вказаного підходу вимагає розробки спеціалізованих алгоритмів і програмного забезпечення, яке дозволяє на основі аналізу концептуальної моделі об'єкту і поставленої задачі теплового проектування перетворити вихідну інформаційну модель в масив, який містить інформацію, що ідентифікує дані і забезпечують реалізацію (вихідні дані) математичного опису процесу теплопередачі. Ці алгоритми забезпечують дві з основних функцій препроцесора системи теплового проектування – формування інформаційної моделі для процесора на основі аналізу виду розв'язуваної задачі, автоматизована побудова теплової моделі на основі концептуальної моделі об'єкту, стадії і етапу проектування.

З позиції системного підходу згідно [1] теплофізичний процес представляється у виді складної кібернетичної системи, яка характеризується великою кількістю елементів і зв'язків, ієрархією рівнів елементарних теплофізичних, термодинамічних та інших ефектів, фізично зв'язаних ланцюгом причинно-наслідкових відносин між

елементарними ефектами і процесами, сумісністю явищ різної фізичної природи, в локальному об'ємі апарату і інше.

Об'єктом дослідження даної роботи є мікросистемні пристрої (МСП).

Для рішення задачі побудови автоматизації побудови теплової математичної моделі МСП необхідно розглянути типи і особливості конструктивних рішень, провести аналіз фізичних процесів теплообміну, вибрати методи і розробити алгоритми представлення, перетворення і оброблення необхідної інформації.

1.1 Аналіз конструкцій і теплових процесів в МСП

Мікросистемні пристрої є функціонально, конструктивно і технологічно закінчені. Вони мають типові габаритні і приєднувальні розміри, формоутворення визначає ступінь інтеграції.

В зв'язку з високими вимогами, що ставляться до зниження маси і габаритів, підвищенню міцності і стійкості до зовнішніх впливів в процесі експлуатації (волога запиленість, забруднення та інше), а, як наслідок, збільшення ступеня герметичності конструкції мікроелектронної апаратури, з точки зору теплових режимів МСП характеризується такими особливостями:

- Збільшення концентрації температурних полів і величини їх градієнтів в малих об'ємах;
- Збільшення температурної взаємодії між елементами схеми;
- Збільшення температурного взаємозв'язку між елементами конструкції;
- Збільшення нерівномірності розподілу температурного поля на елементах та конструкції в цілому;
- Погіршення умов зовнішнього теплообміну;
- Збільшення зовнішніх теплових впливів.

На основі цих особливостей можна зробити висновок, що:

- В більшості випадків для теплового проектування даного класу конструкцій не можна використовувати чисто дискретну модель процесу теплообміну;

- Необхідно розглядати теплову математичну модель (ТММ) конструкції МСП як систему з розподіленими параметрами [2,3];
- Якщо ТММ дуже складна, необхідно виділити її структурні частини і провести декомпозицію фізико-математичної задачі, яка не завжди буде співпадати з декомпозицією по функціональних і конструктивних критеріях;
- Переходити до дискретної моделі, в якій елементи будуть макромоделями окремих структурних частин загальної моделі.

Для побудови теплової моделі МСП необхідна певна інформація про конструкцію, способи її кріплення, теплофізичні характеристики матеріалів, умови експлуатації.

Проведемо аналіз особливостей деяких конструктивних рішень МСП і процесів теплообміну в їх конструкціях. Твердотільні ІС бувають корпусовані і безкорпусні. Безкорпусні ІС кріпляться на підкладку мікропристрою або панель мікроблоку за допомогою клею або приварювання виводів [4]. Теплообмін здійснюється теплопровідністю через герметизуючий шар (кремній – органічні епоксидні емалі, фосфоромісткі лаки, епоксидні компаунди). З нижньої грані теплопередача кондукцією здійснюється в підкладку мікропристрою або панель мікроблоку. З верхньої і бокової граней тепловіддача проходить за рахунок конвекції та випромінювання. В окремих випадках тепло може відводитись через елементи зосередженого тепло відводу (різного типу радіатори). При встановленні безкорпусних ІС та великих інтегральних мікросхем (ВІС) можуть застосовуватись керамічні носії (мікрокорпуси) та гнучкі стрічкові носії. В цьому випадку теплообмін з бокових і нижньої або тільки нижньої граней з носієм здійснюється кондукцією. Тепловий режим без корпусних ІС в більшості буде залежати від об'єкту встановлення, а саме від його теплофізичних характеристик, умов експлуатації і теплообміну. Якщо без корпусна ІС має порівняно товсті виводи, і її кристал теплоізований, необхідно враховувати теплообмін кондукцією через виводи.

В сучасній МСП найбільш часто застосовують МЕМС, ІС і ВІС, герметизовані в металічних, металокерамічних, керамічних, компаундних корпусах. Кріплення кристалу в корпусі аналогічне безкорпусним ІС. Процеси теплообміну конвекцією

може проходити більш інтенсивно через з відсутність герметизуючого шару. Проте величина тепловіддачі конвекцією від кристалу і кришки корпусу буде залежати від об'єму простору і тиску в середині корпусу. Теплообмін випромінюванням залежить від ступені чорноти і температури поверхні кристалу.

Розглянемо теплообмін:

$$\begin{aligned} \text{корпус} &\Rightarrow \text{об'єкт встановлення} \\ \text{корпус} &\Rightarrow \text{зовнішнє середовище} \end{aligned} \quad (1.1,1.2)$$

Корпусована ІС може встановлюватись на панель блоку мікросистеми. В цьому випадку теплообмін буде проходити від нижньої грані корпусу теплопровідністю, якщо ІМС закріплена безпосередньо на панель. Якщо ІС кріпиться через підставку, теплообмін буде здійснюватись теплопровідністю

$$\text{корпус} \Rightarrow \text{підставка} \Rightarrow \text{панель} \quad (1.3)$$

якщо із застосуванням шару кріплення (клей, компаунд та інше)

$$\text{корпус} \Rightarrow \text{шар кріплення} \Rightarrow \text{панель} \quad (1.4)$$

Ступінь теплообміну в даному напрямку буде залежати від величини теплопровідності панелі і шару кріплення. З бокових і верхньої поверхонь теплообмін може здійснюватись з зовнішнім середовищем в середині блоку конвекцією. У випадку заповнення блоку теплопровідним компаундом, теплообмін з цих поверхонь здійснюється кондукцією.

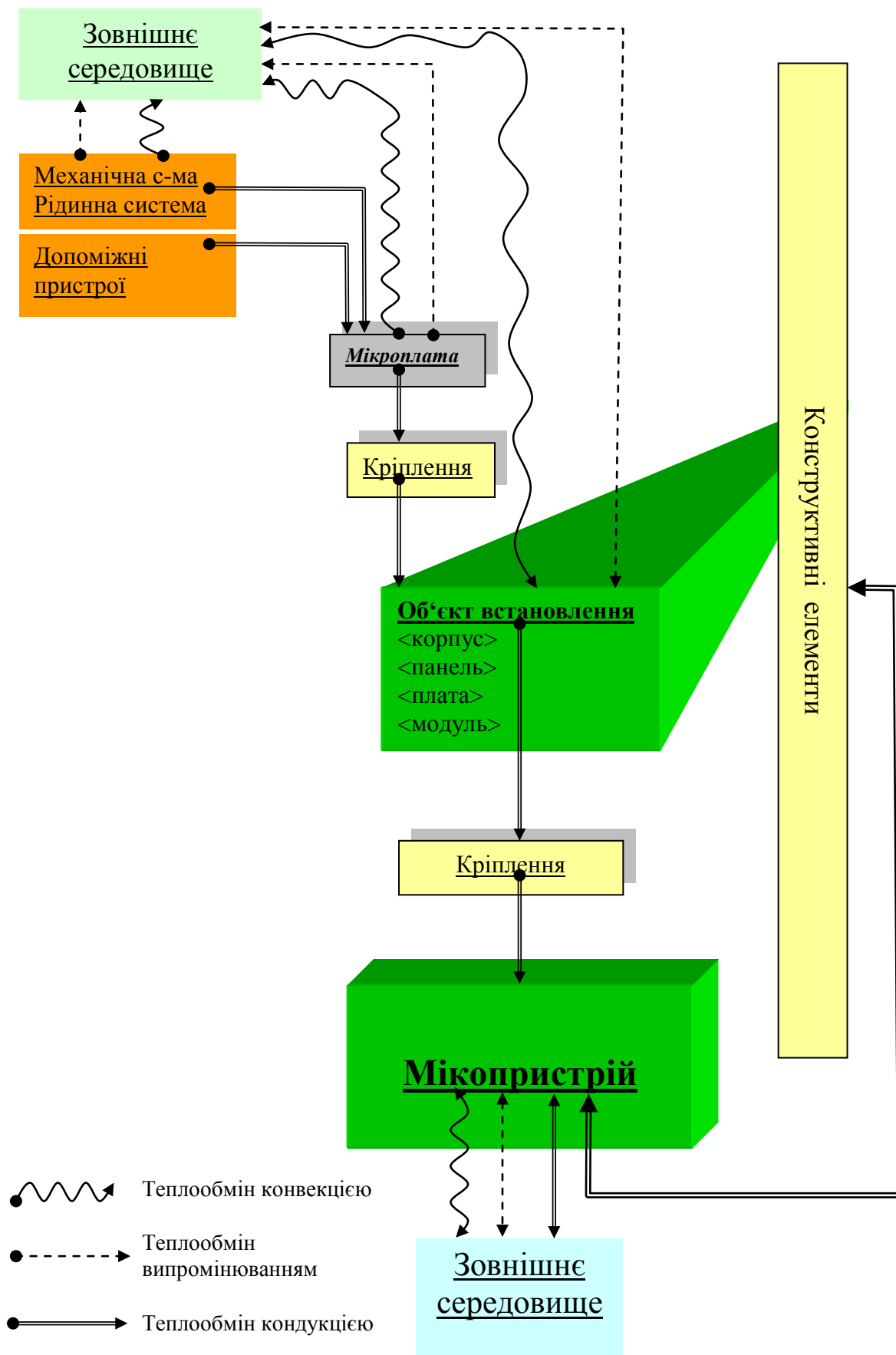
Якщо корпус має низьку теплопровідність, необхідно враховувати теплопередачу кондукцією через виводи до об'єкту кріплення.

Розглянемо мікросистеми. Конструктивно МС складається з навісних і плоских елементів, підкладки, кріплення, об'єкту встановлення. Об'єктом встановлення служить корпус або панель (мікроплата). Кріплення здійснюється шляхом приклеювання або припаювання нижньої грані або торців підкладки до об'єкта встановлення. Підкладки можуть закріплюватись як безпосередньо на об'єкт

встановлення так і через проміжні шари (наприклад – поліамід, алюміній, та інше).
Проведемо аналіз способів теплопередачі:

$$\begin{array}{l} \text{теповиділяючий елемент} \Rightarrow \text{підкладка} \Rightarrow \text{об'єкт встановлення} \Rightarrow \\ \text{зовнішнє середовище} \end{array} \quad (1.5)$$

Тепловиділяючими елементами служать навісні і плоскі елементи. Тепловий потік, що створюється потужністю тепловиділення на поверхні кристалу або плоского елемента передається з врахуванням його теплового опору і теплоємності в підкладку кондукцією. Далше аналогічно, через проміжні шари (якщо такі існують) і кріплення, тепловий потік передається в об'єкт встановлення. Теплообмін між об'єктом встановлення і зовнішнім середовищем здійснюється конвекцією, випромінюванням і кондукцією. В більшості випадків один із механізмів теплопередачі переважає над іншими. Це залежить від зовнішнього середовища (газоподібне – конвекція, вакуум – випромінювання, тверде тіло – теплопровідність).



Мал. 1.1. Схема теплообміну в конструкції МСП

Від підкладки МСП тепло відводиться і в протилежну сторону (верхня чи нижня грань – зовнішнє середовище). Механізми теплопередачі аналогічні розглянутим вище для об'єкта встановлення. З цілю забезпечення необхідного теплового режиму можуть проектуватись елементи зосередженого тепловідводу (радіатори, витоки тепла та інше). В даному випадку розглядаєм механізм теплопередачі кондукцією як найбільш ефективний.

Тепловий режим мікросистемних пристроїв визначається не тільки особливостями їх власного конструктивного виконання але і залежить від конструкції мікроблоку. Тому розглянемо останній з точки зору забезпечення теплових режимів МСП. Мікропристрій складається з несучої конструкції (корпусу) і набору функціональних модулів. Як перші, так і другі переважно металічні і знаходяться в певних зонах в доброму тепловому контакті. Проте в деяких варіантах виконання можуть застосовуватись матеріали з низькою теплопровідністю в цілях забезпечення механічного захисту та інше. Теплообмін між пристроями в середині пристрою здійснюється переважно кондукцією, хоча можлива присутність випромінювання і конвекції. Характерно, що варіанти конструктивного виконання як компонентів, так і мікропристроїв дуже різноманітні. Тому для кожної конструкції потрібно проводити додаткові теоретичні і експериментальні дослідження з метою побудови схеми теплообміну між мікроелектронними пристроями. На основі проведення аналізу особливостей конструктивного виконання і теплопередачі представим загальну схему теплообміну в МСП з врахуванням об'єкту встановлення (мал. 1.1.).

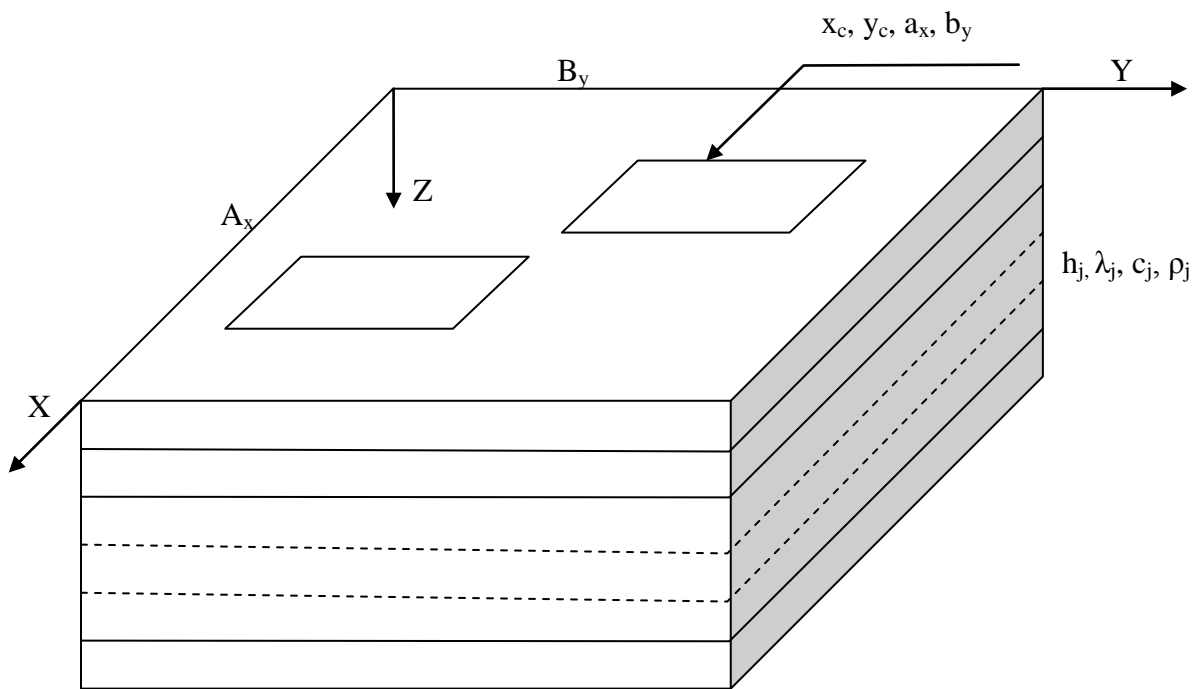
З ціллю подальшої розробки базових теплових і математичних моделей, алгоритму автоматизованої побудови цих моделей того чи іншого пристрою з врахуванням етапу і стадії проектування, проведемо якісний порівняльний аналіз механізмів теплопередачі в об'єкті, що розглядається і приймемо деякі припущення.

В той час, коли для традиційного виконання блоків РЕА третього покоління характерним механізмом тепло відводу була конвекція, для мікросистемних пристроїв перевага віддається кондукції. Це пов'язано із значним зменшенням масо-габаритних показників, підвищеними вимогами до герметичності пристроїв,

необхідності забезпечення малих градієнтів температур в конструкції. Дослідження літературних джерел, а також результати експериментів, що проводились в процесі розробки і перевірки адекватності математичних моделей теплопередачі показують, що механізм конвективного теплообміну займає біля 8%, а випромінювання – біля 2% в загальному процесі теплопередачі в конструкціях які розглядаються. Виходячи із цього можна прийняти допущення про те, що моделями з розподіленими параметрами необхідно описувати процес теплопровідності, а конвекцію і випромінювання можна враховувати дискретно в граничних умовах. Розглянемо особливості процесу теплопровідності в конструкціях МСП з ціллю вибору базової теплової моделі. Згідно вищевказаних особливостей конструкцій, що розглядаються необхідно враховувати тривимірність і нестационарність процесу теплопровідності. Для врахування великої неоднорідності теплофізичних характеристик використовуваних матеріалів виникає необхідність врахування їх змін по одній із координат у виді ступінчатої функції (багатошаровість конструкції і моделі). В зв'язку з різноманітністю конструктивних варіантів і їх ієрархічністю (мал. 1.1.) необхідно вибрати певні правила побудови повної теплової моделі. Основні – принцип місцевого впливу [5]. З врахуванням цього принципу можна застосовувати методику поетапного моделювання [6]. При цьому необхідно враховувати нерівномірність розподілу температури. В залежності від співвідношення розмірів граней і величин теплових потоків, що проходять через них, можна приймати окремі поверхні тепло ізольованими. Узагальнюючи вищесказане, а також, враховуючи результати досліджень, отриманих в [7], приймаємо як базову теплову модель багатошаровий прямокутний паралелепіпед (мал. 1.2.) з різними граничними умовами на різних гранях (1-го, 2-го, і 3-го родів). Між теплопровідними шарами приймаємо ідеальний тепловий контакт (граничні умови 4-го роду). Неідеальний тепловий контакт можна моделювати шляхом вводу додаткового шару із зведеними теплофізичними характеристиками [8]. Загальна теплова модель конструкції МСП будується шляхом композиції багатошарових прямокутних паралелепіпедів (наприклад [9]), що об'єднуються з допомогою поетапної методики. Врахування теплового взаємозв'язку між МСП в комірках і в мікроблоці може проводитись на

основі побудови дискретної теплової моделі (метод теплових схем [10]). При цьому теплові провідності і постійні окремих частин конструкції визначаються шляхом використання базової теплової моделі.

Таким чином, в даному параграфі на основі системного підходу проведено структурний аналіз варіантів конструктивних виконань МСП і процесів теплопередачі з врахуванням об'єкту встановлення, що дало можливість прийняти правила, розробити загальну схему і вибрати базову модель для побудови теплової моделі конструкції МСП.



Мал. 1.2. Базова теплова модель в виді багатошарового паралелепіпеда з плоскими джерелами тепла на поверхні.

A_x – розмір по осі X;

B_y – розмір по осі Y;

x_c – координата центра тепловиділяючого елемента по осі X;

y_c – координата центра тепловиділяючого елемента по осі Y;

a_x – розмір тепловиділяючого елемента по осі X;

b_y – розмір тепловиділяючого елемента по осі Y;

h_j – товщина шару з номером j;

λ_j – коефіцієнт теплопровідності шару з номером j;

c_j – питома теплоємність шару з номером j;

ρ_j – питома густина шару з номером j.

1.2 Методика автоматизованої побудови моделей теплових процесів в конструкціях МСП

Застосування методів автоматизованого формування математичних моделей характерно для числових методів аналізу електричних схем [11], методу скінченних елементів [12] та інше, універсальне призначення яких дозволяє розглядати широкий клас задач.

В даній роботі необхідність розробки методики автоматизованої побудови моделей теплових процесів в конструкціях МСП обумовлюється необхідністю реалізації широкого класу задач теплового проектування [7] в операційному середовищі автоматизованої системи, структура якої представлена в [13] з врахуванням особливостей виконання проектних процедур і конструктивного виконання МСП. Як основу методики виберемо концепцію [14], згідно якої топологічну структуру складного об'єкту можна використовувати як базову інформацію, безпосередньо по якій, в залежності від конкретної цілі здійснюється пошук даних в спеціалізованих базах, їх перетворення і синтез відповідних розрахункових моделей. Алгоритм автоматизованого проектування моделей теплових процесів базується на основі методів перетворення інформації і реалізовується в препроцесорі системи. Як базова інформація виступають дані про об'єкт проектування на певному етапі і стадії розробки, а також вид задачі (мал. 1.3.), яку необхідно рішати з ціллю з ціллю отримання результату проекту шляхом виконання проектної процедури. В результаті перетворення вхідної інформації необхідно отримати:

- дані, що забезпечують виконання подальших проектних операцій, а саме – критерії для прийняття проектного рішення (визначають спосіб прийняття рішення і вид результатів, які необхідно отримати в результаті виконання процедури аналізу);
- вхідні дані для проведення аналізу (визначають структуру загальної теплової моделі і характеристики її компонентів – одно- або тривимірні, стаціонарні чи нестаціонарні, кількість шарів, види граничних умов, що задаються на різних

гранях, функції розподілу теплових потоків і температури, що задаються в граничних умовах, теплофізичні характеристики шарів).

В попередньому параграфі проведено аналіз і визначено види теплових моделей конструкції МСП. Проте не для всіх задач теплового проектування необхідно такі складні моделі. Проведемо аналіз задач і визначимо види моделей, що необхідні для їх виконання.

<i>Стадії</i> <i>Етапи</i>	НДР	Ранні стадії проектування	Технічний проект
Аналіз ТЗ	(1.1) Визначення умов теплообміну.	(1.2) Розробка вимог на забезпечення теплових режимів на етапах проектування.	(1.3) Розробка вимог на випробовування пристрою.
Схемотехнічний	(2.1) Визначення потужностей тепловиділення. Аналіз схеми з врахуванням зовнішніх впливів	(2.2) Проектування схеми з врахуванням внутрішніх і зовнішніх Т впливі. Визначення Т допусків. Оптимізація потужностей.	(2.3) Обґрунтування схемотехнічного рішення по критерію забезпечення теплових режимів.
Конструкторський	(3.1) Аналіз теплових режимів. Розробка критеріїв оптимізації топологічного і конструктивного рішень.	(3.2) Проектування топології і конструкції з врахуванням цілі „забезпечення теплових режимів”.	(3.3) Обґрунтування конструктивного рішення по критерію забезпечення теплових режимів.
Технологічний	(4.1) Вибір характеристик матеріалів по критерію забезпечення теплових режимів	(4.2) Аналіз впливу неточності відтворення топологічних, конструктивних і теплофізичних характеристик на Т режим.	(4.3) Обґрунтування технологічного рішення по критерію забезпечення теплових режимів.
	Виготовлення і випробовування макету	Виготовлення дослідного зразка	Випробовування пристрою

Мал.1.3. Задачі теплового проектування мікросистемних пристроїв

Введемо позначення задач у виді числа з трьох і більше цифр, які розділені розділювачем (наприклад крапкою). Розглянемо ці позначення (цифри зліва на право):

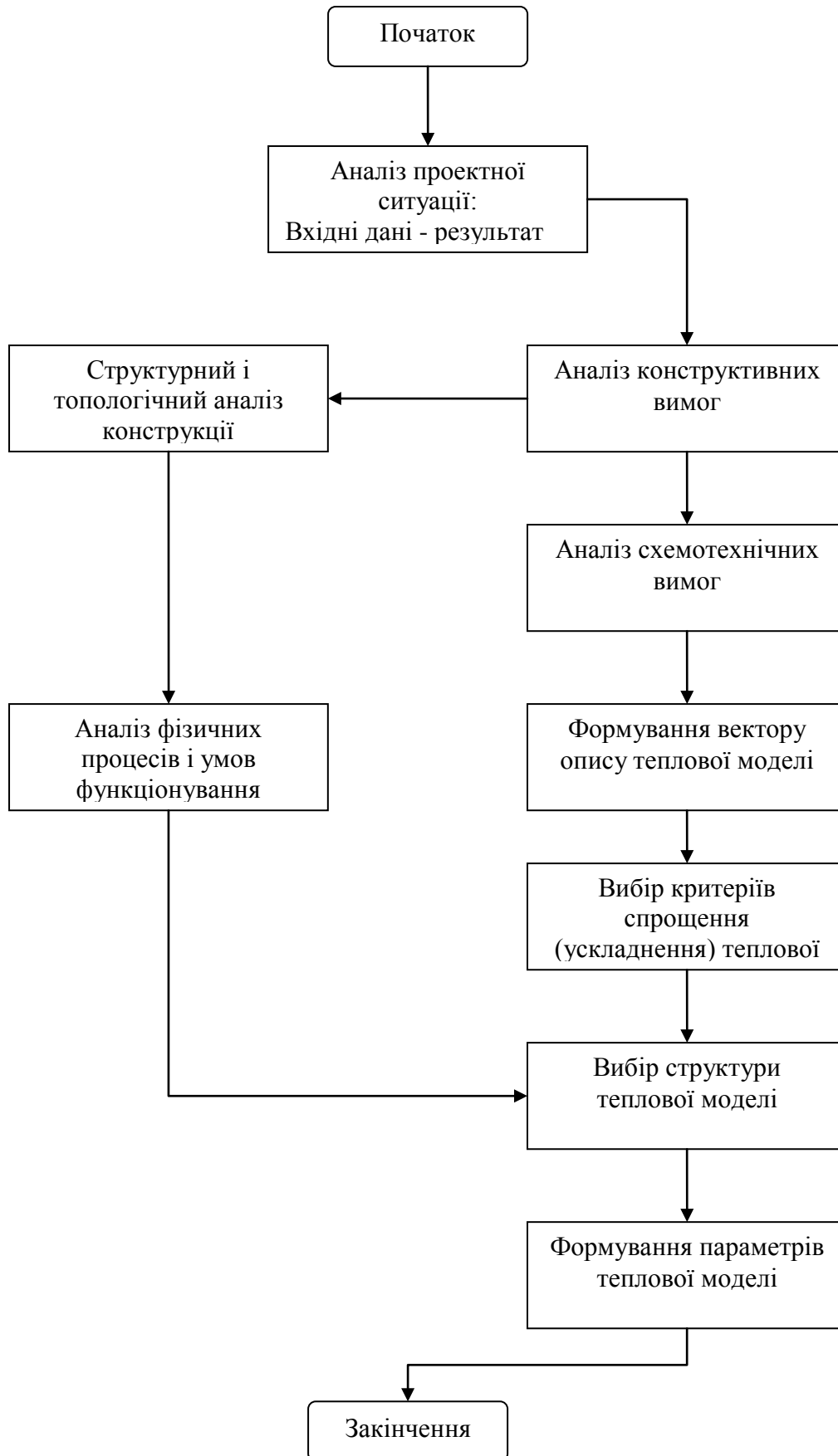
- перша позначає етап проектування –
 - 1 – аналіз ТЗ,
 - 2 – етап схемотехнічного проектування,
 - 3 – етап конструкторського проектування,
 - 4 – етап технологічного проектування;
- друга позначає стадію розробки –
 - 1 – НДР,
 - 2 – ранні стадії проектування,
 - 3 – технічний проект;
- третя – порядковий номер задачі на певному етапі і стадії проектування;
- четверта і подальші – порядковий номер підзадачі для вищестоячої задачі (можуть бути відсутніми).
- Розглянемо основні задачі (мал. 1.3.):
- (1.1.1) – основна особливість даної задачі, це рання стадія проектування. З цього випливає, що застосування складної моделі неможливо через відсутність достатньої кількості вхідної інформації (вхідними даними є інформація про прилад-аналог, уніфіковані корпуси і типові матеріали, ТУ і ТЗ на виріб). Вибирається спрощена теплова модель у виді нагрітих зон і теплових провідностей. Прикладом рішення такої задачі з використанням пакету програм для блоків РЕА може служити [15]. Для МЕП можна використовувати одномірну багат шарову модель.
- (2.1.1) – аналіз теплової моделі не проводиться, формується запит до САПР схемотехнічного проектування.
- (2.1.2) – здійснюється передача даних системі схемотехнічного проектування і отримання результатів (теплова модель не використовується).
- (3.1.1), (3.1.2), (4.1.1) – використовується теплова модель, що відповідає вихідним даним, отриманим в результаті схемотехнічного, конструкторського, а для останньої задачі і технологічного проектування.

результати проведених обчислень, що необхідно для підвищення ефективності роботи і розширення можливостей системи.

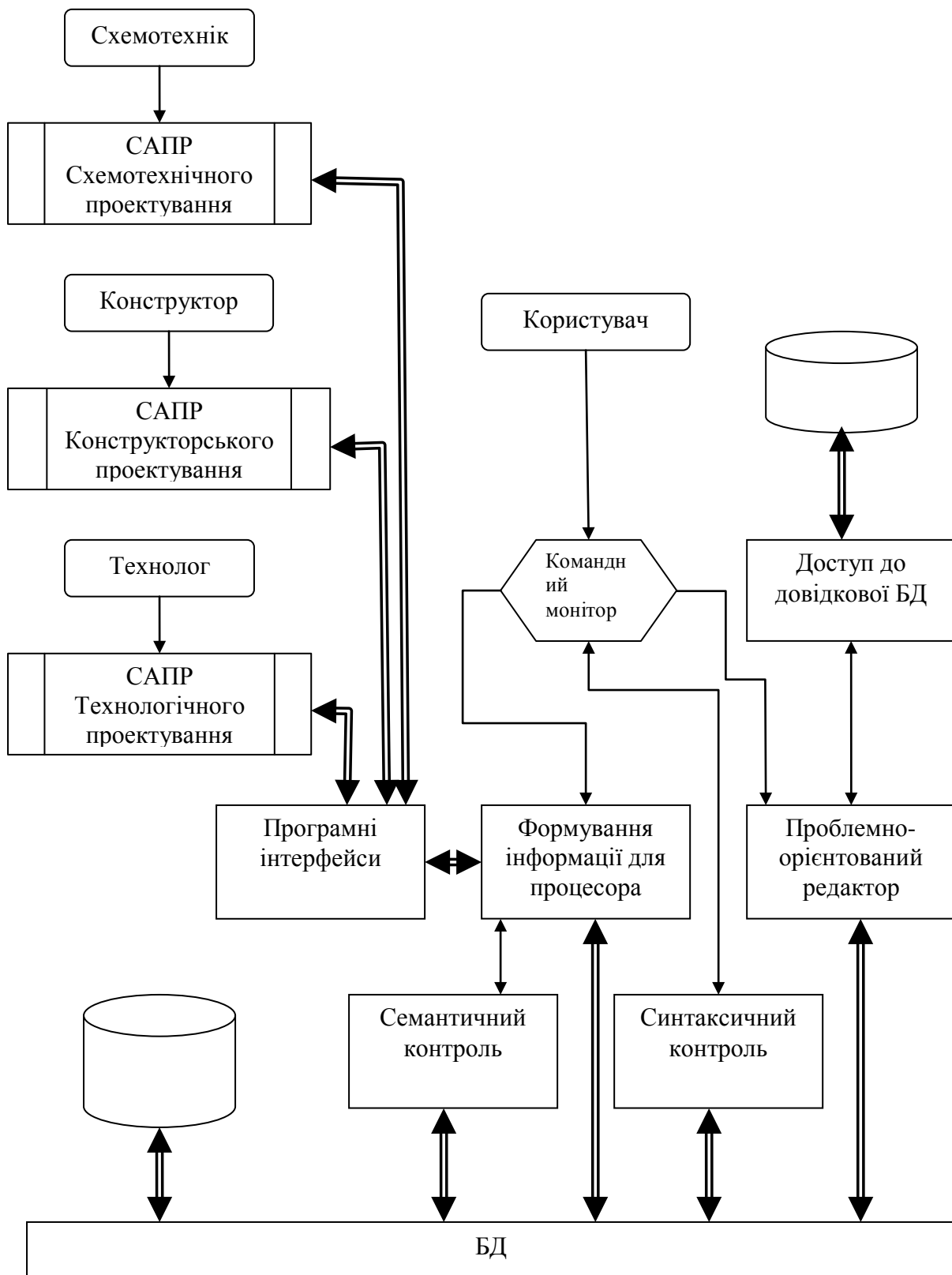
Розглянемо етапи автоматизованої побудови теплових моделей.

1. Адаптація системи до об'єкта і умов проектування (побудова послідовності інтерактивного процесу, вироблення правил перетворення інформації, ввід інформації для побудови базових моделей теплових процесів).
2. Генерація відповідних розділів бази даних.
3. Використання алгоритмів перетворення інформації (робота з базою даних), формування, спрощення і ускладнення теплової моделі.
4. Формування інформаційних масивів, що описують теплову модель конструкції МСП, у відповідності до визначеної задачі проектування. Від задачі до задачі повторюються циклічно 3-й і 4-й етапи.

Загальний алгоритм формування теплової моделі, в основі якого лежить [16], приведено на мал. 1.4. Для спрощення моделі можуть використовуватись методи, запропоновані в [17]. Розроблена методика і алгоритми реалізовані в препроцесорі системи теплового проектування, структура якого представлена на мал. 1.5.



Мал. 1.4. Алгоритм формування теплової моделі.



Мал. 1.5. Структурна схема пре процесора системи теплового проектування у взаємодії з іншими САПР.

1.3 Особливості практичної реалізації методики автоматизованої побудови моделей теплових процесів в конструкціях МСП

Представлена в попередньому параграфі методика може бути реалізована тільки із застосуванням сучасних підходів та інструментальних засобів інформаційних технологій проектування. Пропонуємо покласти в основу принцип комплексного підходу до проектування не тільки пристроїв, виробів чи технологій, але і самого процесу розробки з врахуванням ієрархічності цих процесів та взаємозв'язку з умовами функціонування підприємства-розробника, підприємства-виготовлювача та етапу впровадження виробу. Такі можливості дає об'єктно-орієнтоване проектування і програмування з застосуванням мобільних інструментальних середовищ та побудови інтерфейсів з різними проектними середовищами шляхом перетворення форматів даних.

В основі реалізації поставлених задач необхідні для застосування такі математичні методи:

- 1) Функціонально-логічне моделювання для опису процесів розробки, впровадження та функціонування приладу.
- 2) Теоретико-множинний опис для представлення структури даних, компонентів та системи в цілому.
- 3) Методи аналізу сіток на основі теорії графів для побудови топологічних моделей пристроїв, фізичних процесів та проектно-технологічних процесів.
- 4) Методи апроксимації тривимірних поверхонь і тіл фінітними функціями низьких порядків.
- 5) Методи спрощення моделей на основі застосування параметричної чутливості та побудови регресійних макромоделей.
- 6) Методи пошукового проектування та імітаційного моделювання для розробки бази знань, яка дозволить обробляти інформацію про процеси, проекти і задачі по етапах і стадіях.

Інструментальні середовища реалізації Сі, Джава та інші, інтерпретаційний принцип дасть мобільність.

Практичне завдання – побудова креслення в Автокаді перетворення форматів в вихідні дані для аналізу графами з допомогою пакету Граф а потім декомпозиція конструкції і перетворення доних для процесора.

1.4 Висновки

1. Проведено системно-структурний теплофізичний аналіз конструкції МЕР і задач теплового проектування з ціллю розробки методики автоматизації постановки задач аналізу теплового режиму і прийняття рішення для забезпечення теплоелектричних характеристик.

2. На основі проведеного аналізу конструкцій мікроелектронних пристроїв і процесів теплообміну обґрунтовано вибір базової теплової моделі у виді багат шарового паралелепіпеду, прийнята концепція побудови загальної теплової моделі у виді композиції базових.

3. Автоматизована побудова теплової моделі базується на основі методів перетворення інформації, що визначає необхідність детального розгляду задач теплового проектування і використовуваних теплових моделей.

4. Аналіз задач показав, що тепла модель формується в залежності від наявності інформації на певній стадії і етапі проектування. При переході від однієї задачі до іншої модель не формується кожен раз заново, а ускладнюється або спрощується. Такий процес вимагає розробки спеціального інформаційного забезпечення.

5. Методика автоматизованої побудови моделей базується на певних правилах, положеннях і реалізується в препроцесорі системи теплового проектування.

Список літератури

1. Шашков А.Г. Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение. – М.: Энергоатомиздат. 1983. – 280с.
2. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1975. – 568с.

3. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. – 287с.
4. Микроэлектронная аппаратура на бескорпусных интегральных микросхемах/ И.Н. Воженин, Г.А. Блинов, Л.А. Коледов и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 264с.
5. Дульнев Г.Н., Польщиков Б.В. Проблемы теплообмена в радиоэлектронных устройствах. – Радиотехника, 1977, Т.32, №11, С. 86-96.
6. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в РЭА. – М.: Высш. Шк., 1984. – 247с.
7. Автоматизация теплового проектирования микроэлектронных устройств средствами САПР / Коваль В.А., Федасюк Д.В., Маслов В.В., и др., под ред. Ковалья В.А.. – Львов: Вища шк., 1988. – 256с.
8. Грилицкий Д.В., Кизыма Я.М. Ассиметричные контактные задачи упругости и термоупругости. – Львов: Вища школа. Изд-во при Львов. Ун-те, 1981. – 136с.
9. Разработка методики теплоэлектрического моделирования низкочастотных гибридных интегральных микросборок. Заключительный отчет по НИР, №гос.рег. 01840021270, инв.№0287.0002301, сод. 147с.
10. Дульнев Г.М., Парфенов В.Г., Сиганов А.В. Методы расчета тепловогорезима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312с.
11. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. – М.: Радио и связь, 1988. – 560с.
12. Сабаннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. – М.: Мир, 1989. – 190с.
13. Фармага И.В. Разработка адаптируемых моделей и методов теплового проектирования для интегрированных САПР микроэлектронных устройств. – Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук. – Львів, 1992. – 195с.
14. Кафаров В.В., Дорохов И.М. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации. – М.: Наука, 1979. – 394с.
15. Иофин А.А., Ескин А.Ф., Романов Р.Б., Кирюхина Т.О. Пакет прикладных программ «ТРАП-1» - анализ тепловых режимов РЕА на начальных этапах

проектирования. – Тематический сборник научн. трудов «Конструирование и производство РЭА и ЭВА с применением малых и персональных ЭВМ» М.: Изд-во МАИ, 1988, С.37-41.

16. Коваль В.А., Федасюк Д.В., Фармага И.В. Автоматическое формирование и анализ тепловых и математических моделей конструкций для САПР МЭУ. – В сб.: Комплексная автоматизация научных исследований, проектирования и технологической подготовки производства. М.: 1987, С.39-40.

17. Коваль В.А., Федасюк Д.В., Фармага И.В. Использование параметрической чувствительности в процессе синтеза тепловых математических моделей МЭУ. – В кн.: Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических систем. М., 1987, С. 130.

Розділ 2. Рідинні мікросистеми - методи та засоби їх проектування

Рідинні мікросистеми (або рідинні МЕМС) це пристрої, які базуються на підкладці, що містить канали для протікання рідини або суміші рідин, де один або декілька каналів мають характерний розмір менший ніж 1 мм, тобто ширина каналу знаходиться в діапазоні $1^0..10^3$ мкм. Першим і найбільш успішним прикладом РМСТ є головка струменевих друкарок, вперше запропонована фірмою HP. Успішний розвиток РМСТ пояснюють їх зв'язком з відлагодженою мікроелектронною технологією. Ці пристрої мають дуже високий рівень інтеграції рідинних, мікроелектромеханічних та типових електронних компонентів; а також існує дуже великий, стабільний і зростаючий ринковий попит на такі пристрої [1]. Всі ці аспекти в комплексі дають змогу розвивати і підвищувати якість РМСТ пристроїв.

2.1. Аналіз структури і складу рідинних мікросистем

Типовий пристрій РМСТ складається з мікроканалів і компонентів, які забезпечують такі функції як фільтрація, концентрування, змивання, змішування, очищення, ізоляція та розділення рідинних сумішей [ii]. Склад, розмір і порядок сполучення компонентів РМСТ визначається метою пристрою - а) синтез сполук, б) ріст мікроорганізмів, в) виявлення та діагностика біорідин, г) визначення концентрації компонентів тощо. Робочим елементом і, одночасно, ядром такого пристрою є рідинний мікропотік. В РМСТ протікають складні рідинні суміші, наприклад, зразки крові, бактеріальні клітинні суспензії, суміш білків або антитіла та різні буферні розчини. Для керування мікропотоком в РМСТ включають певну комбінацію вбудованих давачів (сенсорів), виконавчих механізмів (актюаторів), електронні системи керування (мікропроцесори, програмовані вентильні матриці, мікроконтролери) та програмне забезпечення, які мають власну специфіку проектування [iii].

Виконавчі механізми, які необхідні для регулювання руху рідини в

мікроканалах, напр., клапани та мікропомпи, можуть бути як вбудованими, так і зовнішніми по відношенню до мікропотоків пристроїв. Точне керування і контроль рідини є надзвичайно важливим, оскільки різні компоненти рідинної суміші повинні бути перенесені в певну точку мікросистеми і в певний момент часу для забезпечення необхідних перетворень чи успішного детектування.

При проведенні складних аналізів, РМСТ можуть вимагати опрацювання значних обсягів інформації. Напр., детектування білків або лікарських препаратів вимагає швидкого аналізу отриманих даних за допомогою засобів обчислювальної техніки. Тому, коли обсяг даних та сам аналіз не є складним, тоді відповідні компоненти обчислювальних процесорів можуть бути інтегровані в гібридні РМСТ. Однак, значно частіше, обчислювальна техніка використовується як зовнішні пристрої. Схема типової РМСТ представлена на Рис. 1.1.

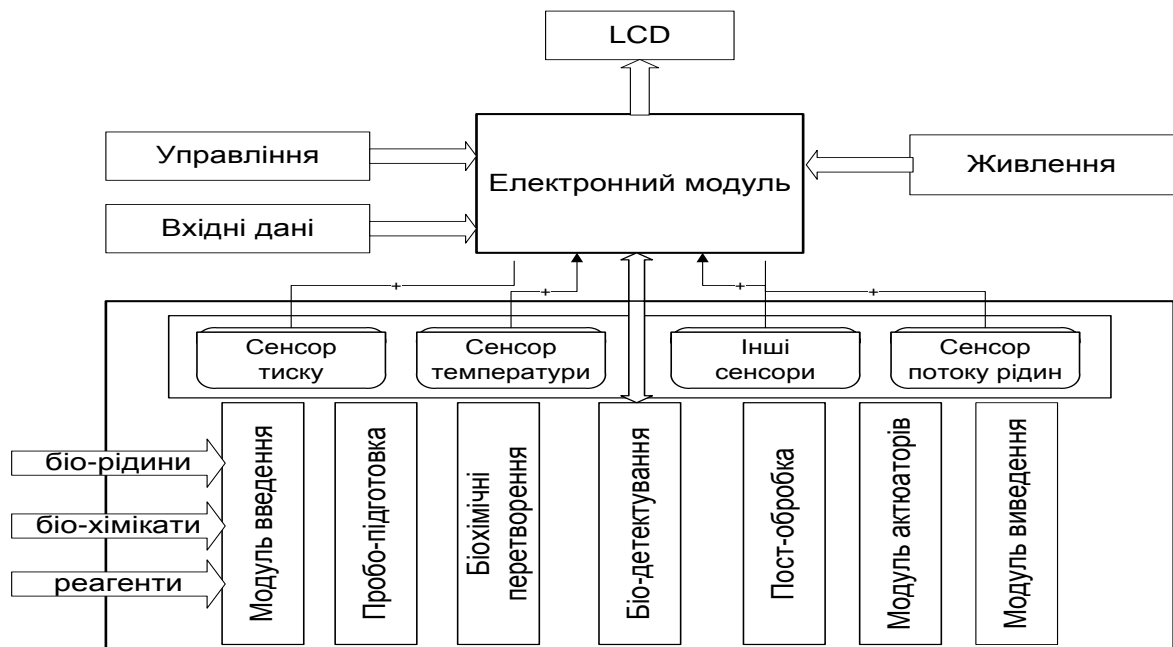


Рис. 1.1. Структурна схема автоматизованої РМСТ.

Рідинні мікросистеми використовують для проведення різноманітних хімічних, біологічних та біотехнологічних лабораторних досліджень [iv, v, vi]. Серед інших застосувань - біомедичні аналізи [vii, viii, ix]: експрес тести, імунологічні аналізи, проточна цитометрія, аналіз та пошук білків, ампліфікація полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР), аналізи ДНК, маніпуляції з живими клітинами та інші. Багато з них належать до сфери клінічної медичної та

ветеринарної діагностики [x, xi].

Загальні методи інтеграції, що використовують в РМСТ, є аналогічними до мікроелектронних систем, що представлено на Рис. 1.2 [xii, xiii].



Рис. 1.2. Аналогія мікропотоків та мікроелектронних пристроїв.

Рідинний мікропотік відіграє роль електричного струму, а мікроканали - провідникових з'єднань в ІС. Замість резисторів, конденсаторів та діодів, в РМСТ інтегровано змішувачі, екстрактори, сепаратори та інші компоненти, що виконують функції керування мікропотоків. Такі мікрокомпоненти, як і у випадку ІС, можуть поєднуватись один з одним послідовно і паралельно для створення певної функціональності. Мікропотоків діагностична камера, як правило, відіграє роль "центрального біохімічного процесора", оскільки саме тут відбувається виявлення рідинних сумішей та аналіз результатів. Для того, щоб практично реалізувати цю електро-рідинну аналогію, для РМСТ дуже важливими є наявність методів контролю багатоконпонентних і багатозфазних мікропотоків.

2.2. Розвиток та застосування рідинних мікросистем

Область РМСТ є міждисциплінарною, яка зростає завдяки поєднанню і розвитку таких галузей науки, як фізика, хімія, мікробіологія, біохімія, мікротехнологія, електроніка, інформатика, а також механіка і матеріалознавство. Дослідження в усіх цих напрямках зробили свій внесок в розвиток підходів і концепцій проектування, виготовлення і використання РМСТ. Саме взаємодія між цими дисциплінами в значній мірі призвела до створення даного напрямку дослідження. Розвиток РМСТ бере свій початок з мікроелектромеханічних систем, які самі стали продовженням розвитку напівпровідникової електроніки. Перші примітивні МЕМС пристрої на основі кремнієвої мікротехнології зароджувались і досліджувались ще в 1970-х роках. А на початку 1980-х активні дослідження велись над газовими кремнієвими хроматографами, що можна вважати зародженням РМСТ. Подальші дослідження були направлені на вдосконалення кремнієвої мікроелектронної технології з метою розроблення таких компонентів, як мініатюрні помпи, клапани, міксери і різноманітні давачі [^{xiv}].

На початку 1990-х прийшло розуміння, що рідинні МЕМС можуть бути застосовані в біологічних і хімічних дослідженнях. Виявилось, що один пристрій може виконувати багато різноманітних лабораторних операцій, включаючи підготовку тестового зразка, розділення сумішей, транспортування проб і виявлення необхідних компонентів [**Error! Bookmark not defined.**, ^{xv}, ^{xvi}]. Саме тоді такі комплексні рідинні пристрої отримали назву Лабораторія-на-чипі (LOC) та Мікросистема повного аналізу (μ TAS), і одразу викликали бурхливий інтерес серед науковців різних напрямків. Такі мініатюрні рідинні системи, розміром в декілька см^2 , можуть виконувати надзвичайно широкий спектр аналітичних досліджень при одночасному скороченні об'єму використовуваних реагентів. З того часу технологія виготовлення і методи детектування зазнали значного прогресу, однак дана концепція розвитку РМСТ є актуальною і до сьогоденного часу.

Один з найбільш широко застосовуваних компонентів РМСТ є електроосмотична помпа, в якій використовується напруга, що прикладена до

подвійного електричного шару в рідинному мікроканалі. Пристрої, що використовують електроосмотичні помпи взагалі не містять механічних рухомих частин і клапанів. Зміна потоку тут відбувається за рахунок зміни напруги на різних ділянках чіпа. Такі рідинні електрофорезні пристрої - сепаратори, які використовують прикладену напругу не тільки для ініціалізації руху рідини, але й для розділення різних біологічних об'єктів, є досить популярними і до сьогоднішнього дня. Більшість таких біохімічних досліджень в даний час спрямовані на мікромініатюризацію аналітичних процесів та створення портативного діагностичного обладнання [xvii, xviii, xix].

Рідинні мікросистеми зазнали бурхливого розвитку за останні 20 років, на що вказує кількість патентів за 1995-2015 роки [xx, xxi]. Важливою подією стало використання нових альтернативних матеріалів - простіших і дешевших за кремній. Такими матеріалами для РМСТ є різноманітні полімери та скло - поліметилметакрилат (ПММА), поліхлор-п-ксілілен (Parylene C), полідиметил-сілоксан (PDMS) та SU-8. А з недавнього часу, на основі цих матеріалів виготовляють РМСТ для секвенування генів, дослідження клітин методом проточної цитометрії, діагностики захворювань та створення новітніх паливних елементів.

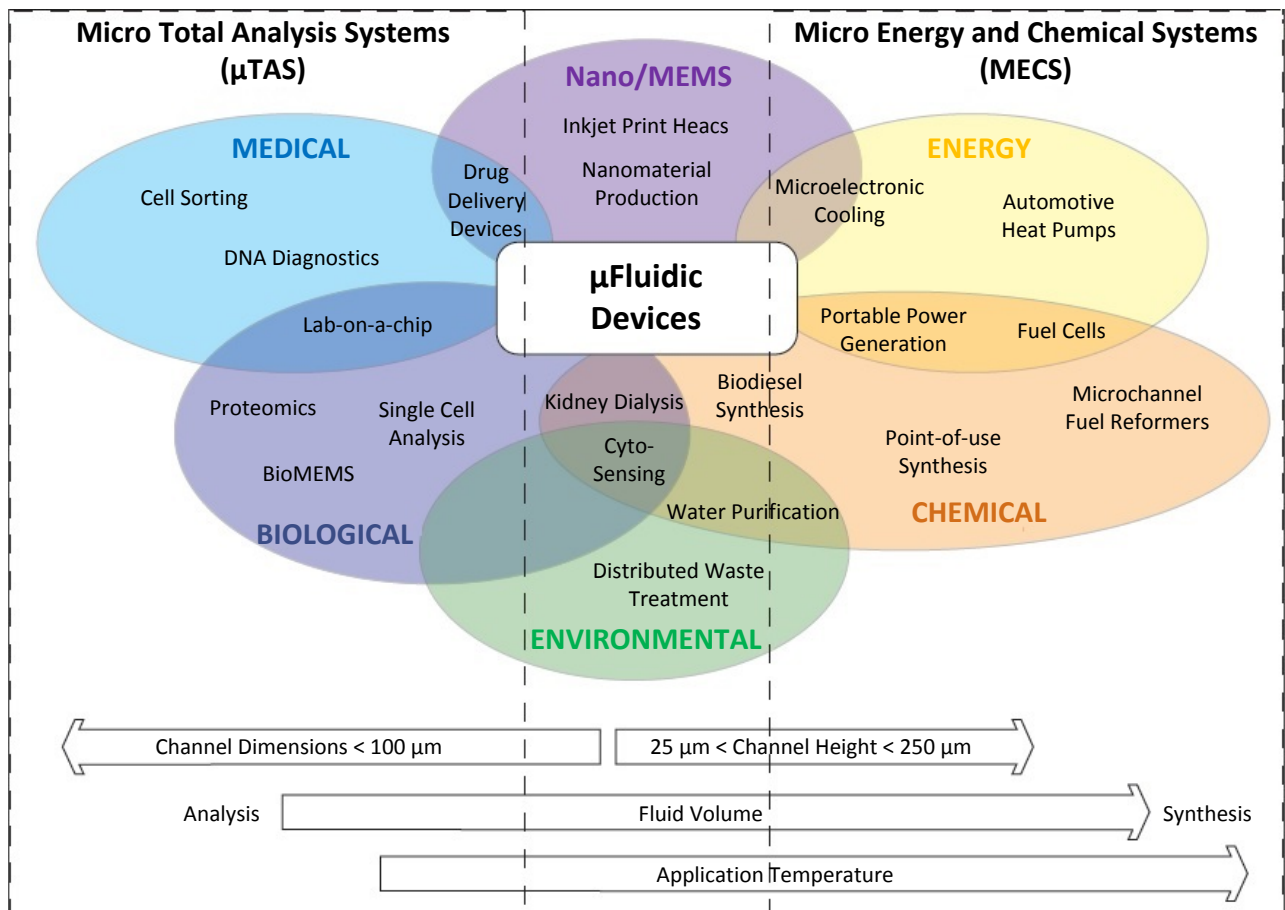


Рис. 1.3. Схематичне представлення областей застосування РМСТ [Error! Bookmark not defined.].

Згідно дослідження Yole Développement [1], ринок РМСТ є дуже широким і перспективним (Рис. 1.3), а в 2016 році обсяг продажів повинен досягнути \$ 4 млрд (Рис. 1.4). Основними тенденціями протягом наступних декількох років буде розвиток: 1) Систем загального аналізу рідин; 2) Вбудованих систем постачання ліків; 3) Систем прецизійного дозування; 4) Лабораторних чіпів для аналітичних приладів; 5) Систем швидкої клінічної діагностики; 6) Систем діагностичного експрес-тестування типу "Point-of-Care"; 7) Систем промислового та екологічного тестування; 8) Фармацевтичних дослідних систем; 9) Мікрореакторних технологій.

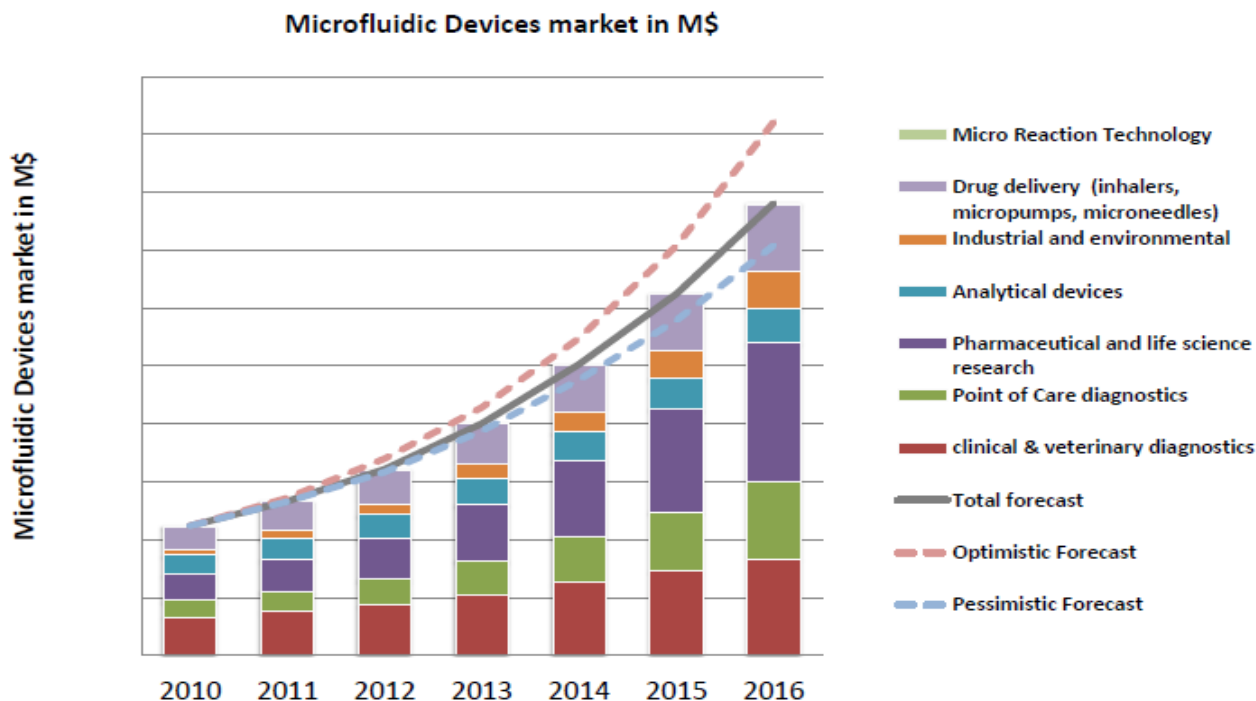


Рис. 1.4. Прогноз зростання світового ринку РМСТ [Error! Bookmark not defined.].

Сучасний стан основних технологій та відповідних застосувань РМСТ відображений на діаграмах Рис. 1.5 і Рис. 1.5.

Технології	Застосування	Медичне застосування	<i>In vitro</i> діагностика				Дослідження та виробництво	
		Доставка ліків	Аналітичні пристрої	Клінічна та ветеринарна діагностика	Охорона здоров'я	Промислове та навколишнє середовище	Фармацевтичні дослідження	Мікрореакції
Дозування	Інгалятори Мікроолки	Мікронасоси, мікроклапани				Дозування	Дозування	
Мікро-аналізатори		Аналізи	Картриджі для клінічної ветеринарної діагностики	Пристрої для охорони здоров'я, інтенсивної терапії	Ідентифікація патогенів (Агро продукти, аналіз води)	Геноміка Протеоміка Аналіз клітин		
Хімічний та біологічний синтез						Мікрореакції - Дослідні пристрої - Експериментальні пристрої		

= Мікрофлюїдні чіпи

Рис. 1.5. Сучасні технології та пристрої на основі РМСТ [Error! Bookmark not defined.].

Незважаючи на бурхливий розвиток та значний прогрес у дослідженнях рідинних мікро потоків, промислове проектування, виготовлення та широке

практичне використання РМСТ є досить повільним та стикається з багатьма складнощами і проблемами. Тому, для широкого застосування РМСТ, вони повинні бути не просто компактними аналогами існуючих технологій, а стати значно простішими, зручнішими та дешевшими у використанні. Проведений аналіз показує, що розвиток РМСТ іде в двох напрямках [^{xxii}, ^{xxiii}]:

1. *Практичне застосування.* Хоча деякі експериментальні прототипи були успішно реалізовані, в той же час досягнення тривалої стабільності в контролі мікро потоків, зокрема багатофазових, все ще є проблематичним, оскільки міжфазові інтерфейси є нестабільними і спотворюються. Це не дає змогу вийти на промислове використання розроблених прототипів. Для надійного контролю рідинних потоків потрібне подальше дослідження методів стабілізації або відновлення паралельних багатофазних мікро потоків. Крім того, для РМСТ особливо важливим є розробка рідинних інтерфейсів для точного контролю обсягів препаратів, зокрема нанолітрових об'ємів. Таку точність можна досягнути за рахунок нових інтелектуальних компонентів - клапанів і pomp для надійної прецизійної подачі рідин.
2. *Нові наукові підходи* для нанорозмірних пристроїв (10-1000 нм). Цей діапазон розмірів каналів РМСТ є важливою областю, в якій зустрічаються і зв'язуються два принципово відмінні світи - дискретний та неперервний. Загальний підхід розширення рідинних законів мікропростору на нанопростір, чи навпаки - дає адекватні результати лише у випадках простих рідин. А для опису поведінки багатокомпонентних сумішей, якими є біологічні рідини, потрібно розробити принципово нові теорії, моделі та методи.

2.3. Базова класифікація діагностичних рідинних мікросистем

Рідинні мікросистеми - це пристрої, що об'єднують дві великі групи: lab-on-a-chip (LOC, Lab-chip) - лабораторія-на-чипі або лабораторний чіп (Лаб-чип), та micro-total-analysis-system (μTAS) - мікросистема повного аналізу [^{xxiv}, ^{xxv}]. Відмінність між цими двома групами є дуже умовною, тому часто обидва терміни (LOC і μTAS) використовуються як взаємозамінні. Ще одною групою

пристроїв, яка може бути дотичною до рідинних мікросистем, є біологічні мікроелектромеханічні системи (БіоМЕМС). Ці пристрої побудовані на основі МЕМС і призначені для роботи з мікробіологічними об'єктами. Оскільки мікробіологічні об'єкти найчастіше переносять в рідинній фазі, то БіоМЕМС також можуть проводити і аналізувати рідинні суміші. Специфічною ознакою БіоМЕМС є наявність мікроелектромеханічної частини, яка, як правило, реалізується на основі н/п мікроелектронної технології. В свою чергу, типові рідинні мікросистеми (LOC і μ TAS), як правило, виготовляють на скляних чи полімерних підкладках, які не містять рухомих мікромеханічних компонентів.

У молекулярній біології, генетиці, біотехнології та інших галузях, діагностичні тести призначені виявляти і визначати кількість різних мікроорганізмів, в тому числі вірусів, бактерій, грибків, дріжджових клітин, рослинних клітин тощо [xxvi, xxvii, xxviii].

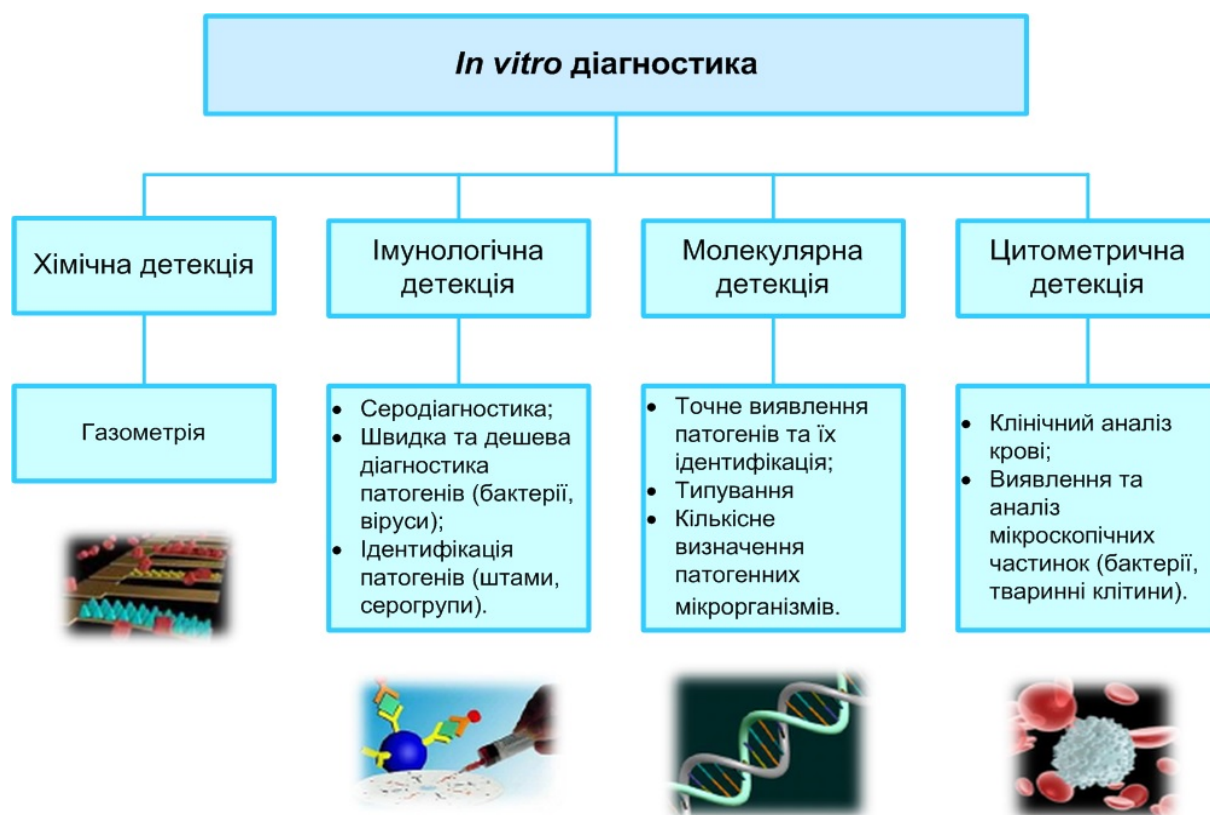


Рис. 1.6. Класифікація діагностичних РМСТ.

Такі дослідження можуть проводитись *in vivo* (в природних умовах існування), або *in vitro* (в пробірці), коли біохімічний процес проходить в штучному середовищі. Рідинні мікросистеми суттєво доповнили набір методів

та засобів для біологічних і біохімічних досліджень завдяки розвитку різноманітних LOC і μ TAS. З їх допомогою дослідник може проводити маніпуляції та вимірювання, які були б неможливі в природних умовах. PMST дають змогу контролювати і керувати не тільки мікросередовищем навколо клітини, але і самими клітинами за допомогою неінвазійних оптичних методів фокусування і утримування (оптичний пінцет).

Щодо PMST для задач *in vitro* діагностики найчастіше застосовують термін Лаб-чип. Ці пристрої (найчастіше одноразові) застосовують для хімічного аналізу і визначення наявності окремих речовин, для імунологічних біомедичних досліджень, для детектування та ідентифікації патогенів в різних середовищах та харчових продуктах, для дослідження та діагностики окремих клітин за допомогою цитометрії. Важливим елементом будь-якої діагностичної PMST є хімічні і біологічні сенсори [xxix]. Блок-схема класичного процесу діагностики за допомогою сучасних цитометрів представлена на Рис. 1.7.



Рис. 1.7. Структурна схема типового діагностичного процесу для PMST.

Процес діагностування починається з введення та попередньої підготовки мікрозразка, далі рідинну суміш подають на блок виділення (сепарації) потрібних компонентів, а потім на пристрій детектування. Після опрацювання інформації про зразок, його компоненти можна сортувати і передати на зберігання в спеціальні резервуари.

Таким чином, в діагностичному Лаб-чипі потрібно інтегрувати всі мікропотоківі компоненти РМСТ, які забезпечують проведення повного комплексу досліджень в автономному і автоматизованому режимі. Такі проточні Лаб-чипи стають основним інструментом для портативних індивідуальних діагностичних систем типу Point-of-Care. Простота цих систем дає змогу проводити самотестування навіть для пацієнтів старшого віку або з обмеженими можливостями.

2.4. Проточні мікропотоківі цитометри для діагностичних рідинних мікросистем

Одним з найбільш успішних та широко-використовуваних застосувань РМСТ є мікропотоківі цитометри [xxx]. Проточна цитометрія – це технологія вимірювання фізико-хімічних властивостей біологічних клітин в рідинному потоці, що використовується в молекулярній біології та біотехнології. Одним з важливих застосувань проточної цитометрії в області діагностики є виявлення, сортування та підрахунок клітин.

Проточні цитометри отримали свій розвиток завдяки синергетичному ефекту, отриманому від синтезу барвників та високошвидкісної обробки даних. Ці технології в комплексі вивели цитометрію в ряд потужних аналітичних інструментів для повсякденного клінічного та лабораторного використання в області генної діагностики, трансфузійної медицини, для аналізу бактерій, діагностики клітин, аналізу молекул ДНК, виявлення різноманітних мікроорганізмів та ін [xxxi]. Проточна цитометрія - це метод для перевірки і підрахунку мікроскопічних частинок, таких як клітини чи хромосоми, шляхом збирання їх в потоці рідини і пропускання через оптичний детектор. Сучасні детектори здатні вимірювати властивості окремих частинок. Для цього, випадково розподілені частинки повинні бути сфокусовані в послідовний потік частинок, які далі зможуть бути протестовані за допомогою оптичної системи.

Проточна цитометрія базується на трьох основних етапах: 1) фокусування, 2) виявлення та 3) сортування. Спочатку потік мікрочастинок

потрібно сфокусувати в центрі каналу, щоб пропустити через оптичний детектор послідовно частинка за частинкою. В залежності від властивостей і необхідності, мікрочастинки можуть бути відсортовані по різних групах. Основні етапи проточної цитометрії та методи, що в ній використовуються зображені на Рис. 1.8.

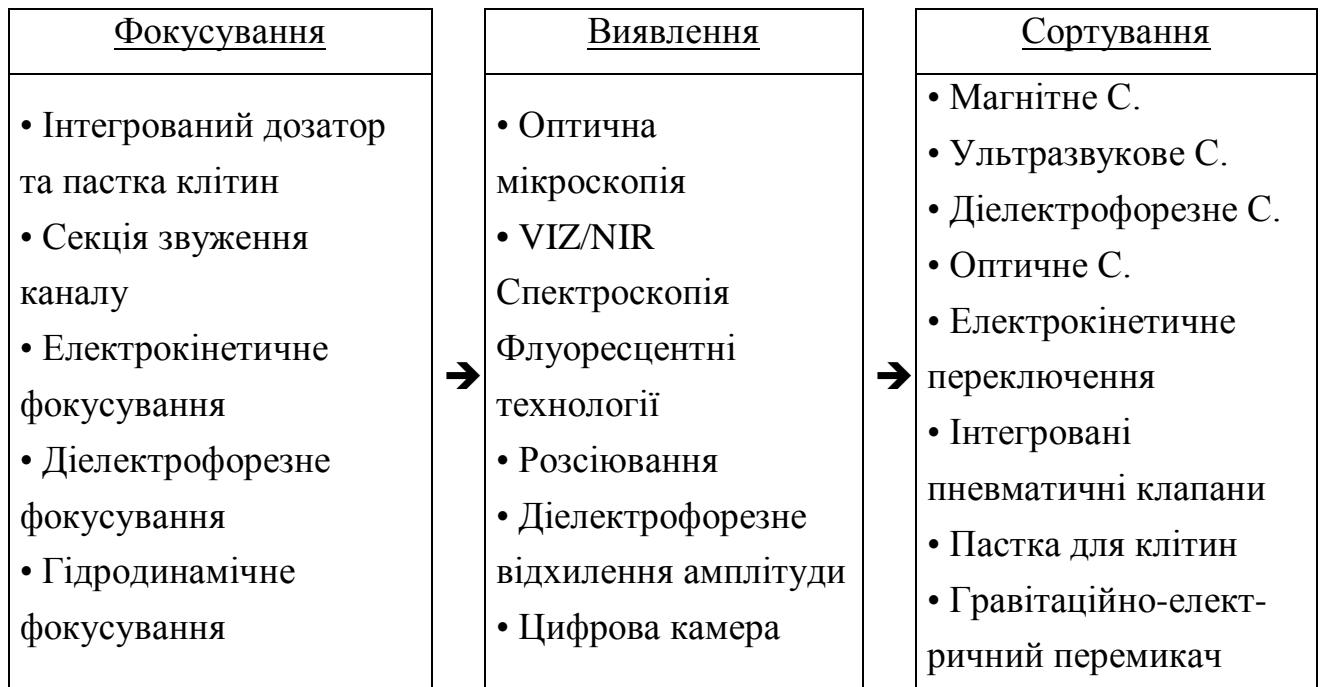


Рис. 1.8. Основні етапи та методи проточної цитометрії.

Проточний цитометр складається з чотирьох основних підсистем: рідинної, оптичної, електронної та програмної. Якщо провести подальшу декомпозицію цих підсистем, тоді отримаємо структуру, зображену на Рис. 1.9.



Рис. 1.9. Загальна структура проточного цитометра.

Рідинна підсистема проточного цитометра складається з джерела буферної рідини, джерела тестової речовини, системи переносу клітин та системи збору відходів. З Рис. 1.9 видно, що буферну та дослідну рідину зі зразками клітин вводять в пристрій з різних резервуарів таким чином, щоб забезпечити гідродинамічне фокусування і формування гладкого ламінарного потоку. В класичних цитометрах тиск створюється зовнішніми повітряними компресорами і контролюється диференціальною системою.

Оптична підсистема проточного цитометра є складнішою за рідинну систему. Оптична система починається з джерела випромінювання. Найчастіше в сучасних цитометрах використовують лазер або дугову лампу - конкретний вибір залежить від призначення системи. Якщо оптичний промінь попадає на флуоресцентні частинки, які прикріплені або включені в клітини, то вони випромінюють фотони з більш високою довжиною хвилі. З іншого боку проточного каналу розміщений оптичний об'єктив, який фільтрує і фокусує оптичні сигнали на детекторі цитометра. Заключним етапом є детектування оптичних сигналів за допомогою фотодіодних приймачів.

Електронна підсистема складається з детектора, підсилювача, регулятора чутливості, перетворювача і компенсатора. Детектор отримує оптичні сигнали і перетворює їх в електричні. Підсилювач, відповідно, лінійно або логарифмічно підсилює амплітуду сигналу до необхідного рівня. Посилений сигнал далі проходить через пороговий обмежувач, який усуває випадкові фотони. Перетворювач необхідний для перетворення сигналів у вигляд, зручний для системи обрахунку. Компенсатор може застосовуватись для керування системою сортування виявлених клітин. Електростатичний принцип сортування клітин по різних каналах представлено на Рис. 1.10. Він дає змогу розділити клітини на три групи - позитивно заряджені, негативно заряджені та нейтральні.

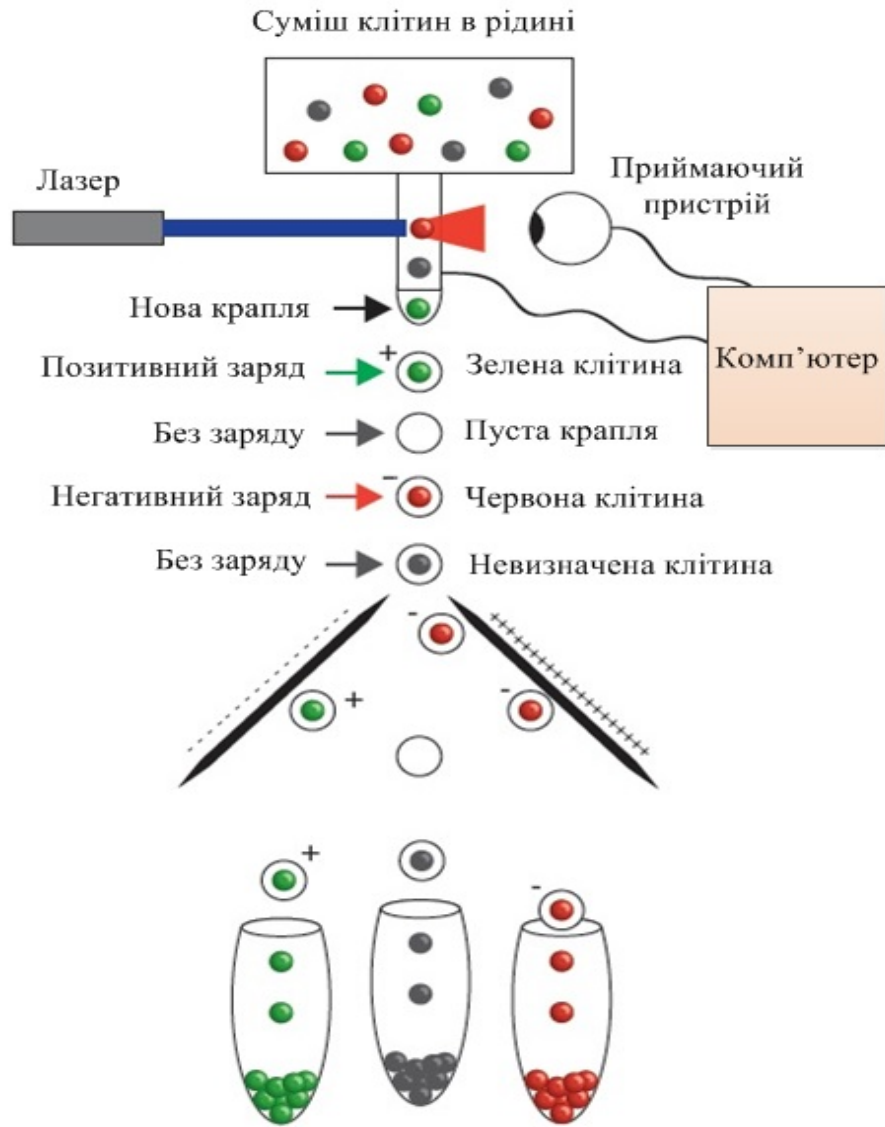
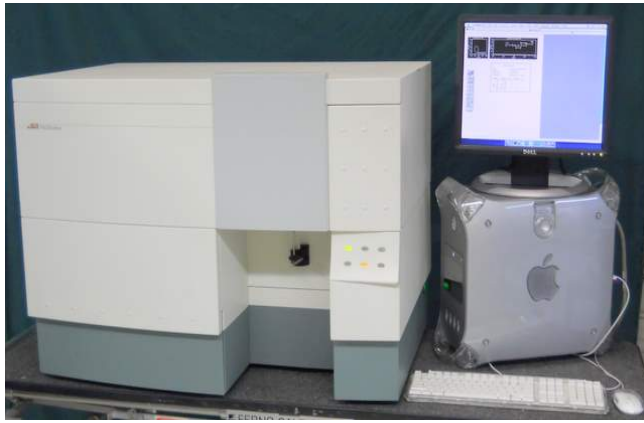


Рис. 1.10. Схема електростатичного методу сортування клітин.

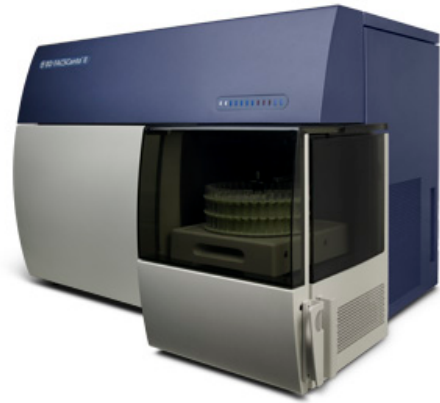
Описані принципи лягли в основу побудови багатоцільових стаціонарних проточних цитометрів. На сьогодні це повністю інтегровані багатопараметричні установки, які включають декілька типів лазерів та реалізують широкий спектр функцій. Основною перевагою стаціонарних потокових цитометрів є можливість швидкого вимірювання декількох характеристик для великої кількості клітин, що протікають зі швидкістю понад 1000 шт/с. Крім того, прилади проточної цитометрії мають можливість сортування клітин по субпопуляціях з високою ймовірністю (> 95%).

Проточна цитометрія широко використовується як в дослідженнях клітинної біології, так і в клінічних дослідженнях для безпосереднього аналізу імунних функцій. Однак, стаціонарні проточні цитометри дуже дорогі: вартість

складає від \$ 75,000 до \$ 125,000, що робить їх доступними лише для великих централізованих лабораторій, Рис. 1.11 [xxxii, xxxiii]



а) BD FACSCalibur™



б) BD FACSCanto™

Рис. 1.11. Багатоцільові стаціонарні проточні цитофлуоретри.

Крім того, обсяги проб, як правило, великі - в діапазоні 1мл, тому обсяги необхідних реагентів також великі й дорогі. У зв'язку з цим, на сьогодні ведуться інтенсивні дослідження з метою проведення цитометричних аналізів в проточних Лаб-чіпах [xxxiv, xxxv]. Схему роботи мікропотокowego цитометра зображено на Рис. 1.12. Цей пристрій використовує традиційні гідродинамічні сили для фокусування потоку і перемикання напрямку виведення тестових частинок. Крім тискових мікропотокowych цитометрів досліджують електрокінетичні, в яких керування потоком здійснюють електричним полем за допомогою інтегрованих електродів.

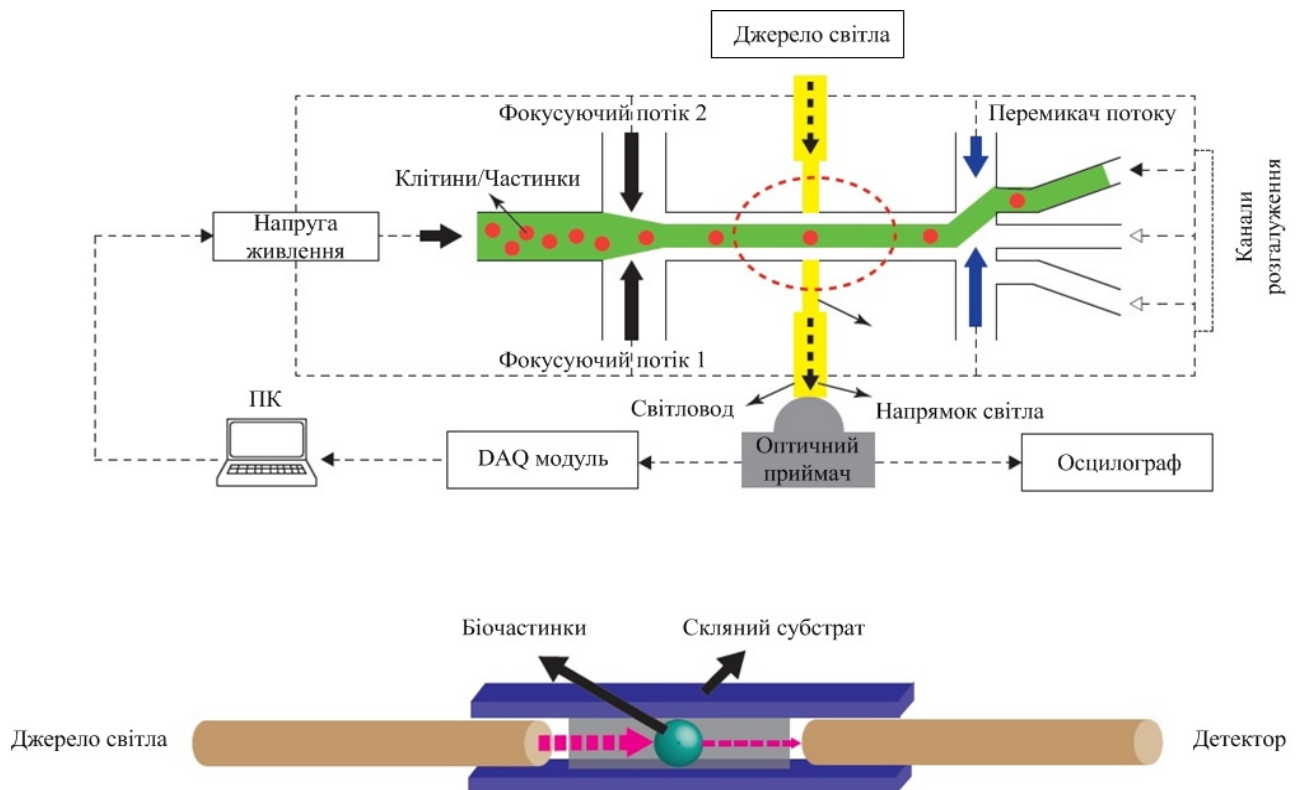


Рис. 1.12. Схема експериментального мікропотокowego цитометра:
 (а) схема Лаб-чипа; (б) зміна інтенсивності променя в хвилеводі при
 попаданні на мікрочастинку.

Багато клінічних методів вимагають проведення частих аналізів крові для моніторингу стану пацієнтів та ефективності терапії. Тут бажано використовувати тільки невеликі об'єми зразків крові для кожного тесту. Крім того, дуже важливо мати доступні і портативні прилади проточної цитометрії для їх використання в польових умовах, в безпосередніх точках надання невідкладної допомоги, а також в місцях обмежених ресурсів. Саме мікропотоківі технології дозволять задовільнити ці вимоги.

2.5. Переваги та виклики у застосуванні рідинних мікросистем

Мікромініатюризація хімічних лабораторій та біохімічних реакторів стала реальним трендом в XXI столітті. Зменшення розміру та інтеграція пристроїв біохімічної діагностики до рівня РМСТ дає значні переваги, пов'язані з загальним підвищенням продуктивності [xxxvi]. Переваги представлено в табл.

Табл. 1.1.

Переваги рідинних мікросистем.

№	Особливість	Характеристика
1.	малі розміри і вага мікропотоків чіпів	- зменшення об'єму реагентів в 10^3 разів від лінійного розміру; - збільшення кількості тестів над однаковою кількістю речовини в 10^3 разів; - зменшення викидів хімічних і небезпечних речовин в навколишнє середовище в 10^3 разів; - зростання безпеки роботи з отруйними, вибухонебезпечними та біонебезпечними матеріалами; - зручність застосування в портативному клінічному обладнанні; - можливість створення мобільних Point-of-Care діагностичних пристроїв; - хороші перспективи для того, щоб стати основою для пристроїв-імплантів, напр., пристроїв постачання препаратів або пристроїв безперервного контролю крові тощо.
2.	мікронні розміри каналів для проведення тестів	- збільшення $S_{\text{пов.}}/V_{\text{об.}}$ дозволило збільшити швидкість хім. реакцій і зменшити тривалість діагностики; - дифузія і передача теплової енергії протікають значно швидше, що дає змогу скоротити час аналізу; - шляхом мультиплікації реакційних камер можна досягнути високої продуктивності; - можливість проведення повного набору різноманітних функціональних тестів над одним зразком; - можливість збільшити щільність тестових реакційних камер на одиницю площі; - забезпечується принципова можливість надзвичайної чутливості і селективності тестів: від окремих клітин до одиничних молекул.
3.	новітні матеріали, методи та мікроелектронна технологія	- методи діагностики в РМСТ базуються на використанні оптичних та електричних принципів; - методи тестування є неінвазивними; - пристрої можуть бути одноразовими, що забезпечує стерильні умови для кожного тесту чи експерименту; - технологія виготовлення сумісна з добре розвинутою груповою мікроелектронною технологією; - розвиваються технології на основі дешевих матеріалів, напр., скла та різноманітних полімерів.

В таблиці показано, що зменшення лінійних розмірів мікроканалів РМСТ лише в 10 разів приводить до зменшення об'єму реагентів до 10^3 разів. Отже, можна провести в тисячу разів більше аналізів з однаковим об'ємом речовини, і в стільки ж разів можна зменшити викиди хімічних речовин. У зв'язку із збільшенням відношення $S_{\text{пов.}}/V_{\text{об.}}$, значно зростає швидкість біохімічних реакцій та перетворень, що дає змогу отримувати результати діагностики в лічені хвилини, а не дні, як це традиційно відбувається. Мікророзміри реакційних камер та мала тривалість дифузії забезпечують високу швидкість реакції, яка обмежується лише самою кінетикою, а не тривалістю примусового перенесення речовин, що беруть участь в перетвореннях. Крім того, високе відношення площі поверхні до об'єму дає змогу забезпечити швидке й контрольоване нагрівання та охолодження рідинної суміші в локальних точках РМСТ. Завдяки компактним розмірам, з'явилась можливість проведення серії паралельних тестів на одному чіпі для збільшення пропускної спроможності. Мікронні розміри каналів дають можливість РМСТ контролювати обсяги рідин з точністю до нанолітра, що дає змогу понизити витрати на високоякісні реагенти, а також точніше контролювати процеси з високотоксичними і вибухонебезпечними речовинами. Тому, в РМСТ біохімічні процеси з такими речовинами є значно безпечнішими і менш ризикованими. Мікромініатюризація дає змогу розробляти універсальні і високопродуктивні діагностичні пристрої. Окремі експериментальні РМСТ можуть проводити тестові дослідження і діагностувати біохімічні зразки в тисячах реакційних камер одночасно. Зменшення розмірів мікрокамер суттєво підвищує чутливість і вибірковість діагностичних пристроїв. Розміри каналів в 1 мкм^2 дають змогу контролювати проходження окремих біомолекул. Єдиною складністю є обмежений вибір методів виявлення, які базуються, в основному, на оптичних та електростатичних принципах. Кожна РМСТ потребує мінімальних витрат матеріалів на виробництво, а використання традиційних групових мікротехнологій забезпечує низьку вартість пристрою. Масове виробництво рідинних сенсорів дає змогу виробляти давачі низької вартості, що можуть застосовуватись в різноманітних додатках, таких як локальний контроль

хімічних викидів, захист від біотерористичних атак, індивідуальний контроль водойм, продуктів, тощо. В одній МСТ можуть бути інтегровані різні компоненти для проведення хімічних та біологічних тестів, що формує універсальну платформу з багатьма функціями.

Разом із перевагами, МСТ характеризуються рядом викликів, які повинні бути вирішені. Наприклад, складність перемішування рідинних сумішей: в більшості досліджень багатоконпонентна суміш повинна бути однорідною, однак розміри мікроканалів, ламінарний характер потоку, дифузійний механізм змішування, наявні концентрації рідин та інші фактори викликають складнощі в утворенні однорідної суміші.

Основними викликами розвитку МСТ є:

- 1) зовнішні системи постачання рідин повинні бути вдосконалені для поєднання їх з характеристиками МСТ для забезпечення належної герметизації та точного контролю за обсягом реагентів;
- 2) потрібний точніший контроль за поведінкою і складом рідинної суміші в мікроканалах, оскільки неочікувана поява в мікроканалах навіть невеликої кількості дрібних іншофазових компонентів може викликати руйнівні збої в роботі пристроїв;
- 3) хоча типові розміри мікропотоків чіпів є достатньо малими, однак зовнішні детектори, пристрої введення проб, тискові системи перенесення рідин та інші компоненти, що забезпечують роботу МСТ є громіздкими;
- 4) виявлено, що проста мініатюризація вже існуючих приладів не завжди покращує функціональність у порівнянні з існуючими опрацьованими технологіями, тому вони вимагають додаткових досліджень для опрацювання та оптимізації нових методів;
- 5) наскрізна інтеграція усіх мікропотоків технологій, методів та матеріалів дотепер залишається проблемою: існує багато зразків геніальних автономних пристроїв, але дуже мало з них використовуються на ринку через відсутність інтегрованих мікросистем;
- 6) потоки багатоконпонентних і багатофазних рідинних сумішей недостатньо точно описуються існуючими моделями, що робить неможливим розрахунок

та проектування надійних і повторюваних лабораторних систем.

Вирішення цих і інших подібних задач вимагає застосування сучасних засобів моделювання потоків та проектування конструкції мікроканалів, мікрокомпонентів та рідинних чіпів загалом.

2.6. Методи аналізу біохімічних сумішей в рідинних мікросистемах

Задача аналізу та діагностики рідинних компонентів в РМСТ потребує наявності виявників з достатньою чутливістю та вибірковістю. Загальні технології виявлення базуються на оптичних, електрохімічних, магнітних, електричних (провідність і / або ємність), механічних та теплових механізмах. Усі ці методи мають різну ступінь чутливості, точності, продуктивності, простоти інтеграції та вартості. Оптичні методи виявлення характеризуються високою вибірковістю та чутливістю, але їх реалізація приводить до великих розмірів. Електромагнітні методи менш селективні і менш чутливі, але вони можуть бути легко і просто реалізовані в мікроканалах РМСТ.

Оптичні методи, напр., лазерно-індукована флуоресценція широко використовується в РМСТ завдяки своїй високій чутливості, але ні лазер, ні пристрій визначення не інтегруються безпосередньо в мікроканали РМСТ. Для більшості оптичних методів визначення, "мітки", тобто молекули, які світяться або сильно поглинають світло обраної довжини хвилі, повинні біохімічним способом кріпитись до "цільового" об'єкту, що іноді досить складно реалізувати. Високочутливі оптичні системи визначення, як правило, будуються на зовнішній оптичній системі, яка займає значний фізичний простір, споживає багато енергії, і може бути найдорожчою частиною РМСТ.

Неоптичні системи визначення (електричні, електрохімічні, механічні, термічні та деякі магнітні) вимагають взаємозв'язаного вбудованого електрода, за допомогою якого вимірюють зміни в рідинному мікропоточі та передають електричні сигнали до зовнішнього електронного пристрою. Таку конструкцію, як правило, легше реалізувати, ніж інтеграцію оптичної системи.

Флуоресцентний аналіз. Цей аналіз базується на флуоресценції - короткотривалій (до мілісекунд) люмінесценції, яка виникає внаслідок опромінення речовини світлом, іонізуючим промінням, проходження крізь неї електричного струму, при хімічних реакціях, механічному впливі тощо. За допомогою флуоресцентного аналізу можна ідентифікувати наявність певних речовин (маркерів), порахувати їх кількість, концентрацію та розміщення в мікропотоці.

- **Фотолюмінісценція.** В РМСТ найчастіше використовують лазерно-індуковану флуоресценцію за допомогою VIS/NIR типів лазерів. Як правило, застосовують зовнішній лазер та приймач, а в мікропотоковий пристрій вбудовують інтерфейси, світловоди, систему фокусування та систему моніторингу. Також існують спроби безпосередньо інтегрувати н/п лазери та приймачі в тіло РМСТ, однак такі мікросистеми є ще занадто дорогими і не знайшли широкого застосування.

- **Хемілюмінісценція.** Найбільш привабливими перевагами хемілюмінесцентного методу є простий інструментарій, тобто немає необхідності в джерелі світла. Світіння об'єктів викликане хімічною реакцією і відбувається при утворенні продуктів хімічної реакції в збудженому стані, який надалі релаксує із випромінюванням квантів світла. Хемілюмінесценція пов'язана з екзотермічними хімічними процесами.

Електрохімічний аналіз. Це сукупність методів якісного і кількісного аналізу, заснованих на електрохімічних явищах, що відбуваються в рідинній суміші або на кордоні розділу фаз, і пов'язані із зміною структури, хімічного складу або концентрації аналізованої речовини. Електрохімічні методи діляться на п'ять основних груп: потенціометрію, вольтамперометрію, кулонометрію, кондуктометрію і діелектрометрію. В РМСТ ці методи визначення почали застосовувати в останні роки через простоту експлуатації, низьку вартість, змінну вибірковість, високу чутливість і мініатюрність засобів. Виготовлення, інтеграція і застосування цього типу аналізу в РМСТ є особливо перспективним в хімічних мікрореакторах.

2.7. Методи формування потоку в мікроканалах рідинних мікросистем

Перенесення та контроль біохімічних рідин та реагентів відбувається в мікроканалах, які з'єднують різні компоненти РМСТ. Ці мікроканали мають розміри від сотень нанометрів до сотень мікрометрів. Поведінка рідинних потоків в мікро- і макроканалах суттєво відрізняються. У мікроканалах в'язкість і, часто, поверхневий натяг рідини переважають над інерційними силами. Тому, рух рідини характеризується плавним ламінарним потоком. Турбулентність в РМСТ ніколи не виникає, хоча в каналах можуть бути створені конвективні потоки (без завихрень), часто досить складними способами. А швидке та ефективно змішування є одним з найбільш цікавих і широко досліджуваних проблем в мікроканалах РМСТ. У багатьох випадках, завдяки розмірам мікроканалів і складу компонентів, дифузія є основним механізмом змішування рідинних сумішей. Але часто задача змішування є доволі складною, напр.: два потоки рідини входять паралельно один до одного в мікроканал шириною 200 мкм зі швидкістю 1 мм/с і на ділянці в 3 мм вони повинні бути перемішані й утворити гомогенну суміш, перш ніж покинути цей короткий канал [xxxvii].

Завдяки властивостям матеріалів (або покриття) каналів РМСТ, поверхневі ефекти можуть впливати на поведінку рідинної суміші [xxxviii]. Такі поверхневі ефекти широко використовують в цифрових РМСТ, в яких для формування і переміщення крапель емульсії використовують капілярні сили. Поверхневі ефекти і топологія мікроканалу визначає напрям руху рідинної суміші в мікроканалах. Контроль і зміна різних параметрів мікроканалу дає змогу вносити корективи в характер потоків. Напр., шляхом зміни геометрії мікроканалу, він може виконувати роль змішувача, фільтра, форсунки, розділювача, тощо.

Існує декілька методів, за допомогою яких формують перенесення рідини в мікроканалах: завдяки різниці тисків, різниці електричних потенціалів, різниці температур, тощо. Однак, два з них є найпоширенішими:

- класичний тисковий метод, тобто перепад тиску між входом і виходом мікроканалу за рахунок прокачування рідини [xxxix],

- електрокінетичний метод, який формує потік завдяки електричному полю, прикладеному на кінцях мікроканалу і руху іонів рідини [x¹].

2.7.1. Конвективний потік

У класичному тисковому методі мікропотік рідини формують завдяки різниці тисків: рідина прокачується через пристрій за допомогою поршневих (шприцевих) pomp. Один з основних законів механіки рідини для тискових ламінарних потоків - гранична умова на стінках каналу: швидкість рідини при стінках дорівнює нулю. Ця умова призводить до параболічного профілю швидкості в каналі, Рис. 1.13 [x^{li}].

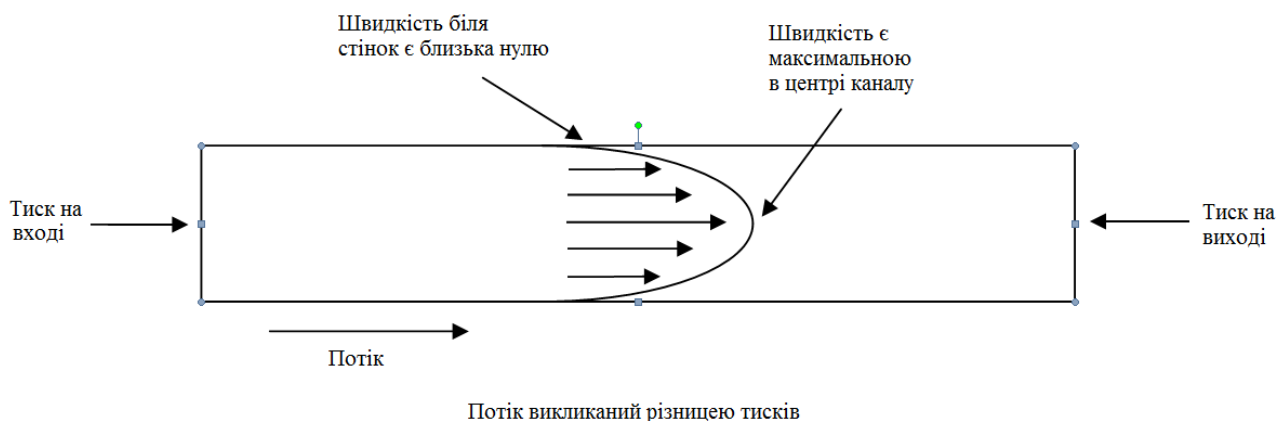


Рис. 1.13. Типовий профіль швидкості напірного потоку в мікроканалі.

Параболічний профіль швидкості впливає на розподіл молекул та різнофазних компонентів, що переміщуються в межах мікроканалу. Це може ускладнити задачу розділення компонентів потоку. Такий метод є відносно недорогим і цілком відтворюваним методом прокачування рідини в мікроканалах Лаб-чіпа. Однак, для створення потоку рідини в мікро- і особливо - наноканалах необхідно прикладати дуже великий гідродинамічний тиск, так як гідравлічний опір обернено пропорційний до 4-го ступеня поперечного розміру каналу. А це робить використання тискового методу у багатьох конструкціях Лаб-чіпів проблематичним, оскільки виготовлення потужних мікропомп та їх інтеграція в скляні та полімерні основи Лаб-чіпів є серйозною технологічною проблемою.

2.7.2. Електрокінетичний потік

В електрокінетичному методі різниця електричних потенціалів на кінцях мікроканалу формує електричне поле в іонізованих розчинах, яке ініціює потік. Електричне поле змушує іони рухатись вздовж каналу, а це створює конвективний рух молекул рідини, який передається на весь мікроканал завдяки силам в'язкості. Електрокінетичні потоки легко контролювати і вони не залежать від розмірів каналу. Під електрокінетичним методом розуміють дві різновидності потоків - електроосмотичний та електрофорезний потоки.

Електроосмотичний потік виникає в скляних та пластикових Лаб-чіпах, оскільки на поверхнях мікроканалів з цих матеріалів утворюється шар з негативним зарядом. Негативно заряджені стінки каналів притягують до себе позитивно-заряджені іони рідини, утворюючи подвійний шар в рідині. Шар позитивних іонів не сильно зв'язується зі стінками мікроканалу. Тому, покрокове прикладення електричного поля вздовж каналу викликає рух іонів та усієї рідини в напрямку електричного поля. Утворюється електроосмотична помпа, в якій, за умови відсутності зворотніх тисків, формується ідеальний потік рідини. Цей потік має рівномірний профіль швидкості і не залежить від розміру каналу за умови, що діаметр каналу \gg Дебаєвської довжини (1 ~ 10 нм для типових умов) [xliii].

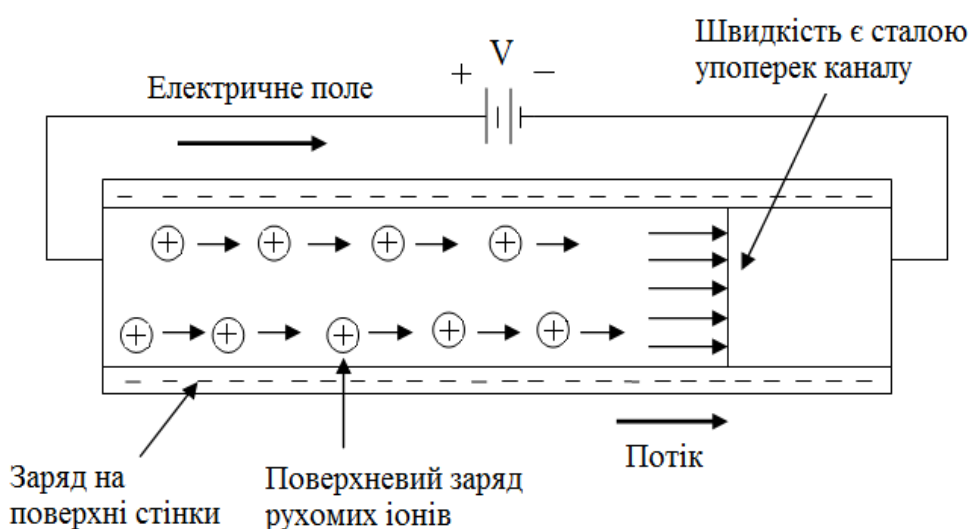


Рис. 1.14. Схема утворення електроосмотичного потоку рідини у відкритому мікроканалі.

Однак, якщо електричне поле прикладене до закритого каналу (або існує зворотній тиск, що компенсує роботу помпи), тоді в мікроканалі утворюється рециркуляційний потік, в якому рідина в центрі каналу рухається в напрямку, протилежному до того, що при стінках (Рис. 1.15). У закритих каналах, швидкість уздовж осьової лінії каналу складає до 50% від швидкості на стінках [xliii].

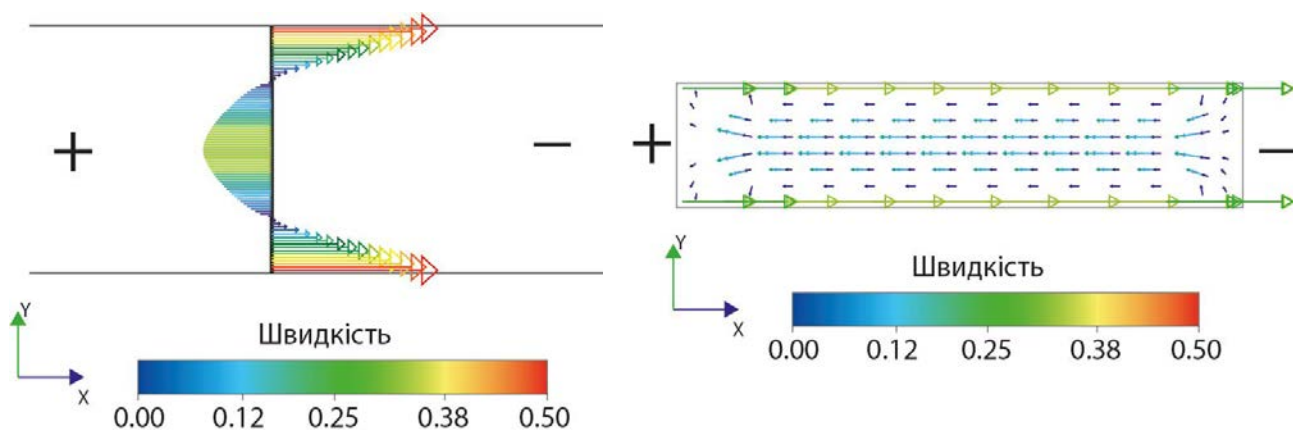


Рис. 1.15. Профіль швидкості електроосмотичного потоку рідини у закритому мікроканалі.

Електрофоретичний потік виникає в рідинному середовищі з іонізованими частинками (твердо-, геле- або газоподібними), під впливом просторово-однорідного електричного поля. Тобто, відбувається рух іонів рідини в електричному полі постійного струму під дією електрокінетичних сил.

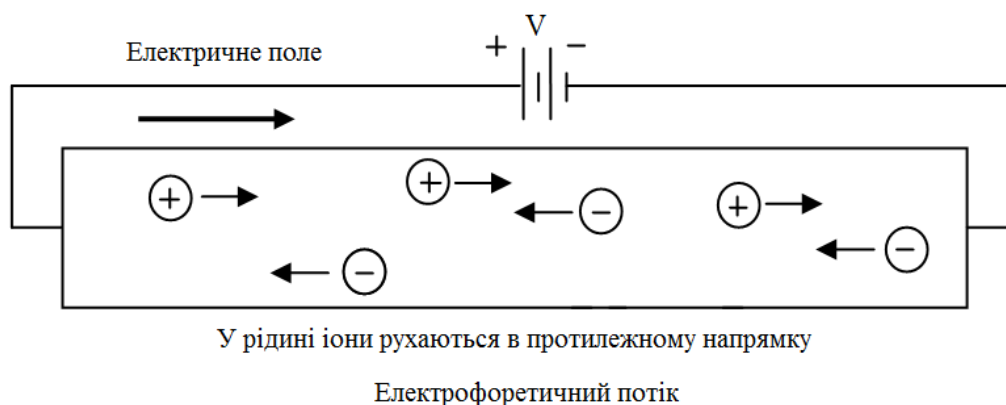


Рис. 1.16. Схема утворення електрофорезного потоку у відкритому каналі.

Рухомі частинки набувають поверхневий електричний заряд, який формується зовнішнім електричним полем під дією електростатичних сил Кулона. Відповідно до теорії подвійного шару [xliv], всі поверхневі заряди в рідині покриваються дифузним шаром іонів, який має таке ж абсолютне

значення заряду, що й поверхневий заряд, але протилежного знаку. Електричне поле створює також силу, що діє на іони в дифузному шарі, з напрямом, протилежним до сили, що діє на поверхневий заряд. Ця остання сила фактично не прикладається до частинок рідини, а лише до іонів в дифузному шарі, розташованому на певній відстані від поверхні частинки. Саме вона викликає електрофоретичний потік.

Основною перевагою цих електрокінетичних методів є забезпечення рівномірного профілю швидкості потоку, що дає змогу уникнути багатьох дифузних неоднорідностей, які з'являються в конвективних потоках. Іншою перевагою є їхня сумісність з електричними компонентами РМСТ, тобто потоком рідини можна керувати безпосередньо шляхом зміни величини електричного поля.

Недоліком електрокінетичних методів є те, що інколи для генерування потрібної швидкості потоку потрібно застосовувати дуже високу напругу. Іншим істотним недоліком електрокінетичних потоків є зміни властивостей поверхні мікроканалів. Напр., білки можуть адсорбуватись стінками мікроканалів, при тому істотно змінюються характеристики поверхневого заряду і швидкість переміщення рідини.

Загалом, електрокінетичні механізми відіграють значну роль в мікро- і нанорідинних системах. Вони широко використовуються в Лаб-чіпах для керування потоком, мікрозмішування, створення градієнтів концентрацій, розділення, сортування тощо. Тому, для застосування електрокінетичних механізмів потоку необхідно провести відповідне моделювання руху рідинної суміші, особливо в багатофазних багатокомпонентних рідинах.

2.7.3. Молекулярний дифузійний потік

За відсутності в мікроканалі конвективних або електрокінетичних сил, основним механізмом переносу компонентів рідини стають процеси молекулярної дифузії. У мікроканалах (і, особливо, в наноканалах) дифузійні відстані є малими, тому можна очікувати, що хімічні процеси будуть

відбуватись дуже швидко. Тривалість дифузійного перенесення речовин можна оцінити з рівняння Ейнштейна-Смолуховського для колоїдних розчинів [xlv]:

$$t = \frac{\bar{l}_D^2}{2D}, \quad (1.1)$$

де l_D - квадрат середнього значення дифузійного переміщення частинки вздовж будь-якої осі за час t , D - коефіцієнт дифузії частинки у розчині.

В мікроканалі шириною 100 мкм тривалість дифузії складає всього 0,1 с для компоненти, що має коефіцієнт дифузії 10^{-9} м²/с. Таким чином, малі молекули компонентів, що мають високий коефіцієнт дифузії, напр., хелати металів, під дією молекулярної дифузії переносяться досить швидко в мікроканалах. Однак, для компонентів, з коефіцієнтом дифузії 10^{-6} м²/с - тривалість дифузії рівна 100 с. Тому, рідинні компоненти з низьким коефіцієнтом дифузії, напр., великі молекули ДНК і білки не можуть достатньо швидко переноситись навіть в рідинних мікроканалах.

2.8. Основні характеристичні числа для мікропотоків

Домінуючими мікропотоківими ефектами, які потрібно розглядати в задачах проектування РМСТ є: напруження зсуву, опір потоку рідини, багатоконпонентна дифузія, довжина розвитку потоку, швидкість потоку тощо [xlv]. Традиційно, в гідродинаміці застосовують критерії подібності у вигляді безрозмірних характеристичних чисел, які розраховуються з параметрів і характеристик рідини чи багатофазної суміші.

Для мікропотоківих систем важливими є такі критерії, як [xlvii, xlviii]: число Рейнольдса (Re), число Кнудсена (Kn), число Пекле (Pe), капілярне число (Ca), число Бонда (Bo). А основними критеріями подібності в процесах теплопередачі між рідиною (газом) і обтічним тілом є число Прандтля (Pr), число Нуссельта (Nu), а також число Стентона (St). Інші характеристичні числа, напр. Грасгофа (Gr) та Релея (Ra) практично не застосовують, оскільки вони характеризують природньо-конвективні потоки, якими нехтують в умовах мікроканалів. Найбільш вживані характеристичні числа подано в таблиці.

Характеристичні числа для мікропотоків в РМСТ.

Параметр	Характеристика	Вираз	Одиниця
Динамічна в'язкість, (абсолютна / Ньютонівська)	вимірює внутрішній молекулярний опір потоку або зміщенню шарів рідини під впливом прикладеної сили	$\tau = \mu \cdot \frac{\gamma}{h}$	[Н с/м ²], [кг/м с]
Кінематична в'язкість	відношення динамічної в'язкості до густини рідини	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$	[м ² /с]
Число Маха	відношення швидкості частинки до швидкості звуку в цьому середовищі	$M = \frac{c}{c_s}$	-
Число Рейнольдса	відношення адвекційних інерційних сил до дисипативних сил в'язкості; характеризує турбулентність потоку	$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu}$	-
Число Пекле	відношення конвективного потоку до дифузійного	$Pe = \frac{u L}{D}$	-
Капілярне число	характеризує відношення сил в'язкості до сил натягу на межі розділу фаз	$Ca = \frac{\mu u}{\gamma}$	-
Число Вебера	характеризує відношення інерційних сил до сил натягу на межі розділу фаз	$We = \frac{\rho u^2 L}{\gamma}$	-
Число Бонда	характеризує відношення сили тяжіння до сили натягу на межі розділу фаз	$Bo = \frac{\rho g L^2}{\gamma}$	-
Число Кнудсена	відношення довжини вільного пробігу молекул до характерного розміру (діаметр мікроканалу, перешкоди, рухомої частинки тощо)	$Kn = \frac{\lambda}{L}$	-

де: μ - коефіцієнт динамічної в'язкості рідини (суміші); τ - напруження зміщення; h - відстань між шарами; γ - швидкість зміщення одного шару відносно до іншого; ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості; ρ - густина рідини (суміші); c - швидкість руху частинки в рідині; c_s - швидкість звуку в рідинному середовищі; u - характерна макроскопічна швидкість потоку; L - характерний геометричний розмір каналу (напр., гідравлічний діаметр, який визначають через ширину b_k та висоту h_k каналу як $L = \frac{4(b_k \cdot h_k)}{2(b_k + h_k)}$); λ - середня довжина вільного пробігу молекул; D - коефіцієнт дифузії.

Число Рейнольдса (Re) - це співвідношення між силою інерції і силою

в'язкості. Його можна використовувати для визначення домінуючої сили в потоці (сили інерції чи сили в'язкості). В залежності від числа Рейнольдса, потік рідини можна класифікувати як турбулентний чи ламінарний. Якщо число Рейнольдса мале, тоді в'язка взаємодія між рідиною і стінкою є набагато сильнішою, а, отже, немає турбулентності або вихорів. Якщо частинки (клітини), розсіяні по рідині, на них буде діяти як сила в'язкості, так і сила інерції, що вносить зміни до визначення числа Рейнольдса:

$$Re_p = Re \frac{D_p^2}{L^2} = \frac{vD_p^2}{L\mu}, \quad (1.2)$$

де Re_p - число Рейнольдса для частинок; Re - число Рейнольдса для потоку; D_p - діаметр частинок.

В типових РМСТ, у зв'язку з малими розмірами мікроканалів ($\sim 10^{-6}$ м), та повільним переміщенням рідинної суміші потік завжди є ламінарним.

Число Пекле. За рахунок ламінарного характеру мікропотуку, змішування компонентів рідинної суміші може відбуватися лише завдяки дифузії. Число Пекле встановлює зв'язок між середньою швидкістю потоку рідини, шириною каналу та коефіцієнтом дифузії частинок:

$$Pe = \frac{v_0 L}{D_p} \cong \frac{z}{L}, \quad (1.3)$$

де v_0 - середня швидкість руху рідини; L - гідравлічний діаметр мікроканалу; D_p - коефіцієнт дифузії частинок.

Число Кнудсена - це відношення середньої довжини вільного пробігу молекул до характерного розміру течії:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{k_B T}{\sqrt{2\pi\sigma^2} pL}, \quad (1.4)$$

де λ - середня довжина вільного пробігу молекул; L -характерний розмір каналу або об'єкту (напр., довжина обтічного тіла, діаметр трубопроводу, діаметр вільного струменя), k_B - стала Больцмана, p - тиск, T - температура, σ - поперечний розмір частинки.

В динаміці розрідженого газу λ стає великою в порівнянні з розміром системи ($Kn \rightarrow 1$). В умовах рідинних мікропотоків число Кнудсена є великим

не завдяки великій довжині вільного пробігу, а завдяки малому розміру каналу. Залежно від значення числа Кнудсена, отримуємо такі режими потоку:

- неперервний потік : $Kn < 0.01$
- ковзаючий потік: $0.1 > Kn > 0.01$
- перехідний потік : $10 > Kn > 0.1$
- молекулярний потік : $Kn > 10$

При малих значеннях числа Кнудсена ($Kn \ll 1$) газ поводить себе як неперервне середовище. В інтервалі значень $0,01 < Kn < 0,1$ потік також можна моделювати за допомогою неперервних рівнянь, однак в граничні умови на твердій поверхні слід вводити поправку на так звані ефекти «ковзання» і «стрибки температури». При дуже великих значеннях числа Кнудсена ($Kn > 10$) прикордонний шар біля поверхні каналу не утворюється, тому отримуємо режим "вільно молекулярної течії". Тертя і теплообмін на поверхні твердого тіла розраховуються з умови одноразового зіткнення молекул з поверхнею. Перехідна область між режимом ковзання і вільно-молекулярним режимом залишається досі мало вивченою, оскільки доводиться враховувати як зіткнення молекул між собою, так і неодноразові їх зіткнення з твердим тілом, а це створює великі обчислювальні труднощі для існуючих моделей потоку.

Число Бонда використовують для опису багатофазних рідинних сумішей. Воно показує важливість міжфазних сил з врахуванням сили тяжіння:

$$Bo = (\Delta\rho)gL^2\sigma^{-1}, \quad (1.5)$$

де $\Delta\rho$ - різниця густин між двома незмішуваними компонентами (газ-рідина або рідина-рідина); L - характерний розмір каналу (гідрравлічний діаметр), який в даному випадку можна оцінити, як:

$$L = 4S / P', \quad (1.6)$$

де S - площа поперечного перерізу каналу; P' - периметр змочення.

Число Вебера. Для прогнозування поведінки багатофазних потоків в мікроканалах і формулювання рекомендацій щодо застосування відповідних математичних моделей, використовують капілярне число та число Вебера.

Для характеристики співвідношення в'язких і поверхневих сил:

капілярне число $Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \frac{\mu}{\mu_d},$ (1.7)

а для оцінки відношення в'язкостей компонентів багатофазної суміші:

число Вебера $We = \frac{\rho U^2 d_h}{\sigma},$ (1.8)

де μ , μ_d - в'язкість неперервної та дисперсної фаз, відповідно; σ - коефіцієнт поверхневого натягу; U - швидкість потоку рідинної суміші.

Низькі значення капілярного числа вказують на домінування міжфазних сил та формування крапельного потоку. І навпаки, високі капілярні числа вказують на значні сили в'язкості, які мають тенденцію подовжувати фазові границі, що призводить до стратифікованого (шаруватого) потоку.

Для однофазних потоків при незмінних швидкості U та характерному гідравлічному діаметрі d_h , число Рейнольдса ($Re = We/Ca$) є постійним, а потік є сталим. Однак, у випадку багатофазних потоків, зміна компонентів суміші приводить до зміни в'язкості і може призвести до зміни характеру потоку.

2.9. Основні рідинні ефекти для мікропотоків

Напруження зсуву та в'язкість. Біохімічні рідинні суміші - це скупчення різних молекул та частинок. Якщо вважати, що розмір частинок значно менший за розміри каналу, а в каналі прикладено достатній тиск, необхідний для подолання в'язкості та переміщення рідини через канал, тоді напруження зсуву τ [xlix, 1]:

$$\tau = \eta \frac{dU(y)}{dy},$$
 (1.9)

де η - динамічна в'язкість рідинної суміші, $U(y)$ - швидкість потоку на відстані y від поверхні (стінок) мікроканалу.

Ламінарний потік Стокса. Потоки в мікро- і наноканалах характеризуються малими числами Рейнольдса, тобто вони є ламінарними. У такому потоці швидкість частинок в рідині не є випадковою функцією часу. Частинки рідини рухаються вздовж гладких ліній в шарах, не змішуючись. Якщо ($Re \ll 1$), ламінарний потік можна класифікувати як потік Стокса у

зв'язку з високим впливом ефектів в'язкості.

Навіть, якщо керовані потоки будуть досягати швидкості рідини до 1 м/с, (в крайніх випадках) і швидкість зсуву досягатиме 10^6 с^{-1} , то типові значення числа Re , як і раніше, будуть значно менші від одиниці через мікронні розміри каналів. Таким чином, в мікропотокових системах неможливо увійти в неламінарний режим. Тому, гідродинаміку нестискуваних Ньютонівських рідин можна описувати формулою Стокса [li]:

$$\mu \cdot \Delta \vec{u} = -\rho \vec{F}_{ext} + \vec{\nabla} p \quad (1.10)$$

де u - локальна швидкість рідини, F_{ext} - зовнішня об'ємна сила, p - локальний тиск, μ - динамічна в'язкість рідини. Для мікросистем з таким режимом рух рідини в мікроканалі визначають два основні чинники - властивості поверхні мікроканалу і гідродинамічні взаємодії в рідині.

Молекулярна дифузія. Дифузія являє собою хаотичний рух молекул (або мікрочастинок) з області з високою концентрацією в область низької концентрації. У мікроканалах дифузія є домінуючим механізмом переносу частинок на малі відстані [liii]. Перший закон Фіка використовується для зв'язування дифузійного потоку з концентрацією:

$$J = -D \frac{dc_j}{dx} \quad (1.11)$$

де J - дифузійний потік частинок, D - коефіцієнт дифузії, c_j - концентрація j -ї компоненти, x - відстань. З формули (1.1) можна виразити дифузійну відстань для одновимірної задачі дифузії:

$$d^2 = 2Dt \quad (1.12)$$

де d – середня дифузійна відстань, на яку переноситься частинка за час t .

Отже, в мікроканалі в ламінарному режимі дві сусідні рідини можуть змішуватись тільки завдяки дифузії, яка характеризується коефіцієнтом D , що обернено пропорційний до розміру частинок дифундууючої рідини, згідно формули Стокса-Ейнштейна [li]:

$$D = \frac{k_B T}{6\pi\mu\delta}, \quad (1.13)$$

де μ - в'язкість рідини, δ - радіус частинок, k_B - стала Больцмана, T - абсолютна

температура.

Незважаючи на те, що ряд теоретичних коефіцієнтів дифузії представлені в літературі, існує багато специфічних речовин, для яких коефіцієнт слід визначати експериментально, напр. методом ядерного магнітного резонансу.

Ділянка формування потоку. При проектуванні мікропотоківих фокусуєчих компонентів РМСТ необхідно враховувати декілька факторів. Досягнення прецизійного контролю над мікропотоківом має важливе значення для проточних цитометрів. Ширина сфокусованого мікропотоківу повинна бути співмірною з розміром частинок (клітин) для їх точного оцінювання, сортування та підрахунку. Для гідродинамічного фокусування частинок, необхідно розрахувати довжину області формування потоку.

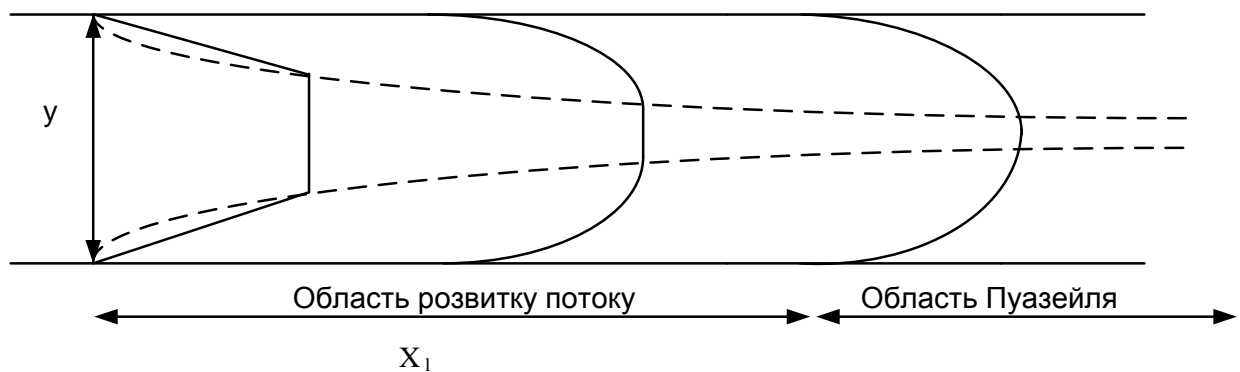


Рис. 1.17. Початкова область розвитку потоку.

Коли рідина входить в канал, її можна розбити на дві області: область розвитку потоку і область повністю сформованого потоку [lⁱⁱⁱ, l^{iv}]. Якщо діаметр (ширину) каналу позначити як y , а довжину області формування потоку як x_l , тоді для оцінки довжини області формування потоку можна використати таку емпіричну залежність [l^v]:

$$\frac{x_l}{y} = 0.04 \cdot Re. \quad (1.14)$$

Застосовуючи цю формулу до потоку рідини з числом Рейнольдса $Re = 1$ для каналу з поперечним розміром від 1 до 100 мкм, отримаємо довжину області формування потоку рівну 4..5 мкм.

Опір потоку. Об'ємну витрату рідини, що проходить через мікроканал, можна розраховувати за допомогою рівняння рідинного опору [l^{vi}]:

$$Q = \frac{\Delta p}{R}, \quad (1.15)$$

де Δp - падіння тиску в каналі; R - опір каналу; Q - об'ємна витрата через канал. Для каналу з квадратним перерізом, опір можна визначити з рівняння [lvii]:

$$R = \frac{12\mu L}{wh^3} \left\{ 1 - \frac{h}{w} \left(\frac{192}{\pi^5} \sum_{n=1,2,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \left(\frac{n\pi w}{2h} \right) \right) \right\} \quad (1.16)$$

Аналогічно можна сформулювати рівняння гідродинамічного опору для каналу круглого перерізу.

Поверхневий натяг. У рідинних середовищах з мікронними розмірами каналів сила поверхневого натягу домінує над іншими силами. Поверхневий натяг можна приблизно описати рівнянням [lviii]:

$$\sigma = \frac{E}{\delta^2} \quad (1.17)$$

де σ - поверхневий натяг, E - середня загальна енергія зв'язку молекул, δ - характерний діаметр молекули. Якщо S - загальна поверхня розділу фаз, а δ^2 - відповідно площа поверхні молекули, тоді загальну енергію поверхні розділу фаз E можна записати як:

$$E = \sigma \cdot S. \quad (1.18)$$

Всі описані вище властивості роблять мікропотоківі пристрої ідеальною платформою для проточної цитометрії. Однак, для практичного використання необхідно детальне дослідження і розроблення моделі рідинних потоків в мікроканалах, моделі поведінки біоклітин, біоматеріалів тощо.

2.10. Технології та матеріали для виготовлення рідинних мікросистем

Мікропотоківі системи складаються з базових компонентів для відбору рідинних проб, контролю, моніторингу, транспортування, змішування, реакції, інкубації та аналізу. Для побудови мікропотоківих систем (або Лаб-чіпів), ці компоненти необхідно функціонально інтегрувати на мікропотоківій платформі з використанням відповідних методів і технологій виготовлення.

Класичні РМСТ складаються з 2-х базових деталей: підкладки, в якій сформовано мережу мікроканалів, та кришки для герметизації каналів, яку монтують на клейовий композит. Кришку, зазвичай, роблять прозорою - зі скла або пластику, а для підкладки використовуються найрізноманітніші матеріали.

У даний час, у вигляді підкладки для мікропотоків пристроїв використовуються 3 основні матеріали: скло, полімери, кремній. Кремній є одним з найпопулярніших матеріалів в мікроелектроніці, його обробка є добре освоєна і широко використовується протягом десятиліть. Основною перевагою кремнію є високі механічні властивості, висока хімічна стійкість, добре відлагоджена технологія, а також можливість інтеграції в мікропотоків чіп н/п схем в якості систем керування. Останнім часом найперспективнішим із доступних матеріалів для Лаб-чіпів стали полімерні матеріали. Вони відрізняються від скла високою технологічністю і низькою вартістю. Загальний огляд основних матеріалів і процесів, що застосовуються при виготовленні РМСТ, представлено на рисунку й в таблиці.

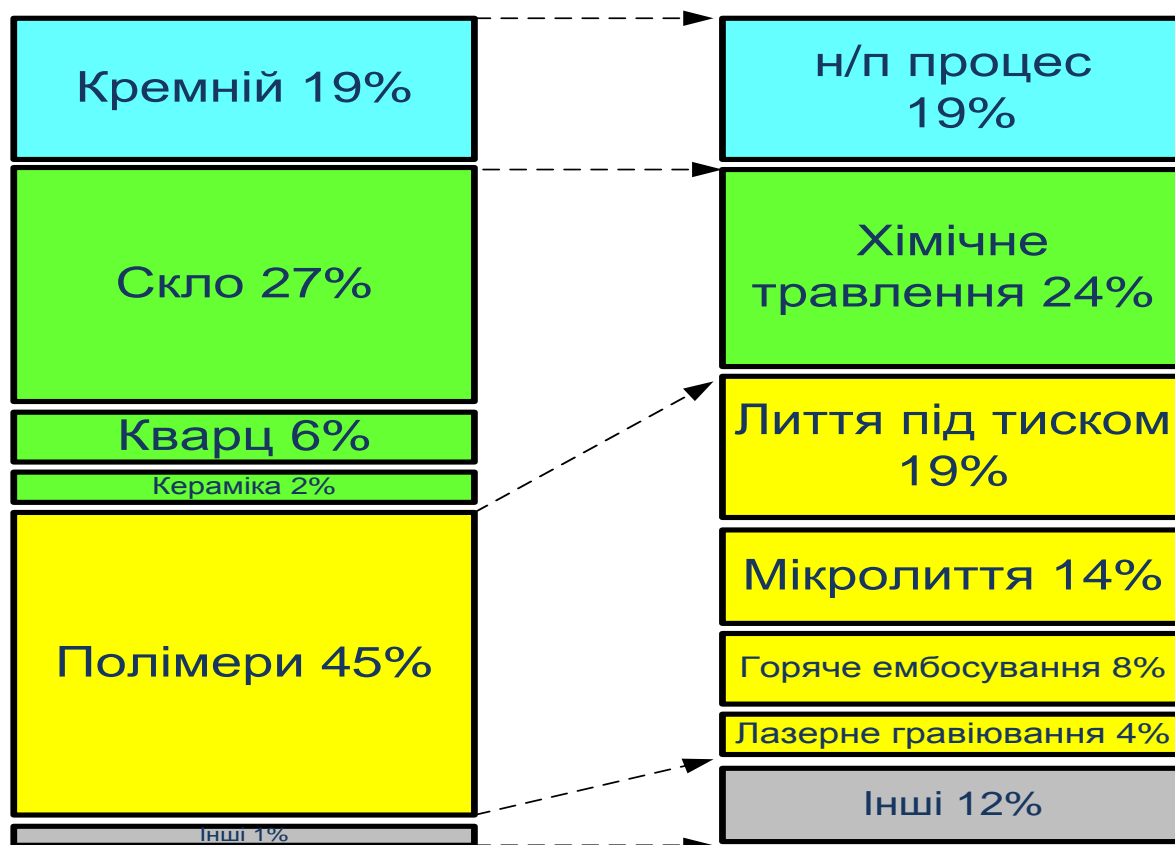


Рис. 1.18. Типові матеріали і процеси у виробництві РМСТ.

Короткий огляд матеріалів для виготовлення РМСТ та характеристики

такого вибору проаналізовано та представлено в таблиці на основі [lix, lx, lxi].

Табл. 1.3.

Матеріали для виготовлення РМСТ.

<u>Матеріал</u>	<u>Характеристика</u>
кремній	Дуже висока інтеграція з мікроелектронною технологією
кераміка	Термічна і хімічна стійкість, але характеризується високою вартістю виготовлення і проблемою усадки після спікання
скло	Простота візуалізації, загальна стійкість до хімічних речовини, але несумісність з деякими сильними основами
пластик	Низька вартість і швидке виготовлення, але несумісність з органічними розчинниками, високою температурою і тиском
силікон	Сумісність з високою температурою і тиском, хороша можливість дизайну, але несумісність з сильними основами
нержавіюча сталь	Сумісність з високою температурою і тиском, але непрозорість і чутливість до агресивних рідин
тефлон	Інертність до хімічних речовин, виняткова стійкість до всіх розчинників, але мало використовується

В даний час полімери є найпоширенішими матеріалами, що використовуються для виготовлення РМСТ завдяки їх низькій вартості, а також універсальності та економічно ефективним технологіям обробки підкладок та формування мікроканалів. Найчастіше використовують такі полімери, як РММА і PDMS [lxii]. Хоча, в біомедичних системах через жорсткі вимоги до біологічної сумісності, а також у випадку формування наноканалів, полімери не можуть повністю замінити традиційні кремній і скло. Кремній є значно дорожчим матеріалом, ніж полімери і скло, але його привабливість пов'язана з потенційною можливістю глибокої інтеграції мікропотоків компонентів РМСТ з іншими електронними компонентами, включно з давачами, детекторами, мікроактюаторами тощо.

2.11. Методи та засоби проектування рідинних мікросистем

Незважаючи на те, що технологія виготовлення РМСТ вийшла з МЕМС, які, в свою чергу, успадкували класичну технологію ІС, проектування РМСТ має власну специфіку, а саме: функції РМСТ залежать від складу і характеру мікропотоків [Lxiii]. Це призвело до того, що навіть сучасні методології проектування РМСТ базуються на великій кількості ручних операцій. Це є серйозним бар'єром на шляху нарощування складності конструкції та розширення меж застосування мікропотоків пристроїв. Так, конфігурацію лаб-чипів зазвичай розробляють в середовищі AutoCAD, з ручним контролем розміщення компонентів, ручною організацією логіки подачі та керування мікропотоків тощо. Далі графічний файл проекту передається в програму моделювання (типу LabView, Comsol, Ansys чи ін.) для аналізу та верифікації розробленої конструкції. Таким є типовий маршрут «ручного» проектування. Він незручний, погано масштабується, дуже чутливий до навіть незначних змін конструкції (напр., додавання декількох клапанів тягне за собою переробку усього проекту і проходження заново усього маршруту проектування). Таким чином, зростання складності мікропотоків пристроїв викликає невідкладну необхідність вдосконалення методології та інструментів автоматизованого проектування.

2.11.1. Сучасний стан автоматизованого проектування рідинних мікросистем

Характерна відмінність між МЕМС та РМСТ переміщення рідини, яка, з одного боку залежить від геометричних розмірів мікроканалів і прикладених параметрів, а з іншого - визначає фізичні та біохімічні процеси в РМСТ. Саме це обмежує застосування класичних електронних та електромеханічних САПР для проектування мікропотоків пристроїв [Lxiv]. В мікропотоків пристроях розташування компонентів є дуже обмеженим через високу вартість додаткових шарів керування. Зокрема, типовий мікропотоків лаб-чип, як правило, має тільки один шар для організації керування потоками. З цієї причини більшість мікропотоків пристроїв є однорівневими, а методи

розроблені для багаторівневої комутації мають бути адаптовані до задач мікропотоків. Через високу коштовність і складність інтеграції позачіпових елементів РМСТ, їх кількість намагаються звести до мінімуму.

Оскільки, дотепер складні мікропотоківі лаб-чіпи керуються, в основному, вручну, при проектуванні їх конструктивних вимог формулюють додаткові інтерфейсні та естетичні обмеження. Завдяки тому, що мікропотоківі лаб-чіпи не потребують складного технологічного обладнання і їх досить легко виготовляти, конструкція цих пристроїв дуже часто змінюється і вдосконалюється. Це різко контрастує з МЕМС та електронними ІС, які модифікуються дуже рідко. Тому, для проектування РМСТ необхідно мати абстрактні проектні елементи з гнучкими інтерфейсами, а також відповідні алгоритми, які швидко працюють в режимі реального часу.

Часто біохімічні РМСТ містять зв'язані повторювані блоки з комплексними мультифізичними процесами (напр., електростатику, мікропотік, перенесення біоречовин, передача тепла), в яких відбувається зміна фазового середовища (напр., проточне перемішування компонентів потоку, біохімічні реакції та перехідні процеси розділення компонентів). Прикладом таких мікропотоківих систем є імуноаналізатор [1xv]. Він складається з шести незалежних блоків, в яких відбуваються операції змішування, хімічної реакції, ін'єкції та поділу, а також чотирьох блоків керування, Рис. 1.19.

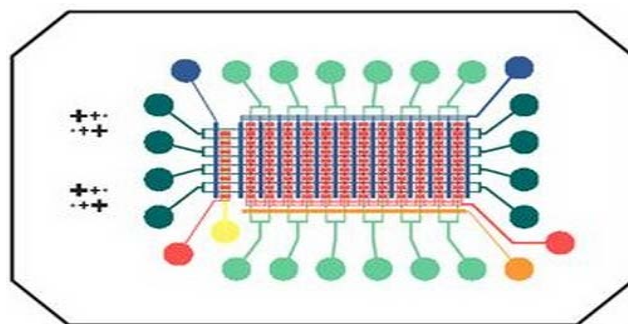


Рис. 1.19. Мультиплексування мікропотоківого імуноаналізатора.

Всі блоки цієї РМСТ працюють синхронно і паралельно. Чисельний аналіз мікропотоків для таких чіпів є дуже складним. Тому, враховуючи, що існуючі системи автоматизованого проектування РМСТ не завжди ефективні для аналізу навіть невеликих конструкцій, їх застосування для таких

інтегрованих біочіпів взагалі є неможливим.

Вцілому, методологія проектування складних об'єктів і систем є добре опрацьованою, а більшість засобів проектування використовують блочно-ієрархічний підхід до проектування [lxvi, lxvii]. Згідно цього підходу, складна РМСТ функціонально і геометрично розкладається в набір повторно уживаних елементів - як і класичні ІС чи МЕМС. Блочно-ієрархічний підхід забезпечує зменшення складності системи, оскільки дає змогу окремо аналізувати кожний з компонентів системи. Такий підхід вимагає встановлення тісних зв'язків між суміжними елементами з метою передачі параметрів на моделювання. Для РМСТ таку передачу можна забезпечити шляхом визначення контрольних електричних та рідинних параметрів для кожного компонента, через які можуть передаватись дані про стан середовища. На макрорівні для цього можна застосовувати закони Кірхгофа та теорію проходження сигналів для розрахунку гідравлічних параметрів в усій мережі каналів [lxviii].

2.11.2. Засоби автоматизованого проектування РМСТ

Внаслідок специфічних відмінностей мікропотоккових компонентів від електромеханічних, більшість існуючих САПР МЕМС не можуть безпосередньо використовуватися для проектування мікропотоккових лаб-чіпів. Виділяють три типи програмних засобів для аналізу й проектування РМСТ:

- Комерційні пакети гідродинамічного аналізу CFD, в яких модифіковано модулі для моделювання мікропотоккових ефектів і компонентів РМСТ – CFD-ACE+, Flow-3D [lxix, lxx].
- Комерційні пакети по проектуванню/моделюванню МЕМС, в які вбудовано модулі для моделювання мікропотоккових рідинних компонентів – Coventor, InteliSuite, COMSOL, Ansys-Fluent [lxxi, lxxii, lxxiii, lxxiv].
- Спеціалізовані дослідницькі пакети, як правило - корпоративні або університетські, які створено безпосередньо для проектування одного або декількох типів РМСТ.

Кожен тип має свої переваги і недоліки. Найефективнішим є застосування

спеціалізованих програмних засобів, які орієнтовані на проектування саме мікропотоків рідинних пристроїв. І хоча такі програми на сьогодні вже використовуються, однак їх базова методологія висхідного проектування не відповідає сучасним вимогам щодо постійного розширення функцій і конструкцій лаб-чипів. Засоби низхідного проектування рідинних МЕМС на системному рівні найкраще розвинені в промислових пакетах, оскільки вони базуються на проектуванні ІС, які традиційно є низхідними. Промислові САПР включають мікропотоків імітаційні моделі для низхідного проектування на системному рівні. Однак, такі системи є універсальними і не можуть поки що задовільнити всі запити проектувальників щодо якісних фізичних моделей для компонентного рівня. Комерційні інструменти не мають достатньо широкого набору моделей компонентів, бажаних до використання проектувальниками замовних мікропотоків лаб-чипів.

Отже, деякі сучасні САПР надають інтегроване середовище, до якого підключено спеціалізований модуль для моделювання мікропотоків. Область застосування включає проточні Лаб-чипи, цифрові РМСТ, рідинні біосенсиори та інші пристрої. Модуль мікропотоків включає певний набір моделей для опису одно- і багатофазних потоків, ефектів масопереносу, хімічних реакцій та потоків в пористих середовищах. Окремі САПР містять теплові та електромагнітні модулі, які теоретично можуть бути об'єднані з мікропотоківим модулем і, таким чином, виконувати комплексне проектування мультифізичних РМСТ.

2.11.3. Недоліки існуючих систем проектування

Основними перепонами для успішного автоматизованого проектування РМСТ засобами сучасних САПР є :

1. Відсутність моделей, які б враховували різноманітні мультифізичні явища в РМСТ - напр., дисперсію мікропотоків, викликану електрофорезними поворотами при використанні електрокінетичних методів прокачування, вплив молекулярно-дифузійних процесів на змішування та перенесення

компонентів потоку, вплив Джоулевого нагріву на масоперенос в електрокінетичних мікропотоках тощо. Відсутність таких моделей не дає змогу проектувальнику адекватно оцінити функціональну поведінку мікросистеми, що призводить до великої кількості похибок та тривалого циклу проектування [lxxv, lxxvi, lxxvii].

2. Існує цілий ряд специфічних обмежень, пов'язаних саме з мікропотоками: деякі мікропотокові компоненти (напр. клапани, циркуляційні міксери тощо) потребують дискретизації робочої області з високою роздільною здатністю або спеціальних адаптивних сіток для точного відображення обмежувальних контурів; мікропотокові клапани можуть зв'язуватись один з одним, утворюючи, складну систему спільного підключення і керування; мікроканали, що використовуються для підключення клапанів, часто можуть бути діагональними. Ці та інші конструктивні особливості ускладнюють задачу вибору й адаптації математичних моделей компонентів [lxxviii, lxxix, lxxx].
3. Критична невідповідність між вимогами, потребами та можливостями обчислювальних ресурсів (процесорний час, пам'ять, кваліфікація тощо), які витрачаються на моделювання окремих мікропотокових задач наявними чисельними процедурами. Традиційні чисельні методи розв'язку 3D нестационарної задачі тепломасопереносу може вимагати декількох годин процесорного часу. Така обчислювальна вартість є непомірно високою для реального проектування РМСТ і стає перешкодою для практичного застосування автоматизованих систем [lxxxii, lxxxiii].

2.11.4. Вимоги до засобів автоматизованого проектування спеціалізованих РМСТ

Проектування РМСТ, як і будь-якого складного об'єкта, носить ітераційний характер. У кожній ітерації, проектувальник хоче оцінити якість проміжного проектного рішення з точки зору якості, ефективності, надійності тощо. На основі проведеного вище аналізу, можна сформулювати вимоги до САПР РМСТ:

1. *Наявність різних моделей мікропотоків.* Моделі мікропотоків повинні описувати однофазні одно- і багатокомпонентні потоки, багатофазні багатокомпонентні потоки, а також молекулярні потоки в пористих середовищах. Для багатофазних потоків повинні бути розроблені різні моделі потоків.
2. *Наявність моделей усіх ефектів потоку рідинної суміші в мікроканалах.* Мікропотоки можуть включати декілька ефектів одночасно, напр., таких як електрофорез, магнітофорез, діелектрофорез, електроосмос, електрозмочування, молекулярну дифузію, хімічну кінетику, тощо.
3. *Можливість конструювання складних систем.* Сучасні РМСТ можуть включати широку мережу каналів з мульти-функціональністю (напр., розділення, змішування і реакція) і формувати масиви таких структур на одному лаб-чипі.
4. *Можливість обробки фізичних явищ з різних дисциплін.* Різні фізичні явища з декількох доменів можуть співіснувати і взаємодіяти навіть в одному мікроканалі. Напр., рідинний мікропотік може формуватись за допомогою електричного струму і конвективної складової, в ньому можуть рухатись біооб'єкти та проходити біохімічні реакції.
5. *Можливість обробки локальних неідеальних ефектів переносу.* Сучасні засоби моделювання мікропотоків обмежені одною вибраною моделлю. Однак, процеси в реальних мікропотоках можуть включати в себе різноманітні локальні ефекти. Тому, моделі повинні мати змогу описувати неідеальні транспортні явища, такі як групове зміщення напрямку потоку, або нерівномірність концентрації компонентів потоку.
6. *Швидка оцінка якості прийняття рішення.* Оскільки процес проектування - це ітераційний процес, бажано, щоб системи автоматизованого проектування мали моделі для швидкого оцінювання проміжних проектних рішень, що значно прискорить весь процес проектування.
7. *Достатня точність моделювання.* В інтерактивному автоматизованому проектуванні, оцінку ефективності зроблених змін в конструкції пристрою (топології, розмірах) здійснюють на основі результатів аналізу. Тому

точність і швидкість моделювання мають важливе значення.

8. *Повторне використання проектних рішень.* Проектування зазвичай охоплює розроблення мережі мікроканалів, встановлення геометрії каналів, вибір матеріалу та експлуатаційних параметрів. Таким чином, важливе значення отримують параметричні моделі компонентів рідинних мікросистем, які повинні зберігатись та повторно використовуватись в різних проектах.

Отже, на сьогодні існує досить велика кількість комерційних САПР, що містить широкий ряд моделей MEMC-компонентів та орієнтованих на поверхневу полікремнієву MEMS технологію. Також, існує багато інструментів для низькорівневого моделювання MEMC структур, що дає змогу проводити 3D/2D моделювання, віртуальне прототипування та відповідний електромеханічний аналіз окремого MEMC пристрою. Комерційні САПР більш високого рівня дають змогу отримати абстрактні моделі та здійснити проектування пристрою на системному рівні. Однак, ситуація з автоматизацією проектування РМСТ є складнішою: інструментів для проектування мікрорідинних систем значно менше, ніж для класичних MEMC.

Проектування кремнієвих РМСТ є достатньо проробленим за рахунок того, що ці пристрої базуються на вже усталеній MEMC технології. Інша ситуація складається з проектуванням скляних та полімерних пристроїв. Спеціалізовані програмні засоби для таких РМСТ ще не розроблені. Це пов'язано як з новизною і бурхливим розвитком різноманітних технологій, так і з тим, що фізико-хімічні ефекти в РМСТ є набагато різноманітніші. Така ситуація обумовила широке використання висхідної стратегії проектування, коли поведінку базових компонентів мікропотоків РМСТ моделюють за допомогою стандартних пакетів типу COMSOL, ANSYS. Тому, запровадження системного рівня проектування та використання прогресивної методології проектування для РМСТ є надзвичайно важливою та актуальною проблемою, рішення якої дозволить підвищити рівень автоматизації та якість проектування.

2.12. Висновки і постановка задачі дослідження

Проведений аналіз показав, що розвиток і застосування РМСТ буде прискорюватись, а мікропотоківі пристрої ставатимуть складнішими з більшою різноманітністю базових компонентів. Проектування РМСТ відрізняється від МЕМС та ІС наявністю рідинних потоків зі складними рідинними ефектами. Тому, автоматизоване проектування РМСТ вимагає наявності сучасної методології мультимасштабного проектування, ефективних моделей та програмних засобів аналізу поведінки рідинних сумішей в мікроканалах, які можна інтегрувати в сучасні САПР. Використання цих складових дасть змогу, аналогічно до проектування ІС та МЕМС, підвищити рівень автоматизації процесу проектування та ефективність проектування РМСТ в цілому.

Для вирішення цієї науково-прикладної проблеми, в даній дисертаційній роботі необхідно:

1. Розробити нову методологію автоматизованого мультимасштабного проектування РМСТ, яка б дозволила усунути необхідність застосування емпіричних методів, скоротити терміни проектування, зменшити вимоги до обчислювальних ресурсів САПР тощо.
2. Розробити мультимасштабну модель мікропотoku, яка б могла інтегрувати в собі всі наявні моделі потоків, та застосовувати їх для опису необхідних ефектів в локальних областях мікроканалів РМСТ.
3. Розробити методи розв'язування рівнянь мультимасштабної моделі потоку, які б забезпечили швидке отримання результату моделювання, і могли б застосовуватись в процесі інтерактивного проектування складних РМСТ.
4. Розробити інструментальне середовище проектування (framework), яке б дозволило розпаралелювати процес проектування РМСТ, об'єднувати в процесі проектування різні гетерогенні САПР та залучати до проектування спеціалістів з різних дисциплін.
5. Інтегрувати розроблену методикку мультимасштабного проектування, мультимасштабну модель потоку, методи та процедури розв'язання рівнянь моделі в інструментальне середовище проектування РМСТ.
6. Здійснити тестове проектування мікропотоківого проточного цитометра та перевірити теоретичну і практичну цінність проведених досліджень.

-
- i. Whitesides G.M. The origins and the future of microfluidics / Whitesides G. M. // *Nature*. – 2006. – No 442. - P. 368-373.
 - ii. *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics* / Ed. by Li D. – city : Springer Science, 2008. - 2226 p.
 - iii Лобур М.В. Особливості проектування вбудованих систем / Лобур М.В. / Вісник НУ "Львівська політехніка": Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. - Львів. - 2004. - №501. С. 69-75.
 - iv Weibel D. B. Applications of microfluidics in chemical biology / Weibel D. B., Whitesides G. M. // *Current Opinion in Chemical Biology*. - 2006. – No 10. - P. 584–591.
 - v Fiorini G. S. Disposable microfluidic devices: fabrication,function, and application / Fiorini G. S., Chiu D. T. // *BioTechniques*. – 2005. -. 38, No 3. – P. 429-446.
 - vi *Microfluidic Lab-on-a-Chip for Chemical and Biological Analysis and Discovery* / Ed. by Li P. C. H. – CRC Press, 2005. - 528 p.
 - vii *Microfluidic Devices for Biomedical Applications* / Ed. by Li X. J., Zhou Y. – Genus Plc, 2013. - 676 p.
 - viii Nguyen N.-T., Wereley S.T. *Fundamentals and Applications of Microfluidics*. / N.-T.Nguyen, S.T.Wereley 2-nd Ed. - Artech House, 2006. - 497 p.
 - ix *Microfluidic Devices in Nanotechnology. Applications* / Ed. by Kumar Ch. S – John Wiley & Sons, 2010. - 407 p.
 - x *Microfluidics for Medical Applications. Series: RSC Nanoscience & Nanotechnology* / Ed. by Segerink L. [et al]. – Royal Society of Chemistry, 2014. - 303 p.
 - xi Schulte T.H. Microfluidic technologies in clinical diagnostics / Schulte T. H., Bardell R. L., Weigl B. H. // *Clinica Chimica Acta*. – 2002. - 321, № 1–2. - P.1-10.
 - xii *Advances in chemical engineering. Microsystems and devices for (bio)chemical processes* / Ed. by Schouten J. C. – city: Elsevier Inc., 2010. - 243 p.
 - xiii Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Седов Л. И. - М. : Наука, 1977. - 440 с.
 - xiv *Microfluidic Devices in Nanotechnology: Fundamental Concepts* / Ed. by Ch. S. Kumar. – John Wiley & Sons, 2010. – 350 p.
 - xv *Microchip Methods in Diagnostics. Series: Methods in molecular biology* / Ed. by Bilitewski U. – Humana Press, 2009. - 183 p.
 - xvi Евстрапов А.А. Микрофлюидные чипы для биологических и медицинских исследований / Евстрапов А.А. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева)*. - т. LV, № 2. 2011. С. 99-110.
 - xvii Janasek D. Scaling and the design of miniaturized chemicalanalysis systems / Janasek D., Franzke J., Manz A. // *Nature*. – 2006. – No 442. - P. 374-380.
 - xviii Mairhofer J. Microfluidic Systems for Pathogen Sensing: A Review / Jürgen Mairhofer, Kriemhilt Roppert, Peter Ertl / *Sensors*. - № 9. - 2009. - P. 4804-4823.
 - xix Yu I.F. A portable microfluidic device for the rapid diagnosis of cancer metastatic potential which is programmable for temperature and CO2 / Yu I.F. et. al. / *Lab Chip*. - №14(18). - 2014. - P. 3621-3628.
 - xx Sharrott D. *Intellectual Property Developments in Biochip Nanotechnology* /

-
- Sharrott D., Sayeed. H. A. // *Nanotechnology Law & Business*. – 2006. - 3, No 1. - P. 21-25.
- xxi Yetisen A. K. Patent protection and licensing in microfluidics / Yetisen A. K., Volpatti L. R. // *Lab Chip*. – 2014. – No 14. - P. 2217-2225.
- xxii Chow A. W. Lab-on-a-chip: Opportunities for chemical engineering / Chow A. W. // *Aiche Journal*. – 2002. - No 48. – P. 1590-1595.
- xxiii You-qi Y. Microscale and Nanoscale Process Systems Engineering: Challenge and Progress / You-qi Y. // *The Chinese Journal of Process Engineering*. - 2008. - 8, No 3. – P. 616-624.
- xxiv Manz A. Miniaturized Total Chemical-Analysis Systems - a Novel Concept for Chemical Sensing / Manz A., Graber N. H., Widmer M. // *Sensors and Actuators B-Chemical*. – 1990. - No 1. – P. 244-248.
- xxv Reyes D. R. Micro total analysis systems. 1. Introduction, theory, and technology / Reyes D. R., Iossifidis D., Auroux P. A., Manz A. // *Analytical Chemistry*. – 2002. – No. 74. – P. 2623-2636.
- xxvi *Methods in Bioengineering. Series: Microdevices in Biology and Medicine* / Ed. by Nahmias Y., Bhatia S. N. – Artech House, 2009. – 260 p.
- xxvii *Microengineering in Biotechnology. Series: Methods in molecular biology* / Ed. by Hughes M. P., Hoettges K. F. – Humana Press, 2010. - 252 p.
- xxviii Dittrich P. S. Lab-on-a-chip: microfluidics in drug discovery / Dittrich P. S., Manz A. // *Nature Reviews Drug Discovery*. – 2006. - No 5. – P. 210-218.
- xxix Marikutsa U. Development and investigation of analysing system with chemical sensors /Uljana Marikutsa, Roman Ivantsiv, Mykhaylo Lobur, Tatyana Sviridova - Proc. of the 15th International Conference. Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES'2008), - Poznan, Poland, 2008. - P. 593-597.
- xxx Ligler F.S. *The Microflow Cytometer* / Ligler F.S., Kim J.S. – Singapore : Pan Stanford Publishing Pte., 2010. – 379 p.
- xxxі Лобур М.В. Методи спектроскопії та обробка даних спектрального аналізу/ М.В.Лобур, О.М.Матвійків, О.І.Файтас. // Вісник НУ “Львівська політехніка”: Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. - 2011. - № 711. - С. 3-9.
- xxxіі BD FACSCalibur Instructions For Use / Becton, Dickinson and Company - 2007-
https://www.bdbiosciences.com/documents/BD_FACSCalibur_instructions.pdf
- xxxііі БиоХимМак. Оборудование для проточной цитофлуориметрии /
http://www.biochemmack.ru/catalog/nauchnye_issledovaniya/15816/14347/15740/
- xxxіv Fub L.M. Electrokinetically driven micro flow cytometers with integrated fiber optics for on-line cell/particle detection / Fub L. M. et al. // *Analytica Chimica Acta*. – 2004. - 507, No 1. – P. 163–169.
- xxxv Li D. Electrokinetic Microfluidic Flow Cytometer Apparatuses with Differential Resistive Particle Counting and Optical Sorting.// U.S. non-provisional patent application claims priority to U.S. Patent Application No. 61/253,279, filed on October 20, 2009. <http://www.google.com/patents/US20110089328>
- xxxvi Chin C.D. Commercialization of microfluidic point-of-care diagnostic devices / C.D. Chin, V.Linder, S.K.Sia // *Lab on a Chip*. - 2012. - No 12. - P. 2118-2134.
- xxxvii Suh Y.K. A Review on Mixing in Microfluidics / Y.K.Suh, S.Kang // *Micromachines*. - 2010. - No 1. - P. 82-111.

- xxxviii Tabeling P. Introduction to Microfluidics / Tabeling P. – Oxford : Oxford University Press, 2005. – 345 p.
- xxxix Kim Y.T. Modulation of Fluidic Resistance and Capacitance for Long-Term, High-Speed Feedback Control of a Microfluidic Interface / Kim Y.T., Kuczenski B., LeDuc Ph.R., Messner W.C. // Lab on a Chip. - 2009. - No 9. - P. 2603-2609.
- xl He X. Microfluidic Modelling and Design for Continuous Flow in Electrokinetic Mixing-Reaction Channels / He X., Huan S. // AIChE Journal. – 2006. - 52, No 11. - P. 3842-3851.
- xli Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л.Г./ – М.: Наука. - 1987. – 840 с.
- xlii Delgado A.V. Electrokinetic phenomena and their experimental determination, an overview / A.V.Delgado, F.J.Arroyo / In Interfacial Electrokinetics and Electrophoresis. Ed. by A.V.Delgado. - New York: Marcel Dekker, 2002.
- xliii Hassan I. Microchannel heat sinks: An overview of the state-of-the-art / I. Hassan, P. Phutthavong, M. Abdelgawad // Microscale Thermophysical Engineering, Vol. . - No. 3. - 2004. - P. 183–205.
- xliv Боргман И.И. Электрический двойной слой / Боргман И.И. // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона : в 86 т. (82 т. и 4 доп.). - СПб. - С. 1890-1907.
- xlv Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии 2-е изд./ Воюцкий С.С. / М.: «Химия». - 1999. - 512 с.
- xlvi Bayraktar T. Characterization of liquid flows in microfluidic systems / Bayraktar T., Pidugu S.B. // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. - 49, No 5. – P. 815-824.
- xlvii Stone H.A. Engineering flows in small devices: microfluidics toward a Lab-on-a-Chip / H.A. Stone, A.D. Stroock, A. Ajdari // Annu. Rev. Fluid Mech. - No. 36. - 2004. P. 381–411.
- xlviii Squires T. M. Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale / Squires T. M., Quake S. R. // Reviews of Modern Physics. - 2005. - 77, No 3. – P. 977-1026.
- xlix Plawsky J.L. Transport phenomena fundamentals / J. L. Plawsky / New York, Marcel Dekker. - 2001. - 430 p.
- l Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений / Т.Г. Елизарова / - М: Научный мир - 2007. - С. 360.
- li Воробьев А.Х. Диффузионные задачи в химической кинетике / Воробьев А.Х. / Уч. пос. - М.: Изд-во Моск. ун-та - 2003. - 98с.
- lii Бриллиантов Н.В. Молекулярная динамика неупорядоченных сред / Бриллиантов Н.В., Ревокатов О.П. / – М. : Изд. Моск. Университета - 1996. - С.158.
- liii Козлов Л.Ф. Теоретические исследования пограничного слоя / Козлов Л. Ф. - К. : Наук. думка. - 1982. - 296 с.
- liv Каліон В.А. Обчислювальна гідромеханіка. Примежовий шар та нев'язкі течії / В.А. Каліон – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет". - 2013. – 210 с.
- lv Козлов Л.Ф. Экспериментальные исследования пограничного слоя / Козлов Л.Ф., Бабенко В.В. - К. : Наук. думка, 1978. - 184 с.
- lvi Bruus H. Theoretical microfluidics / Bruus H. / - Oxford: Oxford university press. - 2008. - 339 p.
- lvii Bahrami M. Pressure drop of fully-developed laminar flow in microchannels of arbitrary cross-section / Bahrami M., Yovanovich M. M. & Culham J. R. / J Fluid

-
- Eng-T Asme. – 2006. – No 128. – P. 1036-1044.
- lviii Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Нигматулин Р.И. - М. : Наука, 1987. - 464 с.
- lix Ren K. Materials for Microfluidic Chip Fabrication /Kangning Ren, Jianhua Zhou, Hongkai Wu/ Acc. Chem. Res. - No 46 (11). - 2013. - P. 2396–2406.
- lx Heeren H. Design for Microfluidic Device Manufacture Guidelines / Henne van Heeren, Peter Hewkin / MF5 Microfluidics Consortium: MF manufacturing project. Cambridge, United Kingdom - April 2014. P. 1-24. <http://www.microfluidicsinfo.com/DesignforManufacture.pdf>
- lxi Ren K. New materials for microfluidics in biology /Kangning Ren, Yin Chen and Hongkai Wu/ Current Opinion in Biotechnology. - No 25. - 2014. - P. 78–85.
- lxii Boone T. Plastic advances microfluidic devices / Boone T., Fan Z. H., Hooper H., Ricco A., Tan H. D., Williams S. // Analytical Chemistry. – 2002. - No 74. – P. 78-86.
- lxiii Fei Su. Microfluidics-Based Biochips: Technology Issues, Implementation Platforms, and Design-Automation Challenges / Fei Su, Chakrabarty K., Fair R.B. / IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. - Vol.25. - № 2. - 2006 - P. 211 - 223.
- lxiv Chakrabarty K. Design Tools for Digital Microfluidic Biochips: Toward Functional Diversification and More Than Moore / Chakrabarty K., Fair R.B., Jun Zeng/ IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems - Vol. 29. - No 7. - 2010. - P. 1001-1017.
- lxv Luo Y. Microfluidic device for immunoassays based on surface plasmon resonance imaging / Luo Y., Yu F., Zare RN. // Lab Chip. – 2008. – 8, No 5. – P. 694-700.
- lxvi Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования / Батищев Д. И. - М. : “Радио и связь”, 1984. – 248 с.
- lxvii Бельков В. Н. Автоматизированное проектирование технических систем: Уч. пос. / Бельков В.Н., Ланшаков В.Л. - М. : Изд-во "Академия Естествознания", 2009. – 143 с.
- lxviii Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования / Норенков И. П. - М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
- lxix CFD for the Microfluidics Industry. <http://www.esi-cfd.com/content/blogcategory/82/>
- lxx Flow-3D Microfluidics brochure. <http://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2015/04/Flow3d-microfluidics-brochure.pdf>
- lxxi CoventorWare ANALYZER Reference: Standard Capabilities. Version 2012. <http://www.coventor.com/mems-solutions/products/>
- lxxii IntelliSuite v8.6 Brochure (Detailed Overview) <http://www.intellisense.com/upload/201212170207142769.pdf>
- lxxiii COMSOL Microfluidics Module. Software for Multiphysics Simulations of Microfluidic Devices. <http://www.comsol.com/microfluidics-module>
- lxxiv Ansys fluent brochure. <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-fluent-brochure-14.0.pdf>
- lxxv Wang Y. System-oriented modeling and simulation of biofluidic lab-on-a-chip / Y.Wang et al. / Proceedings of the 13th Int. Conf. on Solid-State Sensors and

-
- Actuators. Jun. 5-9, 2005, Seoul, Korea. - Vol. 2. - 2005. - P. 1280-1283.
- lxxvi Chang H-C. Electrokinetically driven microfluidics and nanofluidics / Chang H-C., Yeo L. Y. – Cambridge : Cambridge University Press, 2009. – 526 p.
- lxxvii Masliyah J.H. Electrokinetic and Colloid Transport Phenomena / Jacob H. Masliyah, Subir Bhattacharjee – John Wiley & Sons, 2006. – 736 p.
- lxxviii Hsing I.-M. Finite element simulation strategies for microfluidic devices with chemical reactions / Hsing I.-M., et al. // International Conference on Solid State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '97 Chicago. – 1997. - P. 1015 - 1018.
- lxxix Rudd R.E. The Atomic Limit of Finite Element Modeling in MEMS: Coupling of Length Scales / Rudd R.E. // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2001. - 29, No 1-2. - P. 17-26.
- lxxx Choi H.-W. Adaptive Finite Element Methods for Microfluidics: Computational fluid dynamics (CFD) technologies for fluid flows and numerical modeling of electro-osmotic flows in microchannels / Choi H.-W. – LAP Lambert Academic Publishing, 2009. - 232 p.
- lxxxii Chakrabarty K. Design Automation for Microfluidics-Based Biochips / Chakrabarty K., Zeng J. // ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems. – 2005. - 1, No 3. - P. 186–223.
- lxxxii Erickson D. Towards numerical prototyping of labs-on-chip: modeling for integrated microfluidic devices / Erickson D. // Microfluid Nanofluid. – 2005. - No 1. – P. 301–318.
- lxxxiii Steinhauser M.O. Computational Multiscale Modeling of Fluids and Solids. Theory and Applications / Steinhauser M. O. – Berlin : Springer, 2008. - P. 427.

3. Розроблення методів рішення задач аналізу теплового режиму конструкції технічного об'єкта

Реалізація процедур теплового проектування, а саме, операції аналізу теплового режиму конструкції технічного об'єкту пов'язана з розробленням математичних моделей і методів опису фізичних процесів теплопередачі. Незважаючи на велику кількість праць, присвячених вирішенню задач аналізу теплового режиму конструкцій технічних об'єктів від мікро технологій [] до рівня системи [], результати досліджень, подані в параграфах 1.2., 2.1., а також в роботах [] показують необхідність розроблення методики моделювання і аналізу температурних полів в конструкціях технічних об'єктів, які володіють такими особливостями:

- 1) врахування нестационарності процесу теплопровідності в конструкції і теплообміну із зовнішнім середовищем;
- 2) врахування нерівномірності по координатах теплових потоків і температур, заданих в граничних умовах;
- 3) тривимірність, багат шаровість і обмеженість в просторі теплової моделі;
- 4) можливість врахування різноманітних граничних умов на поверхнях (гранях) моделі;
- 5) можливість спрощення математичної моделі в залежності від стадій і етапів проектування (вид задачі), зведення нестационарної задачі до стаціонарної, тривимірної до одновимірної;
- 6) можливість ускладнення моделі шляхом застосування ієрархічного підходу (наприклад поетапне моделювання).

В даній роботі рішення задач аналізу теплового режиму конструкції технічного об'єкту складається із таких етапів:

- 1) формалізація задачі моделювання температурного поля в конструкції технічного об'єкту;
- 2) рішення задачі теплопровідності комбінованим методом;
- 3) дослідження адекватності розроблених моделей і точності отриманих результатів.

3.1 Формалізація задачі моделювання температурного поля в конструкції технічного об'єкту.

Формалізація задачі моделювання температурного поля в конструкції технічного об'єкту базується на описі відповідним рівнянням процесу теплопровідності в обраній тепловій моделі та врахуванням прийнятих допущень про теплообмін із зовнішнім середовищем системою граничних і початкової умов.

На основі розглянутих математичних методів моделювання і аналізу теплових режимів технічних об'єктів, їх конструктивних і технологічних особливостей, а також сформованих вимог до методики моделювання і системи теплового проектування застосовуємо принцип, покладений в основу методу рішення задачі – це декомпозиція початкової задачі на ряд під задач, які дозволяють отримати аналітичне рішення на нижчому рівні, а потім, об'єднання цих рішень в загальне з використанням чисельного підходу.

З метою формалізації граничних умов різного виду і систематизації отриманих в подальшому рішень приймемо деякі позначення. Введемо поняття оператора $U[f] = \varphi$ при умові, що кожній його дії f з множини H_1 поставлено у відповідність функцію φ з множини H_2 . Множина всіх можливих граничних умов по координатах x, y, z подамо у виді операторів U з множиною дій H_1 . Їх можливі значення – множиною H_2 . Множина H_1 містить такі можливі дії:

$$U[1, S] = T; \quad U[2, S] = \frac{\partial T}{\partial S}; \quad (3.1)$$

$$U[3, S_x] = \lambda \frac{\partial T}{\partial S} + \alpha_s (T - T_c). \quad (3.2)$$

Тут 1, 2,3 – рід граничних умов;

S_x - значення координат $S \in \{x, y, z\}$;

T - температура;

λ - коефіцієнт теплопровідності;

α_s - коефіцієнт тепловіддачі;

T_c - температура навколишнього середовища.

Елементи φ множини H_2 можуть приймати наступні значення: нуль, значення функції $T(S_1, S_2)$ на одній з граней, значення потоку $q(S_1, S_2)$.

Математично процес нестационарної теплопровідності описуємо диференціальним рівнянням Фур'є для j -го шару:

$$c_j \rho_j \frac{\partial T^{(j)}}{\partial t} = \lambda_j \left(\frac{\partial^2 T^{(j)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T^{(j)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T^{(j)}}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

Систему граничних умов задаємо множиною операторів U з діями із підмножини $H' \in H_1$, яка відповідає конкретній задачі, яка вирішується

$$\{U[f \in H'_1]\} = H'_z, \quad H'_z \in H_2. \quad (3.4)$$

Початкова умова має вигляд:

$$T^{(j)}(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (3.5)$$

З метою отримання однозначного рішення для всього паралелепіпеда часткові рішення по шарах об'єднуються в загальне шляхом використання граничних умов четвертого роду – рівності функцій $T(x, y, z)$ і потоків $\lambda \frac{\partial T}{\partial S}$ на межі шарів.

$$T^{(j)}(x, y, z_j, t) = T^{(j+1)}(x, y, z_j, t) \quad (3.6)$$

$$\lambda_j \frac{\partial T^{(j)}}{\partial z} \Big|_{z=z_j} = \lambda_{(j+1)} \frac{\partial T^{(j+1)}}{\partial z} \Big|_{z=z_j} \quad (3.7)$$

Поданий вигляд початкової задачі дає змогу задавати довільну граничну умову на будь-якій грані, реалізувати в подальшому автоматичне формування загального рішення, як вибір з множини власних або апроксимуючих функцій підмножини, яка відповідає підмножині граничних та початкової умов у відповідності з типом конструкції, умовам встановлення, експлуатації та функціонування пристрою, формально описаних у вхідному завданні.

Розглянемо більш докладно випадки практичного використання тих чи інших граничних умов і різновидностей рівняння теплової моделі. На верхній грані теплової моделі (рис. 2.2), в більшості випадків, задається гранична умова третього роду, так як моделюються джерела тепловиділення, які зводяться до поверхневих, а також тепловіддача (конвекція або теплопровідність). При необхідності задаються граничні умови другого роду неоднорідна (тепловий потік) або однорідна (теплоізоляція). На нижній грані задається тепловіддача конвекцією, кондукцією (гранична умова 3-го роду) або функція температури $T(x, y, z)$ (гранична умова 3-го роду). Бокові грані приймаються адіабатними або ізотермічними. Часто виникає необхідність задання ізотермічності лише по одній із координатних осей x або y .

Рівняння (3.3), при необхідності, приводиться до стаціонарного трьохмірного, нестаціонарного одномірного, стаціонарному одномірного. При цьому можна отримати множину рішень різноманітних задач. Але, практичної реалізації найбільш зручно використовувати такий метод, щоб із рішення загальної задачі виділяти більш прості випадки за допомогою зміни певних управляючих параметрів.

Описані конкретні випадки задання граничних умов і різновидності початкового рівняння теплопровідності відповідає реальним задачам, які виникають в процесі теплового проектування технічного об'єкту на різних етапах, стадіях проектування і рівнях конструкторської ієрархії.

3.2 Рішення задачі теплопровідності в конструкції технічного об'єкту комбінованим методом.

Ефективність САПР, в основному, залежить від того, які моделі і алгоритми в ній закладені. Застосування технічних засобів для автоматизованого моделювання доцільне при використанні достатньо складних і точних математичних моделей. Математичне забезпечення системи теплового проектування подається рядом математичних моделей, які відображають процеси теплообміну в технічних об'єктах з необхідною ступенем деталізації і адекватності в залежності від вимог рішення задачі і наявності початкової інформації. Для моделювання стаціонарних температурних полів конструкції технічних об'єктів розроблена і впроваджена методика і програмно-методичний комплекс, оснований на аналітичному рішенні системи диференціальних рівнянь і граничних умов для багат шарового паралелепіпеда. Аналітичне рішення задачі, отримане методом Фур'є, апроксимується двократним тригонометричним рядом, який характеризується швидкою збіжністю, що забезпечує високу ефективність рішення задачі моделювання і аналізу стаціонарних температурних полів конструкцій технічних об'єктів.

Задовільні результати отримані при моделюванні стаціонарних температурних полів конструкцій технічних об'єктів на основі числового методу скінчених елементів (МСЕ).

Розробка, практична реалізація і апробація математичної моделі нестационарної теплопровідності технічного об'єкту, отриманої аналітично у виді трикратного тригонометричного ряду, підтвердила більшу складність рішення, нерівномірну збіжність отриманого ряду. Як наслідок – великі затрати часу розрахунку на ЕОМ, мала точність і достовірність отриманих результатів. Спрощення рішення за рахунок зведення багат шарової структури до одношарової з приведеними конструкціями і теплофізичними характеристиками часто не дають позитивних оцінок, оскільки є відмінність характеристик (теплофізичних, геометричних) шарів, а для конструкцій, які допускають таке спрощення моделі потрібно уважно налаштувати

розрахункову модель (вибирати кількість членів ряду, коефіцієнти апроксимації та ін.), що також приводить до незручностей у використанні. Не дав позитивних результатів і підхід до моделювання нестационарних температурних полів на основі МСЕ. В зв'язку з цим пропонується новий підхід до моделювання нестационарних температурних полів конструкцій технічних об'єктів на основі чисельно-аналітичного методу. Розробленню цього методу і присвячено цей параграф.

Рішення формалізованої вище задачі, здійснюється в наступній послідовності.

- приведення нестационарного рівняння до квазістационарного виду;
- отримання рішення у виді двократного ряду по власних функціях;
- отримання власних функцій і власних значень по координатах x , y в залежності від граничних умов;
- отримання рекурентного відношення для нестационарної задачі;
- формування системи рівнянь по шарах;
- апроксимація і розклад в ряд по отриманих власних функціях неоднорідних граничних умов по координаті z ;
- розробка процедури інтегрування по координаті z всередині шару.

Використання такої послідовності дає можливість отримати узагальнене рішення, яке дає змогу проводити аналіз як стаціонарних, так і нестационарних температурних полів в багатошаровому паралелепіпеді з різними граничними умовами.

Зведення нестационарного рівняння до квазістационарного виду. З метою зниження розмірності диференціальної задачі і отримання рішень, аналогічних як для стаціонарного, так і для нестационарного випадків, для перетворення початкового рівняння, використовуємо метод площин, а саме його поперечну схему для рівняння параболічного типу, замінивши наближено похідну по часу лівостороннім різницеvim рівнянням.

$$\frac{\partial T^{(j)}}{\partial t} = \frac{T_{i+1}^{(j)} - T_i^{(j)}}{\tau} \quad (3.8)$$

де $\tau = t_{i+1} - t_i$, $i = 0, 1, \dots, l-1$.

В результаті отримуємо рівняння:

$$\frac{c_j \rho_j}{\lambda_j \tau} T_{i+1}^{(j)}(x, y, z, \tau) = \left(\frac{\partial^2 T_{i+1}^{(j)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{i+1}^{(j)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{i+1}^{(j)}}{\partial z^2} \right) + Q^{(j)}(x, y, z, \tau) \quad (3.9)$$

де
$$Q^{(j)}(x, y, z, \tau) = T^{(j)}(x, y, z, \tau) \frac{c_j \rho_j}{\lambda_j \tau} \quad (3.10)$$

неоднорідна частина рівняння (3.9).

Таким чином початкова задача розпадається на k граничних задач для диференціального рівняння (3.9). Дійсно, так як функція $T_0(x, y, z)$ відома з початкової умови, то невідомі функції $T_k^{(j)}(x, y, z, \tau)$ $k = i+1 = 1, 2, \dots, K$ можна знаходити послідовно, вирішуючи для кожного значення $k = 1, \dots, l$ одне диференціальне рівняння виду (3.9) з тими ж граничними умовами. Для стаціонарного випадку, коли $T_{i+1}^{(j)} - T_i^{(j)} = 0$, отримуємо відоме рівняння Лапласа.

Отримання рішення у виді двократного ряду по власних функціях.
Рішення неоднорідного рівняння (3.9) згідно теореми Стеклова може бути представлено у виді двократного ряду Фур'є по власних функціях (ψ_n, ψ_m) відповідної однорідної задачі.

$$T_k^{(j)}(x, y, z, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} Z_{nmk}^{(j)}(z, \tau) \psi_n(x) \psi_m(y) \quad (3.11)$$

Вид власних функцій $\psi_n(x)$, $\psi_m(y)$ і власних значень α_1 , α_2 визначаються шляхом рішення звичайних диференціальних рівнянь, отриманих в результаті розділення змінних, з врахуванням відповідно заданих граничних умов

$$\ddot{X} + \alpha_1^2 X = 0 \quad (3.12)$$

$$\ddot{Y} + \alpha_2^2 Y = 0 \quad (3.13)$$

Власні функції і значення отримані в результаті рішення рівнянь (3.12), (3.13) мають вигляд:

Для умов ізотермічності торців моделі по координаті x -

$$\{1, x = 0; 1, x = A_x\} = \{0; 0\} \quad \varphi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{A_x}; \quad (3.14)$$

$$n = 1, 2, \dots, \infty;$$

для умов теплоізоляції торців моделі по координаті x -

$$\{2, x = 0; 2, x = A_x\} = \{0; 0\} \quad \psi_n(x) = \cos \frac{n\pi x}{A_x} \quad (3.15)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, \infty;$$

для умов ізотермічності торців моделі по координаті y -

$$\{1, y = 0; 1, y = B_y\} = \{0; 0\} \quad \psi_m(y) = \sin \frac{n\pi y}{B_y} \quad (3.16)$$

$$m = 1, 2, \dots, \infty;$$

для умов теплоізоляції торців моделі по координаті y -

$$\{2, y = 0; 2, y = B_y\} = \{0; 0\} \quad \psi_m(y) = \cos \frac{n\pi y}{B_y} \quad (3.17)$$

$$m = 0, 1, 2, \dots, \infty;$$

Отримання рекурентного співвідношення для нестационарної задачі. Для знаходження $Z_{nmk}^{(j)}(z, \tau)$ здійснюємо підстановку (3.11) в (3.9) і розклавши $Q^{(j)}(x, y, z, \tau)$ в ряд аналогічний (3.11), знаходимо його коефіцієнти. Отримуємо неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку.

$$Z_{nmk}''^{(j)} - \gamma^2 Z_{nmk}^{(j)} = a_{nmk}^{(j)}(z) \quad (3.18)$$

Рішення методом варіації змінних для кожного n, m на k -му кроці по часу.

$$Z_{nmk}^{(j)} = R_{nmk}^{(j)}(z, \tau) + H_{nmk}^{(j)} \exp(\gamma_{nm}^{(j)} z) + G_{nmk}^{(j)} \exp(-\gamma_{nm}^{(j)} z) \quad (3.19)$$

$$\text{де } R_{nmk}^{(j)}(z, \tau) = \frac{\exp(\gamma_{nm}^{(j)} z)}{2\gamma_{nm}^{(j)}} \int_0^z a_{nmk}^{(j)}(s, \tau) \exp(-\gamma_{nm}^{(j)} s) ds - \frac{\exp(-\gamma_{nm}^{(j)} z)}{2\gamma_{nm}^{(j)}} \int_0^z a_{nmk}^{(j)}(s, \tau) \exp(\gamma_{nm}^{(j)} s) ds; \quad (3.20)$$

$$\gamma_{nm}^{(j)} = \sqrt{\frac{c_j \rho_j}{\lambda_j \tau} + \frac{n^2 \pi^2}{A_x^2} + \frac{m^2 \pi^2}{B_x^2}} \quad (3.21)$$

$$a_{nmk}^{(j)}(z, \tau) = \frac{c_j \rho_j}{\lambda_j \tau} \cdot Z_{nmi}^{(j)}(s, \tau) \quad (3.22)$$

$$n, m = 0, 1, 2, \dots, \infty.$$

$Z_{nmi}^{(j)}$ рішення рівняння (3.19), отримане на попередньому часовому кроці. На першому часовому кроці ($k=1, i=0$) $Z_{nmi}^{(j)}$ визначається із початкової умови (3.5) шляхом розкладу в ряд вигляду (3.11) початкової умови.

$$Z_{nm0}^{(j)}(z, \tau) = \frac{1}{\|\psi_n\|^2 \|\psi_m\|^2} \int_0^{A_x} \int_0^{B_y} T_0(x, y, z) \psi_n(x) \psi_m(y) dx dy \quad (3.23)$$

Формування системи рівнянь по шарах. Загальне рішення задачі аналізу математичної задачі теплопровідності в багатошаровому паралелепіпеді отримуємо шляхом знаходження коефіцієнтів $H_{nmk}^{(j)}$, та $G_{nmk}^{(j)}$. Для цього формується і вирішується система алгебраїчних рівнянь, виходячи з граничних умов по координаті z . Розглянемо послідовність формування системи рівнянь. На верхній і нижній гранях конструкції задаються умови 1-го, 2-го або 3-о роду (3.6, 3.7) (однорідні або неоднорідні). На межі шарів задаємо граничну умову 4-го роду. Для отримання алгебраїчного рівняння в граничну умову підставляємо вираз (3.11) в заданій точці z . Неоднорідна частинна розкладається в аналогічний ряд по x, y . При рівності двох аналогічних рядів оператор суми і власні функції опускаються і прирівнюються лише ядра. Отримуємо рівняння, яке містить $H_{nmk}^{(j)}$, $G_{nmk}^{(j)}$ з коефіцієнтами і неоднорідну відому частину. Використовуючи $2N$ граничних умов по z (N – кількість шарів), отримуємо систему рівнянь розмірністю $2N \times 2N$ в наступному вигляді:

$$K \times G = A, \quad (3.24)$$

$$K = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ r_{nm}^{(1)} \exp[r_{nm}^{(j)} h_1] & -r_{nm}^{(1)} \exp[-r_{nm}^{(j)} h_1] & -r_{nm}^{(2)} & -r_{nm}^{(2)} & \dots & 0 \\ \exp[r_{nm}^{(j)} h_1] & \exp[r_{nm}^{(j)} h_1] & -1 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & K_{2N,2N} \end{vmatrix}$$

$$G = \begin{vmatrix} H_{nmk}^{(1)} \\ G_{nmk}^{(1)} \\ H_{nmk}^{(2)} \\ \dots \\ G_{nmk}^{(N)} \end{vmatrix} \quad A = \begin{vmatrix} A_1 \\ -\lambda C_{nmk}^{(1)}(h_1, \tau) \\ -R_{nmk}^{(1)}(h_1, \tau) \\ \dots \\ A_{2N} \end{vmatrix}$$

(Рис. 3.1) Компоненти системи рівнянь (3.24)

де K – матриця коефіцієнтів $H_{nmk}^{(j)}$ та $G_{nmk}^{(j)}$;

G – вектор-стовпець $H_{nmk}^{(j)}$ та $G_{nmk}^{(j)}$;

A – вектор-стовпець, який містить ядро рядів, які апроксимують задані функції і потоки.

Матриці K та A (рис.3.1) відображають структуру моделі, способи теплообміну між шарами і з зовнішнім середовищем по координаті z у відповідності з видом заданих граничних умов. Перший рядок K_1 матриці K і елемент A_1 показують вид теплообміну між верхньою гранню і зовнішнім середовищем. Другій і третій рядки K і елементи A – теплопередачу між першим і другим шарами, і т.д., остання – між нижньою гранню і зовнішнім середовищем – тепловідводом, або наступним конструктивним елементом по ієрархії. Заповнюючи матриці по заданим граничним умовам і вирішуючи систему рівнянь ми формуємо математичну модель по координаті z . Розглянемо декілька часткових випадків математичної моделі по координаті z , (3.25-3.27) які сформовані для граничних умов (3.6, 3.7)

Для теплообміну по закону Ньютона - Ріхмана з верхньої рані отримаємо:

$$\{3, z = 0\} = \{q(x, y, t)\}, \quad K_1 = \{\alpha_s - \lambda_1 \gamma_{nm}^{(j)}; \alpha_s + \lambda_1 \gamma_{nm}^{(j)}; 0; 0; \dots; 0; 0\}$$

$$A_1 = A_{nmk}(f) \quad (3.25)$$

Для граничної умови 1-о роду на нижній рані:

$$\{1, z = z_n\} = \{T(x, y, t)\}, \quad K_{2N} = \{0; 0; \dots; \exp(\gamma_{nm}^{(N)} h_N); \exp(-\gamma_{nm}^{(N)} h_N)\}$$

$$A_{2N} = E_{nmk}^{(j)}(t) - R_{nmk}^{(N)}(h_N, \tau) \quad (3.26)$$

Для граничної умови третього роду:

$$\{3, z = z_n\} = \{0\},$$

$$K_{2N} = \{0; 0; 0; \dots; (\beta_s + \lambda_N \gamma_{nm}^{(j)}) \exp(\gamma_{nm}^{(N)} h_N); (\beta_s - \lambda_N \gamma_{nm}^{(j)}) \exp(-\gamma_{nm}^{(N)} h_N)\}$$

$$A_{2N} = -\lambda_N C_{nmk}^{(N)}(h_N, \tau) + \beta_s R_{nmk}^{(N)}(h_N, \tau) \quad (3.27)$$

Розглянемо позначення прийняті в (3.25 – 3.27) і на рис.3.1.

α_s, β_s - коефіцієнти тепловіддачі з верхньої і нижньої раней відповідно.

$z_N = \sum_{i=1}^N h_i$ - сумарна товщина моделі по координаті z .

$$C_{nmk}^{(j)}(z, \tau) = \frac{\partial R_{nmk}^{(j)}(z, \tau)}{\partial z} = \frac{\exp(\gamma_{nm}^{(j)} z) \gamma_{nm}^{(j)}}{2\gamma_{nm}^{(j)}} \int_0^z a_{nmk}^{(j)}(s, \tau) \exp(-\gamma_{nm}^{(j)} s) ds + \frac{\exp(-\gamma_{nm}^{(j)} z) \gamma_{nm}^{(j)}}{2\gamma_{nm}^{(j)}} \int_0^z a_{nmk}^{(j)}(s, \tau) \exp(\gamma_{nm}^{(j)} s) ds; \quad (3.28)$$

$A_{nmk}^{(j)}(t), E_{nmk}^{(j)}$ коефіцієнти розкладу в ряд (3.11) функцій теплового потоку і температури, заданих в граничних умовах на верхній і нижній гранях відповідно.

$$A_{nmk}^{(j)}(t) = \frac{1}{\|\psi_n\|^2 \|\psi_m\|^2} \int_0^{A_x} \int_0^{B_y} q(x, y, t) \psi_n(x) \psi_m(y) dx dy \quad (3.29)$$

$$E_{nmk}^{(j)}(t) = \frac{1}{\|\psi_n\|^2 \|\psi_m\|^2} \int_0^{A_x} \int_0^{B_y} T_{N_k}(x, y, t) \psi_n(x) \psi_m(y) dx dy; \quad (3.30)$$

Апроксимація і розклад в ряд по отриманих власних функціях неоднорідних граничних умов по координаті z . Значення потоку тепловиділення і-о плоского джерела можна описати за допомогою одиничних функцій Хевісайда:

$$q_i(x, y, t) = \frac{P_i(t)}{a_{xi}b_{yi}} \left\{ \theta \left[x - \left(x_{ci} - \frac{a_{xi}}{2} \right) \right] - \theta \left[x - \left(x_{ci} + \frac{a_{xi}}{2} \right) \right] \right\} \times \left\{ \theta \left[y - \left(y_{ci} - \frac{b_{yi}}{2} \right) \right] - \theta \left[y - \left(y_{ci} + \frac{b_{yi}}{2} \right) \right] \right\} \quad (3.31)$$

де $P(t)$ - функція залежності потужності тепловиділення на джерелі від часу.

Тоді

$$A_{nmk}^{(j)}(t) = \sum_{i=1}^I \frac{P(t)}{A_x B_y} \varphi_n \varphi_m,$$

де i - кількість плоских елементів тепловиділення,

φ_n та φ_m визначаються власними функціями ψ_n та ψ_m

Для задач, які розглядаються (3.14 – 3.17)

$$\{1, x = 0; 1, x = A_x\} = \{0; 0\},$$

$$\varphi_n = \frac{4A_x}{n\pi a_x} \sin \frac{n\pi a x}{2A_x} \sin \frac{n\pi x_c}{A_x}; \quad (3.32)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, \infty;$$

$$\{2, x = 0; 2, x = A_x\} = \{0; 0\},$$

$$\varphi_n = \begin{cases} \frac{4A_x}{n\pi a_x} \sin \frac{n\pi a x}{2A_x} \sin \frac{n\pi x_c}{A_x}, \\ \text{при } n = 1, 2, \dots, \infty; \\ 1, \text{ при } n = 0; \end{cases} \quad (3.33)$$

$$\{1, y = 0; 1, y = B_y\} = \{0; 0\},$$

$$\varphi_m = \frac{4B_y}{m\pi b_y} \sin \frac{m\pi b y}{2B_y} \sin \frac{m\pi y_c}{B_y}; \quad (3.34)$$

$$n = 1, 2, \dots, \infty;$$

$$\{2, y = 0; 2, y = B_y\} = \{0; 0\},$$

$$\varphi_m = \begin{cases} \frac{4B_y}{n\pi b_y} \sin \frac{m\pi b_y}{2B_y} \sin \frac{m\pi y_c}{B_y}, \\ \text{при } n = 1, 2, \dots, \infty; \\ 1, \text{ при } n = 0; \end{cases} \quad (3.35)$$

$$\text{В (3.29-3.35)} \quad t = k \tau.$$

Розглянемо запропонований спосіб апроксимації функції $T(x, y, z_N, t)$ з метою її інтегрування по x, y і подальшого використання в математичній моделі. Задання нерівномірності розподілу температури по площині в граничній умові не є складним при рішенні сформульованих задач числовими методами, але є складним при рішенні аналогічних задач аналітичними методами. В останньому випадку найчастіше задається умова ізотермічності:

$$T(x, y, z_N) = const; \quad (3.36)$$

Реальні умови експлуатації технічних об'єктів і особливості їх конструктивних рішень висувають вимоги задавати температуру однієї з раней (наприклад, нижньої), як нерівномірно розподілену по координатах і змінну в часі в нестационарному випадку. Найчастіше не вдається подати залежність $T(x, y, z_N)$ в чисто аналітичному виді. Це призводить до необхідності використовувати різноманітні апроксимації та спрощення.

Функцію розподілу температури на одній з раней пропонується представити у виді двомірної скінчено-елементної апроксимації. Замінімо неперервну функцію $T(x, y, z_N) = E(x, y, t)$ її дискретною моделлю, у вигляді множини значень вказаної функції на деякій скінченій кількості точок її області визначення в сукупності з кусково-гладкою її апроксимацією на деякій скінченій кількості під областей. Область дискретизуємо на K прямокутних

скінчених елементів. Кожен з елементів будемо розглядати в нормалізованій системі координат:

$$\eta_1 = (x - x_c) / \left(\frac{a}{2}\right); \quad (3.37)$$

$$\eta_2 = (y - y_c) / \left(\frac{b}{2}\right); \quad (3.38)$$

де x_c, y_c координати центру тяжесті;

a і b - розміри прямокутника.

Використовуємо чотирьохвузлові скінчені елементи. Тоді для i -го моменту функція $E(x, y, t)$ буде мати вигляд:

$$E_i(x, y, t) = \sum_{\alpha=1}^4 N_{\alpha} E_i^{\alpha}(t) \quad (3.30)$$

де E_i^{α} - значення функції в вузлі з номером α скінченого елемента c з номером 1;

N_{α} - мають вигляд:

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 + \eta_1)(1 + \eta_2) \quad (3.40)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1 - \eta_1)(1 + \eta_2) \quad (3.41)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \quad (3.42)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1 + \eta_1)(1 - \eta_2) \quad (3.43)$$

і називаються базисними функціями чи функціями форми.

Функції форми використовуються не лише для апроксимації температури, але і для зв'язку між локальною і глобальною системами координат. Нехай,

наприклад, в просторі який має глобальну систему декартових координат Oxy нам необхідно побудувати елемент з заданими координатами вузлових точок $(x_1, y_1); (x_2, y_2); (x_3, y_3); (x_4, y_4)$. В просторі локальних координат $0, \eta_1, \eta_2$ образ цього елемента є правильним квадратом. Використовуючи функції форми N_α :

$$x = \sum_{\alpha=1}^4 N_\alpha(\eta_1, \eta_2) x_\alpha; \quad (3.44)$$

$$y = \sum_{\alpha=1}^4 N_\alpha(\eta_1, \eta_2) y_\alpha; \quad (3.45)$$

Загальний закон перетворення координат для довільної функції задається виразом:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial E}{\partial \eta_1} \\ \frac{\partial E}{\partial \eta_2} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial E}{\partial x} \\ \frac{\partial E}{\partial y} \end{Bmatrix}, \quad (3.46)$$

де $J = \begin{Bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \eta_1} & \frac{\partial Y}{\partial \eta_1} \\ \frac{\partial X}{\partial \eta_2} & \frac{\partial Y}{\partial \eta_2} \end{Bmatrix}$ - матриця Якобі.

В якості прикладу отримання коефіцієнтів (3.30) для часткових задач, розглянемо математичну модель з теплоізованими торцями. Необхідно отримати розклад Фур'є функції $E(x, y, t)$ в виді:

$$E(x, y, t) = E_{00}(t) + \sum_{n=1}^{\infty} E_{n0}(t) \cos \frac{n\pi x}{A_x} + \sum_{m=1}^{\infty} E_{0m}(t) \cos \frac{m\pi x}{B_y} + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} E_{nm}(t) \cos \frac{n\pi x}{A_x} \cos \frac{m\pi x}{B_y} \quad (3.47)$$

Коефіцієнти ряду $E_{nm}(t)$, $n, m = 0, 1, 2, \dots, \infty$ визначаються наступним чином:

$$E_{00}(t) = \frac{1}{A_x} \int_0^{A_x} \frac{1}{B_y} \int_0^{B_y} E(x, y, t) dx dy \quad (3.48)$$

$$E_{n0}(t) = \frac{2}{A_x} \int_0^{A_x} \cos \frac{n\pi x}{A_x} \frac{1}{B_y} \int_0^{B_y} E(x, y, t) dx dy \quad (3.49)$$

$$E_{0m}(t) = \frac{1}{A_x} \int_0^{A_x} \frac{2}{B_y} \int_0^{B_y} \cos \frac{m\pi y}{B_y} E(x, y, t) dx dy \quad (3.50)$$

$$E_{nm}(t) = \frac{2}{A_x} \int_0^{A_x} \cos \frac{n\pi x}{A_x} \frac{2}{B_y} \int_0^{B_y} \cos \frac{m\pi y}{B_y} E(x, y, t) dx dy \quad (3.51)$$

Функція $E(x, y, t)$ представляється в дискретному виді (3.39). Для інтегрування дискретної функції введемо наступні позначення. Нехай c – кількість дискретів по осі x ; d – кількість дискретів по осі y , тоді $k = cd$. При рівномірному розбитті

$$A_x = c \cdot a; \quad (3.52)$$

$$B_y = d \cdot b. \quad (3.53)$$

Інтегрування дискретної функції здійснюється наступним чином. Інтеграл подається у вигляді суми інтегралів по областях, які описують скінчені елементи. Потім, для кожного інтегралу здійснюється перехід з глобальної системи координат до локальної. При цьому для перетворення області інтегрування використовується визначник матриці Якобі (3.46)

$$dx dy = \det[J] d\eta_1 d\eta_2 \quad (3.54)$$

Якобіан в цьому випадку рівний

$$\det[J] = \frac{dx dy}{d\eta_1 d\eta_2} = \frac{ab}{4} = \frac{S_c}{4} \quad (3.55)$$

де: S_0 - площа елемента. Формули для обчислення інтегралів в локальній системі координат отримуємо в аналітичному вигляді. В результаті простих математичних перетворень отримуємо:

$$E_{00}(t) = \frac{ab}{4A_x B_y} \sum_{l=1}^K \sum_{\alpha=1}^4 E_l^\alpha \quad (3.56)$$

$$E_{n0}(t) = \frac{ab}{\alpha A_x B_y} \sum_{l=1}^K [(E_l^1 + E_l^4)F_1 - (E_l^2 + E_l^3)F_2] \quad (3.57)$$

$$E_{0m}(t) = \frac{ab}{2A_x B_y} \sum_{l=1}^K [(E_l^1 + E_l^2)F_3 - (E_l^3 + E_l^4)F_4] \quad (3.58)$$

$$E_{nm}(t) = \frac{ab}{A_x B_y} \sum_{l=1}^K [E_l^1 F_1 F_3 - E_l^2 F_2 F_3 + E_l^3 F_2 F_4 + E_l^4 F_1 F_4] \quad (3.59)$$

Тут - F_1, F_2, F_3, F_4 :

$$F_1 = \frac{2A_x}{n\pi a} \sin \frac{n\pi}{A_x} \left(x_{cl} + \frac{a}{2} \right) - \frac{4A_x^2}{(n\pi a)^2} \sin \frac{n\pi x_{cl}}{A_x} \sin \frac{n\pi a}{2A_x} \quad (3.60)$$

$$F_2 = \frac{2A_x}{n\pi a} \sin \frac{n\pi}{A_x} \left(x_{cl} - \frac{a}{2} \right) - \frac{4A_x^2}{(n\pi a)^2} \sin \frac{n\pi x_{cl}}{A_x} \sin \frac{n\pi a}{2A_x} \quad (3.61)$$

$$F_3 = \frac{2B_y}{m\pi b} \sin \frac{m\pi}{B_y} \left(y_{cl} + \frac{b}{2} \right) - \frac{4B_y^2}{(m\pi b)^2} \sin \frac{m\pi y_{cl}}{B_y} \sin \frac{m\pi b}{2B_y} \quad (3.62)$$

$$F_4 = \frac{2B_y}{m\pi b} \sin \frac{m\pi}{B_y} \left(y_{cl} - \frac{b}{2} \right) - \frac{4B_y^2}{(m\pi b)^2} \sin \frac{m\pi y_{cl}}{B_y} \sin \frac{m\pi b}{2B_y} \quad (3.63)$$

Розроблена методика апроксимації $T(x, y, z_N, t)$ дає змогу в тривимірних аналітичних моделях теплопровідності враховувати нерівномірність розподілу

функції в граничній умові першого роду, стикувати між собою аналітичні і чисельні рішення задач теплопровідності.

Розроблення процедури інтегрування по координаті z всередині шару.

Виберемо метод інтегрування по координаті z у виразах (3.20, 3.28). При спробі отримати рекурентне співвідношення для обчислення інтеграла аналітично виникає проблема зберігання всіх коефіцієнтів $H_{nmk}^{(j)}$, та $G_{nmk}^{(j)}$ для кожного шару, члена ряду і точки по часу. Це вимагає великого об'єму оперативної пам'яті. Тому вибираємо шлях чисельного інтегрування. Методи квадратур типу Гауса - Лежандра для цієї мети не підходять тому, що будуються за принципом плаваючих вузлів. В даній методиці необхідно мати фіксовані вузли (наприклад, метод трапеції) з огляду її рекурентності. Поява додаткових проміжкових точок призводить до значного збільшення об'єму обчислень. Підвищити точність інтегрування і зменшити потрібний об'єм пам'яті в порівнянні з методом трапецій при аналогічному об'ємі обчислень дає змогу метод сплайн-квадратур, згідно якого:

$$\int_a^b f(x)dx = \sum_{i=1}^N \Delta_i \frac{f_i + f_{i+1}}{2} - \Delta_i \frac{g_i + g_{i+1}}{2} \quad (3.64)$$

Тут g_i - коефіцієнти при другому члені сплайну;

f_i, f_{i+1} - значення функції;

Δ_i - крок інтегрування.

З врахуванням (3.64) процедуру інтегрування в (3.20, 3.28) подамо таким чином:

$$\begin{aligned} & \int_0^z Z_{nmi}^{(j)}(s, \tau) \exp(-\gamma_{nm}^{(j)} s) ds = \\ & = \sum_{\omega=1}^W \frac{\Delta}{2} (Z_{nmi}^{(j)}((\omega-1)\Delta, \tau) \exp(-\gamma_{nm}^{(j)}(\omega-1)\Delta) + Z_{nmi}^{(j)}(\omega\Delta, \tau) \exp(-\gamma_{nm}^{(j)}\omega\Delta)) - \\ & - \frac{\Delta^3}{12} (g_{1\omega} + g_{1\omega+1}) = O_1^{(j)}(z, \tau) \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$\begin{aligned}
& \int_0^z Z_{nmi}^{(j)}(s, \tau) \exp(\gamma_{nm}^{(j)} s) ds = \\
& = \sum_{\omega=1}^W \frac{\Delta}{2} (Z_{nmi}^{(j)}((\omega-1)\Delta, \tau) \exp(\gamma_{nm}^{(j)}(\omega-1)\Delta) + Z_{nmi}^{(j)}(\omega\Delta, \tau) \exp(\gamma_{nm}^{(j)}\omega\Delta)) - \\
& - \frac{\Delta^3}{12} (\mathcal{G}_{1\omega} + \mathcal{G}_{1\omega+1}) = O_{2nmk}^{(j)}(z, \tau)
\end{aligned} \tag{3.66}$$

В (3.65, 3.66) $z = \Delta W$

Розроблена математична модель і методика аналізу процесу теплообміну дає змогу проводити розрахунок нестационарного температурного поля в трьохмірному багат шаровому прямокутному паралелепіпеді. Але часто виникає необхідність у використанні спрощених методик теплового аналізу – стаціонарна модель, одномірна нестационарна модель. Розроблений підхід дає змогу отримати ці методики, як часові випадки загальної, так остання практично містить їх.

В стаціонарному випадку початкова задача описується рівнянням Лапласа з тими ж граничними умовами. Відповідно вид власної функції отримуємо аналогічний. Рівняння по координаті z (3.18) буде однорідним. Рішення (3.18) включає вирішення відповідного однорідного рівняння. Тоді:

$$Z_{nm}^{(j)} = H_{nm}^{(j)} \exp(\gamma_{nm}^{(j)} z) + G_{nm}^{(j)} \exp(-\gamma_{nm}^{(j)} z) \tag{3.67}$$

$$\gamma_{nm} = \sqrt{\frac{n^2 \pi^2}{Ax^2} + \frac{m^2 \pi^2}{By^2}} \tag{3.68}$$

Прийнявши рівними нулю значення $R_{nmk}^{(j)}(z, \tau)$ та $C_{nmk}^{(j)}(z, \tau)$ в правій частині системи рівнянь (3.24), отримаємо методику розрахунку стаціонарного температурного поля.

Так як для нестационарного так і для стаціонарного режиму при теплоізованих торцях нульовий член ряду ($n = m = 0$) є рішенням відповідної

одномірної задачі (розміри джерела співпадають з розмірами моделі по координатах x, y).

Представлену методику можна використати і для рішення ряду інших задач, які описуються неоднорідними стаціонарним (рівняння Пуассона) і нестаціонарним рівняннями.

Можливість задання різноманітних, як однорідних, так і неоднорідних умов дають можливість охопити широке коло практичних задач аналізу теплових і інших потенціальних полів.

Підхід використаний при розробці описаної методики, поряд з практичною значимістю (простота в реалізації на ЕОМ, можливість побудови із простих рішень складні математичні моделі, можливість використання особливостей отриманих рішень на спрощених моделях),

має і теоретичний напрямок – подальший розвиток застосування аналітичних методів рішення трьохмірних задач математичної фізики сумісно з числовими, вдале поєднання яких дає змогу отримати якісно новий результат.

3.3 Дослідження адекватності розроблених моделей і точності отриманих результатів.

Програмна реалізація розробленої методики аналізу температурних полів і практичне використання її в системі теплового проектування технічних об'єктів вимагає попереднього дослідження адекватності моделі і точності отриманих результатів.

Загальна похибка результатів моделювання складається із наступних складових:

- похибка методики розрахунку;
- похибка допущень, прийнятих при розробці теплової і апроксимацій, введених в математичну моделі.

3.3.1 Послідовність і методи дослідження точності результатів моделювання і аналізу температурних полів.

Дослідження точності результатів моделювання і аналізу температурних полів здійснюється в такій послідовності:

1. Аналіз похибки методики розрахунків, який містить:
 - похибку дискретизації функції $T(x, y, z, t)$ в часовій області з кроком τ ;
 - похибку числового інтегрування по координаті z ;
 - похибку, яка виникає внаслідок певного обмеження розрядної сітки ЕОМ (похибка заокруглення);
 - похибка, яка вноситься усіченням нескінченного ряду Фур'є по координаті x та y .
2. Аналіз похибки апроксимацій теплового потоку, який описує джерело тепловиділення, залежності потужності тепловиділення від часу, розподілу температури на нижній грані по координатах x та y .
3. Обґрунтування похибки прийнятих допусків при розробці теплової моделі.
Для проведення перерахованих досліджень використовуються методи обчислювального експерименту, результати порівняння розрахункових значень температурного поля з вимірними, логічні висновки на основі

емпіричного досвіду розробника математичних моделей задач теплового проектування технічних об'єктів, а також відомості з літературних джерел.

З метою зменшення об'єму обчислень, а також докладного дослідження стійкості різницевої схеми, збіжності тригонометричного ряду і впливу точності інтегрування на адекватність математичної моделі нестационарного теплового процесу, розроблені часткові спрощені моделі: одномірної теплопровідності (для нескінченної пластини); одномірної тришарової (чи р-шарової) теплопровідності. Реалізація і аналіз цих моделей дозволила більш легко здійснити комплексну відладку і налаштування математичної моделі нестационарного тримірного температурного поля багат шарової структури, яка розробляється. В додатку I наведені рішення наступних задач:

- задача моделювання і аналізу одномірної теплопровідності чисельно-аналітичним і аналітичним методами;
- задача аналізу нестационарної одномірної теплопровідності через тришарову стінку чисельно-аналітичним методом.

З використанням моделей, наведених в додатку I можна розрахувати нестационарне температурне поле в нескінченній пластині, тим самим досліджуючи стійкість і збіжність скінчено - різницевої схеми по часу, а також похибку інтегрування по координаті z .

Оцінити оптимальність затрат на обчислення інтегралу по координаті z , і скінчено-різницевої схеми по часу можна шляхом порівняння результатів аналізу нестационарної теплопровідності в сталий момент часу з розрахунком стаціонарного температурного поля.

3.3.2 Дослідження точності і стійкості обчислень, які проводяться на ЕОМ.

Теоретичне дослідження рішення отриманого комбінованим методом і практичні дослідження показують, що величина кроку по часу t і кількість вузлів інтегрування по координаті z , необхідне для забезпечення правильності отриманих результатів взаємозв'язані і не впливають на кількість членів ряду Фур'є по координатах x та y . Тому, для дослідження похибки скінчено-

різницевої схеми і числового інтегрування по координаті z використано одношарове однорідне рішення (отримане комбінованим методом), нестационарне (отримане в аналітичному виді) і стаціонарне рішення.

Розглянемо наступний тест. Моделюється передача тепла теплопровідністю через нескінчену одношарову стінку, з одного боку якої задано рівномірний тепловий потік, а з другої – ідеальний тепловідвід.

Коефіцієнт теплопровідності	$\lambda = 1,5 \text{ Вт/(м град)}$
Питома теплоємність	$c = 0,7118 \text{ Дж/(г град)}$
Питома густина	$\rho = 0,25 \times 10^7 \text{ г/м}^3$
Товщина	$h = 0,5 \text{ мм}$
Температура середовища	$T_c = 0$
Потік тепловиділення	$q = 0,13 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$
Коефіцієнт тепловіддачі	$\alpha_s = 0$

Розрахуємо стаціонарне значення температури по (П1.21).

$$T_{\text{ст}} = 52 \text{ град. Цельсія.}$$

Це значення абсолютна точне, так як обчислене аналітично.

Виберемо крок по часу $t = 0,1$ сек.

Проведемо розрахунок нестационарної температури в часовому діапазоні 1-4 сек. Чисельно - аналітичним методом. Кількість вузлів інтегрування 10 – методом сплайн - квадратур, 80 – методом трапецій. Отримані результати: час встановлення середнього режиму $t_{\text{ст}} = 1,5$ сек.; температура в стаціонарному режимі $T_{\text{ст}} = 52$ град. Цельсія.

Далі будемо змінювати величину τ , в результаті отримаємо залежності рис.3.2, рис.3.3. При цьому із зменшенням τ збільшувалося число вузлів інтегрування. Точність отриманих результатів контролювалась по стаціонарному значенню температури і шляхом порівняння з результатом розрахунку $T(z, t)$ по (П1.14), П1(16), $T_a(z, t)$ завжди більше $T(z, t)$ при $t < t_{\text{ст}}$. Результати аналізу (рис.3.2) показують, що похибка розрахунку при збільшенні

кроку на малих ділянках часу збільшується. Із збільшенням часу значення τ менше впливає на значення температури. При $t > t_{cm}$ стаціонарне значення температури досягається за 2-3 кроки рекурентних обчислень. Величина кроку практично не впливає на значення $T_{\text{ст}}$, що свідчить про стійкість скінченно-різницевої схеми. Порівняння результатів $T\psi(z,t)$ з $Ta(z,t)$ показує, що при $t < 0,06$ сек. похибка обчислень в діапазоні часу 0.05-1 сек. не перевищує 10 %.

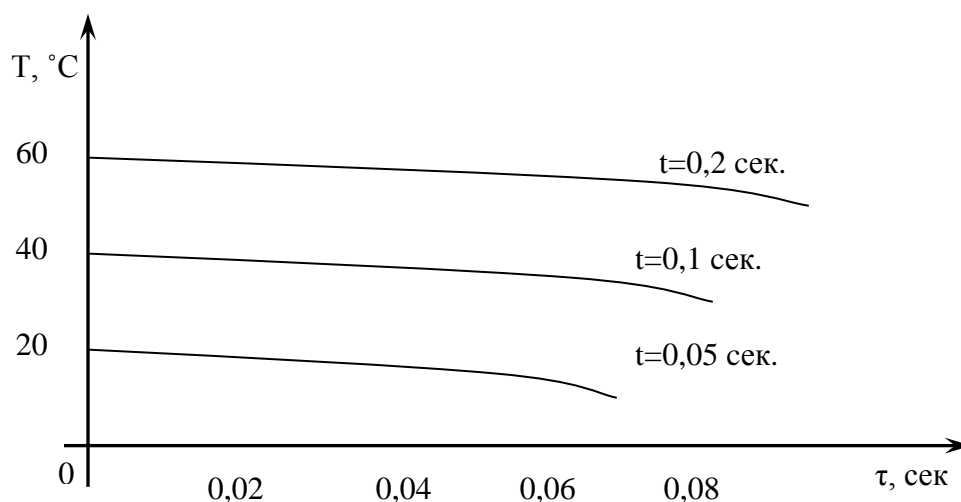


Рис.3.2.Графік залежності $T(\tau)$ в різні моменти часу для одношарової структури з параметрами:

$$\lambda = 1,5 \text{ Вт/(м град)}$$

$$c = 0,7118 \text{ Дж/(г град)}$$

$$\rho = 0,25 \times 10^7 \text{ г/м}^3$$

$$h = 0,5 \text{ мм}$$

$$q = 0,13 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$$



Рис.3.3.Графік залежності температури від величини дискрету скінчено-різницевої схеми τ для одношарової структури з параметрами:

$$\lambda = 1,5 \text{ Вт/(м град)}$$

$$c = 0,7118 \text{ Дж/(г град)}$$

$$\rho = 0,25 \times 10^7 \text{ г/м}^3$$

$$h = 0,68 \text{ мм}$$

$$q = 0,13 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$$

$$T_0 = 0$$

$$\alpha_0 = 0$$

$$t = 0,3 \text{ сек.}$$

Великий вплив на значення стаціонарної температури здійснює похибка інтегрування по координаті z , оскільки в процесі обчислення відбувається її накопичення. Аналіз похибки чисельного інтегрування здійснюється шляхом порівняння результатів обчислення $T(z,t)$ та $T(z)$. На рис.3.4. представлені часові залежності розподілення температури по формулах (ПІ.31-ПІ.34) (Додаток 1). Із рис.3.4. видно, що чим менше значення часу t , тим відповідно, необхідно використовувати менше значення кроку по часу τ що призводить до необхідності збільшення кількості вузлів інтегрування по координаті z . Для обчислення інтеграла числовими методами використовувалися методи трапецій

сплайн квадратур. Методи інтегрування підвищеної точності типу квадратур Гауса не підходять через нерівномірність розподілу вузлів, що призводить до нескінченного збільшення їх сумарної кількості в рекурентних обчисленнях.

Метод трапецій є більш стійким до накопичення похибок. На рис. 3.5. показана залежність значення температури від кількості вузлів інтегрування, які використовуються. Для повного співпадіння значення температури в режимі, який встановився із стаціонарним рішенням (при кроці $\tau = 0,25 \times 10^{-2}$) потрібно 160 вузлів. Використання сплайн-квадратур дає можливість зменшити кількість вузлів, які використовуються, приблизно в 5 разів, хоча по часових затратах на ЕОМ обидва методи рівнозначні.

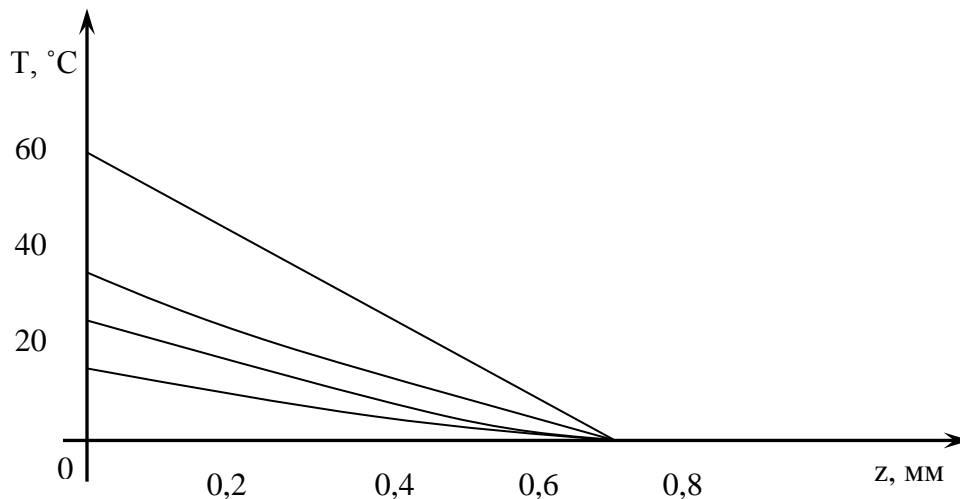


Рис.3.4.Графік залежності нестационарної температури від координати z в різні моменти часу для тришарової структури з параметрами:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1,5 \text{ Вт/(м град)}$$

$$c_1 = c_2 = c_3 = 0,7118 \text{ Дж/(г град)}$$

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = 0,25 \times 10^7 \text{ г/м}^3$$

$$h_1 = 0,5 \text{ мм}; h_2 = 0,3 \text{ мм}; h_3 = 0,3 \text{ мм};$$

$$q = 0,13 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$$

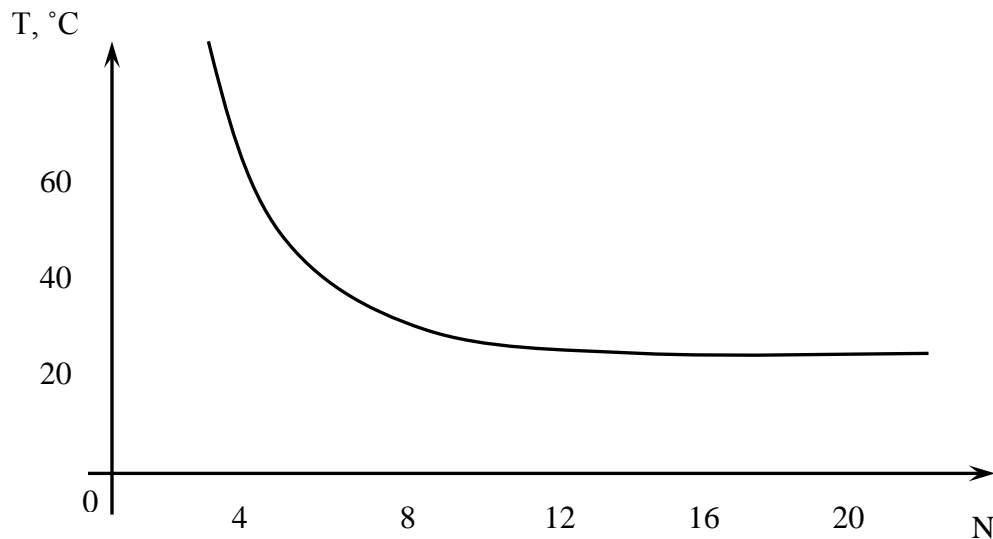


Рис.3.5.Графік залежності температури $T(z,t)$ від кількості кроків інтегрування по z при $\tau=0.001$ сек., $t=0,1$ сек., для одношарової структури з параметрами:

$$\lambda = 1,5 \text{ Вт/(м град)}$$

$$c = 0,7118 \text{ Дж/(г град)}$$

$$\rho = 0,25 \times 10^7 \text{ г/м}^3$$

$$h = 0,68 \text{ мм}$$

$$q = 0,13 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$$

$$T_0 = 0$$

$$\alpha_0 = 0$$

$$t = 0,3 \text{ сек.}$$

На похибку інтегрування, і як наслідок, похибка розрахунку температурного поля, здійснює вплив похибка заокруглення, яка виникає в ЕОМ через обмеженість її розрядності. Так, наприклад, при $\tau = 0,05$ сек. виникає необхідність в розрахунку на ЕОМ використовувати подвійну точність обчислення.

В результаті проведених досліджень отримана залежність (рис.3.3.) (аналогічна залежність для схеми Ейлера, яка використовується наведена в[]).

Представлений рафік можна розбити на три ділянки. На першій ділянці при малих значеннях τ ($\tau < 0,25 \cdot 10^{-2}$) великий вплив здійснюють похибки заокруглення чисел і похибка інтегрування. Потім друга ділянка – стабільної роботи схеми, ($0,25 \cdot 10^{-2} < \tau < 0,25$). Третя ділянка – область похибки схеми Ейлера. Крутизна цієї ділянки буде залежати від того, в який момент часу нам необхідно отримати значення температури. Якщо $t_{\text{задане}} \geq t_{\text{ст}}$, то крок τ можна використати великий, так як помилки схеми, як вже говорилося, практично не впливають на стаціонарне значення температури.

З метою визначення впливу інших параметрів математичної моделі процесу теплопередачі в багат шаровому паралелепіпеді подальші дослідження проводилися з використанням одновимірної багат шарової, а потім тривимірної багат шарової моделі розрахунку. Варіювалися геометричні, топологічні, теплофізичні параметри, коефіцієнти тепловіддачі, а також міра нерівномірності розподілу по нижній грані моделі, вид граничних умов в торцях, кількість членів ряду Фур'є.

Встановлено, що розроблена методика стійка до зміни всіх перерахованих параметрів, межі яких визначені характеристиками мікроелектронних пристроїв, які проектуються в даний час в ряді галузей промисловості.

Встановлено, що величина мінімального кроку по часу обмежена і визначається наступним чином. Серед всіх шарів вибирається максимальне значення $(c_j \rho_j) / (\lambda_j \tau)$. Воно не повинне перевищувати число U_{max} .

$$\max_{j=1,N} \left(\frac{c_j \rho_j}{\lambda_j \tau} \right) \leq U_{\text{max}},$$

де U_{max} залежить від типу процесора в ЕОМ, яка використовується. Для ЕС ЕОМ $U_{\text{max}} = 10^8$, для ЕОМ, в основі яких лежать мікропроцесори Intel 85/286 арифметичні сопроцесори Intel 87/287 $U_{\text{max}} = 10^9$.

Не вдаючись в особливості апаратної організації ЕОМ використовуючи запропоновану послідовність аналізу і розроблені в цьому параграфі спрощені математичні моделі можна за короткий проміжок часу визначити межі точнісних характеристик методики, яка розглядається.

Максимальна величина кроку τ вибирається виходячи із компромісу між необхідною точністю отримання результатів і часом здійснення обчислень. Час аналізу нестационарного теплового режиму лінійно залежить від добутку кількості точок по часу на кількість вузлів інтегрування. При виборі максимально допустимого τ також необхідно мати на увазі, що при одному і тому ж кроці по часу похибка апроксимації залежності $T(t)$ - пропорційна ступеню крутизни і не лінійності даної апроксимації.

Для автоматизації контролю похибки інтегрування по координаті z в багатошарових моделях розроблена методика, в основі якої лежить перевірка виконання умов рівності температур на межах шарів теплової моделі.

В ході реалізації алгоритмів аналізу температурного поля перевірялась правильність формулювання і рішення системи алгебраїчних рівнянь для N шарів по координаті z . Для цього отримані в аналітичному виді коефіцієнти H і G для одношарової моделі і вирішена тришарова задача (Додаток 1). Рішення системи рівнянь (3.24) проводиться за допомогою стандартної програми DGELB. Перевірка правильності програмно реалізованих алгоритмів здійснювалася шляхом зведення тришарової моделі до одношарової. При заданні для програми DGELB $\epsilon=0,1 \cdot 10^{-3}$ точність рішення системи рівнянь повністю задовольняє вимогам, які висувуються.

Збіжність двократного тригонометричного ряду, в виді якого отримане рішення стаціонарної тримірної задачі теплообміну і похибки розрахунку пов'язані з вибором скінченного числа його членів, досліджені в роботі // . Отриманий ряд Фур'є для розрахунку тримірної нестационарної теплопровідності в K -тий момент часу аналогічний ряду, який показує рішення відповідної стаціонарної задачі. На рис.3.6. показані результати дослідження збіжності ряду в різні моменти часу. Оптимальне по затратах і точності значення кількості членів ряду для представлених вихідних даних – 25.

В результаті проведених обчислень отримуємо методику дослідження похибки отриманих числових результатів і адаптації даної моделі до визначених умов і об'єктів проектування.

РИС.3.6. ГРАФІК ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕМПЕРАТУРИ В ЦЕНТРІ ...

3.3.3 Аналіз і обґрунтування похибок апроксимацій, які проводяться і прийнятих допущень.

Згідно запропонованого методу рішення задачі нестационарної теплопровідності функція зміни потужності тепловиділення в часі описується дискретно. З одного боку - це певна перевага, так як є можливість по точках описати $P(t)$, яка змінюється по випадковому закону. З другого – східцеві апроксимація $P(t)$ вносить певну похибку в обчислення.

Аналіз результатів цілого ряду розрахунків, направлених на дослідження вказаної похибки, показує, що апроксимація потужності вносить невелику похибку, так як фізично теплові процеси проходять на порядок-два повільніше, чим електричні в схемі, тому, якщо при визначеному τ забезпечується точність моделювання температури, то такої ж дискретизації достатньо для апроксимації $P(t)$. В якості прикладу покажемо тест рис.3.7.

РИС.3.7. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ $T(t)$ ДЛЯ....

Досліджувалась точність отриманих результатів моделювання нестационарного температурного поля при заданні на тепловиділяючих елементах імпульсів потужності прямокутної і довільної форми.

Для дослідження вибрана конструкція (таблиця 3.1). На нижній грані задана умова ізотермічності. Фронт імпульсу 12 сек. Прораховувалися тести:

- 1) прямокутний імпульс, крок – 0,25 сек., час виходу в стаціонар – 4 сек., результати наведені на графіку (рис.3.7.).
- 2) імпульс з фронтом 2,5 сек., з кроком по часу 0.25, 0.125, 0.5, 1, 2 секунд відповідно (графіки 2-6, рис.3.7.).

Аналіз результатів показує, що для врахування із задовільною точністю зміни $P(t)$ на відрізку часу Δt необхідно, щоб на даний відрізок припадало мінімум 3 точки часової дискретизації.

Аналогічно з такою ж точністю проводиться апроксимація зміни температури в часі нижньої рані моделі. Похибка моделювання розподілу температури нижньої рані по координатах x та y , визначається на основі

точності скінчено-елементної апроксимації, яка достатньо досліджена в роботах //.

В розробленій методиці нерівномірність розподілу потужності тепловиділення по координатах моделюється шляхом розбиття тепловиділяючого елемента на піделементи і опису кожного з них у виді джерела тепловиділення із своїм значенням потужності. Аналітичне одночасне інтегрування всіх джерел тепловиділення забезпечує обчислювальну точність такої апроксимації і незалежність в часі обчислень від ступеня розбиття.

В якості прикладу представимо тест таблиця 3.1., рис.3.8. Розміри тепловиділяючого елемента рівні 4*4 мм. Результати розрахунку розподілу температури по осі x показані на графіку 1 (рис.3.8.). Потім, по осі x резистор розбивається на 2, 4, 8 і 16 частин, які дотикаються краями одна з одною. Питома потужність на всіх, отриманих таким чином елементах-однакова. Для цих вихідних даних розраховувалося температурне поле в зоні тепловиділення елементів з кількістю дискретів 10*10. У всіх випадках отримано абсолютно однакове температурне поле. Далі, задавався нерівномірний розподіл потужності по осі x , симетричний відносно осі y , - низька питома потужність по краях із зростанням до центру зони тепловиділення. Сумарна потужність тепловиділення рівна попереднім значенням. Отримані такі результати (графік 2, рис.3.8.): температура в центрі зони тепловиділення на 15 градусів Цельсія перевищує, а на краях – 2 рад. Цельсія нижче раніше розрахованих значень в момент часу 10 сек., при коефіцієнті тепловіддачі з нижньої грані 300 і температурі середовища 100 град. Цельсія.

РИС. 3.8. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ АПРОКСИМАЦІЇ....

На основі отриманих результатів робимо висновки, що нерівномірність розподілу потужності на резисторі можна апроксимувати шляхом розбиття його на декілька тепловиділяючих елементів з достатньою кількістю точності, яка відповідає точності задання вхідних даних (зона розподілу потужності).

Правомірність апроксимації фізичних процесів, а також прийнятих допущень при розробці моделі визначається ступенем достовірності вхідних даних, які задаються для проведення тих чи інших розрахунків. Запропонований ступінь складності теплових і математичних моделей обґрунтовується результатами дослідження особливостей об'єкту проектування, а також наявним досвідом розробки впровадження і промислового використання методик моделювання температурних полів. Для підтвердження правомірності прийнятих допущень проводилося порівняння результатів розрахунку теплового режиму із вимірними значеннями. Виміри проводилися безконтактним методом з допомогою інфрачервоного радіометра з використанням методики, а також за допомогою системи «Плот». Отримані такі результати. Порівняння результатів вимірювання і розрахунку проведеного при точно відомих вхідних параметрах і характеристиках показало розходження більше 5% (рис.3.9.). Порівняння результатів вимірювання і розрахунку проведеного для конструкції, параметри якої визначені із довідково-нормативних документів, показало розходження 17% (рис.3.10).

РИС.3.9. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ...

РИС.3.10. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНОЇ ТЕПЛОВОЇ ...

Таким чином розгляд питань аналізу похибок і точності отриманих результатів, обґрунтування адекватності розроблених моделей дало можливість: отримати результати, які підтверджують пригодність комбінованого чисельно – аналітичного методу для практичного використання; на основі обчислювального експерименту більш глибоко вивчити межі застосування і стійкості прийнятих рішень; визначити методи, моделі і послідовність рішення задач, які лежать в основі методики випробовування програмно о забезпечення, яке розробляється і настройки його на об'єкт проектування, технічні засоби; отримати інформацію про обчислювальну

складність алгоритмів аналізу теплових режимів, що дало можливість розробити оптимальну структуру програмного забезпечення.

3.4 Висновки.

1. Формалізована задача моделювання теплових режимів в базовій тепловій моделі конструкції технічного об'єкту у вигляді, який дає змогу задавати довільну граничну умову на будь-якій рані, реалізувати автоматичне формування загального рішення, як вибір із множини власних або апроксимуючих функцій підмножини, яка відповідає підмножині граничних і початкової умов у відповідності до типу конструкції, умовам встановлення, експлуатації та функціонування пристрою, формально описаних у вхідному завданні.

2. Розроблено комбінований підхід рішення задачі аналізу температурних полів в конструкціях технічних об'єктів, в основу якого покладено принцип декомпозиції вхідної задачі на ряд під задач, які дають змогу отримати аналітичне рішення на нижчому рівні і потім, об'єднання цих рішень в загальне з використанням чисельного підходу. Представлена методика поряд з практичним значенням має і теоретичне направлення – подальший розвиток використання аналітичних методів рішення тримірних задач математичної фізики сумісно з числовими, поєднання яких дає змогу отримати якісно новий результат.

3. Проведено детальні дослідження точності і стійкості розрахунку нестационарних температурних полів, які підтвердили достовірність отриманих результатів. Розгляд питання аналізу похибок отриманих результатів, обґрунтування адекватності розроблених моделей дало змогу отримати результати, які підтверджують пригодність комбінованого чисельно – аналітичного методу для практичного використання, більш глибоко вивчити межі застосовності і стійкості запропонованих рішень, визначити методи, моделі і послідовності рішення задач, які лежать в основі методики випробовування розробленого програмного забезпечення і налаштування його

на об'єкт проектування і технічні засоби, отримати інформацію про обчислювальну складність алгоритмів аналізу теплових режимів.

РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДИК В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ПРОЕКТУВАННІ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Розроблена методика моделювання температурних полів і аналізу теплових режимів мікроелектронних пристроїв, а також засоби автоматизації теплового проектування орієнтовані на достатньо широкий клас задач, які вирішуються з метою обґрунтування прийнятих рішень і забезпечення заданих характеристик.

Процес проектування реалізується шляхом вибору проектувальником послідовності дії (процедур, операцій, задач і т.д.), яка називається стратегією проектування з метою перетворення вихідного технічного завдання в готовий проект. У відповідності з рис.1.1 та рис.1.2. задачі моделювання, аналізу, оптимізації теплових режимів та ін. виступають під задачами схемотехнічного, конструкторського, технологічного проектування. Процедури теплового проектування можуть виконуватися як самостійно, так і у виді операцій по перерахованих етапах. Тому стратегія, технологія і маршрути теплового проектування повинні розглядатися в тісній взаємодії з іншими процесами. Виходячи із сказаного виникає необхідність розгляду загальних стратегій теплового проектування, особливостей адаптації та використання розроблених методик і системи в автоматизованому процесі, розробки загального підходу і приведення конкретних прикладів рішення задач на етапах аналізу технічного завдання, схемо технічному, конструкторському, технологічному.

Результати проведених дослідів в цьому розділі в сукупності з задачами теплового проектування (част.1) складають методологічну основу розроблених методів аналізу і системи теплового проектування.

4.1. Стратегії автоматизованого теплового проектування МЕР і методи прийняття рішень.

Детальний аналіз досліджень в області методології проектування [18, 66/ підтверджують важливість розробки стратегій теплового проектування. В [26/ розглядаються наступні стратегії проектування: лінійні, коли етапи виконуються строго послідовно; циклічні, якщо після виконання одного з етапів необхідно повернутися і повторити попередні етапи; розгалужені, які дають змогу виконувати окремі етапи паралельно; адаптивні, при яких вид наступного етапу залежить від результатів виконання попереднього; випадкового пошуку, який відрізняється абсолютною відсутністю плану, коли при виборі наступного етапу зовсім не враховуються результати попереднього.

Вибір тої чи іншої стратегії залежить від степеня заданості (тобто від змісту і об'єму) вихідної інформації і від схеми пошуку. Тому на різних стадіях етапах розробки МЕР стратегія може змінюватися. В деяких випадках застосовують методи управління стратегіями, які дають змогу притримуватися одної і тої ж до того часу, доки вона залишається перспективною і замінити її, якщо вона перестає відповідати оточенню.

В зв'язку з особливостями конструктивних і функціональних характеристик МЕР, які обумовлюють складність математичних моделей, які використовуються при аналізі теплових режимів, основною метою методології теплового проектування є зменшення циклічності і збільшення лінійності проектування. Циклічність пов'язана з вимушеним повтором етапів роботи в результаті того, що деякі часткові задачі, які виявилися важливими, не були враховані. Лінійність передбачає, що всі важливі проблеми можна виявити на самому початку і вірогідність появи неврахованих часткових задач зводиться до мінімуму. Суттєвим методом забезпечення лінійності проектування є прогнозування, яке дозволяє визначити діапазон можливих виходів із етапів проектування до їх виконання

- це прогнозування пропонується здійснювати на основі результатів аналізу і системою взаємозв'язку характеристик аналогів методам і засобам якими вони були отримані. Процес проектування розробляється виходячи із змін, які необхідно внести в методи, моделі і алгоритми які використовуються при розробці аналогу. Задача прогнозування формулюється наступним чином: визначити варіанти і діапазон збуджень, які вносяться в систему і направлених на визначення змін або отримання нових характеристик. Такий підхід дає змогу максимально використовувати лінійну і розгалужену стратегії. Виконання розгалуженої стратегії забезпечується структурою системи теплового проектування. Одночасне рішення декількох задач (рис.5.1) реалізується алгоритмічно в процесорі ПМК, а також відповідною конфігурацією технічних засобів (паралельне вирішення задач в мережі ЕОМ). Прийняття проектних рішень отримуємо шляхом аналізу і порівняння результатів виконання етапів (варіанти задач теплового проектування). Але для автоматизації рішення часткових задач теплового проектування використовується обмежений варіант адаптивного пошуку – стратегія приросту (рис.5.2), на якій основано багато методів автоматичної оптимізації /39,100/. В процесі виконання загальної стратегії для досягнення цілей проектування перевіряється степінь **разрешения** поставлених задач і на основі отриманих результатів здійснюється управління.

Розробивши загальну стратегію теплового проектування (рис.5.1) перейдемо до розгляду методів прийняття проектних рішень.

Виходячи з особливостей виконання проектних операцій прийняття проектних рішень, розробленої стратегії теплового проектування складності математичних моделей теплообміну і необхідністю адаптації системи до різних умов розробки і об'єктам, пропонується методика прийняття рішення реалізувати на основі людино - машинного комплексу, використовуючи при цьому напівевристичні методи проектування.

Суть цього методу полягає в тому, що частина операцій і задач описується у виді алгоритмів і відповідно запрограмована для ЕОМ, а друга – евристички-

реалізується людиною. Використання такого підходу дає змогу підвищити ефективність і якість виконання проектних процедур, так як участь людини дозволяє знайти найбільш компромісні, часто принципово нові рішення, а використання ЕОМ дозволяє скоротити час, який витрачається на пошук відомих рішень, аналіз різноманітних гіпотез, обробку результатів аналізу (графічне зображення, побудова таблиць) ,максимально зменшити ймовірність помилки проектувальника.

В процесі теплового проектування виникає цілий ряд задач, рішення якого з одного боку важко формалізується, а з іншого – застосування евристичних прийомів дозволяє приймати рішення швидше, чим проходить процес багатокритеріальної оптимізації на ЕОМ.

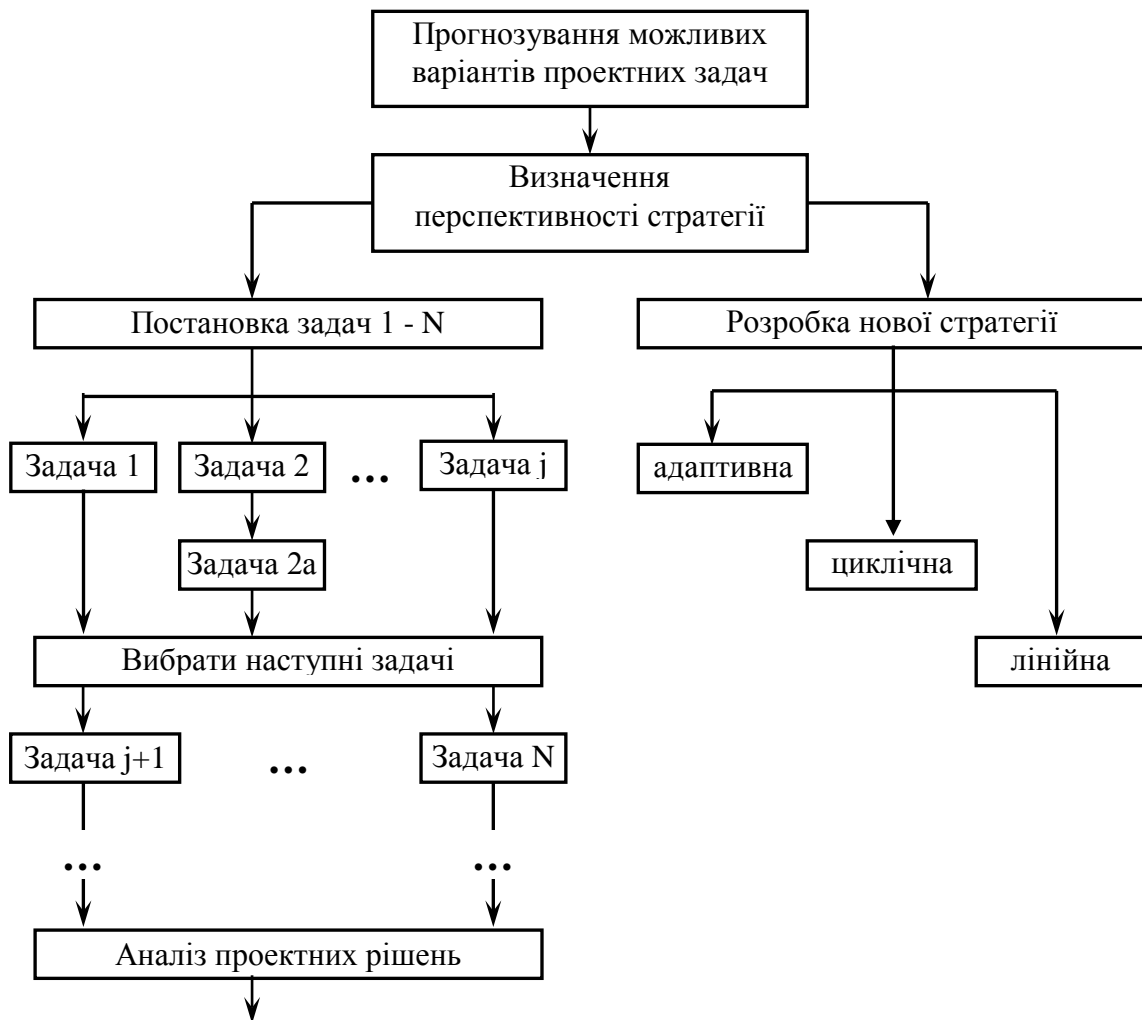


Рис. 4.1 Загальна стратегія теплового проектування МЕР.

Завдання на рішення задачі

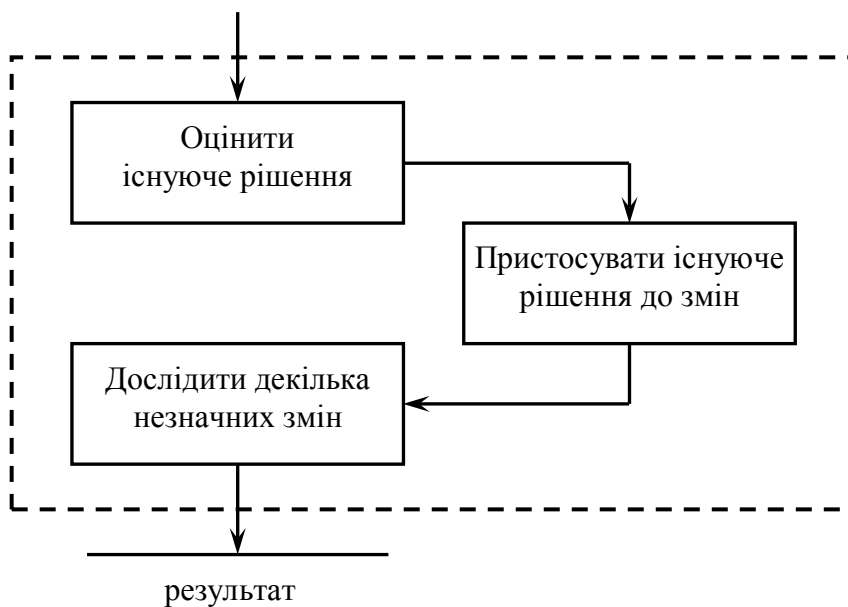


Рис. 4.2. Стратегія приростів

В таблиці 4.1. наведені задачі, які вирішуються за допомогою евристичних прийомів з участю людини. Ці задачі сформульовані на основі вивчення реальних процесів проектування мікроелектронних пристроїв в процесі розробки і впровадження автоматизованої системи.

Задачі теплового проектування МСТ, які вирішуються евристичними прийомами з участю людини

Таблиця 4.1

Етап проектування	Задачі	Прийоми
Аналіз ТЗ	Вибір варіанту умов тепловідводу і охолодження. Визначення підмножини задач забезпечення теплового режиму, функціональних і конструктивних характеристик, випробовування пристроїв.	М1 ∪ М2 М1
Схемотехнічний	Синтез електричних ланцюгів термокомпенсації. Пошук нових методів забезпечення теплоелектричних характеристик мікроелектронних пристроїв. Визначення підмножини варіантів схемотехнічного рішення. Постановка оптимізаційних задач. Прийняття кінцевого схемотехнічного рішення.	М1 М2 М4 М3А М4 ∪ М4А ∪ М4Б
Конструкторський	Корекція топологічного рішення. Вибір варіанту конструктивного рішення. Постановка оптимізаційних задач. Прийняття кінцевого конструктивно-топологічного рішення.	М4 ∪ М4Б М4 М3А М4 ∪ М4А ∪ М4Б
Технологічний	Вибір технологічних методів забезпечення теплового рішення. Постановка задач на аналіз теплового рішення. Прийняття кінцевого рішення.	М1 ∪ М2 М3 ∪ М3А М4 ∪ М4Б

В таблиці 4.2. наведені прийоми рішення задач теплового проектування. Прийоми М2, М3, М3А важко формалізуються. Прийоми М1, М4, М4А, М4Б можна формалізувати, але не завжди вдається врахувати повну множину критеріїв, які використовуються для прийняття рішення.

Евристичні прийоми рішення задач теплового проектування.

Таблиця 4.2.

Позначення	Евристичні прийоми
М1	Пошук рішення серед раніше отриманих і вибір одного чи множини виходячи з емпіричного досвіду проектувальника в рамках вимог, які встановлюються до об'єкту проектування.
М2	Розробка принципово нових схемотехнічних, конструктивних, технологічних та інших (наприклад, проектування засобів охолодження) рішень.
М3	Розробка математичних моделей для аналізу або прийнятті рішення автоматично.
М3А	Постановка задачі розробки алгоритмів, які використовують відомі математичні моделі.
М3Б	Розробка оптимізаційних моделей.
М4	Прийняття рішень на основі експертних оцінок результатів аналізу.
М4А	Прийняття рішень на основі експертних оцінок результатів оптимізації.
М4Б	Прийняття рішень в процесі діалогової взаємодії з програмою оптимізації (автоінтерактивний процес) або інтерактивного аналізу.

Розробка задач і методів прийняття рішення евристичними прийомами дає можливість підвищити рівень оптимізації теплового проектування шляхом їх реалізації за допомогою сучасних методів штучного інтелекту [35, 57], а також реалізації їх в експертних системах [85, 107]. При цьому накладається вимога до наявності таких систем в тій інтегрованій САПР, в якій буде використовуватися розроблена система теплового проектування. Використання експертної системи автономно для задач теплового проектування (якщо така відсутня в САПР) є недоцільним з огляду на такі фактори: тісної взаємодії і залежності задач теплового проектування процедур і цілям схеми технічного, конструкторського та технологічного

проектування; підвищення складності використання і вимог до рівня підготовки користувача системи теплового проектування; зниження економічних показників при впровадженні за рахунок значного підвищення вартості системи (вартість систем підвищується в 2,5 рази за рахунок засобів, які витрачаються на закупівлю оболонки і розробку експертної системи).

Використання інформаційного забезпечення, препроцесора, постпроцесора і монітору дає можливість частково автоматизувати рішення вказаних задач.

Обробка стратегії теплового проектування МЕР дає можливість розробити технології в яких формалізуються часткові задачі забезпечення теплового режиму шляхом розробки оптимізаційних моделей на різних етапах і стадіях теплового проектування.

Задачі теплового проектування, які розглядаються, поділяються на дві групи:

- 1) задачі прийняття схемотехнічних, конструкторських, технологічних рішень з врахуванням теплових обмежень;
- 2) зворотні задачі теплопровідності, які виникають при проектуванні МЕР /81, 82/.

Такий поділ здійснено виходячи з виду і умов формування критеріальної функції.

Для першої групи характерне формування критеріальних функцій при розробці математичного забезпечення схемо технічних, конструкторських, технологічних САПР. Результати аналізу теплових режимів виступають в ролі обмежень на критеріальну функцію і використовуються при формуванні області пошуку оптимального рішення. В загальному випадку задача формалізується у вигляді:

задачі векторної оптимізації /8/:

визначити: $\bar{x}^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\}$

що забезпечує: $\min \bar{Q}(\bar{x})$

$x \in R_{opt}$

При умові $\bar{G}(\bar{x}) = g(\bar{x}) > 0$

Тут: \bar{x}^* - вектор оптимальних значень **варьїруємих** схемотехнічних і конструкторсько-технологічних параметрів на відповідних етапах проектування;

$\bar{Q}(\bar{x})$ - вектор критеріїв оптимальності, які відповідають різним цілям по етапах проектування;

$\bar{G}(\bar{x})$ - вектор функції обмежень $g(\bar{x})$ на параметри, які варіюються, і критеріальну функцію, які враховують тепловий режим МЕР і його параметри.

Для рішення задач цієї групи формуються макромоделі температурного поля або використовуються спрощені моделі процесу теплопередачі, в яких в якості змінних виступають змінні, які варіюються, а решта характеристик теплового режиму приймаються постійними для конкретної задачі і визначаються шляхом аналізу загальної теплової моделі.

Зупинимось більш докладно на формулюванні задач другої групи. Рішення цих задач направлене на прийняття технічних рішень в рамках вибраної концепції системи забезпечення теплового режиму, здійснюється вибір її проектних параметрів, уточнюються характеристики, які є результатом схемо технічного і конструкторсько-технологічного етапів проектування.

В основі оптимального теплового проектування лежить математична тепла модель (моделі) пристрою, який розробляється, і екстремізується цільова функція. Модель зв'язує шукані проектні (причинні – з точки зору постановки зворотної задачі) характеристики з параметрами, які описують тепловий стан об'єкту (наслідкові характеристики) і навантажуючи ми діями, наприклад, зовнішніми і внутрішніми тепловими потоками. Можливим варіантом проектно-конструкторських рішень відповідають визначені теплообмінні і геометричні характеристики конструкції МЕР.

Таким чином, якщо дотримуватись концепції причинних і наслідкових характеристик, то сама задача оптимального теплового проектування може розглядатися як обернена задача теплообміну: по відомим умовам, які визначають допустимий тепловий стан об'єкту (тобто заданої області зміни

наслідкової характеристики), знайти потрібні причинні характеристики, які задовольняють цей стан і критерію оптимальності теплового проектування.

За ознакою шуканої причини характеристики в загальному випадку вводяться чотири види обернених задач – граничні, коефіцієнтні, ретроспективні і геометричні. Граничні задачі полягають в знаходженні функцій і параметрів, які входять в граничні умови; коефіцієнтні - функцій і параметрів, які входять в коефіцієнти рівнянь; ретроспективні, тобто обернені назад по часу - в знаходженні умов; геометричні – в реконструкції геометричних характеристик області чи яких-небудь характерних шарів середині її.

Розглянемо математичну формалізацію описаних задач. Математична теплова модель температурного поля розроблена в розділі 3 представляє собою:

$$T(x, y, z, t) = W(x, y, z, t, R) \quad (5.1)$$

де: W - рішення математичної задачі теплопровідності в просторі координат x, y, z, t в обмеженій області;

R – вектор характеристик, який включає граничні, початкові, геометричні, теплофізичні коефіцієнти.

Для дослідження обернених задач зручним записом математичної моделі є операторне рівняння першого роду представлене в [4, 62] і яке використовується в [61]

$$A u = f, \quad (5.2)$$

в якому u та f позначають відповідно шукані та характеристики моделі та характеристики за якими спостерігають, що належать деяким метричним просторам U та F . Оператор A , який діє з U в F , формалізуючи сукупність операцій, які визначаються математичною моделлю температурного поля (5.1), встановлює причинно-наслідкові зв'язки між шуканими величинами і вхідними (за якими спостерігають) величинами. Величина U може бути вектором $U \subseteq R$ або вектор функцією. В якості f фігурує вектор або функція стану $f(w)$ (в певних випадках $f = w$).

Визначальне значення для вирішення обернених задач мають їх обчислювальні постановки. Узагальнено всі постановки задач, які розглядаються можна розділити на екстремальні (варіаційні) і неекстремальні /4/.

В екстремальній постановці обернена задача розглядається як оптимізаційна, яка передбачає побудову цільового функціонала з наступним пошуком його екстремуму. Для операторного рівняння (5.2) це зводиться до мінімізації функціоналу нев'язки

$$E(u) = \| Au - f \|_F, \quad (5.3)$$

Рішення оберненої задачі в цьому випадку буде таке значення u , при якому $E(u)$ досягає максимального або близького до нього наперед обумовленого рівня.

Для рішення таких задач використовуються числові методи теорії оптимізації /19,100/. При цьому можливі два випадки:

- 1) задача вирішується в функціональному просторі;
- 2) рішення шукається в просторі параметрів

В першому випадку визначаються функції, які екстремізують функціонал від цих функцій – функціональна оптимізація. В другому – екстремізується функція скінченної кількості параметрів – параметрична оптимізація.

В якості прикладу можна привести функціонали /16/:

$$J_1 = \int_0^{t_p} \int_{\Omega} |w(r, R, t) - f(r, t)|^p \, dr \, dt \quad (5.4)$$

$$J_2 = \max_{[0, t]} \int_{\Omega} |w(r, R, t) - f(r, t)|^p \, dr \, dt \quad (5.5)$$

$$J_3 = \max_{[0, t] \times [\Omega]} |w(r, R, t) - f(r, t)|^p \, dr \, dt \quad (5.5)$$

де: $r \in \Omega$ - координати (наприклад) x, y, z в обмеженій області Ω ;

t_p - час роботи пристрою;

p – деяке додатне число.

Квадратичний функціонал ($p=2$) (5.4) використовувався автором для постановки і рішення задач в [90]. Якщо замість неперервної функції $R(r, t)$ розглядати її скінчений аналог у виді вектора $\bar{R} = [R_1, R_2, \dots, R_m]$, компоненти якого отримані дискретизацією на вибраній координатно-часовій сітці, тоді вихідну екстремальну постановку можна переформулювати в задачу параметричної оптимізації

$$J = \Delta r \Delta t \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N |w(r_n, \bar{R}, t_n) - f(r_n, t_n)|^p, \quad (5.6)$$

де: $\Delta r, \Delta t$ - приріст r, t ;

r_n, t_n - дискретні значення r, t .

В умовах застосування цифрової обчислювальної техніки, а також інтеграції з іншими САПР параметрична постановка оптимізаційної задачі більш прийнятна.

На відміну від екстремальної неекстремальна постановка передбачає можливість рішення безпосередньо рівняння (5.2) шляхом **обращення** математичної моделі або алгоритму рішення прямої задачі теплопровідності. В цих випадках операторне рівняння (5.2) трансформується в рівняння $u = A^{-1}f$. Такий підхід процесі теплового проектування можна використати лише при рішенні простих задач (наприклад, визначення значення теплового потоку в заданий момент часу при заданій температурі в одномірній моделі та ін.). У випадку ускладнення передбачається для рішення таких задач вихідну постановку приводити до екстремальної з метою отримання можливості використання відомих числових методів оптимізації.

Розглянуті дві групи задач різні за цілям, які формулюються при розробці оптимізаційної моделі направлені тим чи іншим чином на рішення проектних задач в процесі розробки МЕП, результат виконання яких – покращення функціональних характеристик пристрою з врахуванням теплового режиму конструкції. Виходячи із структури процесу проектування, а також із метою підвищення ефективності методики прийняття рішення за рахунок участі людини, загальну задачу оптимізації необхідно декомпонувати у

відповідності етапам і стадіям проектування. Рішення тих чи інших оптимізаційних та обернених задач приводиться до виду, придатному для подальшого використання алгоритмів прийняття рішення, наведених в /7/.

Розроблена загальна стратегія теплового проектування і метод, який оснований на частковій формалізації і алгоритмізації процесу теплового проектування складають методичну основу використання математичних моделей аналізу температурних полів (розділ 3) програмного, інформаційного і технічного забезпечення (розділ 4) в середовищі людинно-машинного комплексу, який забезпечує функціонування інтегрованої САПР МЕР /43/.

4.2 Розробка оптимізаційних моделей для рішення задач по етапах теплового проектування.

Запропоновані в попередньому параграфі евристичні прийоми теплового проектування дають змогу систематизувати послідовність дій інженерів-проектувальників МЕР в процесі виконання проектних процедур (рис. 1.3) і рішення задач (рис.1.2). В основі проектних процедур лежить методика моделювання і аналізу температурних полів. Прийняття рішень здійснюється на основі аналізу результатів розрахунку теплового режиму і температурного поля. Підвищення рівня автоматизації процесу прийняття рішень є його формулюванням, тобто опис функції цілі, визначення керованих параметрів і областей обмежень. Рівень автоматизації підвищується в процесі обробки стратегії, формування маршрутів і технології теплового проектування. Тоді виникають конкретні задачі і проектні ситуації, для рішення яких формуються оптимізаційні моделі.

Виходячи з аналізу задач теплового проектування формуємо оптимізаційні моделі, розроблені під час досліджень і обробки процесу теплового проектування. Варто відмітити, що орієнтація системи теплового проектування рішення визначеного класу задач, а також на об'єкт і процес проектування, здійснюється на етапі формулювання і рішення оптимізаційних задач. Це і стосується інших систем в основі яких лежать складні математичні моделі. Так наприклад, математичне і програмне забезпечення для аналізу електричних схем при відповідній постановці лежить в основі цільової функції задачі допусків на параметри елементів. Тому задачі прийняття рішень сформульовані у вигляді оптимізаційних моделей і алгоритмізація з використанням того чи іншого методу в даному випадку відноситься до методологічної основи прийняття розроблених моделей температурних полів, програмного і інформаційного забезпечення.

Розглянемо задачі етапу аналізу технічного завдання. Відповідно до тверджень, прийнятих в **част. 2** це задачі (1.1)-(1.2),(1.3). В **параграфі 2.2**

визначений вид математичних моделей для рішення даних задач. Ці моделі використовуються як для аналізу теплового режиму так і для прийняття чи обґрунтування рішень, тобто в даному випадку для розробки вимог на схемо-технічне і конструкторсько-технологічне виконання МЕП. На цьому етапі найчастіше використовуються евристичні прийоми прийняття рішень. Проте вибір умов охолодження конструкції чи обґрунтування завдання максимально-можливого потоку тепловиділення, величина якого визначає вибір елементної бази, можуть здійснюватися шляхом рішення зворотних чи оптимізаційних задач. Для простих конструкцій в стаціонарному режимі використовуються аналітичні моделі типу (П.21) з якого визначається тепловий потік, теплопровідність, товщина, коефіцієнт тепловіддачі при заданій температурі. Якщо режим роботи не стаціонарний (необхідно враховувати зміну температури в часі) і конструкція багат шарова (більше різних теплофізичних характеристик), вид математичної моделі для аналізу ускладнюється. Проте, збільшується адекватність отриманих результатів і відповідно правильність прийнятих рішень. В цьому випадку можна визначати черговість проходження шарів, темп нагріву конструкції, умови роботи виробу. На етапі аналізу ТЗ оптимізаційні задачі характеризуються неоднозначністю і багатокритеріальністю. Наприклад, забезпечення заданої середньої температури роботи здійснюється вище переліченими конструктивно-теплофізичними параметрами.

На основі вищесказаного в загальному випадку можна визначити задачу знаходження необхідних параметрів у вигляді (5.1). Тут в якості варійованих параметрів вибираються:

x_1 -коефіцієнт тепловіддачі;

x_2 -тепловий потік;

x_3 -температура зовнішніх теплових дій;

x_4 -коефіцієнт теплопровідності;

Основні компоненти векторного критерію це:

Q_1 -мінімум температурного поля;

Q_2 -забезпечення функціональних особливостей схем;

Q_3 -мінімум вартості.

Часто постановка загальної задачі для отримання результатів в процесі проектування виникає внаслідок згортання векторного критерію і визначення обмежень на критеріальні функції, а також на варійовані параметри. В результаті згортання векторного критерію отримуємо:

$$Q(\bar{x}) = \sum_{i=1}^s w_i Q_i(\bar{x}), \quad (5.7)$$

де: w_i -вагові коефіцієнти, які визначають важливість $Q_i(\bar{x})$.

Методи згортання критеріальної функції вибираються, виходячи з наступних факторів:

а) можливість взаємодії з проектувальником і автоматичною операцією оптимізації забезпечується визначенням вагових коефіцієнтів за допомогою експертних оцінок.

б) можливість виключення визначеної підмножини власних критеріїв в залежності від проектної ситуації;

в) розповсюдження метода для рішення такого типу задач, відповідно наявність програмного забезпечення.

Однією з широко розповсюджених форм представлення критеріальної функції є адитивна:

$$Q(\bar{x}) = \sum_{i=1}^s w_i Q_i(\bar{x}), \quad (5.8)$$

де: w_i -вагові коефіцієнти, які визначають важливість $Q_i(\bar{x})$.

Для цього визначимо критерії і обмеження.

$$Q_1(\bar{x}) = v_1 \sum_{j=1}^p \frac{(T_j(\bar{x}) - T_{j0})^2}{T_j(\bar{x})^2}, \quad (5.9)$$

$$T_j(\bar{x}) - T_c \geq 0,$$

де: $T_j(\bar{x})$ -визначене значення температури в j -й точці по просторових чи часових координатах,

T_{j0} - задане значення температури в j -й точці;

T_c - температура середовища;

v_1 - масштабуючий множник, призначений для вирівнювання значень критеріальних функцій між собою.

$$Q_2(\bar{x}) = v_2 \sum_{l=1}^r \frac{(Fl(T) - Flo)^2}{Fl(T)^2}, \quad (5.10)$$

$$\prod_{l=1}^r (Fl(T) - F \min l)(F \max l - Fl(T)) \geq 0,$$

де: $Fl(T)$ - вихідна функціональна характеристика МЕР, яка залежить від температури T і пов'язана з нею відомою залежністю,

Flo - задана вихідна функціональна характеристика;

$F \min l, F \max$ - мінімально і максимально допустимі значення;

v_2 - масштабний множник;

r - кількість характеристик.

$$Q_3(\bar{x}) = v_3 \sum_{k=1}^q c_k x_k, \quad (5.11)$$

$$\sum_{k=1}^q c_k x_k \leq c_{\max} \quad (5.12)$$

де: c_k - відносна нормована одиниця вартості;

q - кількість варійованих параметрів в векторі x ,

c_{\max} - максимально допустиме значення вартості виробу в безрозмірних одиницях.

Обмеження на варійовані параметри задаються у вигляді

$$x_i \min \leq x_i \leq x_i \max$$

де $x_i \min, x_i \max$ - мінімально та максимально допустимі значення i -го варійованого параметра.

Вагові коефіцієнти w_i , масштабний множник v_i , мінімальні та максимальні значення як вихідних так і вхідних параметрів - це величини, наслідком яких проводять адаптацію до об'єкта проектування і проектної ситуації.

Дослідження різних методів згортання критерію показали, що у випадку сильного переважання одного власного критерію над іншим краще використовувати методом виділення головного критерію. Сутність методу полягає в мінімізації найважливішого («головного») критерію $Q_1(\bar{x})$ при умові, що значення інших критеріїв $Q_i(x), i = 1, 2, 3, \dots, n$, не порушують деяких порогових значень Q_i^o

$$\begin{aligned} \min Q_1(\bar{x}), \\ x \in \hat{D}, \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\text{де } \hat{D} = D \cap D_0; D_0 = \{\bar{x} \mid Q_i(\bar{x}) \leq Q_i^o \quad i = 2, 3, \dots, n\}$$

Основна складність при застосуванні метода виділення головного критерію полягає в призначенні порогових значень Q_i^o . Ця постановка найбільш застосовувана на більш пізніх стадіях проектування, коли присутня детальна інформація про можливі межі змін як вхідних так і вихідних параметрів.

Розглянемо постановку оптимізаційних задач на схемо-технічному етапі проектування [11]. Основною ціллю виконання проектних процедур і операцій на даному етапі є мінімізація нестабільності вихідних характеристик схеми $\bar{F} = (F_1, F_2, \dots, F_m)$ під дією температури за рахунок ціленаправленої зміни параметрів елементів схеми. $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ (параметри активних і пасивних елементів, номінальні значення і температурні коефіцієнти). Зменшення нестабільності \bar{F} буде здійснюватися за рахунок перерозподілення потужності тепловиділення на елементах (за рахунок зміни їх параметрів), що особливо важливо для параметрів елементів з великими коефіцієнтами параметричної чутливості, і за рахунок вибору температурних коефіцієнтів. Приведемо два приклади постановки оптимізаційних задач, направлені на рішення вищенаведених проблем.

Задача 1. В основі критеріальної функції покладена математична модель МЕР, по якій визначається вихідна функціональна характеристика (ВФХ).

Знайти $\bar{x}^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\},$ (5.14)

Яке забезпечує $\min_{x \in D} Q(\bar{x}) = \sum_{k=1}^m w_k (F_k(\bar{x}(T)) - F_k^0)^2;$ (5.15)

при обмеженнях

$$G_{1k}(\bar{x}) = \sigma_T F_k - \frac{|F_k(\bar{x}(T)) - F_k^0|}{F_k^0} \geq 0, k = \overline{1, m};$$
 (5.16)

$$G_{2i}(\bar{x}) = (x_i - x \min_i)(x \max_i - x_i) \geq 0, i = \overline{1, n};$$
 (5.17)

$$G_{3i}(\bar{x}) = (T_i^0 - T_i(P(\bar{x}), \bar{z})) \geq 0, i = \overline{1, n};$$
 (5.18)

де $D = \left\{ \bar{x} \mid \bigcap_{k=1}^m G_{1k}(\bar{x}) \bigcap_{i=1}^n G_{2i}(\bar{x}) \bigcap_{i=1}^n G_{3i}(\bar{x}) \right\}$ - область пошуку оптимальних рішень.

$\bar{F} = (F_1, F_2, \dots, F_m)$ - вихідні функціональні характеристики МЕР;

$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - параметри елементів схеми (номінальні значення, температурні коефіцієнти);

F_k^0 - задане значення k-ої ВФХ;

$\sigma_T F_k$ - заданий температурний допуск на ВФХ;

T_i^0 - обмежено допустиме значення температури, визначене в ТЗ на схематичне проектування;

$T_i(P(\bar{x}), \bar{z})$ - температура яка залежить від управляючих та інших параметрів.

w_i - вагові коефіцієнти, які визначають важливість то чи іншої ВФХ.

Задача 2. В основі критеріальної функції лежить математична модель температурного поля конструкції МЕР.

Знайти $\bar{x}^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*\},$ (5.19)

Яке забезпечує $\min_{x \in D} Q(\bar{x}) = \sum_{k=1}^m w_k (T_i(p(x), z) - T_i^0)^2;$ (5.20)

при обмеженнях

$$G_{1j}(\bar{x}) = \sigma_T F_j - \frac{|F_j(\bar{x}(T)) - F_j^0|}{F_j^0} \geq 0, j = \overline{1, m};$$
 (5.21)

$$G_{2i}(\bar{x}) = (x_i - x \min_i)(x \max_i - x_i) \geq 0, i = \overline{1, n};$$
 (5.22)

$$G_{3i}(\bar{x}) = (T_i^0 - T_i(P(\bar{x}), \bar{z})) \geq 0, i = \overline{1, n};$$
 (5.23)

Де
$$w_i = \left\{ \max_{T_i} \frac{\partial F_j(x(T))}{\partial T_i}, j = \overline{1, m} \right\}, i = \overline{1, n} \quad (5.24)$$

Всі решта значень такі самі як в попередній задачі 1.

Задача 1 найчастіше застосовується при недостатній інформації про топологічні характеристики джерел тепловиділення, так як температуру можна визначити як локальну так і опосередковану. У випадку задання визначеної температури визначаємо температурні коефіцієнти елементів.

Задача 2 дозволяє більш адекватно врахувати всі параметри температурного поля і визначити параметри електричної схеми, забезпечуючи мінімум температурного поля з врахуванням обмежень, які накладаються на ВФХ і температурні допуски. Температурні допуски на даному етапі проектування визначаються шляхом вирахування тз загального заданого допуску на ВФХ передбачуваних технологічного і інших допусків.

В загальному випадку задача прийняття конструктивного рішення, що забезпечує відтворення функціональних характеристик по критерію теплоелектричної сумісності для певного класу МЕР вмістимо формулюється наступним чином: в області визначеної геометричної форми необхідно розмістити задане число різнотипних джерел температурного поля $I_i (i = \overline{1, n})$ і теплопровідних шарів $(j = \overline{1, m})$ з визначеними теплофізичними характеристиками таким чином, щоб інтегральні чи диференціальні характеристики температурного поля задовольняли умови нормального функціонування МЕР і врахуванням виконання необхідних умов і обмежень.

Сформовану задачу трансформуємо у послідовність оптимізаційних задач, формування яких потрібно здійснювати на основі часткових цільових функцій:

- а) забезпечення рівномірного розподілу температурного поля в конструкції;
- б) мінімізація максимальних локальних значень температурного поля;
- в) забезпечення потрібного температурного поля в заданих координатах чи вказаних елементів (яке не перевищує заданої величини).

В розглянутих задачах безліч обмежень можна розбити на такі групи:

- а) обмеження на значення температурного поля як в окремих координатних точках, так і у всій області пошуку рішення;
- б) обмеження на значення топологічних (геометричних) характеристик елементів, компонентів пристрою;
- в) обмеження на значення функціональних параметрів елементів (зокрема потужних характеристик), компонентів і схеми;
- г) обмеження на значення теплофізичних характеристик використовуваних матеріалів для виготовлення конструкцій пристрою.

Рішення вказаних задач проводиться шляхом забезпечення оптимальних значень:

- а) топологічних параметрів елементів;
- б) функціональні параметри елементів (параметр, температурний коефіцієнт, потужність тепловиділення);
- в) характеристик компонентів конструкції (геометричні розміри, розміщення: теплофізичне - теплопровідність, теплоємність; об'єднання - тепловий опір, тепла постійна)

Розглянемо оптимізаційні методи, розроблені на конструкторському етапі проектування гібридних інтегральних мікросхем (ГІМС).

Один із способів забезпечення температурного поля ГІМС-це введення в конструкцію додаткового шару з номером j (наприклад нанесення на підкладку з внутрішньої сторони) більш теплопровідного ніж попередній і наступний шар (наприклад клей). При цьому вводяться технологічні обмеження на коефіцієнт теплопровідності шару α , товщину h_j , а також на температурний дрейф вихідної функціональної характеристики F_i . Останнє обмеження вводиться, оскільки при покращенні рівномірності поля одночасно збільшується температура взаємовпливу між елементами. Це може спричинити збільшення температурної нестабільності F_m . Задача формулюється наступним чином:

Знайти
$$\bar{x}^* = \{a_j^*, n_j^*\}, \quad 5.25)$$

Яке забезпечує
$$\min_{x \in D} Q(\bar{x}) = \sum_{k=1}^m (T_i(\bar{x}) \max - T_k(\bar{x}) \min)^2; \quad (5.26)$$

при обмеженнях

$$G_{1j}(\bar{x}) = (a_j - a_j \min)(a_j \max - a_j) \geq 0; \quad (5.27)$$

$$G_{2j}(\bar{x}) = (h_j - h_j \min)(h_j \max - h_j) \geq 0; \quad (5.28)$$

$$G_{3m}(\bar{x}) = (F_m^+ - F_m)(F_m - F_m^-) \geq 0, m = \overline{1, M}; \quad (5.29)$$

де $D = \left\{ \bar{x} \mid \bigcap_{j=1}^N G_{1j}(\bar{x}) \bigcap_{j=1}^N G_{2j}(\bar{x}) \bigcap_{m=1}^M G_{3m}(\bar{x}) \right\}$ - область пошуку оптимальних рішень;

F_m^+, F_m^- - границі дрейфу m -й вихідної характеристики F_m під дією

температури;

m -кількість вихідних характеристик схеми.

Важливою задачею теплового проектування ГІМС є забезпечення теплового режиму навісних напівпровідникових елементів. Для цього пропонується проектувати розсіювачі температурного поля у вигляді шару із температуро провідного матеріалу, який наноситься на підкладку під кристалом. Розміри розсіювача l_x, l_y по осях x, y рівні розмірам нижньої грані кристалу a_x, b_y чи перевищують їх.

Знайти
$$\bar{x}^* = \{a_i^*, h_i^*, l_{xi}, l_{yi}\}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (5.30)$$

Яке забезпечує
$$\min_{x \in D} Q(\bar{x}) = \sum_{j=1}^I (T_i - T_{oi})^2; \quad (5.31)$$

при умовах

$$G_{1i}(\bar{x}) = (a_i - a_{i \min})(a_{i \max} - a_i) \geq 0, \quad i = \overline{1, I}; \quad (5.32)$$

$$G_{2i}(\bar{x}) = (h_i - h_{i \min})(h_{i \max} - h_i) \geq 0, \quad i = \overline{1, I}; \quad (5.33)$$

$$G_{3i}(\bar{x}) = l_{xi} - a_{xi} \geq 0, \quad i = \overline{1, I}; \quad (5.34)$$

$$G_{4i}(\bar{x}) = l_{yi} - a_{yi} \geq 0, \quad i = \overline{1, I}; \quad (5.35)$$

$$G_{5i}(\bar{x}) = l_{xi} l_{yi} - S_{oi} \leq 0, \quad i = \overline{1, I}; \quad (5.36)$$

де $D = \left\{ \bar{x} \mid \bigcap_{i=1}^N G_{1i}(\bar{x}) \bigcap_{i=1}^I G_{2i}(\bar{x}) \bigcap_{i=1}^I G_{3i}(\bar{x}) \bigcap_{i=1}^I G_{4i}(\bar{x}) \bigcap_{i=1}^I G_{5i}(\bar{x}) \right\}$ - область пошуку оптимальних

рішень;

T_i - температура навісного елемента;

S_{oi} - максимально допустима площа, яку потрібно розсіяти;

I - кількість навісних елементів, тепловий режим яких потрібно забезпечити.

При рішення даної задачі формується макромодель для визначення температури.

$$T_i = P_i(R_{ni} + R_{ki} + R_{pi} + R_{ni}) + T_{ei}, \quad (5.37)$$

де R_{ni} - i -ий тепловий опір навісного елемента відносної нижньої грані;

R_{ki} - i -ий тепловий опір кріплення кристала в розсіювачі (клей, припій);

R_{pi} - i -ий тепловий опір розсіювача;

R_{ni} - i -ий тепловий опір нижня грань розсіювача – зовнішнє середовище;

T_{ei} - температура впливу інших елементів і зовнішнього середовища на i -й навісний елемент.

Таке формулювання задачі знаходження температури навісного елемента дозволяє зменшити машинний час, який затрачається на проведення розрахунків. Дійсно, R_{ni} та R_{ki} не залежать від \bar{x} , T_{ei} також не змінюється, якщо не проводиться перерозміщення елементів. Ці величини знаходяться попередньо з використанням методики і програмного забезпечення аналізу температурного поля МЕР. В ході рішення оптимізаційної задачі проводиться перерозрахунок тільки R_{pi} та R_{ni} .

Температурне поле МЕР і тепловий режим елементів встановлюють тісний взаємозв'язок між конструкторськими параметрами пристрою і його функціональними характеристиками. Тому вони вважаються безумовно важливими задачами, які дозволяють врахувати ці взаємозв'язки в процесі проектування.

Розглянемо задачу мінімізації температурних допусків на вихідні характеристики ГІС шляхом ціленаправленого перерозміщення теплових елементів на підкладці. Мінімізація базується на автокомпенсації температурного дрейфу параметрів елементів схеми за рахунок зміни температури взаємовпливу (збільшення чи зменшення теплового взаємозв'язку). При цьому потрібно враховувати функціональну особливість схеми, виражену у вигляді різнознакових коефіцієнтів параметричної чутливості.

Якщо виразити степінь температурного взаємовпливу елементів як функції

$$\Delta T_{ij} = F(d_{ij}), \quad (5.38)$$

де d_{ij} - відстань між центрами тепловиділяючих елементів;

ΔT_{ij} - температура взаємовпливу i -го на j -ий елемент, визначення відносно власного температурного нагрівання.

Тоді, температурний допуск на вихідні параметри елементів схеми, визначаються температурою взаємовпливу у вигляді

$$\sigma F_{Tk}^2 = \sum_{i=1}^N S_i^2 (\alpha_i \Delta T_i)^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N S_i S_j \alpha_i \alpha_j \Delta T_{ij}(d_{ij}) \quad (5.39)$$

Перший доданок є температурним допуском за рахунок власного нагріву елемента $\sigma \alpha_i T = \alpha_i \Delta T_{ic}$, без врахування температури взаємовпливу. Другий доданок визначає ту частину допуску на вихідний параметр елемента, яка викликана температурою взаємовпливу.

Враховуючи те, що в схемі є різнознакові коефіцієнти чутливості, тобто збільшення температури взаємовпливу шляхом розміщення цих елементів на мінімально-можливій відстані будемо зменшувати дрейф вихідних параметрів (те саме буде відбуватися при рознесені тепловиділяючих елементів на максимальну відстань з одно знаковими коефіцієнтами чутливості), можна сформулювати критерій мінімізації температури допуску як:

$$\min Q(d_{ij}) = \sum_{i=1}^N S_i^2 (\alpha_i \Delta T_{ic})^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \sum_{j=1}^N S_i S_j \alpha_i \alpha_j \Delta T_{ij} (d_{ij}) \quad (5.40)$$

Такий критерій можна використовувати в якості власного, поряд з головним в задачах розміщення, що забезпечить оптимальність топології з точки зору мінімуму температурного дрейфу вихідних параметрів схеми.

Цю ж задачу можна розв'язувати і на технологічному етапі проектування.

Якщо звернутися до визначення температурного допуску

$$\sigma F_{Tk}^2 = \sum_{i=1}^N S_i^2 (\alpha_i \Delta T_i)^2 \quad (5.41)$$

то очевидно, що визначальними є параметри:

ΔT_i -різниця між нормальною температурою середовища і максимальною температурою в центрі тепловиділяючого елемента.

α_i -температурний коефіцієнт параметра елемента.

Шукаючи можливість мінімізації температурного допуску, розглянемо два можливі підходи.

1. Мінімізація σF_{Tk}^2 за рахунок зменшення температурного перегріву ΔT_i , які визначаються розподілом температурного поля конструкції ГІМС. Основними конструкторсько-технологічними параметрами, які визначають кількісну оцінку ΔT_i є вектор $\bar{x} = \{h_1, h_2, \dots, h_n, a_1, a_2, \dots, a_n, Ax, By\}$. В цьому випадку можна поставити задачу мінімізації максимальних температурних перегрівів:

$$\text{Визначити} \quad \bar{x}^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_i^*\} \quad (5.42)$$

забезпечує

$$\min_{x \in D} Q(\bar{x}) = \sum_{i=1}^K w_i \Delta T_i(\bar{x}); \quad (5.43)$$

при умові

$$G_i(\bar{x}) = (x_{\max_i} - x_i)(x_i - x_{\min_i}) \geq 0, \quad i = \overline{1, I}; \quad (5.44)$$

де w_i -ваговий коефіцієнт, який визначає функціональну важливість параметра елемента

$$w_i = \left\{ \max |S_i k|, \quad k = \overline{1, m} \right\}. \quad (5.45)$$

Рішення такої задачі методами нелінійної оптимізації дозволить зменшити температурний перегрів найбільш «відповідальних» за функціональні схеми параметрів елементів, що в кінцевому зменшить дрейф вихідних характеристик під впливом температури.

2. Наступний підхід полягає у виборі в якості визначального параметра температурного допуску елемента-температурного коефіцієнта α_i . Для плівкових елементів ГІМС він вважається основним якісним параметром технологічного процесу (ТП). Виходячи з цього, ставимо задачу визначення максимального значення α_i при наявності управляючої моделі ТП. Для компонентів ГІМС α_i є заданим і в даному випадку можливий вибір більш стабільних параметрів компонентів, враховуючи вирішення компромісу між збільшенням вартості компонентів і зменшенням температурного дрейфу. Таким чином при наявності моделі ТП нанесення тонких плівок, де визначена залежність $\alpha\rho_s$ від управляючих параметрів ТП

$$\alpha\rho_s = f(U_c, U_M, P, t, T), \quad (5.46)$$

можна сформулювати задачу налаштування ТП на отримання стабільних параметрів плівки, як задачу нелінійної оптимізації:

Визначити $\bar{x}_T^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*\} \quad (5.47)$

Забезпечує $\min_{x \in D} Q(\bar{x}) = \sum_{i=1}^K \alpha\rho_s(\bar{x}); \quad (5.48)$

При умові $G_1(\bar{x}) = (\rho_s(\bar{x}) - p_{s\min})(\rho_{s\max} - \rho_s(\bar{x})) \geq 0; \quad (5.49)$

$$G_2(\bar{x}) = (x_{\max_i} - x_i)(x_i - x_{\min_i}) \geq 0, \quad i = \overline{1, k}; \quad (5.50)$$

В результаті рішення такої задачі отримаємо вектор оптимальних значень керованих параметрів технологічного процесу, який забезпечує мінімальний температурний коефіцієнт плівки.

Задача вибору параметрів компонентів з більш стабільними температурними параметрами можна сформулювати як:

Визначити $\bar{\alpha}_k = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{Nk}\} \quad (5.51)$

Що забезпечує
$$\min_{x \in D} Q(\bar{\alpha}) = \sum_{i=1}^{Nk} w_i(\alpha_i \Delta T); \quad (5.52)$$

При умові

$$G_1(\bar{\alpha}) = \sum_{i=1}^{Nk} c_i \alpha_i \leq c_{зад}; \quad (5.53)$$

$$G_2(\bar{\alpha}) = (\alpha - \alpha_{\min})(\alpha_{\max} - \alpha) \geq 0. \quad (5.54)$$

де c_i - відносна вартість одиниці температурного коефіцієнта компонента, $c_{зад}$ - задана відносна вартість компонентів схеми. В результаті рішення такої задачі детермінованими методами нелінійного програмування отримаємо вектор оптимальних значень $\bar{\alpha}^*$.

Розглянуті в даному розділі оптимізаційні методи теплового проектування МЕР розроблені в ході дослідження і обробки процесу проектування гібридних інтегральних мікросборок, мікроелектронних вузлів і блоків. Наведені результати досліджень демонструють різні способи постановок та формулювання проектних задач (задача векторної оптимізації, спільні задачі схемотехнічного проектування і аналізу температурного поля, розробка критерію для системи конструкторського проектування, задача синтезу допусків). Реалізація і використання розроблених моделей дозволяють частково автоматизувати процес прийняття проектних рішень, а також підвищувати якість проєктованих виробів за рахунок більш детального обліку фізичних процесів теплообміну в конструкціях МЕР.

РОЗДІЛ 5. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ТЕХНІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

5.1. Основні поняття про вимірювання

У загальному випадку виміром називається сукупність операцій із застосування технічного засобу, що зберігає одиницю фізичної величини, що забезпечують знаходження співвідношення (у явному чи неявному вигляді) вимірюваної величини з її одиницею і отримання значення цієї величини.

Число, що виражає відношення вимірюваної величини до одиниці вимірювання, називається числовим значенням вимірюваної величини. Якщо x - вимірювана величина, u - одиниця виміру, а q - числове значення вимірюваної величини, то

$$x=qu \quad (1.1)$$

Права частина співвідношення (1.1) називається результатом вимірювання. Результат виміру - завжди розмірна величина - складається з одиниці u , яка має своє найменування, і числа q , що показує, скільки разів дана одиниця міститься в вимірюваній величині.

Існує кілька видів вимірювань. При їх класифікації виходять з характеру залежності вимірюваної величини від часу, виду рівняння вимірювань, умов визначають точність результату вимірювань і способу вираження цих результатів.

За характером залежності вимірюваної величини від часу вимірювання поділяються на:

- **статичні вимірювання** - це вимірювання фізичної величини, прийнятої відповідно до конкретної завданням за незмінну впродовж часу вимірювання;
- **динамічні вимірювання** - вимірювання, що змінюється за розміром фізичної величини.

За способом отримання результатів вимірювань (виду рівняння вимірювань) їх поділяють на:

- **прямі виміри** - виміри, при яких шукане значення величини знаходять безпосередньо. При цьому вимірювану величину порівнюють з мірою вимірювальними приладами, градуйованими в необхідних одиницях;

- **непрямі вимірювання** - визначення шуканого значення фізичної величини на підставі результатів прямих вимірювань інших фізичних величин, функціонально пов'язаних з шуканою величиною;

- **сукупні вимірювання** - проводяться одночасно вимірювання кількох однойменних величин, при яких шукане значення величини визначають шляхом розв'язання системи рівнянь, отриманих при прямих вимірах різних сполучень цих величин. Прикладом сукупних вимірювань є визначення маси окремих важок набору (калібрування за відомою масою однієї з них і за результатами прямих порівнянь мас різних сполучень важок);

- **спільні виміри** - вироблені одночасно вимірювання двох або кількох які однойменних величин для визначення залежності між ними. Як приклад спільних вимірів можна назвати вимірювання електричного опору при 200°C і температурних коефіцієнтів вимірювального резистора за даними прямих вимірювань його опору при різних температурах.

За способом вираження результату вимірювань вимірювання ділять на:

- **абсолютні вимірювання** - засновані на прямих вимірюваннях однієї або декількох основних величин і використанні значень фізичних констант;

- **відносні вимірювання** - вимірювання відношення величини до однойменної величини, що відіграє роль одиниці, або вимірювання велич по відношенню до однойменної величини, прийнятої за вихідну.

По використовуваному методу вимірювання (сукупності прийомів використання принципів і засобів вимірювань) вимірювання поділяються

- **метод безпосередньої оцінки** - метод вимірювань, при якому значення величини визначають безпосередньо по що показує засобу вимірювань;

- **метод порівняння з мірою** - метод вимірювань, в якому вимірювану величину порівнюють з величиною, що відтворюється мірою. Цей метод має наступні модифікації:

- а) *метод доповнення* - метод порівняння з мірою, у якому значення

вимірюваної величини доповнюється мірою цієї ж величини з таким розрахунком, щоб на прилад порівняння впливала їх сума, рівна заздалегідь заданому значенню;

б) *диференційний метод вимірювань* - метод вимірювань, при якому вимірювана величина порівнюється з однорідної величиною, що має відоме значення, незначно відрізняється від значення вимірюваної величини, при якому вимірюється різниця між цими двома величинами;

в) *нульовий метод* - метод порівняння з мірою, у якому результуючий ефект впливу вимірюваної величини і заходи на прилад порівняння доводять до нуля;

г) *метод вимірювання заміщенням* - метод порівняння з мірою, у якому вимірювану величину заміщують заходом з відомим значенням величини.

Основними характеристиками вимірів є:

- **принцип вимірювань** - фізичне явище або ефект, покладене в основу вимірювань;

- **метод вимірювань** - прийом або сукупність прийомів порівняння вимірюваної величини з її одиницею відповідно до реалізованим принципом вимірювань;

- **методика вимірювань** - встановлена сукупність операцій і правил при вимірюванні, виконання яких забезпечує одержання необхідних результатів вимірювань з гарантованою точністю відповідно до прийнятого методом;

- **похибка вимірювань** - відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини;

- **вага вимірювань** - позитивне число, що служить оцінкою довіри до того чи іншого окремого результату вимірювань, що входить в ряд неравноточних вимірів (зазвичай результату з більшою похибкою приписують вагу, рівний одиниці, а решта ваги знаходять по відношенню до нього);

- **збіжність вимірювань** - близькість один до одного результатів вимірювань однієї і тієї ж величини, виконаних повторно одними і тими ж засобами, одним і тим же методом в однакових умовах і з однаковою ретельністю;

- **відтворюваність вимірювань** - близькість результатів вимірювань однієї і тей величини, отриманих в різних місцях, різними методами, різними засобами вимірювань, різними операторами, в різний час, але наведені до одних і тих же умов вимірювань (температурі, тиску, вологості та ін.) .

5.2. Засоби вимірювання

Засіб вимірювань (ЗВ) - технічний засіб, призначений для вимірювань, має нормовані метрологічні характеристики, що відтворює і (або) зберігає одиницю фізичної величини, розмір якої приймається незмінним в межах встановленої похибки протягом відомого інтервалу часу.

За конструктивним виконанням ЗВ поділяються на:

- **міра** - засіб вимірювань, призначений для відтворення і (або) зберігання фізичної величини одного або декількох заданих розмірів, значення яких виражені у встановлених одиницях і відомі з необхідною точністю. Як приклад можна навести: нормальний елемент - міра ЕРС, кварцовий генератор - міра частоти електричних коливань і т.д. Заходи підрозділяють на однозначні, багатозначні, набори заходів, магазини заходів, установочні;

- **вимірювальний прилад** - засіб вимірювань, призначений для отримання значень вимірюваної фізичної величини у встановленому діапазоні. Вимірювальний прилад, як правило, містить пристрій для перетворення вимірюваної величини в сигнал вимірювальної інформації і його індикації у формі, найбільш доступною для спостерігача. За ступенем індикації значень вимірюваної величини вимірювальні прилади поділяються на показують і реєструють. Розрізняють прилади прямої дії та прилади порівняння;

- **вимірювальний пристрій** - частина вимірювального приладу (установки або системи), пов'язана з вимірювальним сигналом і має відокремлену конструкцію та призначення. вимірювальним пристроєм може бути названо реєструючий пристрій вимірювального приладу (що включає стрічку для запису, механізм протягування стрічки і пишучий елемент); вимірювальний перетворювач - технічний засіб, що служить для перетворення

вимірюваної величини в іншу величину або сигнал вимірювальної інформації, зручною для обробки, зберігання, подальшого перетворення, індикації або передачі і має нормовані метрологічні характеристики. Вимірювальний перетворювач (ВП) або входить до складу будь-якого вимірювального приладу (вимірювальної установки, вимірювальної системи та ін.) Або ж застосовується з яким-небудь засобом вимірювання. За характером перетворення розрізняють; аналогові, цифро-аналогові, аналого-цифрові перетворювачі. За місцем в вимірювальній ланцюга розрізняють:

а) **первинний вимірювальний перетворювач** - вимірювальний перетворювач, на який безпосередньо впливає вимірювана фізична величина, тобто перший перетворювач в вимірювальній ланцюга вимірювального приладу (установки, системи). Конструктивно відокремлений первинний перетворювач, від якого надходять вимірювальні сигнали (він "дає" інформацію) називається датчиком;

б) **передавальний вимірювальний перетворювач** - вимірювальний перетворювач, призначений для дистанційної передачі сигналу вимірювальної інформації;

в) **масштабний вимірювальний перетворювач** - вимірювальний перетворювач, призначений для зміни розміру величини в заданий число раз;

• **вимірювальна установка** - сукупність функціонально об'єднаних заходів, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів та інших пристроїв, призначених для вимірювання однієї або декількох фізичних величин і розташована в одному місці. Вимірювальну установку з включеним в неї зразковим засобом вимірювань і застосовувану для повірки називають повірочною установкою. Вимірювальну установку, що входить до складу еталона, називають еталонною установкою. Вимірювальну установку, призначену для випробувань будь-яких виробів називають випробувальним стендом;

• **вимірювальна система** - сукупність функціонально об'єднаних заходів, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів, ЕОМ та інших технічних засобів, розміщених у різних точках контрольованого простору

(середовища, об'єкта і т.п.) З метою вимірювань однієї або декількох фізичних величин, властивих цьому простору (об'єкту, середовищу і т.п.).

За рівнем автоматизації ЗВ поділяються на:

- **неавтоматичний засіб вимірювань** - засіб вимірювань, що не має пристроїв для автоматичного виконання вимірювань і обробки їх результатів;
- **автоматизований засіб вимірювань** - засіб вимірювань, що виробляє в автоматичному режимі одну або частину вимірювальних операцій;
- **автоматичний засіб вимірювань** - засіб вимірювань, що виробляє в автоматичному режимі вимірювання і всі операції, пов'язані з обробкою результатів вимірювань, їх реєстрацією, передачею даних або виробленням керуючого сигналу.

З метрологічного призначенням ЗВ поділяються на:

- **робочий засіб вимірювань** - засіб вимірювань, призначений для вимірів не пов'язаних з передачею розміру одиниці іншим засобам вимірювання. До них відносяться засоби вимірювань, що застосовуються в наукових цілях, при контролі параметрів продукції і технологічних процесів, в астрономії, в геодезії і т. п.;
- **метрологічний засіб вимірювань** - засіб вимірювань, призначений для метрологічних цілей: відтворення одиниці і (або) її зберігання або передача розміру одиниці робочим засобам вимірювань. До них відносять еталони, зразкові засоби вимірювань, перевірочні установки, засоби порівняння (компаратори), стандартні зразки.

По відношенню до вимірюваної фізичної величиною розрізняють:

- **основний засіб вимірювань** - засіб вимірювань тієї фізичної величини, значення якої необхідно отримати відповідно до вимірювальної завданням;
- **допоміжний засіб вимірювань** - засіб вимірювань тієї фізичної величини, вплив якої на основний засіб вимірювань або об'єкт вимірювань необхідно врахувати для отримання результатів вимірювань необхідної точності.

З метою систематизації та раціонального підходу до розробки і використання технічних засобів автоматизації для всього різноманіття процесів

і виробництв була побудована Державна система промислових приладів і засобів автоматизації (ДСП), в основу якої покладені певні системотехнічні принципи.

Основні схематичні принципи побудови ДСП:

- поділ приладів за функціональною ознакою;
- мінімізація номенклатури на основі створення параметричних рядів, уніфікованих систем і агрегованих комплексів;
- блочно-модульний принцип побудови приладів на основі типових блоків і модулів;
- сумісність приладів і пристроїв ДСП на основі:
 - а) уніфікації сигналів зв'язку між електричними, пневматичними і гідравлічними приладами;
 - б) уніфікації конструктивів і приєднувальних розмірів;
 - в) уніфікації технічних і експлуатаційних вимог.

За функціональною ознакою виробу ДСП поділяються на такі групи:

1. Пристрої отримання інформації про стан процесу - первинні технічні перетворювачі (давачі).
2. Пристрої прийому, перетворення і передачі інформації з каналів зв'язку. Об'єднують в собі комутатори вимірювальних ланцюгів, перетворювачі сигналів і кодів, телемеханічні пристрої вимірювання, сигналізації та управління.
3. Пристрої обробки, зберігання та подання інформації та пристрої формування команд управління. У цю групу входять аналізатори сигналів, функціональні та операційні перетворювачі, логічні пристрої, регулятори, керуючі обчислювальні пристрої та комплекси.
4. Пристрої використання командної інформації на об'єкті управління - виконавчі механізми, підсилювачі потужності.

З точки зору виконуваної функції **пристрої першої групи** - давачі не є складними: вони перетворюють вимірюваний параметр в зручний для передачі та обробки сигнал. З точки зору принципу дії і конструктивного виконання пристрою цієї групи є досить складними. Вони встановлюються на об'єкті і

безпосередньо взаємодіють з регульованим параметром або контрольованим середовищем. Вид вимірюваного параметра, умови монтажу та експлуатації різко обмежують можливості уніфікації давачів. Для вимірювання одного параметра в залежності від необхідних технічних характеристик і умов експлуатації застосовується велика кількість різних типів давачів (наприклад, більше шістдесяти типів давачів тиску, більше п'ятдесяти типів давачів перепаду тиску і т.д.).

Номенклатура засобів отримання інформації про технологічні параметри процесу може бути розбита на такі основні групи:

- засоби вимірювання теплоенергетичних параметрів - температури, тиску, перепаду тиску, рівня, витрат;
- засоби вимірювання геометричних розмірів, переміщень, зусиль і деформацій;
- засоби визначення складу та властивостей речовин;
- засоби вимірювання маси і дозувальна техніка;
- засоби неруйнівного контролю якості продукції.

Пристрої **другої функціональної групи** можна розділити на дві підгрупи:

- нормуючі і міжсистемні перетворювачі;
- пристрої для телемеханічної передачі інформації.

Нормуючі перетворювачі призначені для посилення і масштабування (нормування) сигналів, міжсистемні перетворювачі призначені для перетворення виду сигналу або виду енергії сигналу. Ці перетворювачі дозволяють здійснити дистанційну передачу сигналів на відстань до трьох кілометрів, і призначені для керування об'єктами з зосередженими параметрами. Для управління об'єктами з розподіленими (розосередженими) параметрами застосовуються телемеханічні системи передачі інформації. У цих системах використовують радіоканали, лінії зв'язку та лінії електропередачі з ущільненням і почерговою передачею даних по одному каналу.

Пристрої третьої групи призначені для формальної і змістовної обробки інформації та формування управляючих впливів. Сюди входять показують і

реєструють прилади, регулятори, блоки арифметичних і логічних перетворень, електронні обчислювальні машини, універсальні і спеціалізовані контролери. З об'єктом пристрої цієї групи не взаємодіють безпосередньо і сприймають вхідні уніфіковані сигнали, кількість яких обмежена стандартами. У функціональному відношенні ця група є найскладнішою, оскільки саме дані засоби реалізують всі алгоритми регулювання та управління від найпростіших режимів стабілізації параметра до автоматизації управління великими і складними підприємствами. Оскільки пристрої цієї групи безпосередньо з об'єктом не пов'язані і оперують з абстрактними моделями, їм властива універсальність використання і висока ступінь уніфікації.

Пристрої четвертої групи - виконавчі пристрої, як і датчики з точки зору виконуваної функції вельми прості і безпосередньо взаємодіють з об'єктом. Однак від них не потрібно такої високої точності та різноманітності параметрів, як від датчиків. Крім того, виконавчі пристрої, як правило, складаються з виконавчого механізму і регулюючого органу. Часто регулюючі органи є складовою частиною основного технологічного обладнання і поставляються разом з ним.

За родом використовуваної енергії виробу ДСП поділяються на:

- електричні;
- пневматичні;
- гідравлічні.

У ДСП входять також пристрої, що працюють без використання допоміжної енергії (прилади та регулятори прямої дії).

В АСУ складними технологічними процесами застосовуються, як правило, прилади усіх трьох гілок. Зв'язок електричних, пневматичних і гідравлічних приладів здійснюється за допомогою перетворювачів сигналів.

5.3. Інформаційно-вимірювальні системи

Інформаційно-вимірювальна система (ІВС) - сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних

засобів для отримання виміральної інформації, її перетворення, обробки з метою представлення споживачеві (в тому числі введення в САПР та АСУ) в необхідному вигляді, або автоматичного здійснення логічних функцій вимірювання, контролю, діагностування, ідентифікації (розпізнавання образів).

Будь-яка ІВС володіє необхідними функціональними можливостями, технічні та інші характеристики вирішальною мірою визначаються об'єктом дослідження, для якого дана система створюється.

Призначення ІВС можна визначити як цілеспрямоване оптимальне ведення вимірального процесу та забезпечення суміжних систем вищого рівня достовірною інформацією. Виходячи з цього, основні функції ІВС такі: отримання виміральної інформації від об'єкта дослідження, її обробка, передача, подання інформації оператору і (або) ЕОМ, запам'ятовування, відображення і формування керуючих впливів.

Ступінь досягнення функцій прийнято характеризувати за допомогою критеріїв виміру. ІВС оптимізують за багатьма частковим критеріям, таким як точність, завадостійкість, надійність, пропускна здатність, адаптивність, складність, економічність та ін.

Склад і структура конкретної ІВС визначається загальними технічними вимогами, встановленими ДСТУ, і конкретними вимогами, що містяться в технічному завданні на її створення.

ІВС повинна управляти вимірвальним процесом або експериментом у відповідності з прийнятим критерієм функціонування; виконувати покладені на неї функції відповідно до призначення і метою; володіти необхідними показниками і характеристиками точності, надійності і швидкодії; відповідати економічним вимогам, що пред'являються до способів і формою представлення інформації, розміщення технічних засобів; бути пристосованою до функціонування з ІВС суміжних рівнів ієрархії, тобто мати властивості технічної, інформаційної та метрологічної сумісності; допускати можливість подальшої модернізації та розвитку та ін.

Спрощена схема взаємодії основних компонентів ІВС представлена на

рис. 1.1.

Процесом функціонування ІВС (як і будь-який інший технічної системи) є цілеспрямоване перетворення вхідної інформації у вихідну. Це перетворення виконується або автоматично комплексом технічних засобів (технічним забезпеченням), або спільно-оперативним персоналом і КТЗ в складних ІВС,

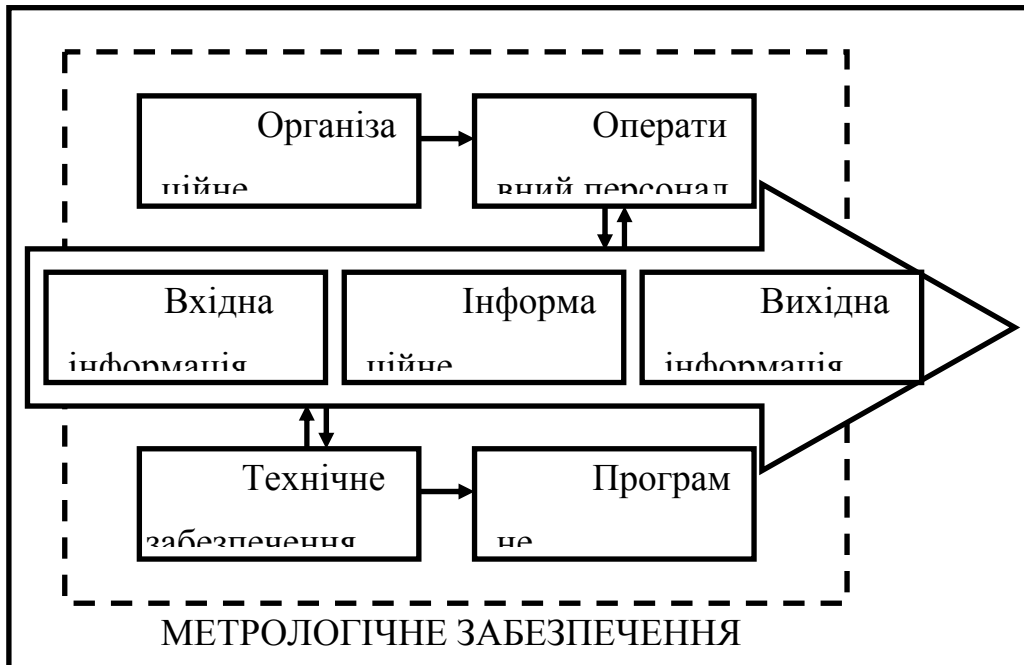


Рис. 1.1. Основні компоненти інформаційно-вимірювальних вимірювально-керуючих системах. Щоб люди і комплекс технічних засобів могли функціонувати оптимально, необхідні відповідні інструкції та правила. Це завдання виконує організаційне забезпечення.

Математичне, програмне та інформаційне забезпечення входить до складу лише ІВС з цифровим обчислювальним комплексом.

- **Математичне забезпечення** - це моделі та обчислювальні алгоритми.
- **Програмне забезпечення** гарантує конкретну реалізацію обчислювальних алгоритмів і алгоритмів функціонування системи, охоплює коло рішень, пов'язаних з розробкою та експлуатацією програм.
- **Інформаційне забезпечення** визначає способи і конкретні форми інформаційного відображення стану об'єкта дослідження у вигляді документів, діаграм, графіків, сигналів для їх подання обслуговуючому персоналу і ЕОМ для подальшого використання в управлінні.

Всю систему в цілому охоплює метрологічне забезпечення.

Технічні засоби ІВС складаються з таких блоків:

- 1) множини первинних вимірювальних перетворювачів (давачів);
- 2) множини вторинних вимірювальних перетворювачів;
- 3) множини елементів порівняння - мір;
- 4) блоку цифрових пристроїв;
- 5) множини елементів опису - норм;
- 6) множини перетворювачів сигналу, засобів відображення, пам'яті та ін.

Блоки 1-6 використовують у цифрових ІВС; блоки 1, 2, 3 і 6 - в аналогових ІВС.

При наявності у складі ІВС ЕОМ інформація до ЕОМ може надходити безпосередньо від пристроїв обробки та (або) зберігання.

Кожного конкретного виду ІВС притаманні численні особливості, що визначаються вузьким призначенням систем та їх технологічно-конструктивним виконанням. Через різноманіття видів ІВС до теперішнього часу не існує загальноприйнятої їх класифікації.

Найбільш поширеною є класифікація ІВС за функціональним призначенням. За цією ознакою ІВС реалізуються у вигляді: вимірювальних систем (ВС); систем автоматичного контролю (САК); систем технічної діагностики (СТД); систем розпізнавання образів (ідентифікації) (СРО); телевимірювальних систем (ТВС).

Власне ВС використовуються для різного роду комплексних досліджень наукового характеру. Вони призначені для роботи з об'єктами, що характеризуються до початку експерименту мінімумом апріорної інформації. Мета створення таких систем полягає в отриманні максимальної кількості достовірної вимірювальної інформації про об'єкт для складання алгоритмічного опису його поведінки.

Зворотній зв'язок системи з об'єктом відсутній або носить допоміжний характер. Інформація, отримана на виході ВС, може використовуватися для прийняття будь-яких рішень, створення збудуючих впливів, але не для управління об'єктом. ВС призначена для створення додаткових умов проведення експерименту, для вивчення реакції об'єкта на ці впливи. Отже,

використання інформації не входить у функції ВС. Ця інформація надається людині-оператору або надходить в засоби автоматичної обробки інформації.

Для ВС характерні:

- більш високі по відношенню до систем іншого виду вимоги до метрологічних характеристик;
- більш широкий спектр вимірюваних фізичних величин і особливо їх кількість (число вимірювальних каналів);
- необхідність в засобах представлення інформації - це пов'язано з тим, що основний масив інформації з виходу систем передається людині для прийняття ним рішення про зміну умов проведення експерименту, його продовження або припинення. Тому визначальним вимогою є неспотворене, наочне і оперативне подання поточної інформації з урахуванням динаміки її оновлення і швидкодії системи, що забезпечує зручність сприйняття та аналізу людиною;
- великий обсяг зовнішньої пам'яті для систем, в яких обробка та аналіз результатів вимірювань виконуються після завершення процесу експерименту за допомогою набору різних засобів обробки і представлення інформації.

Класифікація ВС за функціональним призначенням представлена на рис. 1.2, де:

"А" - ВС для прямих вимірювань, т. Е. Незалежних вимірювань дискретних значень безперервних величин;

"Б" - статистичні ВС, призначені для вимірювання статистичних характеристик вимірюваних величин;

"В" - системи, призначені для роздільного вимірювання залежних величин.

Найбільш поширені системи для прямих вимірювань. Вхідними в ВС для прямих вимірювань є величини, що сприймаються давачами або іншими вхідними пристроями системи. Завдання таких ВС полягає у виконанні аналого-цифрових перетворень безлічі величин та видачі отриманих результатів вимірювання.



Рис. 1.2. Класифікація ВС за функціональним призначенням

У розглянутих ВС основні типи вимірюваних вхідних величин можуть бути зведені або до безлічі змінюються в часі t величин $\{x_i(t)\} j, i = 1, 2, \dots, n$, або до мінливих у часі і розподіленої по простору S неперервної функції $x(t, S)$. При вимірюванні неперервна функція $x(t, S)$ представляється безліччю дискретів $x(t_i, S_j), i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, 3$.

Вимірювальні системи, що проводять вимірювання дискретів функції $x(t, S)$, засновані на використанні багатоканальних, багато точкових, мультиплікованих і скануючих структур.

Багатоканальні системи паралельної дії об'єднуються в один з найпоширеніших класів вимірювальних систем паралельної дії, що застосовуються у всіх галузях народного господарства. Основні причини такого широкого розповсюдження багатоканальних ВС полягають у можливості використання стандартних, відносно простих, вимірювальних приладів, в найбільш високою схемної надійності таких систем, в можливості отримання найбільшої швидкодії при одночасному отриманні результатів вимірювання, у можливості індивідуального підбору СІ до вимірюваних величин. Недоліки таких систем - складність і велика вартість у порівнянні з іншими системами.

Мультипліковані (із загальною зразковою величиною) ВС мають меншу

кількість елементів, ніж багатоканальні паралельні ВС, але дещо меншу швидкодію. У цих системах вимірювальна величина порівнюється з лінійно змінною величиною. При фіксованих моментах початку розгортки і рівності x і x_k може бути визначений інтервал часу t_x , пропорційний значенню x_k . У багатоканальній системі виникають труднощі в поділі сигналів від елементів порівняння. У цьому випадку вдаються до спеціальних мір.

У скануючих ВС (ВС послідовної дії) - операції отримання інформації виконуються послідовно в часі за допомогою одного каналу вимірювання. Якщо вимірювана величина розподілена в просторі або власне координати точки є об'єктом вимірювання, то сприйняття інформації в таких системах виконується за допомогою одного скануючого датчика. Скануючі системи знаходять застосування при розшифровці графіків в медицині, геофізиці, метрології, при промислових випробуваннях, у багатьох галузях народного господарства і при наукових дослідженнях витрачається значний час на вимірювання параметрів графічних зображень і представлення результатів вимірювання в цифровому вигляді. Сканування може виконуватися безпосередньо сприймає елементом або скануючим променем при нерухомому сприймаючому елементі. Такими елементами можуть бути оптико-механічні або електронно-розгортаючі пристрої. Недолік систем - низька швидкодія.

Багато точкові ВС (ВС послідовно-паралельної дії) застосовують у складних об'єктах з великою кількістю вимірюваних параметрів. У цих системах при безлічі давачів є всього один вимірювальний тракт і вимірювальний комутатор. Недолік систем - знижена швидкодія і точність за рахунок використання ключів комутаторів.

За характером взаємодії системи з об'єктом дослідження та обміну інформацією між ними ІВС можуть бути розділені на активні і пасивні.

Пасивні системи тільки сприймають інформацію від об'єкта, а активні, діючи на об'єкт через пристрій зовнішніх впливів, дозволяють автоматично і найбільш повно за короткий час вивчити його поведінку. Такі структури широко застосовуються при автоматизації наукових досліджень різних об'єктів.

Залежно від характеру обміну інформацією між об'єктами і активними

ІВС розрізняють ВС без зворотного зв'язку і зі зворотним зв'язком по впливу. Вплив на об'єкт може здійснюватися за заздалегідь встановленою жорсткою програмою чи за програмою, яка враховує реакцію об'єкта. У першому випадку реакція об'єкта не впливає на характер впливу, а отже, і на хід експерименту. Його результати можуть бути видані оператору після закінчення. У другому випадку результати реакції відбиваються на характері впливу, тому обробка ведеться в реальному часі. Такі системи повинні мати розвинену обчислювальну мережу. Крім того, необхідно оперативне подання інформації оператору у формі, зручній для сприйняття, з тим щоб він міг втручатися в хід процесу.

Ефективність наукових досліджень, випробувальних, повірочних робіт, організації управління технологічними процесами із застосуванням ІВС значною мірою визначається методами обробки вимірювальної інформації.

Операції обробки вимірювальної інформації виконуються в пристроях, які використовують спеціалізовані або універсальні ЕОМ. У деяких випадках функції обробки результатів вимірювання можуть здійснюватися безпосередньо у вимірювальному тракті, тобто вимірювальними пристроями в реальному масштабі часу.

У системах, які містять обчислювальні пристрої, обробка інформації може здійснюватися як в реальному масштабі часу, так і з попереднім накопиченням інформації в пам'яті ЕОМ, тобто із зсувом за часом.

При дослідженні складних об'єктів або виконанні багатofакторних експериментів застосовуються вимірювальні системи, що поєднують високу швидкодію з точністю. Такі ІВС характеризуються великими потоками інформації на їх виході. Значно підвищити ефективність ІВС при недостатній апріорної інформації про об'єкт дослідження можна за рахунок скорочення надмірності інформації, тобто скорочення інтенсивності потоків вимірювальної інформації. Виключення надлишкової інформації, несуттєвої з точки зору її споживача, дозволяє зменшити ємність пристроїв пам'яті, завантаження пристроїв обробки даних, а отже, і час обробки інформації, що знижує вимоги до пропускнуої спроможності каналів зв'язку.

При проектуванні і створенні ІВС велика увага приділяється проблемі підвищення достовірності вихідної інформації і зниження вірогідності виникнення (або навіть виключення) небажаних ситуацій. Цього можна досягти, якщо на ІВС покласти функції самоконтролю, в результаті чого ІВС здатна здійснювати тестові перевірки працездатності засобів системи і тим самим зберігати метрологічні характеристики тракту проходження вхідних сигналів, перевіряти достовірність результатів обробки інформації, одержуваної за допомогою вимірювальних перетворень, і її уявлення.

Все більш широкий розвиток отримують системи, що передбачають автоматичну корекцію своїх характеристик - самоналагоджувальні (самокорегуючі) системи.

Введення в такі системи властивостей автоматичного використання результатів самоконтролю - активного вивчення стану ІВС - і пристосовується до зміни характеристик вимірюваних сигналів або до зміни умов експлуатації уможливорює забезпечення заданих параметрів системи.

Висновки

Визначено основні поняття про вимірювання.

Дано характеристику вимірювальної величини.

Проведено аналіз методів та засобів вимірювань.

Розроблено основні види забезпечення інформаційно-вимірювальної системи.

РОЗДІЛ 6. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

6.1. Поняття вимірювання температури

Вимірювання температур поряд з вимірами інших величин має дуже важливе значення в науці і техніці. Сучасне промислове виробництво немислимо без температурного контролю. Досить вказати на такі галузі промисловості, як чорна та кольорова металургія, хімічна і нафтопереробна промисловість, у багатьох технологічних процесах яких температурний контроль має вирішальне значення.

Температурою називають величину, що характеризує тепловий стан тіла. Згідно кінетичної теорії температурою називають фізичну величину, кількісно характеризує міру середньої кінетичної енергії теплового руху молекул будь-якого тіла або речовини.

З визначення температури слід, що вона не може бути виміряна безпосередньо і судити про неї можна по зміні інших фізичних властивостей тіл (об'єму, тиску, електричного опору, термо-ЕРС, інтенсивності випромінювання і т.д.). Ці властивості тіл називають термометричними, а речовини, що характеризуються такими властивостями, також називаються термометричними. З цієї причини неможливо створити еталон температури, подібно до того, як створюються еталони інших величин.

Засіб вимірювання температури називають **термометром**.

6.2. Класифікація засобів вимірювання температури

Всі типи термометрів прийнято розбивати на два класи залежно від методики вимірювань (рис. 2.1). Традиційний і найбільш масовий вид термометрів - контактні термометри, відмінною рисою яких є необхідність теплового контакту між датчиком термометра і середовищем, температура якої

вимірюється. Другу групу складають безконтактні термометри, для вимірювання якими немає необхідності в тепловому контакті середовища і приладу, а досить вимірювань власного теплового або оптичного випромінювання.

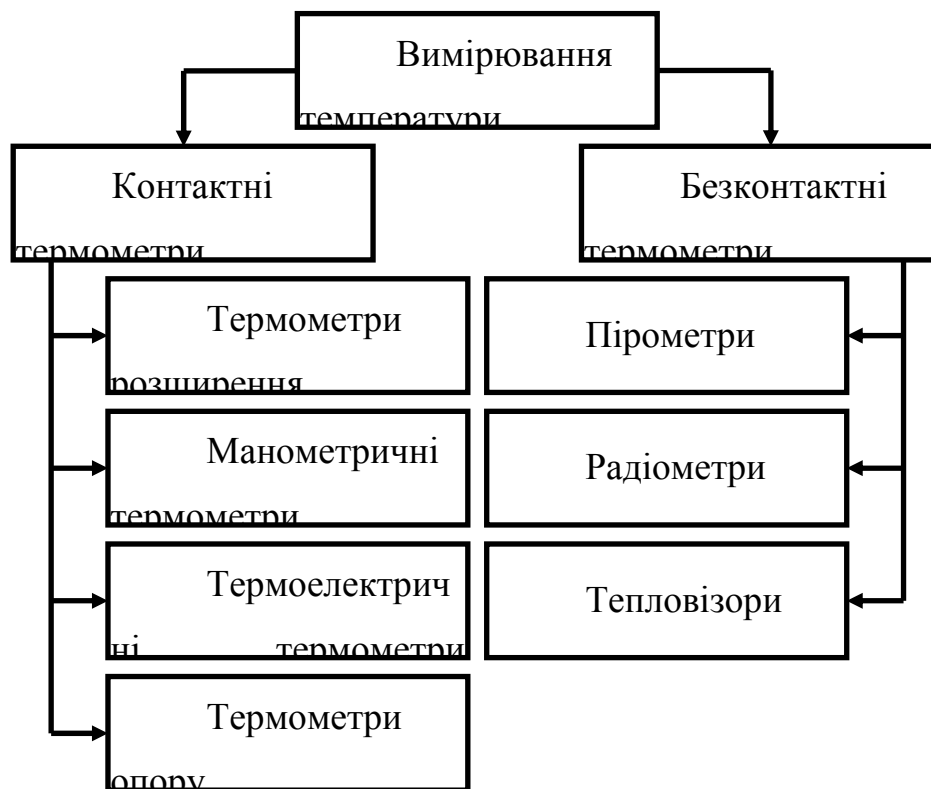


Рис.6.1. Класифікація засобів вимірювання

Контактні прилади та методи за принципом дії поділяються

а) **термометри розширення**, принцип дії яких заснований на залежності об'ємного розширення рідини і лінійних розмірів твердих тіл від температури;

б) **манометричні термометри**, принцип дії яких заснований на зміні тиску робочого (термометричного) речовини залежно від температури;

в) **термоелектричні термометри (термопари)**, принцип дії яких заснований на використанні залежності термоелектрорушійної сили від температури;

г) **термометри опору**, принцип дії яких заснований на залежності електричного опору чутливого елемента (провідника або напівпровідника) від температури.

Безконтактні методи, в основі яких лежить реєстрація власного теплового

або оптичного випромінювання, можна представити такими напрямками:

а) **пірометрія** - вимірювання температури самосвітних об'єктів:

полум'я, плазми, астрофізичних об'єктів;

б) **радіометрія** - вимірювання температури за власним тепловому випромінюванню тіл. Для невисоких і кімнатних температур це випромінювання знаходиться в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль;

в) **тепlobачення** - радіометричне вимірювання температури з просторовим розрішенням і з перетворенням температурного поля в телевізійне зображення, іноді з колірним контрастом. Дозволяє вимірювати градієнти температури, температуру середовища в замкнутих об'ємах, наприклад, температуру рідин в резервуарах і трубах.

6.3. Термоелектричні термометри

6.3.1. Основні поняття та визначення

Вимірювання температури термоелектричними термометрами (термоелектричними перетворювачами, ТЕП) засновано на використанні відкритого в 1821 році німецьким фізиком Т. Зеєбеком термоелектричного ефекту, що полягає в генеруванні термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС), що виникає через різниці температур між двома з'єднаннями різних металів або сплавів, утворюють частину одного і того ж ланцюга.

У найпростішому випадку, якщо ланцюг складається з 2-х різнорідних матеріалів, то він носить назву термопари.

Під термоелектричним термометром прийнято розуміти комплект, що складається з:

- 1) термопари, що здійснює перетворення температури в електричну напругу;
- 2) ліній зв'язку (подовжувальних проводів);
- 3) вторинного приладу для вимірювання термо-ЕРС.

6.3.2. Принцип дії

Термопара є ланцюг, що складається з двох з'єднаних між собою

різномірних провідників **A** і **B** (рис.2.2). Ці провідники називаються **термоелектродами**, місця з'єднання термоелектродів - **спаями**. Спай з температурою t , занурюваний в вимірюване середовище, називають робочим (вимірювальним) спаєм термопар, другий спай з температурою t_0 носить назву вільного (з'єднувального).

Зеєбеком було встановлено, що якщо температури t_0 і t не рівні, то в такому колі протікатиме електричний струм I_t . Напрямок струму залежить від різниці температур спаїв. При розмиканні такого ланцюга на кінцях може бути виміряна термо-ЕРС. Цей ефект володіє і зворотною дією, тобто якщо через такий ланцюг пропустити електричний струм, то в залежності від напрямку струму один з спаїв буде нагріватися, а інший охолоджуватися (ефект Пельтьє).

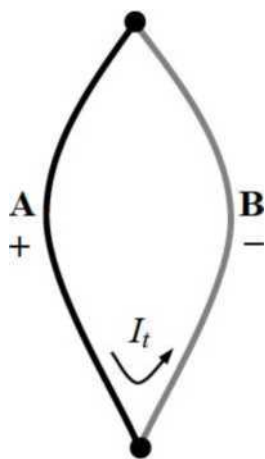


Рис. 2.2. Схема контуру термопар

Виникнення термострумів пояснюється так: при з'єднанні однаково нагрітих кінців двох провідників з різномірних матеріалів, з яких у першому кількість вільних електронів в одиниці об'єму більше, ніж у другому, останні будуть дифундувати з першого провідника в другий більше, ніж назад. Таким чином, перший провідник стане заряджатися позитивно, а другий - негативно. Утворене при цьому в місці з'єднання провідників електричне поле буде протидіяти цій дифузії, в результаті чого настане стан рухомої рівноваги, при якому між вільними кінцями вказаних провідників з'явиться деяка різниця потенціалів (термо-ЕРС). Зі збільшенням температури провідників значення цієї термо-ЕРС також збільшується. Крім того, термо-ЕРС виникає і між

кінцями однорідного провідника, що мають різні температури. У цьому випадку до настання стану рухомого рівноваги позитивно заряджається більш нагрітий кінець провідника як володіє більшою концентрацією вільних електронів в порівнянні з менш нагрітим кінцем. Зростання різниці температур між кінцями провідника приводить до збільшення термо-ЕРС яка виникає в ньому.

Так два цих чинники - контактна різниця потенціалів і дифузія електронів - є складовими результуючої термо-ЕРС ланцюга, значення якої залежить від природи термоелектродів і різниці температур спаїв ТЕП.

У замкнутому ланцюзі, що складається із двох різнорідних провідників, при рівності температур спаїв ($t = t_0$) термострум I_t дорівнює нулю. Таким чином, якщо спаї мають одну і ту ж температуру (t_0), то контактні ЕРС в кожному спаї рівні між собою і спрямовані назустріч один одному. Результуюча термо-ЕРС контуру в цьому випадку дорівнює:

$$E_{AB}(t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) - e_{AB}(t_0) = 0$$

$$\text{або з врахуванням того, що } e_{AB}(t_0) = -e_{BA}(t_0),$$

$$E_{AB}(t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BA}(t_0) = 0$$

тобто результуюча термо-ЕРС контуру дорівнює арифметичній сумі контактних термо-ЕРС (черговість запису термоелектродів відповідає напрямку обходу контуру).

Для замкнутого ланцюга

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0), \text{ або } E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (2.1)$$

Рівняння (2.1) називають основним рівнянням ТЕП. З нього випливає, що термо-ЕРС, яка виникає в контурі, залежить від різниці функцій температур t і t_0 . Якщо зробити температуру вільних кінців постійною $t_0 = const$, то

$$e_{AB}(t_0) = C = const \text{ і } E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - C = f(t).$$

При відомій залежності $E(t, t_0) = f(t)$ шляхом вимірювання термо-ЕРС може бути знайдена температура t , якщо $t_0 = const$.

В даний час немає прийнятною теорії, здатної передбачити залежність $E(t, t_0) = f(t)$ в явному вигляді, що ускладнює градування ТЕП. При вимірюванні температури t для різних ТЕП ця залежність визначається експериментальним

шляхом градуванням і побудовою залежності термо-ЕРС від вимірюваної температури. При градуванні температура $t_0 = const$. Її значення в РФ стандартизовано, $t_0 = 0^\circ C$. На практиці для різних ТЕП зазвичай використовують стандартні градувальні таблиці.

6.3.3. Включення вимірювального приладу в ланцюг термопари

Для вимірювання термо-ЕРС, що продукується термопарою, в ланцюг включають вимірювальний прилад за однією з двох схем (рис. 2.3). Обидві схеми можна представити як включення в ланцюг третього провідника С, тому схема вимірювального приладу увазі замикання ланцюга термопари за допомогою послідовного включення третього провідника (як правило, мідного) з якого виконана вимірювальна рамка приладу, підганяльні опори і т.д. У цьому випадку в місцях приєднання провідника С утворюються додаткові спаї, які продукують власні термо-ЕРС, що вносить похибку в сумарну термо-ЕРС термопари.

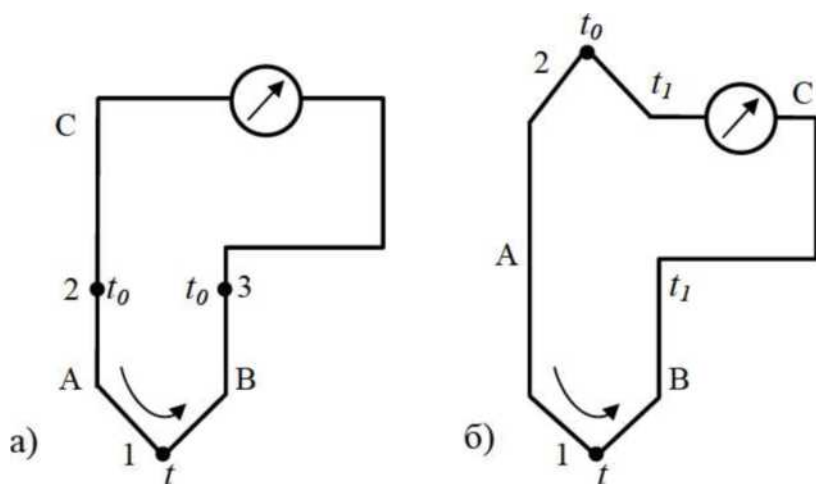


Рис. 2.3. Підключення вимірювального приладу в ланцюг термопари:

а) ланцюг з третім провідником С, включеним в спай термопари;

б) ланцюг з третім провідником С, включеним в електрод термопари

При першому з'єднанні (рис. 2.3, а) - один спай робочий (точка 1), два вільних (точки 2 і 3). При другому включенні (рис. 2.3, б) - один спай робочий (точка 1), один вільний (точка 2) і два нейтральних при постійній температурі t_1 .

Покажемо, що термо-ЕРС, яка продукується в обох випадках, однакова.

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0).$$

Якщо $t=t_0$, то

$$E_{ABC}(t_0, t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0).$$

Тоді

$$-e_{AB}(t_0) = e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0)$$

або

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0).$$

Для ланцюга (рис. 2.3.б) отримаємо

$$E_{ABC}(t, t_1, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1) + e_{CB}(t_0) + e_{BA}(t_0),$$

так як $e_{BC}(t_1) = -e_{CB}(t_1)$, $e_{AB}(t_0) = -e_{BA}(t_0)$, то

$$E_{ABC}(t, t_1, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0). \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) збігається з основним рівнянням ТЕП (2.1), отже, термоЕРС ТЕП не зміниться від введення в ланцюг третього провідника при рівності температур його кінців. Цей висновок може бути застосовано до будь-якої кількості провідників і вимірювальних приладів. Найчастіше вимірювальний прилад приєднують до термопари за схемою, наведеною на рис. 2.3, а.

6.3.4. Подовжувальні (компенсаційні) термоелектродні дроти

Як було сказано вище, в комплект термоелектричного термометра, крім термопари і вимірювального приладу ВП входять подовжувальні дроти, якими з'єднуються клеми термопари і затискачі вимірювального приладу. Причому довжина цих проводів в кожному випадку індивідуальна і залежить від взаємного розташування термопари і вимірювального приладу. У цьому випадку в вимірювальному ланцюзі з'являються два додаткових провідники: F і D (рис. 2.4).

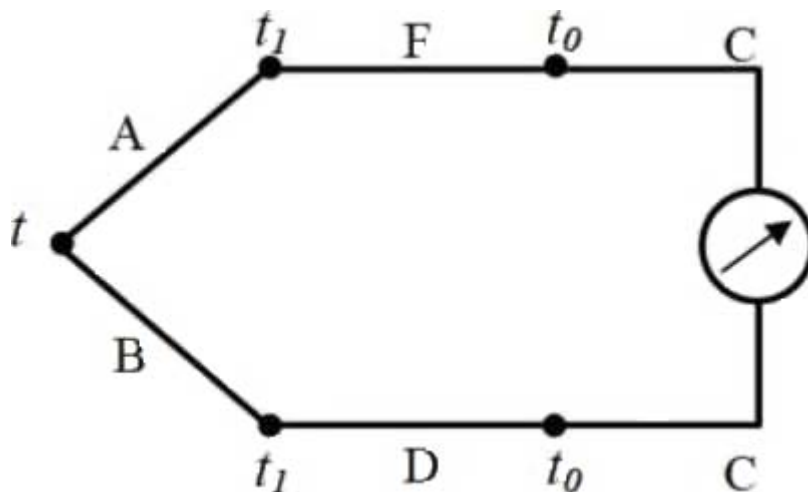


Рис. 2.4. Вимірювальна схема

термоелектричного термометра з подовжувальними

При прокладанні сполучної лінії між термopарою і вимірювальним приладом вільні кінці термометра, що знаходяться на затискачах в його головці, будуть розташовані близько нагрітих поверхонь, тобто в зоні змінної температури t_j . Щоб віднести ці кінці в зону з постійною і більш низькою температурою t_0 , застосовуються так звані термоелектродні подовжувальні (компенсаційні) дроти, що складаються з двох жил, виготовлених з металів або сплавів, що мають однакові або схожі термоелектричні властивості з термоелектродами термометра.

За допомогою подовжувальних проводів проводиться «наращування» термоелектродів термометра, що дозволяє віднести вільні кінці від місця його установки в більш сприятливі умови.

Для термометрів з неблагородних металів подовжувальні дроти виготовляються найчастіше з тих же матеріалів, що і термоелектроди, тоді як для термометрів з благородних металів з метою здешевлення подовжувальні проводи виконуються з матеріалів, які продукують в парі між собою приблизно ту ж термо-ЕРС, що і термометр, для якого вони призначені. Щоб уникнути неправильного підключення компенсаційного дроту, ізоляція його жил має певне забарвлення, залежно від використовуваного матеріалу. У табл. 2.1 наведені характеристики основних типів компенсаційних проводів.

Таблиця 2.1

Характеристики компенсаційних проводів і їх застосовність

	компенсаційний провід		
		матеріал проводу	кolor ізоляції (відповідно)
мель-копелева		мель - копель	металевий - жовтий
мель-алюмелева		мель - алюмель	металевий - білий
		мель - константан	металевий - коричневий
гетерогенний-платинова		мель - сплав ТП	металевий - зелений

Якщо термоелектродні дроти правильно вибрані і підключені до ТЕП, то місця їх підключення до вимірювального приладу розглядають як вільні кінці.

Термоелектродні дроти підбираються таким чином, що в парі вони мають характеристику, збігається з характеристикою використовуваного ТЕП в інтервалі температур від $t_0=0^{\circ}\text{C}$ до $t\approx 100-120^{\circ}\text{C}$, тобто $E_{FD}(t_1, t_0)=E_{AB}(t_1, t_0)$.

Тоді отримаємо $E=E_{AB}(t, t_1)+E_{FD}(t_1, t_0)=E_{AB}(t, t_0)$, тобто включення в ланцюг ТЕП термоелектродних проводів не створює в ланцюзі паразитних термо-ЕРС і не спотворює результатів вимірювань.

Як правило, вимірювальний прилад розташовується в приміщенні, де ведеться спостереження за температурою (приміщення операторної), в якому температура більш стабільна, ніж у зоні, де знаходяться клеми термопари. Але все-таки температура в цій зоні (кімнатна температура) відрізняється від температури градування термопари (0°C) і також, хоч і в малій мірі, схильна до коливань. У цьому випадку сумарна термо-ЕРС термометра буде занижена (у випадку, якщо температура в зоні вільних кінців $> 0^{\circ}\text{C}$) на величину термо-ЕРС між навколишньою температурою і градувальною.

У цьому зв'язку вільні кінці термопари або підлягають термостатуванню, або в показання термоелектричного термометра повинна бути внесена поправка.

6.3.5. Поправка на температуру вільних кінців термопари

Термостатування.

У лабораторних умовах температуру вільних кінців зазвичай підтримують рівною 0°C . Для цієї мети вільні кінці термоелектричного термометра, спаяні з мідними провідниками, занурюють у скляні пробірки з невеликою кількістю масла, поміщені, в свою чергу, в посудину Дьюара, наповнений льодом, який топиться. При цьому необхідно, щоб вільні кінці були занурені в лід на глибину не менше (100-150) мм. При цьому способі компенсація температури вільних кінців не потрібно.

Якщо при вимірюванні температури не потрібна висока точність і при цьому температура в приміщенні, де проводяться вимірювання, змінюється непомітно, то вільні кінці термометра можуть перебувати при цій температурі, проте в цьому випадку їх слід занурити в посудину, заповнену маслом, температура якого повинна контролюватися з допомогою скляного термометра.

Цей спосіб підтримання постійної температури вільних кінців дозволяє контролювати їх температуру з похибкою $\pm(0,2-0,5)^\circ\text{C}$.

Введення поправки.

Для більшості випадків вимірювання температури в промислових умовах термостатування не є прийнятним варіантом зважаючи громіздкість термостатуючих пристроїв і потреби в постійному за ними спостереженні. У цьому випадку необхідно вводити поправку на температуру вільних кінців. Вона повинна компенсувати різницю між градуировальною температурою $t_0(0^\circ\text{C})$ і поточною температурою в приміщенні t'_0 .

Існують два способи введення поправки: ручний і автоматичний.

Ручний спосіб вимагає наявності допоміжного термометра (наприклад, ртутного) для вимірювання температури t'_0 і градуировальної таблиці відповідного ТЕП.

Алгоритм введення поправки такий.

1) За допомогою вимірювального приладу визначається термо-ЕРС термопари $E(t, t'_0)$ при температурі вільних кінців t'_0 .

2) За показами допоміжного термометра визначається текуче значення t'_0 .

3) За градуировальною таблицею знаходить значення термо-ЕРС $E(t'_0, t_0)$, що відповідає величині поправки між $|t'_0 - t_0|$.

4) Скориговане значення термо-ЕРС визначається за формулою

$$E(t'_0, t_0) = E(t, t'_0) \pm E(t'_0, t_0) \quad (2.3)$$

Знак «+» вибираємо, коли температура $t'_0 > 0$, а «-», коли температура $t'_0 < 0$.

В даний час широко застосовується **автоматичне** введення поправки на температуру вільних кінців ТЕП за допомогою спеціальних компенсуючих пристроїв, що не вимагає забезпечення постійного значення температури. Ці пристрої розташовуються окремо або вбудовуються у вторинний прилад.

Компенсуючий міст (рис.2.5) – це неврівноважений міст з постійними манганіновим резисторами R_1, R_2, R_3 і мідним резистором R_M . Діагональ **ав**

підключена до джерела живлення ІПС через навантажувальний опір R_H , призначений для зміни напруги живлення моста при переході до перетворювачів з різним градуванням.

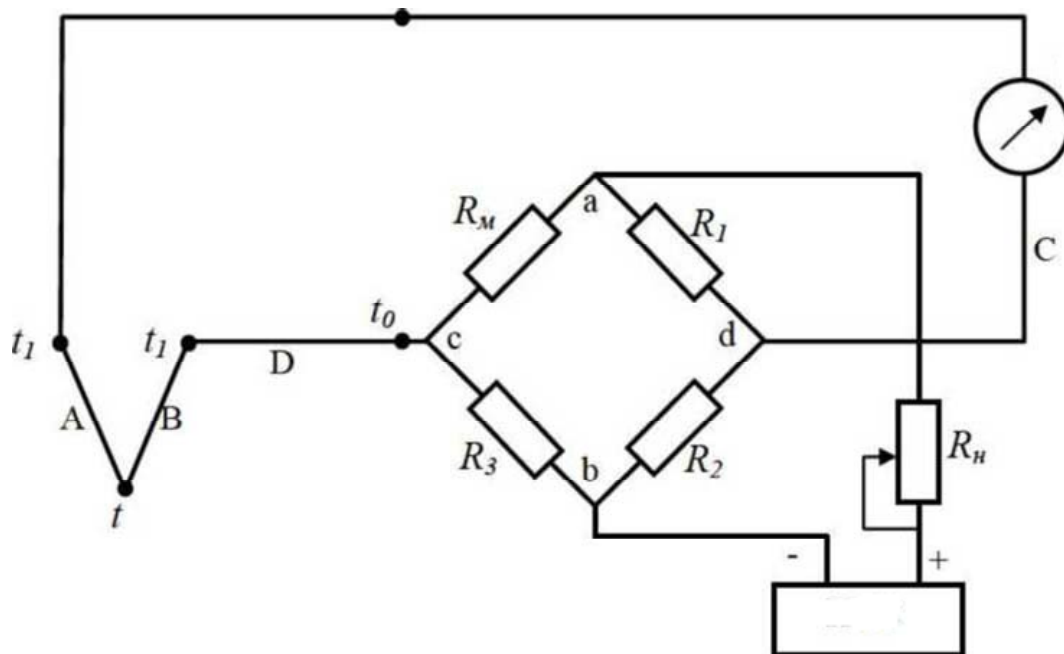


Рис.2.5. Схема автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців термопари

Вимірювальна діагональ cd включена в розрив між подовжувальним проводом F і з'єднувальним проводом C . При $t=0^\circ C$ міст знаходиться в рівновазі, тобто $U_{CD} = 0$. При підвищенні температури вільних кінців опір резистора R_M , розташованого поруч з кінцями подовжувальних проводів F і D , також зростає, в результаті чого в діагоналі з'явиться напруга U_{CD} . Дана напруга компенсує відсутню термо-ЕРС на значення поправки

$$U_{CD} = E_{AB}(t'_0, t_0)$$

тобто на виході вимірювального приладу термо-ЕРС дорівнює

$$E_{AB}(t'_0, t_0) + U_{CD} = E_{AB}(t, t_0)$$

6.3.6. Термоелектродні матеріали та типи термопар

Значення термо-ЕРС залежить від матеріалу термоелектродів і температури робочого і вільного решт термометра. Як термоелектроди, переважно застосовуються ті метали і сплави, які продукують порівняно великі

термо-ЕРС. Застосування термометрів з більш високими значеннями термо-ЕРС збільшують надійність вимірювання температури. Створювана термометрами термо-ЕРС порівняно невелика - вона становить не більше 8 мВ на кожні 100°C і при вимірюванні найвищих температур не перевищує 70 мВ.

До термоелектродних матеріалів, призначених для виготовлення термоелектричних термометрів, ставлять ряд вимог:

- жаростійкість і механічна міцність;
- хімічна інертність;
- термоелектрична однорідність;
- стабільність і відтворюваність термоелектричної характеристики;
- однозначна, бажано близька до лінійної, залежність термо-ЕРС від температури;
- висока чутливість.

Жоден з існуючих нині матеріалів не задовольняє всім вимогам, тому для різних меж вимірювання використовуються термоелектроди з різних матеріалів.

Для виготовлення термометрів як термоелектродні матеріали застосовують, головним чином, чисті метали і їх сплави. Найбільшого поширення набули матеріали: платина, платинородій, хромель, алюмель і копель. Для вимірювань в лабораторних установках знаходять також застосування мідь, залізо, константан та ін.

Міждержавний стандарт ГОСТ 6616-94 «Перетворювачі термоелектричні. Загальні технічні умови», введений в дію з 1 січня 1999. У стандарті нормалізовані вимоги до дванадцяти типів термоелектричних перетворювачів (табл. 2.3).

Перетворювачі термоелектричні на основі благородних і тугоплавких металів.

Термоперетворювачі вольфрамрений-вольфрамрениєві (ТВР) мають найвищу межу тривалого застосування - 2200°C, але тільки в неокислювальних середовищах, так як на повітрі вже при температурі 600°C відбувається дуже швидке окислення н руйнування термоелектродів. Термопара стійка в аргоні,

гелії, сухому водні і азоті, а також у вакуумі. Основний недолік - погана відтворюваність термо-ЕРС, що змушує групувати термоелектродні пари по групах з номінальними статичними характеристиками А-1; А-2, А-3.

Термоперетворювачі платинородій-платинові (ТПП 10 і ТПП 13). Найчастіше використовуються в металургійному виробництві та при термообробці в діапазоні 1000÷1600°C. Модифікація ТПП 13 широко застосовується на Заході. Термопари ТПП 10 використовуються також як еталонні засоби. За сукупністю властивостей платина і платинородієві сплави є унікальними матеріалами для термопар. Їх основна властивість - гарний опір газової корозії, особливо на повітрі при високих температурах. Вказана властивість у сполученні з високою температурою плавлення і чималою термо-ЕРС, хорошою сумісністю з багатьма ізолюючими та захисними матеріалами, і навіть з гарною технологічністю та відтворюваністю метрологічних параметрів, робить їх незамінними при виготовленні електродів термопар для вимірювання найвищих температур в окисних середовищах. Ці сплави стійкі в аргоні і гелії, що не розчиняють азот і водень, не утворюють нітридів і гідридів, не взаємодіють з СО і СО₂.

До недоліків даних ТЕП можна віднести високу чутливість термоелектродів до будь забруднень, які з'являтимуться при виготовленні, монтажі або експлуатації ТЕП, а також їх високу вартість.

Хімічний склад основних типів ТЕП і межі вимірюваних температур

Таблиця 2.2

термопар	начення градуювання	начення градуювання (МЕК)*	хімічний склад термоелектродів, %мас		вимірювання температур, °С		
			позитивний	негативний	мінімум	максимум	точка
ель-алюмелева			5 Cr	і+2Al+2.5Mn			
ель-копелева			5 Cr	42-44)Ni+0.5Mn+0,1 Fe			
ель-константанова			5 Cr	40-45)Ni+U)Mn+0,7Fe			
копелева				42-44)Ni+0,5Mn+0,1 Fe			
константанова				40-45)Ni+1,0Mn+0.7Fe			
о-константанова				40-45)Ni+1,0Mn+0,7Fe			
осил-нісилова			1.2Cr+1.4Si	4Si+0.1Mg			
х-снлинова			Cr+0,9Si	-2.8)Si			
инородій-			0Rli				
инородій-			0Rh	Rh			
фрамреній-		A-2;A-3	%Rc	0Re			

*МЕК – міжнародний електротехнічний комітет

Термоперетворювачі платинородій-платинородієві (ТПР). Особливістю ТЕРП типу ТПР є дуже мала термо-ЕРС, при 20°C

- 0,002 мВ, при 120 ° С - 0,04 мВ, тому вона не вимагає введення поправки на температуру холодного спаю.

Перетворювачі термоелектричні на основі неблагородних металів.

Термоперетворювачі хромель-копелеві (ТХК) володіють найбільшою диференціальною чутливістю зі всіх промислових ТЕРП, застосовуються для точних вимірювань температури, а також для вимірювань малих температурних різниць. ТХК властива виключно висока термоелектрична стабільність при нагрівах до 600°C, обумовлена тим, що зміни термо-ЕРС хромелевого і копелевого термоелектродів направлені в одну і ту ж сторону і компенсують один одного. Технічний ресурс термопар може становити кілька десятків тисяч годин. До недоліків ТХК можна віднести відносно високу чутливість до деформації.

Термоперетворювачі хромель-алюмелеві (ТХА) є самими поширеними термоперетворювачами в промисловості та наукових дослідженнях. ТХА призначена для вимірювання температури до 1200 ° С (довгостроково) і 1300 ° С (короткочасно) в окислювальних та інертних середовищах. Термоперетворювач широко використовується у всіх галузях промисловості: у печах, нагрівальних пристроях, енергосилового устаткування. Номінальна статична характеристика ТХА близька до лінійної, диференційна термо-ЕРС близько 40 мкВ / °С у всьому діапазоні вимірюваних температур. Головна перевага ТХА порівняно з іншими термопарами з неблагородних металів полягає в значно більшій стійкості до окислення при високих температурах. Технічний ресурс термопар при температурах менше 850°C обмежується тільки дрейфом термо-ЕРС, так як жаростійкість хромелю і алюмелю дозволяє використовувати їх при цих температурах десятки тисяч годин. До недоліків ТХА належать притаманні їй два види нестабільності термо-ЕРС: оборотна циклічна нестабільність і необоротна нестабільність, що накопичується з часом.

На рис.2.6 наведено градувальні залежності стандартних, найбільш поширених термопар.

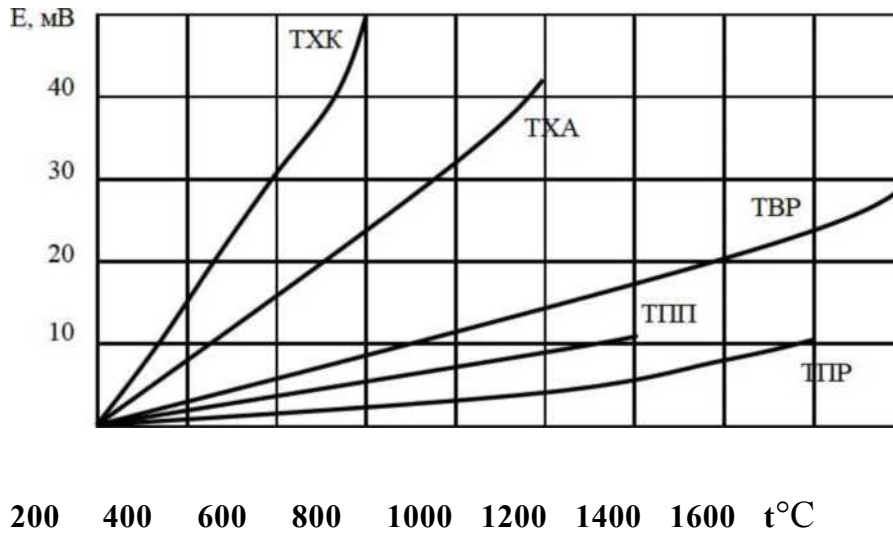


Рис. 2.6. Градувальні залежності основних типів термопар

6.3.7. Конструкція термопар

Конструктивне виконання термопар визначається умовами їх застосування.

За типом виконання стандартні ТЕП поділяються на:

- а) занурювані і поверхневі;
- б) стаціонарні і переносні;
- в) одинарні, подвійні і потрійні;
- г) однозонні і багатозонні;
- д) звичайні, водозахищені, вибухобезпечні і т.д.

Можливі різні поєднання цих виконань.

Конструктивно термоелектричний перетворювач є два дроти з різнорідних матеріалів, що нагріваються. Кінці скручуються, а потім зварюються або спаюються. Конструктивне оформлення термопар різноманітне. На рис 2.7 представлена конструкція термопар, яка найчастіше використовується для вимірювання температури в трубопроводах та інших апаратах, що знаходяться під тиском.

Для захисту від механічних пошкоджень і дії середовища, температура якої вимірюється, електроди ТЕП, армовані ізоляцією, поміщаються в спеціальну захисну арматуру. У перетворювачах, які застосовують для вимірювання температури різних середовищ, арматура складається із захисного чохла 7, нерухомого або пересувного штуцера 5 з сальниковим ущільненням

(на малюнку не показано) і головки 7, міцно приєднаної до захисного чохла. У головці, забезпеченою кришкою 8 і штуцером під кабель 9, поміщена розетка 6 з ізоляційного матеріалу з клемами для приєднання термоелектродів 2 і проводів, що з'єднують термопару з вимірювальним приладом або перетворювачем.

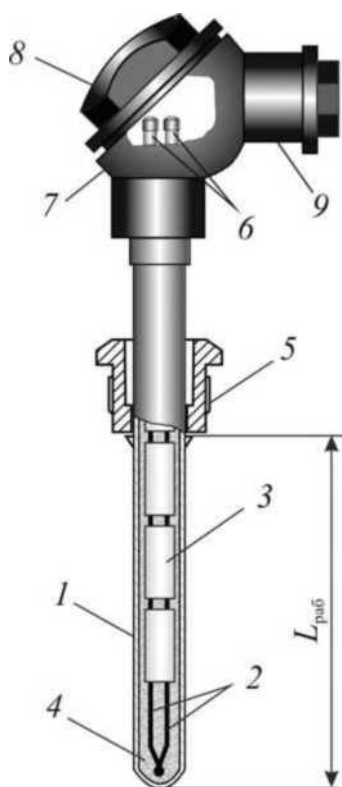


Рис. 2.7. Конструкція термопари: 1 - захисний чохол; 2 - термоелектроди; 3 - ізоляційні намиста; 4 - порошок; 5 - штуцер; 6 - розетка з клемми; 7 - головка; 8 - кришка; 9 - штуцер під кабель

Для виготовлення ізоляції термоелектродів термометра застосовуються одно- або двоканальні трубки або сфери 3 з порцеляни (при температурі до 1300°C) і оксидів алюмінію, магнію або берилію (понад 1300°C), що надягають на термоелектроди. Вільний простір між термоелектродами і захисним чохлом заповнено порошком окису алюмінію 4 для поліпшення теплопередачі.

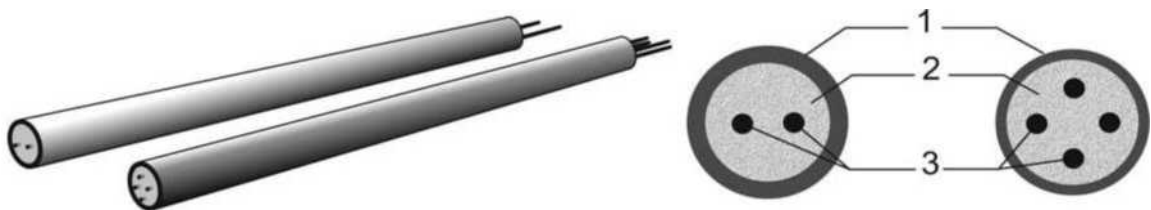
Довжина монтажної (робочої) частини $L_{роб}$, занурюваної в середовище,

температуру якого вимірюють, є різною для кожного конкретного типу ТЕП.

Робочий кінець термопари можна виконувати шляхом зварювання, пайки або скрутки. Найбільшого поширення набув спосіб виготовлення спаю за допомогою зварювання, а пайку застосовують тільки в спеціальних випадках. Скрутку робочого кінця часто застосовують для термоелектричних термометрів вольфрамрениєвих і вольфраммолібденових груп. Зварку електродів ТЕП виробляють як з попередньою скруткою термоелектродів, так і без скрутки. Ще одним варіантом виготовлення спаю робочого кінця є приварка електродів до дна захисного чохла.

Випускаються одинарні (з одним чутливим елементом) і подвійні (із двома чутливими елементами) термоелектричні перетворювачі різних типів. Подвійні термопари застосовуються для вимірювання температури в одному і тому ж місці одночасно двома вторинними приладами, встановленими в різних пунктах спостереження. Вони містять два однакових чутливих елементи, укладених в загальну арматуру. Термоелектроди є ізольовані один від одного і захисного чохла.

В даний час у всьому світі широкого поширення набули термоелектричні перетворювачі, що виготовляються з термопарного кабелю (рис. 2.8). Це гнучка металева трубка з, розміщеними всередині, однією або двома парами



термоелектродів, розташованими паралельно один одному. Простір навколо термоелектродів заповнено сильно ущільненою дрібнодисперсною мінеральною ізоляцією.

Рис. 2.8. Термопарний кабель з однією або двома парами термоелектродів:

1 - оболонка кабелю; 2 - мінеральна ізоляція (MgO); 3 - термоелектроди

Виготовляють термопарний кабель з двома типами термоелектродів:

КТМС-ХА і КТМС-ХК (кабель термопарний з мінеральною ізоляцією в сталевій оболонці з хромель-алюмелеві або хромель-копелеві термоелектроди) діаметром від 0,9 до 7,2 мм з ізоляцією з електротехнічного периклазу. Оболонка кабелю виготовлена з жаростійкої сталі або сплаву. Термопарний кабель за рахунок високої щільності заповнення периклазом витримує вигин на 180° навколо циліндра діаметром, рівним п'ятикратному діаметру кабелю.

До переваг кабельних термопар можна віднести:

- більш високі термоелектрична стабільність і робочий ресурс в порівнянні з дротяними термоперетворювачами (в 2-3 рази);
- можливість вигину, монтажу у важкодоступних місцях, в кабельних каналах, при цьому довжина ТП може досягати 60-100 метрів. Термопари можна приварювати, припаювати або просто притискати до поверхні для вимірювання її температури;
- малий показник теплової інерції, що дозволяє застосовувати їх для реєстрації швидкоплинних процесів;
- універсальність застосування для різних умов експлуатації, хороша технологічність, мала матеріаломісткість;
- здатність витримувати великі робочі тиски;
- можливість виготовлення на їх основі термоперетворювачів в захисних чохлах блочно-модульного виконання, що забезпечують додатковий захист термоелектродів від дії робочого середовища і створюють можливість оперативної заміни чутливого елемента.

6.3.8. Основні джерела похибки при вимірюванні температури за допомогою термопар

Серед джерел похибок можна виділити як явища, специфічні тільки для термопар, так і загальні (шуми і перешкоди), характерні для будь-яких вимірювальних систем. Розглянемо коротко ці явища і методи їх нейтралізації.

Поганий контакт в місці спаю і розкалібрування.

Для з'єднання різнорідних металів між собою найчастіше застосовуються пайка припоєм і зварювання. При температурах, близьких до точки плавлення припою, можливе порушення контакту і навіть розрив термопари (цю ситуацію

можна виявити по зміні характеристик термопари). Термопари, з'єднані за допомогою зварювання, витримують більш високі температури, однак при зварюванні структура і хімічний склад провідників можуть деградувати, що призводить до виникнення похибок.

Розкалібрування термопари (виникнення невідповідності робочої характеристики термопари до калібрувального полінома) також може бути результатом хімічної зміни матеріалу термоелектродів під дією високих температур. Щоб зменшити такі похибки, можна вдаватися до повторної калібрування або заміні термопари.

Шунтування термопари і гальванічний ефект.

При високих температурах електричний опір матеріалів ізоляційних оболонок термоелектродів знижується і може стати менше омичного опору самих електродів. Це еквівалентно включенню в ланцюг термопари шунтуючого резистора і утворення нового паразитного спаю, що має температуру, відмінну від вимірюваної.

Також при високих температурах, особливо при вимірюванні температури рідини, можливе утворення (проникнення) електроліту всередину термопари і виникненню гальванічного ефекту, також приводить до помилок вимірювання.

Шуми і перешкоди.

Оскільки вихідний сигнал термопари дуже малий, необхідно приймати спеціальні заходи для зниження рівня шумів (і відповідно похибки вимірювання). Коротко зупинимося на найбільш важливих з них.

1) Сполучні провідники для підключення термопар повинні бути виготовлені з матеріалів з коефіцієнтом Зеєбека, максимально близьким до матеріалів термопари.

2) Необхідно прагнути до максимального скорочення довжини з'єднувальних провідників між термопарою і цифровим вимірювальним пристроєм. У разі великого видалення термопари від вимірювального пристрою слід використовувати наявні в безпосередній близькості від термопар спеціальні модулі нормалізації сигналів, що перетворюють термо-ЕРС в

струмовий сигнал (наприклад, 4-20 мА) або безпосередньо в цифровий відлік. Крім того, ці модулі, як правило, забезпечують гальванічну розв'язку сигналів і містять пристрої компенсації холодного спаю. Додаткові витрати окуповуються надійністю, точністю і стабільністю роботи системи.

3) Як можна ширше використовувати екранування термопар і з'єднувальних провідників для боротьби з перешкодами загального вигляду, особливо якщо провідники проходять поряд з джерелами наведень і перешкод, а також при вимірах в електропровідних середовищах.

4) Використовувати фільтрацію сигналів для зниження рівня високочастотних перешкод.

5) При багатоканальних вимірювальних системах використовувати метод тимчасового відключення не використовуваних у даний момент груп каналів для запобігання підсумовування їх шумів з сигналом вимірюваного каналу.

6) Використовувати провідники, які не відводять тепло від вимірюваної зони.

6.3.9. Засоби вимірювання сигналів термопар

Для вимірювання термо-ЕРС, що продукується термопарами, використовуються магнітоелектричні мілівольтметри, потенціометри та нормуючі перетворювачі.

Магнітоелектричний мілівольтметр.

Найпростішим приладом, яким вимірюють термо-ЕРС термопар, є мілівольтметр. Мілівольтметри є електровимірювальними приладами магнітоелектричної системи (рис. 2.9).

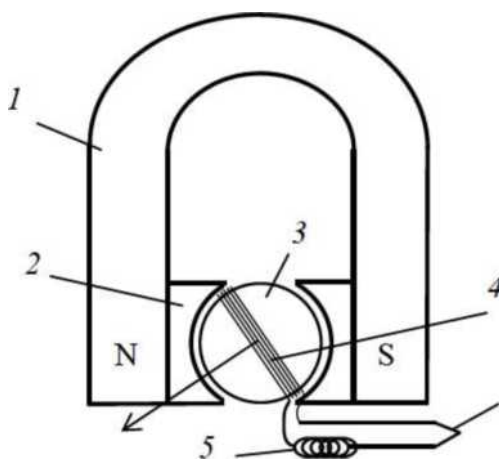


Рис. 2.9. Мілівольтметр: 1 - магніт; 2 - полюсні наконечники; 3 - сердечник; 4 - рамка; 5 - спіральна пружина;

У конструкції мілівольтметрів можна виділити магнітну і рухому системи. Перша складається з підковоподібного магніту 1, полюсних наконечників 2 і циліндричного сердечника 3. Наявність сердечника в міжполюсному просторі магніту зменшує магнітний опір і формує радіальний магнітний потік.

У кільцевому повітряному зазорі між полюсними наконечниками 2 і сердечником 3 обертається рамка 4, виготовлена з ізолюваного мідного дроту і вмонтована на кернях, які спираються на підп'ятники, або на натягнутих нитках.

Момент сил, що протидіє обертанню рамки, створюється спеціальною пружиною 5, що служить одночасно струмопроводом до рамки. З допомогою тягарців магнітна система врівноважується так, щоб її центр ваги знаходився на осі рамки. Рамка - це прямокутник довжиною l і шириною $2r$ і складається з n витків тонкого мідного дроту, скріпленого між собою лаком. Завдяки сердечникові, розташованому всередині рамки, остання опиняється під дією рівномірного і радіального магнітного поля, через що, незалежно від кута повороту рамки, площина є паралельною до вектора магнітної індукції B . Таким чином, при протіканні по рамці електричного струму I на рухому систему діє магнітоелектричний момент:

$$M = 2rIBl \quad (2.4)$$

Протидіючий момент $M_{\text{пр}}$, створюваний спіральною пружиною:

$$M_{\text{пр}} = W\varphi \quad (2.5)$$

де W - питомий протидіючий момент, (φ - кут повороту рамки. При деякому куті повороту φ маємо $M_{\text{пр}} = M$, тобто

$$W\varphi = 2rIBl \quad \text{або} \quad \varphi = \frac{2rIBl}{W} I = S_i I$$

де $S_i = \frac{2rIBl}{W} = \frac{\varphi}{I}$ - чутливість вимірюваного механізму по струму (рад/А).

Залежність кута повороту рамки від напруги U , підведеного до затискачів

приладу з внутрішнім опором R_m дорівнює

$$\varphi = S_i \frac{U}{R_m} I = S_u U \quad (2.6)$$

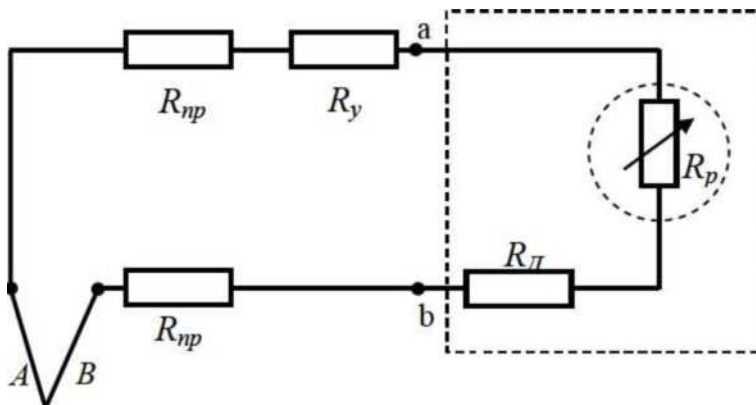
де $S_u = \frac{S_i}{R_m} = \varphi / U$ - чутливість приладу по напрузі.

Вимірювання термо-ЕРС здійснюється за схемою, наведеною на рис.2.10.

Генерована ТЕП термо-ЕРС $E_{AB}(t, t_0)$ створює в замкнутому ланцюзі струм

$$I = \frac{E_{AB}(t, t_0)}{R_{AB} + R_{np} + R_{np} + R_y + R_p + R_d} = \frac{E_{AB}(t, t_0)}{R_{BH} + R_m} \quad (2.7)$$

де R_y - опір зрівняльної катушки, R_y - опір додаткової катушки, R_{np} - опір підвідних проводів, $R_{BH} = R_{AB} + R_{np} + R_{np} + R_y$ - зовнішній опір ланцюга по відношенню до затискачів **а-в** приладу, $R_M = R_d + R_p$ - внутрішній опір



мілівольтметра.

Рнс.2.10. Схема вимірювання термо-ЕРС мілівольтметром.

Виміряна мілівольтметром напруга U_{AB} завжди менше, ніж ЕРС в ланцюзі на значення падіння напруги IR_{BH} у зовнішній ланцюга:

$$U_{AB} = I R_M = E_{AB}(t, t_0) - I R_{BH}$$

(2.8)

Якщо $R_{BH} + R_M = const$, то між показаннями мілівольтметра і вимірюваної ЕРС однозначна залежність:

$$\varphi = S_i \frac{E_{AB}(t, t_0)}{R_{BH} + R_m} \quad (2.9)$$

і шкалу мілівольтметра можна градувати в градусах за відповідною

градуовальною характеристикою.

Опори зовнішнього ланцюга R_{BH} і мілівольтметра R_M змінюються залежно від температури навколишнього середовища, що призводить до похибки вимірювання. Зменшити температурну похибку можна за рахунок вибору співвідношень R_{BH}/R_M і R_p/R_M

$$U_{AB} = I_{RM} \quad (2.10)$$

Отже, чим менше R_{BH}/R_M , тим менше зміна цього відношення позначиться на залежності U_{AB} від $E_{AB}(t, t_0)$. Зменшення R_{BH}/R_M можливо за рахунок збільшення R_M , але так як R_M складається з опору рамки, виконаної з мідного дроту з опором R_p і додаткового опору R_D , то R_M збільшують за рахунок збільшення додаткового опору R_D , виконаного у вигляді манганінової котушки. Значне збільшення R_M призводить до збільшення чутливості мілівольтметра. Зазвичай, $R_M=100-500$ Ом, а співвідношення $R_p/R_M=1/3$, що значно зменшує температурний коефіцієнт приладу.

Значення R_{BH} стандартизовано в межах $0,6 \div 25$ Ом і вказано на шкалі приладу. При використанні мілівольтметра з температурною шкалою необхідно опір зовнішньої лінії підігнати до значення R_{BH} , вказаною на шкалі приладу, за допомогою пістроювального опору R_y . Якщо мілівольтметр має мілівольтну шкалу, то вона наноситься без урахування опору R_{BH} і покази приладу відповідають опору на його затискачах, тобто U_{AB} . За відомим R_M і R_{BH} визначають $E_{AB}(t, t_0)$, а потім по градуовальних таблиць визначають температуру.

Мілівольтметри, призначені для роботи з ТЕП, бувають переносними і щитовими. Щитові мілівольтметри мають тільки градусну шкалу. Клас точності 0,5; 1,0; 1,5; 2,0.

Потенціометр.

Принцип дії потенціометра оснований на компенсації невідомої термо-ЕРС відомим падінням напруги, створюваним струмом від додаткового джерела E_0 (рис.2.10).

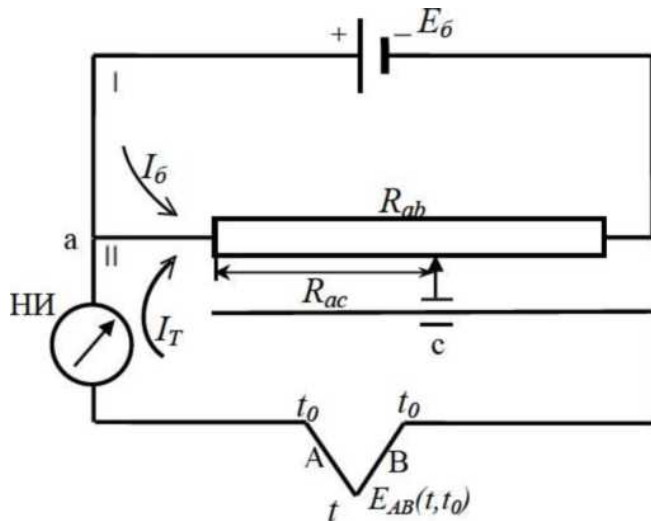


Рис.2.10. Вимірювальна схема потенціометра

Замкнутий контур I містить додаткове джерело струму E_g і реохорд R_{ab} . Реохорд являє собою змінний резистор з тонкого калібрувального дроту (виконаний із спеціального сплаву), намотаного на циліндричний стрижень, і забезпеченого рухомим контактом для зміни опору. Цей контур називають компенсаційним. Сила струму I_g в цьому контурі визначається величиною E_g і опором реохорда R_{ab} .

Контур II включає в себе ТЕП, термо-ЕРС $E_{AB}(t, t_0)$ якого вимірюється і чутливий гальванометр, що виконує функції нуль-індикатора (НИ), а також частина реохорда R_{ac} від точки а до рухомого контакту з повзунка реохорда. Джерело вимірюваної термо-ЕРС $E_{AB}(t, t_0)$ включене назустріч додаткового джерела E_g так, що струми від обох джерел на ділянці R_{ac} йдуть в одному напрямку. Для контуру II на підставі закону Кірхгофа маємо:

$$E_{AB}(t, t_0) = I_T R_{ЗН} + I_T R_{НИ} + I_T R_{ac} + I_g R_{ac} \quad (2.11)$$

де I_T - сила струму в контурі ТЕП; $R_{ЗН}$ - зовнішній опір термопари і підвідних проводів; $R_{НИ}$ - опір нуль-індикатора.

Звідки

$$I_T = \frac{E_{AB}(t, t_0) - I_g R_{ac}}{R_{ЗН} + R_{НИ} + R_{ac}} \quad (2.12)$$

Переміщаючи ротор реохорда можна домогтися, щоб $I_T = 0$, тоді

$$E_{AB}(t, t_0) = I_g R_{ac},$$

тобто при $I_T = 0$, падіння напруги U_{ac} на ділянці ac служить мірою

термо-ЕРС, яку вимірюємо.

Перевагою компенсаційного методу вимірювання термо-ЕРС є відсутність струму в ланцюзі в момент вимірювання. Це виключає необхідність обліку значення опору зовнішнього ланцюга, а також вимірювання опору $R_{зН}$ при зміні температури.

Компенсуючу напругу можна виміряти двома методами:

1. підтримуючи постійне значення струму I_{ϕ} , вимірювати R_{ac}
2. зберігаючи опір R_{ac} постійним, вимірювати значення робочого струму I_{ϕ} .

Найбільшого поширення набули потенціометри з постійною силою робочого струму (рис.2.11).

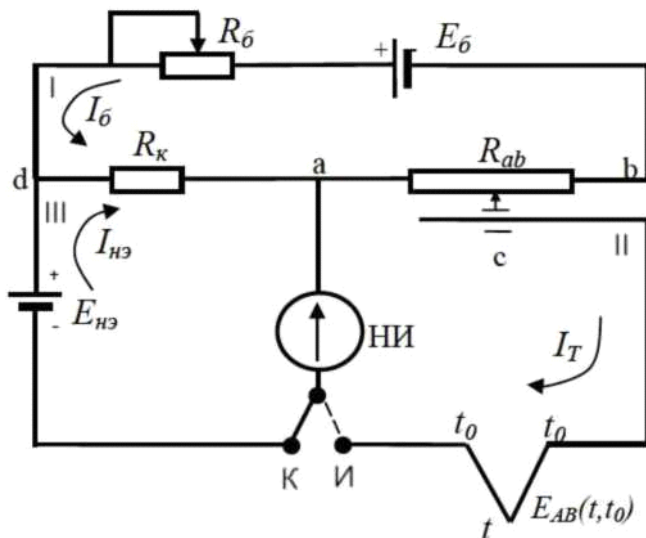


Рис 2.11. Потенціометр з постійною силою робочого струму

Для контролю постійності робочого струму введено додатковий III контур - контур нормального елемента. Нормальний елемент є зразковою мірою ЕРС $E_{НЕ} = 1,0186 \text{ В}$ і зберігає цю ЕРС при короткочасних і малих навантаженнях тривалий час. При встановленню ключа в положення К (контроль) проводять порівняння ЕРС нормального елемента $E_{НЕ}$ з падінням

напруги U_{da} на постійному резисторі R_k . Якщо при цьому $E_{HE} \neq 0$ (стрілка нуль-індикатора не стоїть на нулі), тобто $U_{da} \neq E_{HE}$, то за допомогою реостата R_6 змінюють струм в контурі I до тих пір, поки стрілка нуль-індикатора не встановиться на 0, тоді $E_{HE} = U_{da}$. Так як $U_{da} = I_6 R_k$ і $R_k = 509,3 \text{ Ом}$,

$$I_6 = \frac{E_{HE}}{R_k} = \frac{1,0186}{509,3} = 2 \text{ мА.}$$

Після стандартизації значення струму ключ переводять у положення "вимір" I і переміщують ротор реохорда R_{ab} до встановлення стрілки нуль-індикатора на нулі. При цьому

$$E_{AB}(t, t_0) = I_6 R_{ac} = \frac{E_{HE} R_{ac}}{R_k}. \quad (2.13)$$

При рівномірній намотуванні реохорда опору його ділянок пропорційні відповідним довжинах, тобто $R_{ac}/R_{ab} = 1/L$ і тоді

$$E_{AB}(t, t_0) = \frac{E_{HE} R_{ac}}{R_k} = \frac{E_{HE} R_{ac}}{R_k L} = K, \quad (2.14)$$

де K - константа.

Таким чином, вимірювання ЕРС зводиться до вимірювання довжини l ділянки реохорда, яка проградуєрована в одиницях напруги. Потенціометри, що працюють за цією схемою мають клас точності до 0,005.

У схемі потенціометра зі змінною силою робочого струму (рис. 2.12) вимірювана термо-ЕРС $E_{AB}(t, t_0)$ компенсується падінням напруги $I_6 R_{ab}$ на постійному і відомому опорі R_{ab} шляхом зміни значення струму I_6 в компенсуючому контурі I за допомогою реостата R_6 .

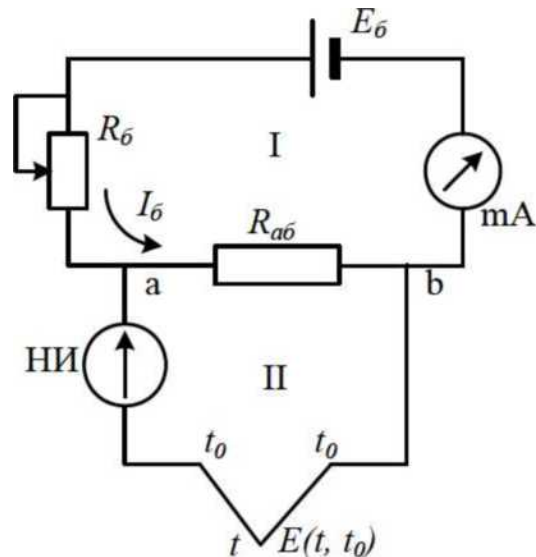


Рис. 2.12. Потенціометр зі змінною силою робочого струму

Ротор останнього переміщається до тих пір, поки нуль-індикатор НІ в контурі II не покаже нуль, при цьому відраховується значення струму I_s за шкалою міліамперметра. Цей потенціометр поступається по точності потенціометру з постійною силою робочого струму.

Схема даного потенціометра знаходить застосування, зокрема, при побудові нормуючих струмових перетворювачів.

Автоматичний потенціометр.

Схема цього приладу (рис.2.13) побудована на основі схеми потенціометра з постійною силою робочого струму. Однак, тут передбачається два контури компенсації напруги - II і III. Контур III, що містить резистор R_M з мідного дроту, служить для автоматичного введення поправки на температуру вільних кінців ТЕП. Вільні кінці ТЕП за допомогою подовжувальних проводів F і D підводяться до резистору R_M і знаходяться при одній з ним температурі. Решта резистори вимірювальної схеми потенціометра виконані з манганіну.

Для живлення контурів II і III використовується джерело стабілізованого живлення ІПС, в якому вхідна напруга змінного струму 6,3В випрямляється і стабілізується у вихідну напругу постійного струму 5 В (похибка стабілізації \pm

5 або ± 10 мВ відповідно для класу точності 0,1 і 0,2) при навантаженні 1000 Ом і струмі навантаження 1-5мА. При роботі ІПС в складі потенціометра напруги між точками **d** і **к** до $U_{dk}=1019$ мВ.

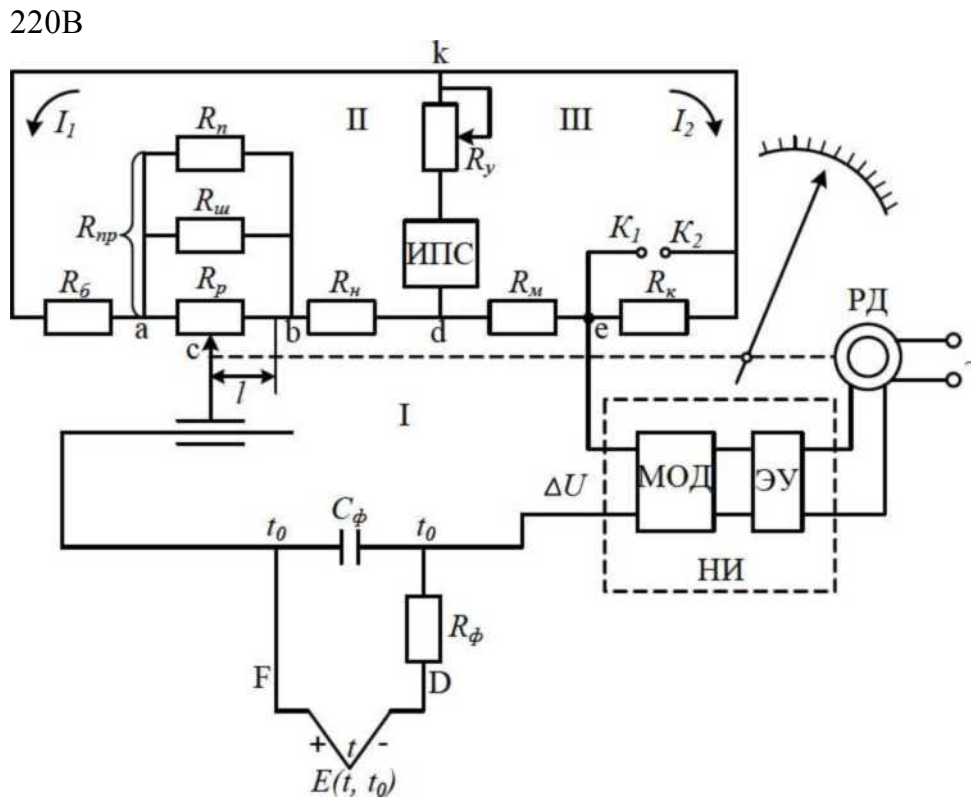


Рис. 2.13. Автоматичний потенціометр

Завдяки використанню ІПС в автоматичних потенціометрах встановлення робочого струму здійснюється через кілька тисяч годин безперервної роботи, крім того, спростилася кінематика механізму і підвищилася надійність приладу.

Підключення до клем K_1 і K_2 нормального елемента $E_{не}$ і послідовно сполученого з ним нуль-індикатора здійснюється для контролю робочого струму I лише при повірці і градуюванні потенціометра. при цьому

$$U_{KE} = IR_K = E_{HE}$$

Зазвичай $R_K=509,3$ Ом, тоді $I=2mA$.

R_y - резистор для установки робочого струму; R_{np} - значення опору реохордної групи, що складається із трьох паралельно з'єднаних резисторів: R_p - реохорда, $R_{ш}$ - шунта і опору R_n .

Таке виконання реохордної групи пов'язано з тим, що реохорд R_p є

відповідальним вузлом, призначеним для вимірювання. При необхідності зміни опору на ділянці **ав** (зазвичай при зміні діапазону вимірювання) змінюють загальний опір R_{np} цієї ділянки за рахунок зміни, а іноді й $R_{ш}$, залишаючи R_p стандартним. Резистори R_H і R_6 служать для встановлення початкового значення шкали і значення струму $I=3mA$.

Як нуль-індикатор НІ в автоматичних потенціометрах використовується електронний підсилювач ЕП, на вході якого встановлено модулятор МОД для перетворення сигналу розбалансу напруги постійного струму ΔU в змінну напругу. Для оберігання підсилювача від наведень і перешкод, що виникають у ланцюзі ТЕП, передбачено фільтр, що складається з опору R_Φ (р і конденсатора C_Φ).

Нехай при деякому значенні вимірюваної термо-ЕРС $E_{AB}(t, t_0)$ в деякому положенні ротора реохорда **с** струм в контурі вимірювання Π дорівнює 0, тобто $E_{AB}(t, t_0)$ компенсовано падінням напруги U_{ce} на ділянці **cbde**. Тоді сигнал розбалансу

$$\Delta U = E_{AB}(t, t_0) - U_{ce} = 0$$

При сигналі $\Delta U \neq 0$ на виході підсилювача відповідно до абсолютного значення і знаку розбалансу формується керуючий сигнал, під дією якого реверсивний двигун РД переміщує ротор реохорда **с** доти, поки напруга розбалансу не стане рівною нулю; одночасно з ротором за шкалою реохорда переміщається стрілка приладу. Зведення до нуля напруги розбалансу ΔU , тобто досягнення повної рівності компенсуючої напруги U_{ce} вимірюваної термо-ЕРС $E_{AB}(t, t_0)$, реалізується завдяки тому, що система автокомпенсації є астатичною. Властивість астатичності досягається через наявність в системі регулювання розбалансу інтегруючої ланки, якою виступає РД.

Нормуючі перетворювачі термо-ЕРС.

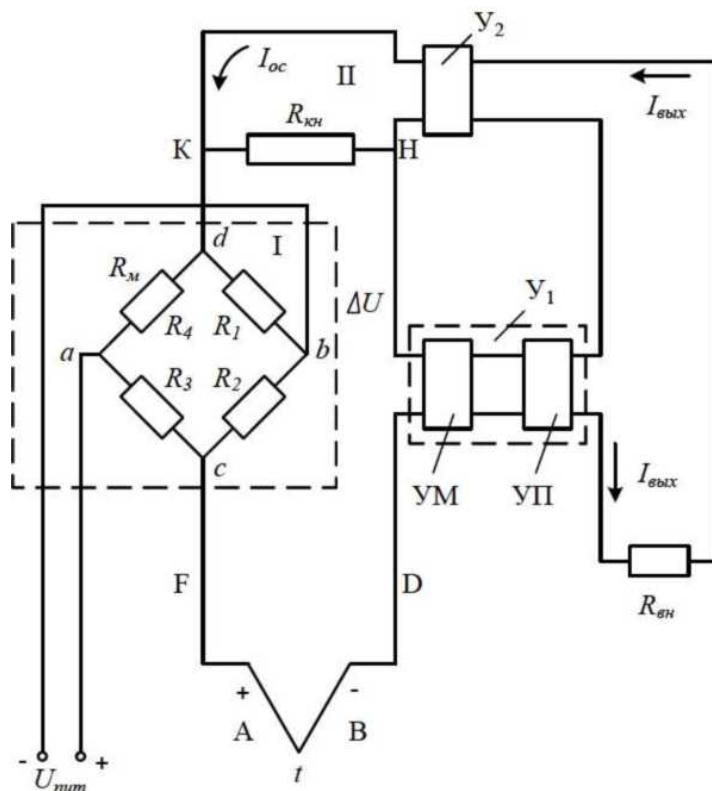
Для введення інформації від ТЕП в ЕОМ або систему автоматичного регулювання застосовують нормуючі вимірювальні струмові перетворювачі (рис.2.14). Вони призначені для перетворення сигналу ТЕП в уніфікований сигнал постійного струму 0-5mA (0-20 mA).

Рис.2.14. Нормуючий перетворювач термо- ЕРС

В основу роботи нормуючого перетворювача покладено компенсаційний метод вимірювання термо-ЕРС з використанням схеми потенціометра зі змінною силою робочого струму.

Контур вимірювання I містить коригувальний міст КМ, підсилювач, підсилювач Y_1 із струмовим виходом $I_{вих}$ і резистор $R_{кн}$. До контуру I за допомогою подовжувальних проводів F і D підключено ТЕП.

Коригуючий міст призначено для введення автоматичної поправки на зміни температури вільного кінця ТЕП, а також компенсації початкової термо-



ЕРС в перетворювачах, нижня межа вимірювання яких не дорівнює 0°C. До діагоналі **ав** живлення моста підведено стабілізовану напругу постійного струму. Резистори R_1, R_2 і R_3 - манганінові, R_M - мідний.

Підсилювач $У_1$ складається з двох каскадів:

магнітного УМ, виконаного за двотактною напівперіодичною схемою і напівпровідникового підсилювача УП, що працює в режимі посилення постійного струму. Підсилювач $У_1$ виконує функції нуль-індикатора. Контур компенсації II включає в себе резистор R_{KH} і підсилювач зворотного зв'язку $У_2$. Цей підсилювач аналогічний $У_1$ але включений з глибоким негативним зв'язком по вихідному струму підсилювача. Вихідний струм I_{oc} підсилювача $У_2$ є робочим струмом контура II, і при проходженні цього струму через опір R_{KH} , в ньому з боку контуру II створюється компенсація напруга: $U_{KH} = I_{oc}R_{KH}$. Зі сторони контура I до резистора R_{KH} підводиться сигнал ТЕП $E_{AB}(t, t_0)$, який складається з напруги U_{cd} , створеної в вимірювальній діагоналі **cd** коригуючого моста КМ. Ця напруга рівна поправці на температуру вільних кінців ТЕП, тобто

$$U_{cd} = E_{AB}(t_0'', t_0),$$

тобто цей сумарний сигнал рівний

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0'') + U_{cd},$$

порівнюється з напругою U_{KH} . Розбаланс, рівний $\Delta U = E_{AB}(t, t_0) - U_{KH}$ подається на підсилювач $У_1$, де цей сигнал постійного струму ΔU перетворюється спочатку в магнітному підсилювачі УМ в сигнал змінного струму, потім посилюється, а потім знову перетвориться в сигнал постійного струму, який додатково посилюється в напівпровідниковому підсилювачі УП постійного струму.

Вихідний сигнал підсилювача $У_1$ створює струм $I_{вих}$, який надходить в зовнішній ланцюг R_{BH} і далі, через подільник, в підсилювач зворотного зв'язку $У_2$. Вихідний струм I_{oc} підсилювача $У_2$ змінюється і змінює падіння напруги U_{KH} на резисторі R_{KH} до тих пір, поки розбаланс ΔU не досягне деякої малої величини ΔU , названою статичною помилкою компенсації.

Наявність статичної помилки компенсації призводить до того, що в контурі вимірювання проходить недокомпенсований струм. При цьому, чим

більша вимірювана термо-ЕРС, тим більший цей струм. Виключити цю помилку в пристроях, виконаних по статичній автокомпенсаційній схемі, принципово неможливо, так як вихідний струм перетворювача $I_{вих}$ і струм контуру компенсації $I_{ос}$ визначаються наявністю цієї помилки і пропорційні їй. У той же час статична помилка автокомпенсаційної схеми може бути значно зменшена, якщо використовувати підсилювач з великим коефіцієнтом посилення.

Розглянемо зв'язок між вимірюваною термо-ЕРС $E_{AB}(t, t_0)$ і вихідним струмом перетворювача $I_{вих}$:

$$\Delta U = E_{AB}(t, t_0) - U_{КН} \quad (2.15)$$

На виходах підсилювачів $У_1$ і $У_2$ формуються сигнали

$$I_{вих} = K_1 I_{вх} = K_1 \frac{\Delta U}{R_{вх}} \quad (2.16)$$

$$I_{ос} = K_2 I_{вих} \quad (2.17)$$

де K_1, K_2 - коефіцієнти підсилення підсилювачів $У_1$ і $У_2$; $I_{вх} = \frac{\Delta U}{R_{вх}}$ - струм, створюваний у вхідному ланцюзі підсилювача сигналом ΔU , $R_{вх}$ - опір вхідного ланцюга підсилювача $У_1$.

Падіння напруги на резистори $R_{КН}$ з урахуванням (2.17) складе

$$U_{КН} = I_{ос} R_{КН} = K_2 I_{вих} R_{КН} \quad (2.18)$$

Підставляючи у вираз (2.15) ΔU із (2.16) і $U_{КН}$ з (2.18), отримаємо:

$$\frac{I_{вих} R_{вх}}{K_1} = E_{AB}(t, t_0) - K_2 I_{вих} R_{КН}$$

Знаходимо

$$I_{вих} = K E_{AB}(t, t_0), \quad (2.19)$$

де $K = \frac{1}{R_{вх}/K_1 + K_2 R_{КН}}$ - коефіцієнт перетворення нормуючого перетворювача.

Таким чином, вихідний сигнал нормуючого перетворювача пропорційний відкоригованому по температурі вільного спаю сигналу ТЕР.

Залежно від діапазону вхідного сигналу нормуючі перетворювачі мають класи точності 0,5 - 1,5.

Висновки до розділу 2

Дано характеристику методам та пристроям вимірювання температури композитних матеріалів.

Проведено класифікацію засобів вимірювання температури.

Дано детальну характеристику термоелектричних перетворювачів.

Розроблено математичні моделі термо-ЕРС для різних схем підключення до вимірювальних приладів.

Поняття термостата

Термостат — фізичне тіло або пристрій, що забезпечує сталість температури у системі. Термостат підтримує температуру на заданому рівні вмикаючи/вимикаючи нагрівальний або охолоджуючий елемент, чи змінюючи потік теплоносія.

Термостат може бути керуючим пристроєм в системах опалення або охолодження, або ж бути компонентом радіатора чи кондиціонера.

Термостати мають широкий вибір конструктивних схем, а також можуть використовувати велику кількість термодатчиків. У термодинаміці термостатом часто називають систему, що володіє настільки великою теплоємністю, що підвведене до неї тепло не змінює її температуру. [1]

Класифікація термостатів

За точністю підтримки температури (в градусах):

- 5-10 градусів і більше, як правило, досягається без перемішування, за рахунок природної конвекції;
- 1-2 градуси (хороша теплова стабільність для повітряних, посередня для рідинних), як правило, з перемішуванням;
- 0,1 градуса (дуже хороша теплова стабільність для повітряних, на рівні кращих зразків, середня для рідинних);
- 0,01 градуса (як правило, досягається в рідинних термостатах спеціальної конструкції, практично неможливо отримати в повітряному термостаті з вентилятором).

За теплоємністю термостати класифікуються на :

- Повітряні;
- Рідинні;
- Твердотільні (як правило, використовуються елементи Пельтье і віск).

Термостати можна класифікувати по діапазону робочих температур:

- Термостати високих температур (300-1200° C);
- Термостати середніх температур (-60-500° C);
- Термостати низьких температур (менше - 60° C (200 K)) - кріостати.

Можна виділити два основних способи роботи термостатів:

1) У термостаті підтримується постійною температура теплоносія, що заповнює термостат. Досліджуване тіло при цьому знаходиться в контакті з робочою речовиною і має його температуру. В якості робочих речовин зазвичай використовують повітря, спирт (від мінус 110 до 60° C), воду (від 5 до 95° C), масло (мінус 30 до 300° C) та інше.

2) Досліджуване тіло підтримується при постійній температурі в адіабатичних умовах (робоча речовина відсутня). Підведення або відведення теплоти здійснюється спеціальним тепловим ключем (у термостатах низьких температур) або ж використовуються електропечі з терморегулятором і масивним металевим блоком, в який поміщається досліджуваний тіло (в термостатах високих температур). [2]

Компанія Polyscience

Компанія Polyscience є одним з найстаріших і однією з найбільш успішно розвинутих виробників систем охолодження, термоустаткування, найширшого спектру застосування. Обладнання Polyscience застосовується в різних областях: хімія, медицина і лабораторне обладнання.

Компанія Polyscience виробляє наступне обладнання: циркуляційні термостати нагрівання і охолоджуючі, універсальні циркуляційні термостати, ванни для вимірювання в'язкості, калібрувальні ванни, чиллери, охолоджувачі, заглибні термостати і багато іншого.

Устаткування компанії Polyscience підходить для охолодження досліджуваних об'єктів, охолодження аналітичного та технологічного обладнання. Термостати широко Polyscience застосовуються при проведенні сертифікаційних випробувань, наукових досліджень, в рутинному контролі якості при виробництві тієї чи іншої продукції, в різних галузях промисловості.

Циркуляційний термостат з контролером AP15R-30

Циркуляційні термостати Polyscience призначені для підтримки температури об'єктів як у власній ванні, так і в зовнішніх системах з відкритим або закритим контуром: лабораторних реакторах, вимірювальних осередках рефрактометрів, віскозиметрів, електрохімічних аналізаторів. Термостати

складаються з занурювального термостата-циркулятора і робочої ванни.

Цей пристрій призначені для точного контролю температури рідини в камері пристрою. Простий у використанні і обслуговуванні, поєднує інноваційний дизайн з дуже простим, інтуїтивно зрозумілим управлінням. Він забезпечує зручність і можливість контролювати температуру в широкому діапазоні застосувань.

Дана модель Polyscience AP15R-30 (рис. 1.1) — це циркуляційний термостат, який підтримує робочу температура в межах від мінус 30°C до 200°C.



Рис. 1.1 Циркуляційний термостат з контролером AP15R-30

Передня панель контролера оснащена кольоровим сенсорним 4.3" TFT дисплеєм і чотирма кнопками (рис. 1.2), на задній панель знаходяться порти різних типів підключення, перемикач і розд'єм живлення та інше (рис. 1.3). Також контролер оснащений шарнірним з'єднанням, яке дозволяє повертати контролер на 180°.



Рис. 1.2 Передня панель контролера AP15R-30

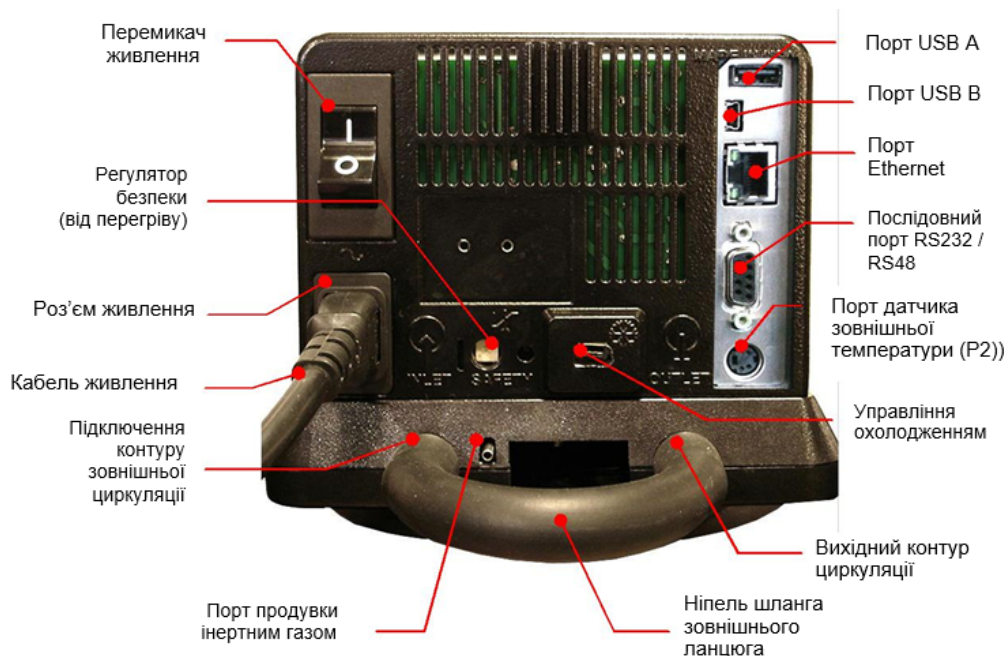


Рис. 1.3 Задня панель контролера AP15R-30

Технічні характеристики

Робоча температура -30 ° C до + 200 ° C; (-22 ° F до 392 ° F)

Температурна стабільність ± 0.01 ° C;

Максимальний тиск: 3.6 (0.25) psi (бар);

Безпека: DIN 12876-1 Клас III (для роботи з легкозаймистими рідинами);

Максимальний потік: тиск 4.4 (16.7) gmp (л / хв), тиск всмоктування 3.2 (12.2) gmp (л / хв);

Можливість зовнішнього контролю температури;

Насос з регульованою швидкістю прокачування;

Працює в режимі замкнутого і відкритого циклу.

Властивості

Система LidDock забезпечує самостійне закриття кришки резервуара;

Система DuraTop відповідає за стійкість верхньої панелі до хімічного впливу;

WhisperCool система контролю впливу навколишнього середовища;

Cool Command змодельована система охолодження;

Сенсорний дисплей з можливістю обертання (система Swivel 180);

Миється повітряний фільтр;

Програмування кроку температури і часу (100 кроків);

Планування подій (час / дата) в режимі реального часу на 10 днів вперед;

Автоматична і / або настроювана користувачем оптимізація продуктивності, можливість калібрування по 10 точкам;

6 мов: англійська, німецька іспанська, китайська та т.д. .;

Можливість виведення декількох вікон на екран, екран довідки;

Інтерфейс: USB, Ethernet, RS232 / 485.

Рідини

В таблиці 1.1 наведено перелік рідин, їх в'язкість і нормальний та граничний температурний діапазон застосування.

Таблиця 1.1

Назва рідини	В'язкість при 25°C	Нормальний температурний діапазон	Граничний температурний діапазон
Дистильована вода	1	10 до 90°C	2 до 100°C
Polyclear MIX 30	1	15 до 90°C	2 до 100°C
Polytherm S150	50	50 до 150°C	5 до 270°C*
Polytherm S200	125	100 до 200°C	80 до 232°C*
Polytherm S250	500	150 до 250°C	125 до 260°C*
Polytherm M170	40	50 до 170°C	25 до 190°C
Polycool HC-50	3	-50 до 100°C	-62 до 118°C
Polycool EG-25	20	-25 до 100°C	-30 до 115°C
(50/50 суміш з ДВ)			
Polycool EG-25	12	0 до 95°C	-15 до 107°C

(30/70 суміш з ДВ) Polycool PG-20	20	-20 до 100°C	-30 до 115°C
(50/50 суміш з ДВ) Polycool PG-20	12	5 до 90°C	-10 до 107°C
(30/70 суміш з ДВ) Polycool MIX-25	20	-25 до 100°C	-30 до 115°C
(50/50 суміш з ДВ) Polycool MIX-25	12	0 до 95°C	-15 до 107°C

* Зазначена максимальна температура до температури займання рідини.

Інтерфейси

Контролер AP (Advanced Programmable) оснащений декількома портами для зовнішніх комунікацій. Нижче наведені типові рішення, використовувані для моніторингу і контролю операції. На рис. 1.4 зображено які інтерфейси відтримує дане устаткування.

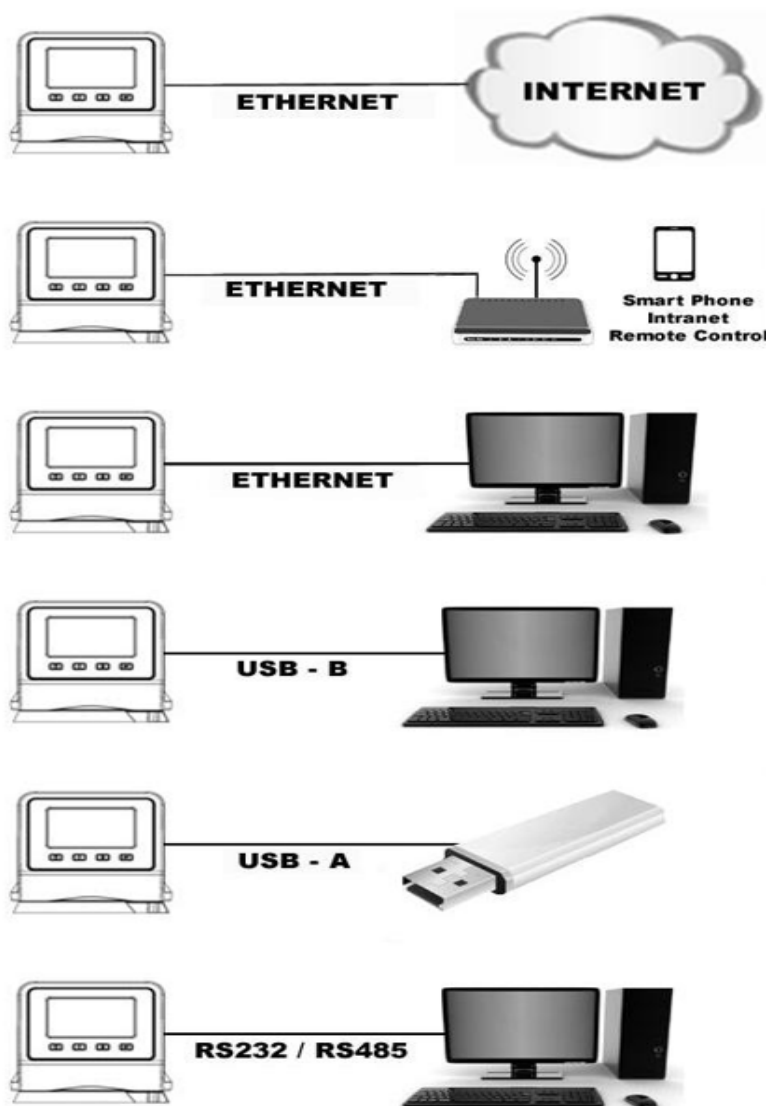


Рис. 1.4 Інтерфейси термостата AP15R-30

«Швидкий старт»

Коротко опишемо процедуру введення в експлуатацію циркулюючого термостата з контролером AP15R-30.

Першик кроком є заповнення ванни термостата рідиною. Для цього потрібно відкрити кришку ванни термостата і залити туди випробовувану рідину. В даному випадку було вибрано дистильовану воду (рис. 1.5).



Рис. 1.5 Наповнення резервуару термостата водою

Так як об'єм нашої ванни становить 15 літрів , то для функціонування достатньо 12 літрів дистильованої води. Мінімальний і максимальний допустимий об'єм рідини, яку потрібно залити у ванну зображено на рис. 1.6.



Рис. 1.6 Допустимий об'єм рідини

Досягнувши потрібного рівня води в посудині (рис. 1.7), можна

розпочати підключення усіх кабелів живлення і керування (рис. 1.8).



Рис. 1.7 Досягнення потрібного рівня води в посудині

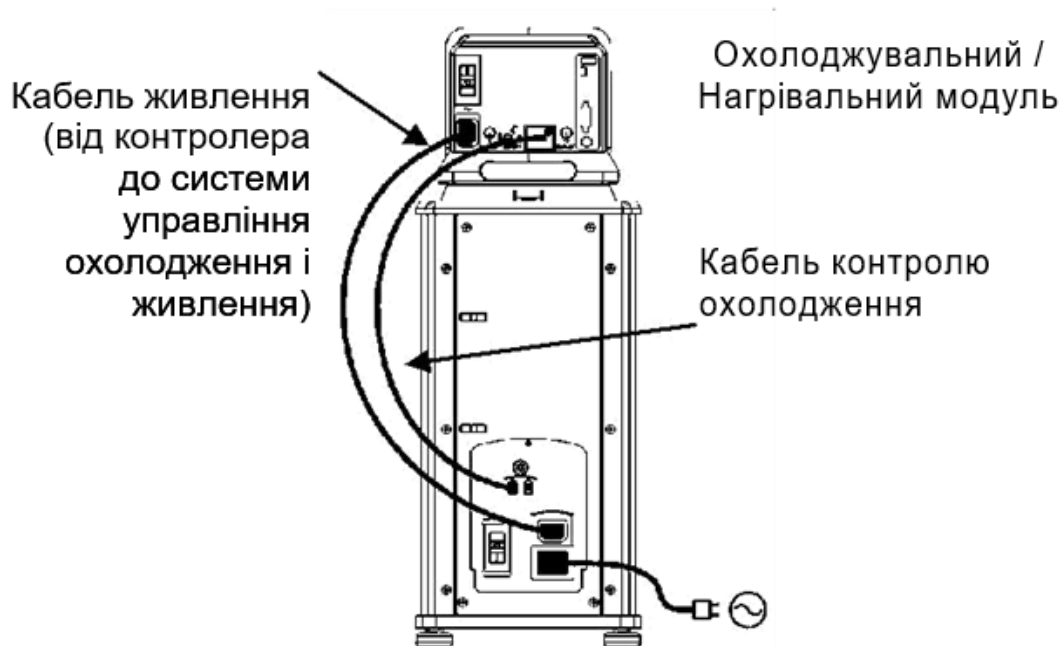


Рис. 1.8 Підключення кабелів живлення і керування

Після цього вмикаємо відповідні перемикачі живлення (рис. 1.9), натискаємо кнопку «ON» на передній панелі контролера і установлюємо запобіжник перегріву на задній панелі на потрібне обмеження (рис. 1.10).

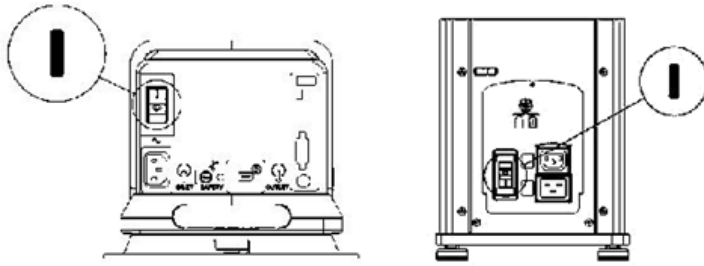


Рис. 1.9 Задня панель перемикачів живлення

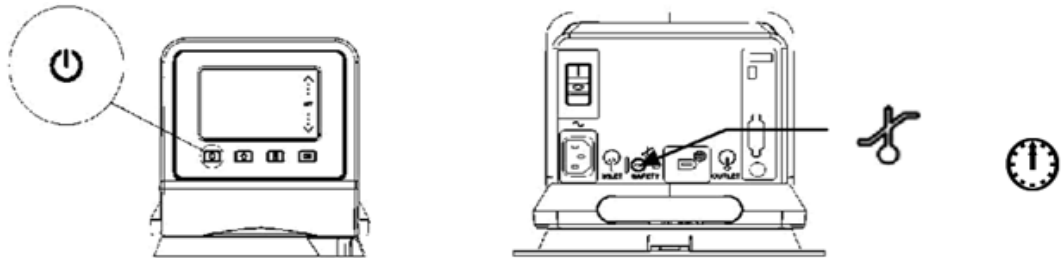


Рис. 1.10 Ввімкнення і настройка запобіжника перегріву

В результаті виконання вищенаведеної послідовності кроків термостат коректно введено в експлуатацію (рис. 1.11) і пристрій готовий до проведення на ньому відповідних дослідів.



Рис. 1.11 Готовий до експлуатації термостат

Висновки

В даному розділі було коротко представлено загальне поняття, що таке термостат і наведено його класифікації. Проаналізувавши основні розділи інструкції, яка була надана на англійській і польській мовах, вибрано основну інформацію, що потрібна для розуміння і подальшого дослідження роботи термостата. В розділі наведено технічні характеристики, властивості термостата і рідини, які рекомендовано застосовувати для проведення лабораторних

дослідів , а також які інтерфейси підтримує дане устаткування.

Проаналізувавши всі ці аспекти, було проведено пробне тестування по запуску термостата в експлуатацію – «Швидкий старт». Отримавши задовільні результати, можна продовжити дослідження і в подальшому розробити підсистему керування циркуляційними термостатами.

РОЗДІЛ 6. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ

Мова програмування C++

C++ був розвинутий з мови програмування C і за дуже малими виключеннями зберігає C як підмножину. Базова мова, C підмножина C++, спроектована так, що існує дуже близька відповідність між його типами, операціями й операторами і комп'ютерними об'єктами, з якими безпосередньо приходиться мати справу: числами, символами й адресами. [3]

Microsoft VisualC++ містить безліч інтегрованих засобів візуального програмування. Компілятор VisualC++ містить багато нових інструментальних засобів і поліпшених можливостей, надає величезні можливості в плані оптимізації додатків, внаслідок чого можна отримати виграш як відносно розміру програми, так і відносно швидкості її виконання, незалежно від того, що являє собою ваш додаток.

Система Microsoft VisualC++ дозволяє створювати як маленькі програми і утиліти для персонального використання, так і корпоративні системи, що працюють з базами даних на різних платформах. [4]

Команди відладки викликаються з меню Debug. Вбудований відладчик дозволяє покроково виконувати програму, переглядати і змінювати значення змінних та багато іншого. Точки зупинки застосовуються в програмі при необхідності перервати її виконання в певних місцях. Значення використання точок зупинки полягає у тому, що відладчик не витрачає часу на покрокове виконання програми аж до вказаної точки, після досягнення якої переходить в покроковий режим. Точки зупинки найпростіше розставляти за допомогою кнопки Breakpoint панелі інструментів Build. Для цього достатньо встановити курсор на потрібному рядку програми і натиснути кнопкою миші на вказаній кнопці. Якщо ж виділений рядок вже містить точку зупинки, то вона буде видалена. При виборі команди Go програма виконуватиметься від поточного місцезнаходження курсора до найближчої точки зупинки.

Коли розпочинається процес відладки, з'являється панель інструментів Debug. З безлічі представлених на ній кнопок найчастіше задіюються StepInto і

StepOver. У обох випадках програма буде запущена на виконання в покроковому режимі, а в тексті програми виділяється той рядок, який зараз буде виконаний. Відмінності між командами StepInto і StepOver виявляються тільки тоді, коли в програмі зустрічається виклик функції. Якщо вибрати команду StepInto, то відладчик увійде до функції і почне виконувати крок за кроком всі її оператори. При виборі команди StepOver відладчик виконає функцію як єдине ціле і перейде до рядка, наступного за викликом функції. Цю команду зручно застосовувати в тих випадках, коли в програмі робиться звернення до стандартної функції або створеної вами підпрограми, яка вже була протестована. [5]

Платформа QT .

Qt - крос-платформний інструментарій розробника прикладного програмного забезпечення, широко використовуваний для створення графічних інтерфейсів. Він написаний на C++ і надає потужні розширення цієї мови. Також доступні інтерфейси для інших мов програмування, таких як Python (PyQt), Ruby (Korundum / QtRuby) і Perl (PerlQt).

Основна особливість Qt від інших бібліотек - використання Meta Object Compiler (MOC) - попередньої системи обробки вихідного коду. MOC дозволяє у багато разів збільшити потужність бібліотек, вводячи такі поняття, як слоти і сигнали. Крім того, це дозволяє зробити код більш лаконічним. Утиліта MOC шукає в заголовних файлах на C++ опису класів, що містять макрос Q_OBJECT, і створює додатковий вихідний файл на C++, що містить метаоб'єктний код.

Qt дозволяє створювати власні плагіни і розміщувати їх безпосередньо в панелі візуального редактора. Також існує можливість розширення звичної функціональності віджетів, пов'язаної з розміщенням їх на екрані, відображенням, перемальовуванням при зміні розмірів вікна.

Qt комплектується візуальним середовищем розробки графічного інтерфейсу «Qt Designer», що дозволяє створювати діалоги і форми в режимі WYSIWYG. В комплекті Qt є «Qt Linguist» - графічна утиліта, що дозволяє спростити локалізацію і переклад програми багатьма мовами; і «Qt Assistant» -

довідкова система Qt, що спрощує роботу з документацією по бібліотеці, а також дозволяє створювати крос-платформену довідку для розроблювального на основі Qt . Починаючи з версії 4.5.0 в комплект Qt включена середовище розробки «Qt 6 Creator», яка включає в себе редактор коду, довідку, графічні засоби «Qt Designer» і можливість налагодження додатків. «Qt Creator» може використовувати GCC або Microsoft VC++ як компілятора і GDB як відладчика. Для Windows версій бібліотека комплектується компілятором, заголовними і об'єктними файлами MinGW. [6]

В Qt використовується CamelCasing: імена класів виглядають як MyClassName, а імена методів - як myMethodName. При цьому імена всіх класів Qt починаються з Q, наприклад QObject, QList або QFont. Більшості класів відповідають заголовки з тим же ім'ям (без розширення .h).

Для ефективною роботи з класами на стадії виконання в Qt використовується спеціальна об'єктна модель, що розширює модель C ++. Зокрема, додаються такі можливості:

- деревовидні ієрархії об'єктів;

- аналог dynamic_cast для бібліотеки, який не використовує RTTI;

- взаємодія об'єктів через сигнали і слоти;

- властивості об'єктів.

Багато об'єктів визначаються значенням відразу декількох властивостей, внутрішніми станами і зв'язками з іншими об'єктами. Вони являють собою індивідуальні сутності, і для них не має сенсу операція буквального копіювання, а також поділ даних в пам'яті. В Qt ці об'єкти успадковують властивості QObject.

При створенні графічних користувальницьких інтерфейсів взаємодія об'єктів часто здійснюється через зворотні виклики, тобто передачу коду для подальшого виконання (у вигляді вказівників на функції і т.д.). Також популярна концепція подій і обробників, в якій обробник діє як перехоплювач події певного об'єкта. [7]

В Qt вводиться концепція сигналів і слотів.

Сигнал відправляється при виклику відповідного йому методу.

Програмісту при цьому потрібно тільки вказати прототип методу в розділі `signals`.

Слот є методом, виконуваним при отриманні сигналу. Слоти можуть оголошуватися в розділі `public slots`, `protected slots` або `private slots`. При цьому рівень захисту впливає лише на можливість виклику слотів в якості звичайних методів, але не на можливість підключення сигналів до слотів.

Модель сигналів і слотів відрізняється від моделі подій і обробників тим, що слот може підключатися до будь-якого числа сигналів, а сигнал може підключатися до будь-якого числа слотів. При відправці сигналу будуть викликані всі підключені до нього слоти. [8]

Таким чином, для ефективної роботи з класами на стадії виконання Qt використовує спеціальну об'єктну модель, в якій за допомогою успадкування від `QObject` і генерування коду компілятором метаоб'єктів реалізовані:

- ієрархії об'єктів;

- спеціальний аналог `dynamic_cast`, що не залежить від RTTI;

- система сигналів і слотів;

- система властивостей об'єктів;

- динамічна робота з класами.

База даних SQLite

SQLite — полегшена реляційна система керування базами даних. Втілена у вигляді бібліотеки, де реалізовано багато зі стандарту SQL-92. Вихідний код SQLite поширюється як суспільне надбання (англ. `public domain`), тобто може використовуватися без обмежень та безоплатно з будь-якою метою. Фінансову підтримку розробників SQLite здійснює спеціально створений консорціум, до якого входять такі компанії, як Adobe, Oracle, Mozilla, Nokia, Bentley і Bloomberg.

Особливістю SQLite є те, що воно не використовує парадигму клієнт-сервер, тобто рушій SQLite не є окремим процесом, з яким взаємодіє застосунок, а надає бібліотеку, з якою програма компілюється і рушій стає складовою частиною програми. Таким чином, як протокол обміну використовуються виклики функцій (API) бібліотеки SQLite. Такий підхід

зменшує накладні витрати, час відгуку і спрощує програму. SQLite зберігає всю базу даних (включаючи визначення, таблиці, індекси і дані) в єдиному стандартному файлі на тому комп'ютері, на якому виконується застосунок. Простота реалізації досягається за рахунок того, що перед початком виконання транзакції весь файл, що зберігає базу даних, блокується; ACID-функції досягаються зокрема за рахунок створення файлу-журналу. [9]

Кілька процесів або нитей можуть одночасно без жодних проблем читати дані з однієї бази. Запис в базу можна здійснити тільки в тому випадку, коли жодних інших запитів у цей час не обслуговується; інакше спроба запису закінчується невдачею, і в програму повертається код помилки. Іншим варіантом розвитку подій є автоматичне повторення спроб запису протягом заданого інтервалу часу.

У комплекті постачання йде також функціональна клієнтська частина у вигляді виконуваного файлу `sqlite3`, за допомогою якого демонструється реалізація функцій основної бібліотеки. Клієнтська частина працює з командного рядка, і дозволяє звертатися до файлу БД на основі типових функцій ОС.

Сама бібліотека SQLite написана мовою C; існує велика кількість прив'язок до інших мов програмування, зокрема до C++, Java, Python, Perl, PHP, Tcl (засоби для роботи з Tcl включені в комплект постачання SQLite), Ruby, Haskell, Scheme, Smalltalk і Lua, а також до багатьох інших. Повний список наявних засобів можна знайти на сторінці проєкту. [10]

Особливості SQLite :

транзакції атомарні, послідовні, ізольовані, і міцні (ACID) навіть після збоїв системи і збоїв живлення

Встановлення без конфігурації — не потребує ані установки, ані адміністрування

Реалізує значну частину стандарту SQL92

База даних зберігається в одному крос-платформовому файлі на диску

Підтримка терабайтних розмірів баз даних і гігабайтного розміру рядків і BLOBів

Малий розмір коду: менше ніж 350KB повністю налаштований, і менш 200KB з опущеними додатковими функціями

Швидший за популярні рушії клієнт-серверних баз даних для найпоширеніших операцій

Простий, легкий у використанні API

Написана в ANSI C, включена прив'язка до TCL; доступні також прив'язки для десятків інших мов

Добре прокоментований сирцевий код зі 100% тестовий покриттям гілок

Доступний як єдиний файл сирцевого коду на ANSI C, який можна легко вставити в інший проект

Автономність: немає зовнішніх залежностей

Крос-платформовість: з коробки підтримується Unix (Linux і MacOS X), OS/2, Windows (Win32 і WinCE). Легко переноситься на інші системи

Сирці перебувають в суспільному надбанні

Поставляється з автономним клієнтом інтерфейсу командного рядка, який може бути використаний для управління базами даних SQLite. [11]

Алгоритм управління термостатом

Алгоритм дозволяє при заданій конструкції термостата оптимізувати точність стабілізації температури на основі зібраних калібрувальних даних.

Існує цілий ряд завдань, для яких важливим є забезпечення певного температурного режиму. Для цих цілей розроблено велику кількість термостатів. У простих стабілізація проводиться за допомогою нагрівача, термодатчика і компаратора, який би порівнював опорне значення температури з одержуваних від термодатчика (так звані лінійні аналогові термостати). Однак в таких системах часто виникає перегрів або переохолодження термостата за рахунок кінцевої швидкості поширення тепла по його об'єму, що призводить до низької точності стабілізації температури. [12,13]

У більш складних термостатах ці недоліки частково усуваються наступними способами:

підбором потужності нагрівача таким чином, щоб тепло встигало

поширюватися по всьому об'єму термостата;

установкою двох компараторів для попередження перегріву і переохолодження, які забезпечують два пороги: один компаратор вимикає нагрівач раніше, ніж термостат встигне нагрітися до стабілізуючої температури, другий — включає нагрів до того, як термостат встигне до стабілізуючої температури.

Однак в таких термостатах ефект дрейфу температури усувається незначно, що не дозволяє досягти високої точності стабілізації температури. Наприклад, якщо термодатчик знаходиться доволі близько від нагрівача (менше 1 см), то в кращому випадку може досягатися точність стабілізації 0,01 - 0,005 °С, в іншому випадку ця величина становитиме близько 0,1 - 0,05 °С. [14]

Існують також складні цифрові термостати на основі персональних комп'ютерів і мікро-ЕОМ, що забезпечують досить високу точність стабілізації температури, що досягається:

за допомогою врахування тепла, що віддається термостатом в навколишнє середовище;

шляхом застосування аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів;

застосуванням алгоритмів табличної обробки і визначенням складових величини регулювання, пропорційних неузгодженості, інтегралу і похідної від зміни температури, а також розсіюваної потужності нагрівача. [15]

У таких термостатах передбачається їх налаштування під конкретний нагрівач, геометрію термостата, розташування термодатчика і інші дані, які необхідно ввести в таблиці. Використання ж дорогих мікросхем додатково обмежує їх застосування.

Разом з тим широке впровадження в електронну апаратуру мікропроцесорної техніки стимулює створення термостата на основі мікропроцесора з закладеними в нього складними алгоритмами, які здатні :

самостійно і автоматично проводити калібрування термостата;

враховувати зовнішні фактори, що впливають на термостат;

використовуючи дані попередньо розрахованої температури термостата, а

також зібрані і оброблені дані, поступово підвищувати точність стабілізації до максимально можливої.

У таких термостатах проводиться адаптація до системи «нагрівач — термостабілізуюче тіло — датчик температури».

З метою зменшення вартості і габаритів електронної частини термостата пропонується використовувати «гібридний» метод термостабілізації, тобто в якості основного елемента, що здійснює порівняння опорної температури з заданою, використовувати високоточний і стабільний компаратор, а разом з ним застосовувати дешевий аналого-цифровий перетворювач і аналоговий комутатор, вбудований в мікроконтролер, який здійснює всі інші функції управління. У цьому випадку в алгоритмі управління термостатом під час режиму стабілізації використовуються тільки дані від прецизійного компаратора і дані виміру часу. Дані ж, що надходять з АЦП, використовуються тільки для приблизної оцінки точності термостабілізації і для калібрування, і в цьому випадку похибка АЦП в 1-5% не відіграє суттєвої ролі.

Основною перевагою термостата такого типу є використання алгоритму, що адаптується до роботи термостата. З кожної ітерацією «перегрівання - переохолодження» режим роботи нагрівача змінюється таким чином, щоб цикл ставав все більш тривалим і рівномірним (час знаходження термостата в стані перенагрівання та переохолодження має бути якомога більш рівним). Як наслідок, температура стабілізується більш точно.

Основу алгоритму складають наступні положення :

при розрахунку параметрів нагрівання та охолодження алгоритм повинен враховувати невідповідність динаміки нагріву динаміці охолодження. Так як при роботі термостат взаємодіє з зовнішнім середовищем за допомогою конвективного теплообміну, то кількість тепла, яке передається в процесі конвективного теплообміну, визначається законом Ньютона-Ріхмана. При цьому інтенсивність тепловіддачі залежить від виду конвекції, умов руху газу і його фізичних властивостей, форми і розмірів тепловіддаючої поверхні. У разі регулярного режиму охолодження (нагрівання) для двох довільних моментів

часу $(\theta_2 - \theta_1) / (\tau_2 - \tau_1) = \dots$, (2.1) де τ – час, θ – надлишкова температура ;

алгоритм повинен забезпечувати обчислення необхідної потужності нагрівача з урахуванням часу поширення тепла за обсягом термостата;

алгоритм повинен адаптуватися до роботи термостата, щоб забезпечити максимально можливу стабілізацію температури. [16]

Структурна схема пропонованого термостата зображена на рис. 2.1. Сигнал від термодатчика зовнішньої температури 5 через операційний підсилювач (ОП) 7 подається на аналоговий комутатор 11. Сигнал від термодатчика 2, закріпленого на термостабілізуючому тілі 3, подається на прецизійний компаратор 8, який порівнює сигнал термодатчика з опорним сигналом від джерела опорної напруги 6. Результат порівняння потрапляє на мікроконтролер для подальшого аналізу.

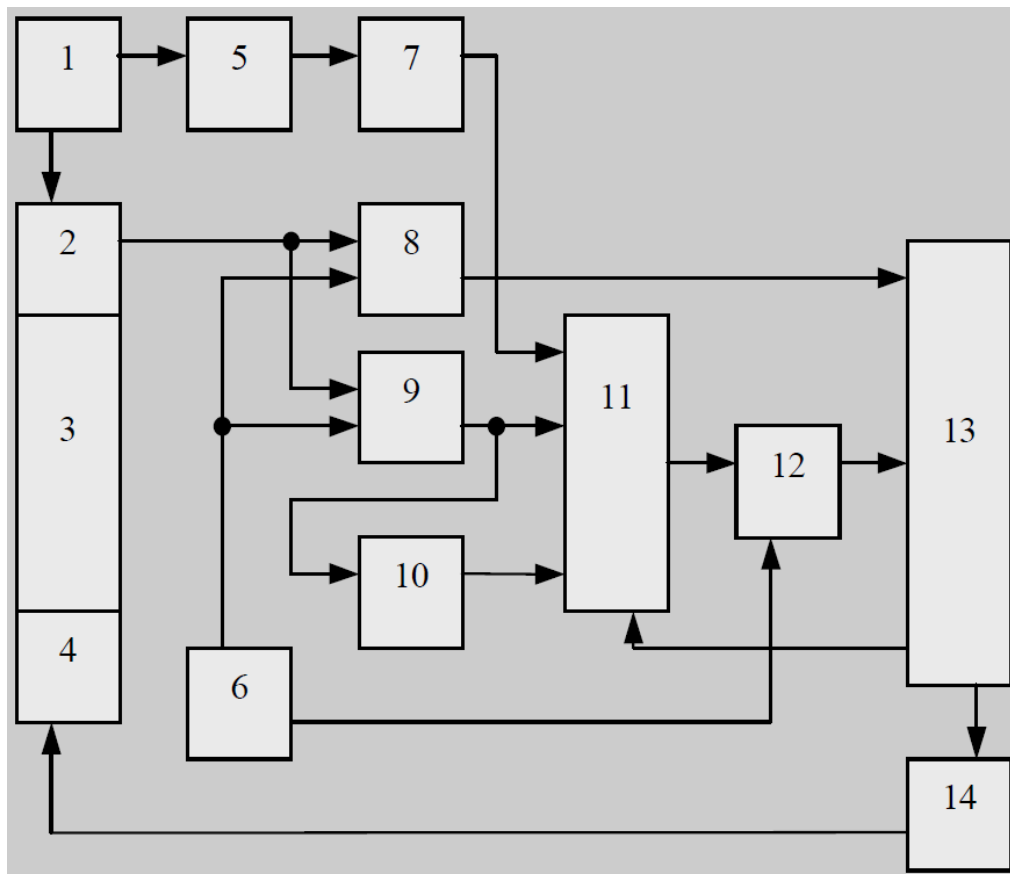


Рис. 2.1 Структурна схема термостата

1 – джерела стабільного струму; 2 – термоелемент термостабілізуючого тіла; 3 – термостабілізуюче тіло; 4 – нагрівач; 5 – термоелемент контролю зовнішньої температури; 6 – джерело опорної напруги; 7, 9, 10 – операційні

підсилювачі; 8 – прецизійний компаратор; 11 – комутатор; 12 – аналого-цифровий перетворювач; 13 – мікроконтролер; 14 – підсилювач потужності.

Окрім компаратора, сигнал з термодатчика надходить на ОП 9, підсилює сигнал до рівня, що забезпечує вимір абсолютної температури з точністю $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Крім того, щоб забезпечити відносний вимір температури з дискретністю $0,00025^\circ\text{C}$ в діапазоні $0,2^\circ\text{C}$, сигнал посилюється за допомогою ОП 10. Сигнали з обох ОП надходять на комутатор 11, потім під управлінням мікроконтролера проводиться почергова комутація вхідних сигналів з подальшим кодуванням їх на 10 розрядному низко швидкісному АЦП 12.

Дані з АЦП надходять в мікроконтролер 13. На підставі отриманих і накопичених даних з використанням закладеного в мікроконтролер алгоритму останній виробляє широтно-імпульсно-модульований сигнал управління нагрівачем, який через підсилювач потужності 14 потрапляє на нагрівач 4. Управління нагрівачем відбувається за допомогою широтно-імпульсної модуляції з частотою 500-1000 Гц.

Варто зазначити, що оскільки не вимагається велика точність і лінійність АЦП і комутатора, можна використовувати в схемі мікроконтролер, до складу якого вже входить АЦП і комутатор, наприклад мікроконтролери фірми Atmel AT90S4433, ATmega103, ATmega603 і інші. Однак необхідно мати на увазі, що термодатчики, компаратор, джерело постійного струму і опорної напруги повинні володіти високою часовою і температурною стабільністю і не залежати від зміни напруги живлення.

Узагальнено, на рівні підпрограм, алгоритм роботи термостата виглядає наступним чином на рис. 2.2.

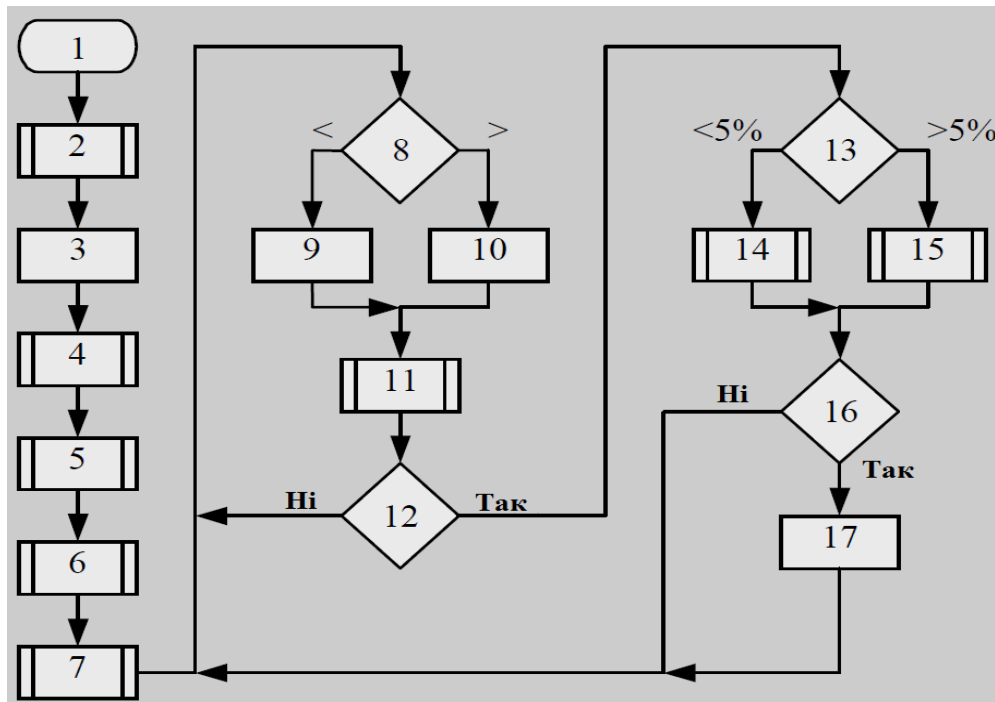


Рис. 2.2 Алгоритм роботи термостата

При включенні термостата на нагрівач подається напруга (рис. 2, 1) і відбувається початковий розігрів термостата на 1-2 °С (рис. 2, 2).

На нагрівач продовжує подаватися напруга, температура вимірюється з точністю до 0,1°С, фіксується час, за який відбувається нагрів термостата на 3 °С (рис. 2, 3).

Знімається напруга з нагрівача, робиться пауза до моменту початку охолодження термостата на 0,1– 0,2 °С (рис. 2, 4).

Фіксується час, за який термостат охолоне на 3 °С (рис. 2, 5).

Одночасно з нагріванням і охолодженням вимірюється температура середовища, що оточує термостат, з точністю до 0,1 °С.

На термостат подається напруга і проводиться швидке нагрівання до робочої температури (рис. 2, 6). Щоб уникнути перегріву, заздалегідь, не досягаючи заданої температури на 0,1 °С, з нагрівача знімається напруга і мікропроцесор переводиться в режим стабілізації температури.

На основі калібрувальної інформації про потужності нагрівача (пп. 2, 5) і поверхні, через яку термостат віддає тепло в навколишнє середовище, (пп. 4, 5) обчислюється частка потужності, яку потрібно подавати на нагрівач щодо максимальної (рис. 2, 7). Цей коефіцієнт обернено пропорційний відношенню часу нагріву (п. 2) до часу охолодження (п. 4).

Задаються початкові значення відсотка потужності нагріву і охолодження щодо розрахованої в п. 7, рівні 105% і 95%, відповідно. Наприклад, якщо розраховано, що потужність нагріву (шпаруватість імпульсів, що подаються на нагрівач) повинна становити 1,210, то для нагрівання на нагрівач повинна подаватися потужність $1,210 \cdot 105\% = 1,270$, а для охолодження – $1,210 \cdot 95\% = 1,150$.

Перевіряючи сигнал від компаратора (температура менше або більше заданої), мікропроцесор видає відповідний сигнал управління на нагрівач (рис. 2, 8, 9, 10).

Одночасно процесор весь час здійснює замір часу, протягом якого сигнал від компаратора перебуває в стані логічних «1» і «0» (рис. 2, 11, 12). Якщо час відрізняється більш ніж на 3-5% (13), то проводиться корекція значення потужності нагріву або охолодження - щоб час перегріву і недогріву став однаковим (15).

У разі якщо цей час (п. 10) однаковий, проводиться наближення потужності нагріву і охолодження до їх середнього значення на 10% (рис. 2, 14). Наприклад, якщо потужність нагріву становить 1,275, а охолодження – 1,198, і середнє значення – 1,2365, то 10% наближення складуть $(1,2365 - 1,198) \cdot 10\% = 0,004$. Отже, потужність нагріву становитиме 1,271, а охолодження – 1,202. Одночасно необхідно стежити за тим, щоб обидва значення не наближалися один до одного більше, ніж на 2 одиниці молодшого розряду, який враховується. В даному випадку вони повинні відрізнятися на 0,002 одиниць (14).

Коефіцієнти потужності коригуються також на основі даних, отриманих від термодатчика, що вимірює температуру повітря поряд з термостатом (рис. 2, 15).

Під час кожної ітерації наближення потужності нагріву до потужності охолодження слід контролювати сигнал, що надходить від додаткового ОП, щоб визначити ступінь стабілізації температури, а також перевірити, чи не погіршилося це значення щодо попереднього виміру (рис. 2, 16). Погіршення стабілізації може статися, якщо раптом різко зміниться температура

навколишнього середовища або в разі будь-яких інших неврахованих факторів. Тоді слід розширити діапазон між потужністю нагріву і охолодження на 50% (рис. 2, 17) - таким чином, як це робилося в п. 11.

Сигнал перемикання зі зниженої потужності на підвищену виробляється процесором з випередженням у часі щодо попередньої ітерації на 25%.

Процесор повторює описані вище дії починаючи з п. 9.

При кожному зменшенні діапазону між частками потужності нагріву і охолодження термостата існує небезпека прорахунку частки потужності, що підводиться, особливо у випадку зміни зовнішніх умов. Тому для звуження цього діапазону вибрано значення 10%. У разі якщо температура зовнішнього середовища змінюється швидше, ніж процесор встигне її врахувати, або результати розрахунку коефіцієнта корекції частки потужності нагріву і охолодження виявляться не точні, точність стабілізації буде знижуватися на 50% на кожен цикл нагріву-охолодження. Точність стабілізації температури буде знижуватися до тих пір, поки помилка обчислення коефіцієнтів частки потужності нагріву і охолодження не стане менше самого діапазону цих коефіцієнтів, після чого діапазон коефіцієнтів знову почне звужуватися.

На основі даного алгоритму було розроблено пристрій керування термостатом (див. Рис. 1). В якості керуючого мікроконтролера був обраний мікроконтролер фірми Atmel AT90S4433, що містить в своєму складі 10-розрядний АЦП, апаратний пристрій широтно-імпульсної модуляції, аналоговий комутатор на 6 входів, ОЗП, ПЗП (Flash і EEPROM). Продуктивність його складає 8 млн. операцій за секунду при ціні менше 7 доларів США. В якості аналогового компаратора використовувався прецизійний ОП 140УД24, термодатчик напівпровідникового типу К1019ЕМ1, як джерело опорної напруги – стабілітрон КС191Ф (стабільність 0,0005 В% / °С). Габарити керуючого модуля склали 80x50x15 мм. Споживання струму (без урахування нагрівача) – менше 15 мА. Вихідна потужність каскаду становить 15 Вт (12 В, 1,25 А).

Організований зовнішній інтерфейс дозволяє виводити на індикатор або персональний комп'ютер значення температурної стабільності, а також поточну

абсолютну і відносну температуру.

Керуючий пристрій було випробувано в термостаті, що має такі характеристики:

потужність нагрівального елементу (з ніхромової нитки) – 3 Вт;

термостабілізуюче тіло – мідь, 6,75 см³ (30x15x15 мм);

розташування нагрівача і термодатчика – на протилежних сторонах термостабілізуючого тіла.

На рис. 2.3 показані режими роботи термостата. Час виходу на режим становить менше 10-15 хв при точності стабілізації температури 0,001 °С. Точність стабілізації визначалася по виходу ОП 10 (див. рис. 2.1) за допомогою осцилографа і даних від АЦП. Зміна температури на термостабілізуючому тілі на 0,1 °С відповідає зміні напруги на виході ОП на 2,5 В. При виході термостата на режим зміна напруги на виході ОП становила трохи більше 2,5 мВ, що відповідає зміні даних на АЦП в межах 5 рівнів квантування.

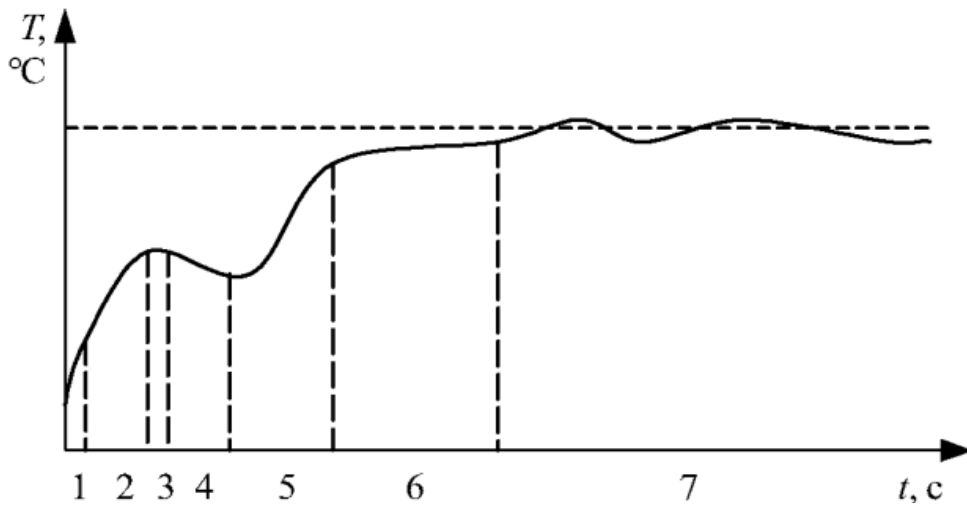


Рис. 2.3. Режим роботи термостата

1 – початковий нагрів; 2 – калібрований нагрів; 3 – початок охолодження; 4 – каліброване охолодження; 5 – швидке нагрівання до температури стабілізації (0,1°С); 6 – вихід на робочий режим; 7 – режим стабілізації.

Виміри проводилися в закритому опалювальному приміщенні при температурі від 15 до 21 °С, при цьому термостабілізуюче тіло було захищене від прямого впливу навколишнього повітря.

Таким чином, запропонований алгоритм наділений властивостями автоматичного пристосування до багатьох типів термостатів, а також

автоматичного наближення до найкращих показників стабільності температури без використання високоточного АЦП, що дозволяють вважати його перспективним для створення високоточних термостатів.

Висновки

У даному розділі описано інструменти та ПЗ за допомогою якого було розроблено підсистему керування циркуляційними термостатами.

Платформа QT і мова програмування C++ були обрані через те, що вони містять практично всі сучасні інструменти для розробки надійних і якісних програмних продуктів.

Теоретичний алгоритм управління термостатами дає змогу зрозуміти принцип роботи термостата, наприклад, зростання температури рідини є досить інертним явищем, для цього потрібно відносно багато часу і затрат енергії. Точність виводу температури також залежить від калібрування показників датчиків температури.

Постановка та обґрунтування проблеми

Метою роботи є розроблення підсистеми керування циркуляційними термостатами. Дана розробка є актуальною, тому що планується створення нової навчальної дисципліни, яка називається «Тепло- і масообмін в мікросистемах», а використання підсистеми може бути корисним і допомогти у створенні практичної частини курсу. Курс «Тепло- і масообмін в мікросистемах» розроблено для студентів спеціальності «Інформаційні технології проектування», спеціалізація – автоматизація проектування мікросистем.

Метою курсу є вивчення фізичних основ і математичних моделей процесів теплопередачі та масопереносу в мікросистемах на основі аналізу конструктивних особливостей, умов експлуатації та функціонування, вимог до забезпечення схемотехнічних, конструктивних, технологічних та функціональних характеристик.


В результаті вивчення даного курсу студент повинен вміти: математично моделювати процеси теплопередачі та масопереносу за допомогою САЕ

COMSOL, вимірювати вплив температур на характеристики мікросистем з використанням термостата.

Спільно з дипломним керівником було проаналізовано структуру і тематику, яку охоплює цей курс. Було вирішено зупинитися на експериментальному дослідженні температурних впливів на функціональні характеристики MEMS, що передбачало вибір режиму нагріву та охолодження MEMS, а також встановлення програми для циркуляційної ванни.

Після опрацювання документацій і достатнього розуміння принципу роботи циркуляційного термостату, провести вимірювання функціональних характеристик MEMS під дією температур, встановлених у циркуляційній ванні. Потрібно розробити інструкції створення програм для ручного програмування.

Створення програми «Час/Температура»

Натисніть кнопку , щоб отримати доступ до головного меню, а потім натисніть на значок програми. Підменю Програма з'явиться (рис.3.1):

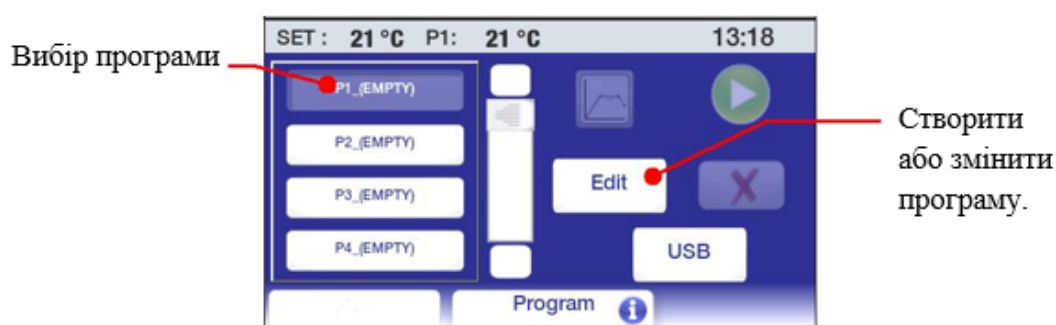


Рис.3.1 Підменю «Програма»

Initial Program Step — початковий програмний крок, щоб задати параметри для першого кроку у вашій програмі «часу/ температури», натисніть значок Rx, а потім Edit. Екран для першого кроку програми з'явиться (рис. 3.2):

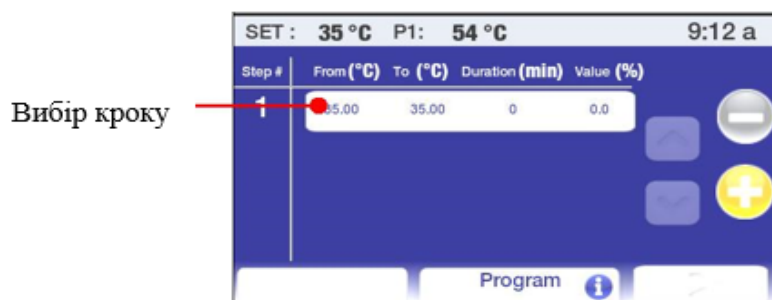


Рис. 3.2 Створення першого кроку програми

Натисніть кнопку From / To . Екран для введення початкової температури (Step Start Temperature) , кінцевої температури (Step End Temperature), і тривалість кроку у хвиликах (Step Duration), з'явиться (рис. 3.3) :

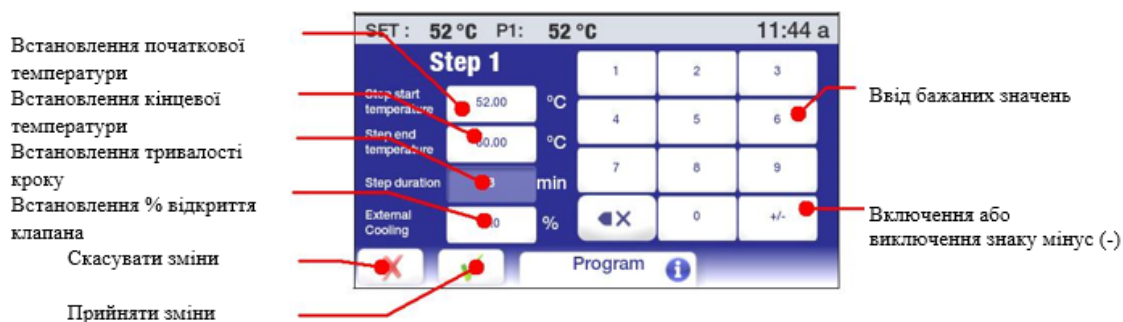


Рис. 3.3 Ввід параметрів

Step Start Temperature – це температура ванни на початку відображуваного кроку. Вона підходить тільки для першого кроку в програмі.

Step End Temperature – це бажана температура ванни в кінці стадії. Вона може бути вищою, нижчою або такою ж, як на початковому етапі.

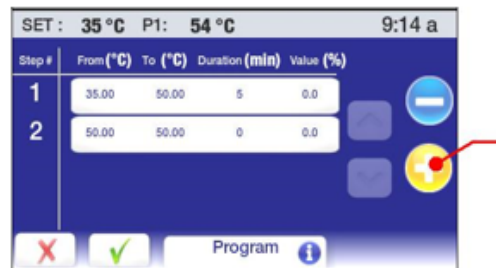
Step Duration – це кількість часу виконання кроку.

External Cooling – ця функція працює тільки на пристроях, оснащених додатковим зовнішнім охолодженням електромагнітного клапана і впливає на швидкість підйому температури. Чим вище значення%, тим більше витрата охолоджуючої води через охолоджуючий змійовик. Відкриття клапана відбувається що 5 секунд з кроком. Якщо відсоток зовнішнього охолодження встановлена на рівні 20%, а тривалість кроку 1 хвилина, то клапан буде відкрито протягом однієї секунди кожні п'ять секунд. (тобто, відкритої в протягом 12 секунд). Охолоджуючий значок в рядку стану буде горіти, коли зовнішній клапан охолодження відкритий.

Важливо: Якщо температура ванни є більшою або меншою за встановлену температуру на початковому кроці програми, то буде застосовано охолодження або нагрів відповідно, щоб довести температуру до встановленої і вже після цього почнеться виконання програми.

Additional Program Steps — додаткові кроки програми, натисніть для додавання інших кроків програми (рис. 3.4). Значенням температури "From" для кожного нового кроку за замовчуванням буде "End" для значення

температури з попереднього кроку.



Додати новий крок програми

Рис. 3.4 Додавання нового кроку програми

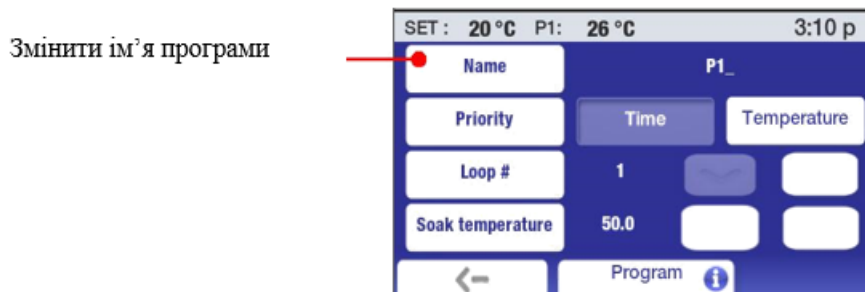
Naming and Setting Program Run Parameters — натисніть ✓ після того, як ви ввели всі кроки, які ви хочете в програмі (рис. 3.5).



Збереження всіх змін.

Рис. 3.5 Збереження змін

З'явиться екран, що дозволяє надати вашій програмі унікальне ідентифікаційне ім'я (рис. 3.6).



Змінити ім'я програми

Рис.3.6 Зміна імені програми

Існує обмеження у 8 символів на ім'я програми (рис. 3.7).

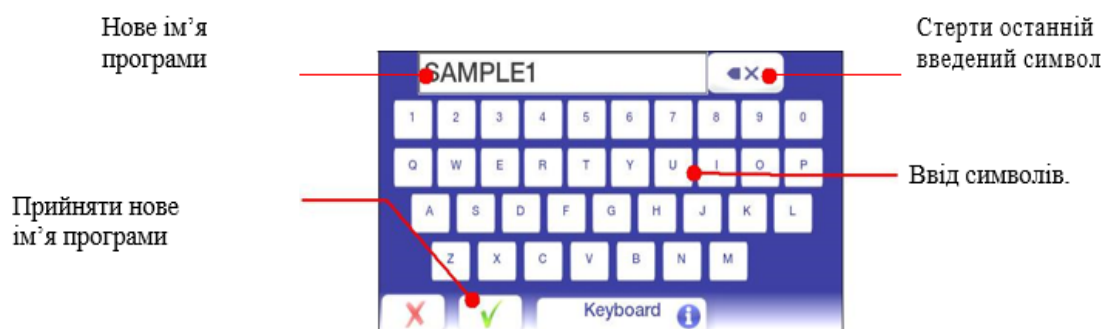


Рис.3.7 Введення імені програми

Після того, як ви назвали цю програму, ви можете встановити додаткові

параметри для запуску програми (рис. 3.8).

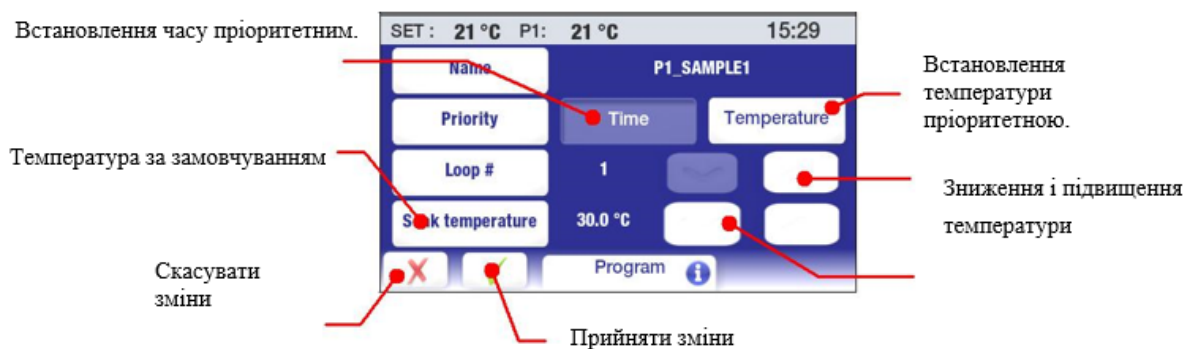



Рис. 3.8 Встановлення додаткових параметрів

Priority — пріоритет в програмі. Програми можуть бути запуснені з використанням або часу або температури на основі пріоритету. Якщо досягнення послідовних заданих значень температури має вирішальне значення, температура повинна бути обрана в якості пріоритету. Якщо завершення програми в фіксованій кількості часу має важливе значення, час має бути вибрано як пріоритет.

Loop — цикл, а саме кількість разів, які програма буде повторно виконувати. Тобто, автоматично починає працювати Крок 1, коли останній крок в програмі буде завершено.

Soak Temperature — температура за замовчуванням. Температура ванни повинна підтримуватися на рівні, як тільки останній крок був завершений.

Попередній перегляд існуючої програми і її запуск.

Функція попереднього перегляду дозволяє переглядати недавно створену програму «часу/температури» або щоб переконайтеся, що програма, яку ви хочете запусити є відповідною. Ця функція здійснюється натисканням клавіші , натиснувши на значок програми в головному меню, а потім вибрати програму, яку ви хочете переглянути (рис. 3.9).

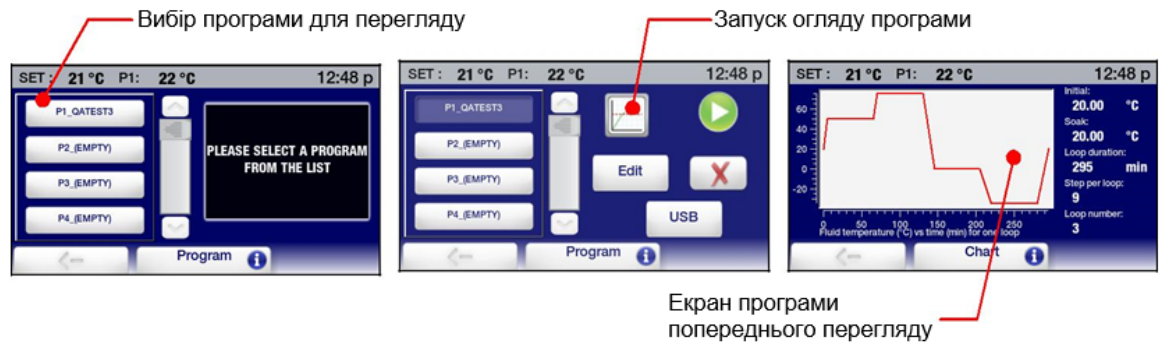


Рис.3.9 Вікно попереднього перегляду

Вікно попереднього перегляду містить наступну інформацію:

Initial Temperature — початкова температура на першому кроці програми.


Soak Temperature — температура, при якій ванна буде підтримуватися після завершення програми.

Loop Duration — час (у хвиликах), який буде потрібно, щоб завершити один цикл програми.

Steps per Loop — число кроків в програмі.

Loop Number — число циклів в програмі.

Fluid Temperature vs Time — графічне представлення одного програмного циклу, який ілюструє криву температури в залежності від часу, пов'язаних з різними етапами програми.

Для запуску програми натисніть  для входу в головне меню контролера, а потім натисніть значок програми. Контролер буде відображати підменю в наступному вигляді (рис. 3.10):

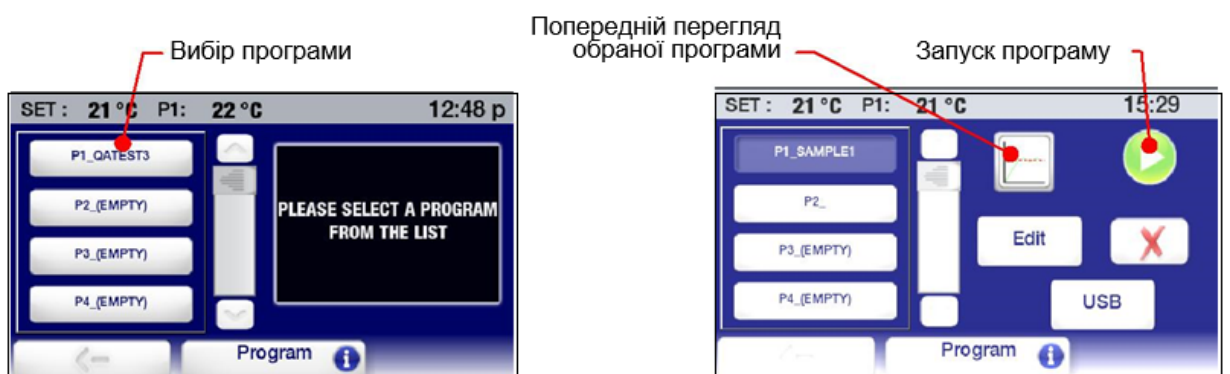



Рис. 3.10 Попередній перегляд програми

Виберіть програму, яку ви хочете запустити, а потім натисніть на значок стрілки , щоб розпочати роботу (рис. 3.11).

Важливо: Якщо температура в даний момент в резервуарі пристрою є

вищою або нижчою початкової температури, то почнеться охолодження або нагрівання до необхідної температури. Після досягнення необхідної температурної програми почне свою роботу.

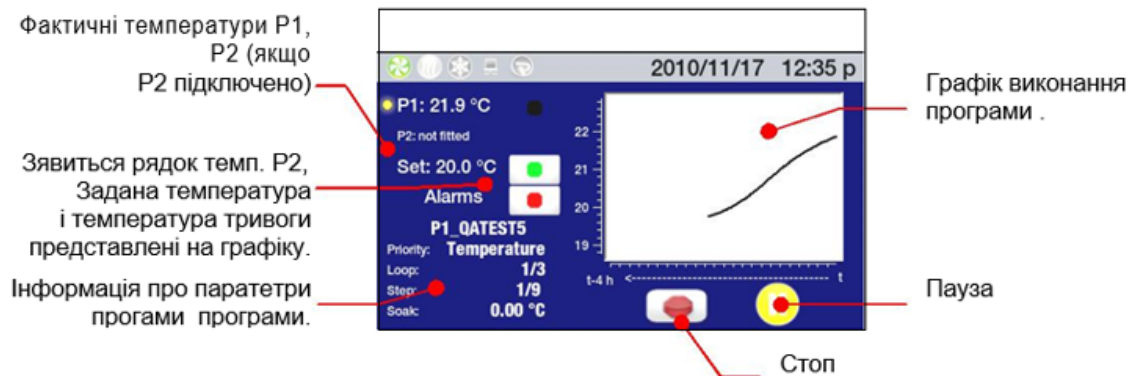


Рис.3.11 Перегляд параметрів запущеної програми

На екрані контролера буде зображено інформацію про:




Temperature Information — фактична температура рідини P1 всередині резервуара; температуру рідини P2 виміряна датчиком у зовнішньому резервуарі (якщо він підключений і включений); поточне задане значення температури для виконуваного кроку програми.

Program Name — назва виконуваної програми.

Program Information — обрана програма пріоритету (час або температура); виконання циклу (повтору) програми і загальна кількість циклів; поточний крок програми; загальне число кроків програми; температури, яка відбудеться після завершення програми.

Temperature Graph — температура P1 (внутрішня температура) в залежності від часу зображена на графіку чорним кольором; графік температури у зовнішньому резервуарі P2 (синя лінія); задана температура (зелена лінія); верхня і нижня межа температурного сигналу тривоги (червона лінія).

Time Scale — шкала часу, може бути зміненою шляхом дотику до області графіка. Дані можуть відображатися в діапазоні від 4 хвилин до 10 днів.

Тимчасово призупинити програму, натиснувши на знак , що символізує паузу. Температура буде підтримуватися на тому ж рівні, поки не продовжити виконання програми, натиснувши на значок , що символізує початок. Кінцева зупинка програма виконана червона іконка , що

символізує зупинку.

Редагування програми

Натисніть кнопку для входу в головне меню контролера і натисніть на значок програми. Контролер буде відображати підміну в наступному вигляді (рис. 3.12):

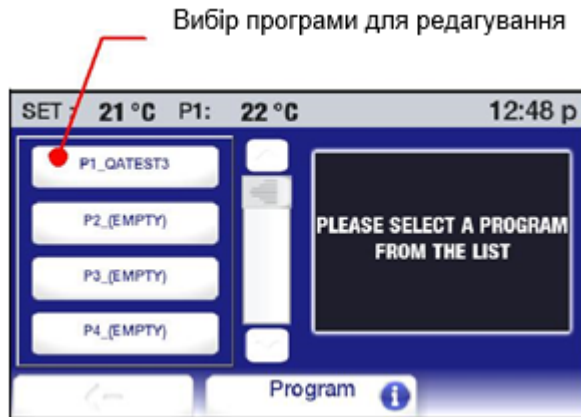


Рис.3.12 Вибір програми для редагування

Виберіть програму, яку ви хочете змінити, і натисніть на значок редагування “Edit” (рис. 3.13).

Змінити вибрану програму

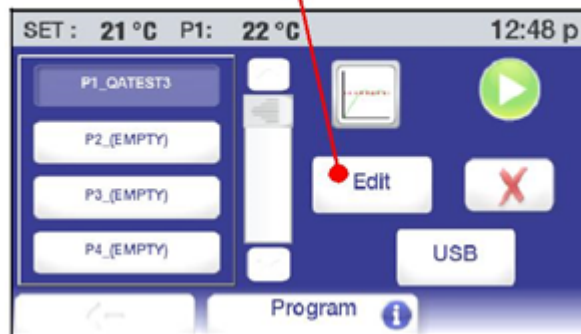


Рис. 3.13 Перехід в режим редагування програми

Після натискання кнопки “Edit” на екрані контроллера для цієї програми буде відображено параметри, які можна змінити (рис. 3.14):

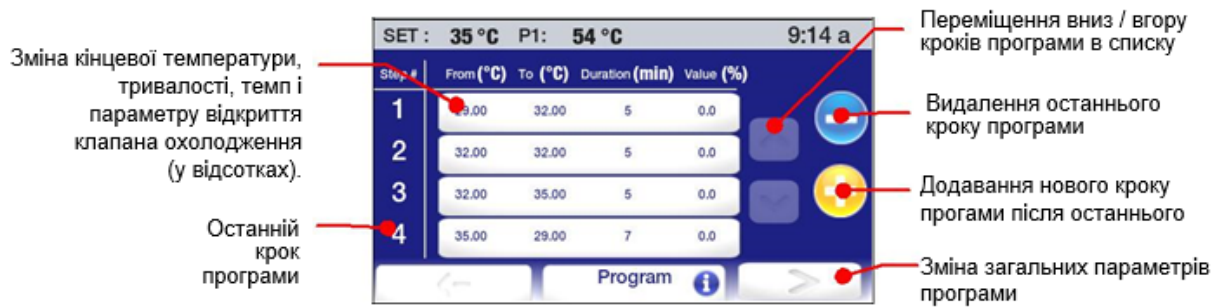


Рис. 3.14 Внесення змін параметрів при редагуванні

Adding a Step — щоб додати крок до програми, натисніть . Новий крок буде додано після остаточного кроку в програмі. Введіть температуру і кінцеву стадію виконання кроку, натиснувши відповідну іконку і введіть потрібні значення за допомогою клавіатури. Торкнутися , щоб прийняти значення, які були введені, або для скасування.

Deleting a Step — щоб видалити останній крок програми, натисніть . Натисніть , щоб підтвердити видалення, або для скасування.

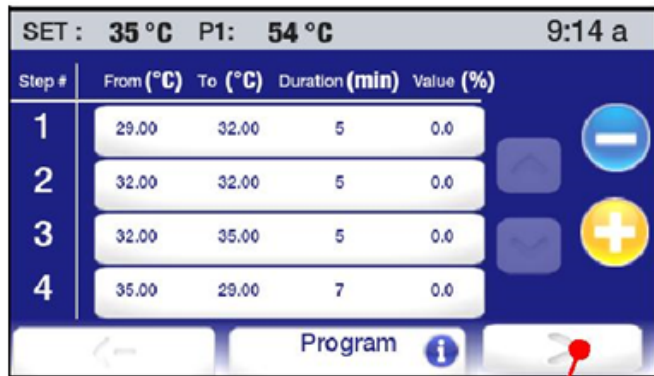
Editing Step Parameters — щоб змінити температуру на кінцевій стадії, час або швидкість охолодження, натисніть на іконку для цього кроку (рис. 3.15).



Рис. 3.15 Зміна температури на кінцевій стадії

Виберіть елемент, який ви хочете змінити і використовувати цифрову клавіатуру, щоб ввести нове значення. Натисніть , щоб прийняти зміни, або щоб скасувати їх .

Editing Program Parameters — зміна параметрів програми, а саме пріоритету (час/температура) або змінити кількість циклів. Натиснувши на значок, що символізує стрілки "вправо" в нижньому правому куті екрану (рис. 3.16).



Доступ до основних параметрів програми

Рис. 3.16 Перехід до основних параметрів програми

На екран з'являється меню редагування наступного виду (рис. 3.17):

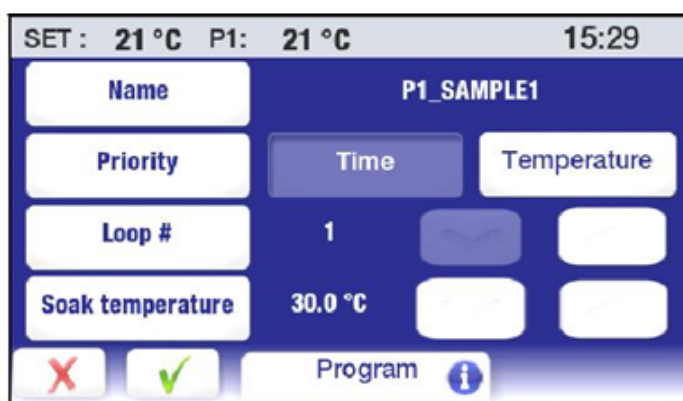


Рис. 3.17 Редагування основних параметрів програми

Ви можете змінити будь-які або всі параметри програми, включаючи назву програми. Натисніть **✓**, щоб прийняти зміни, **X** щоб скасувати.

Збереження і завантаження програм на зовнішній пристрій USB

Ця функція дозволяє записувати програми на портативний флеш-накопичувач або інший пристрій для збору даних. Збережений файл може бути використаний для відновлення первісного вигляду програми або передачі на інший пристрій, використовуючи тип контролера Advanced Programmable.

Saving a Program — натисніть **☰**, щоб отримати доступ до головного меню, а потім натисніть на значок програми. Підменю програма з'явиться (рис. 3.18):



Рис. 3.18 Вибір програми з переліку

Натисніть будь-який із цих значків програму. З'явиться екран списку програм. Натиснувши на кнопку «USB», файл буде відправлено на підключений USB-носій. Виберіть програму, яку ви хочете зберегти на флеш-накопичувач USB і натисніть на значок USB. На мить відобразиться повідомлення про передачу файлу USB-носій (рис. 3.19).

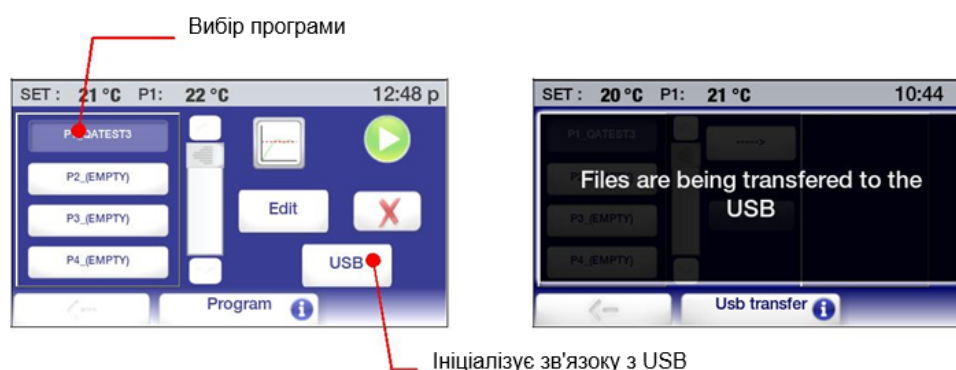


Рис. 3.19 Відправлення файлу на USB-носій

Виберіть файл для передачі і натисніть на значок зі стрілкою вправо (рис. 3.20).

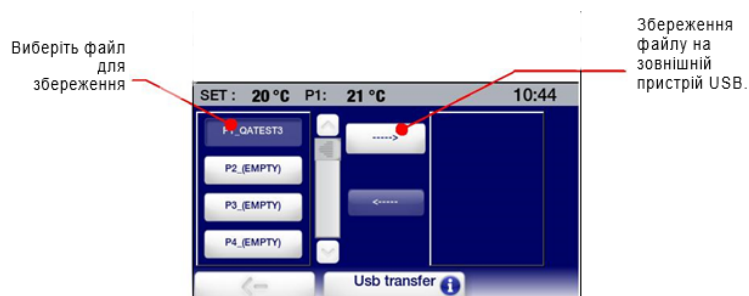
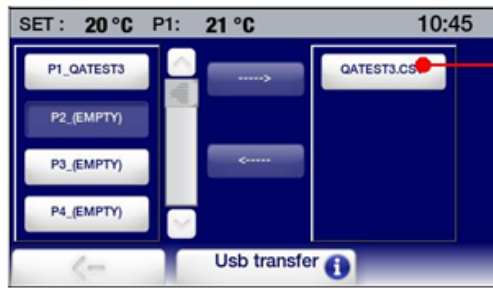



Рис. 3.20 Передача файлу на USB-носій

Після завершення передачі файлу, ім'я файлу буде відображатися в списку на правій частині екрану (рис. 3.21).

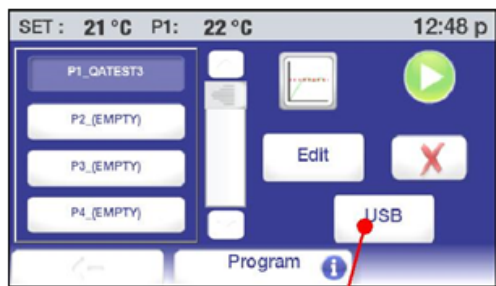


Файли, що зберігаються на підключеному зовнішньому USB-носії.

Рис. 3.21 Збереження файлу на USB-носії

Uploading a Program — щоб завантажити програми на термостат, натисніть кнопку  для входу в головне меню контролера і натисніть на іконку програми.

Натисніть на значок з назвою будь-якої програми, щоб викликати появу наступного екрану (рис. 3.22):



Ініціалізує зв'язок з USB



Рис. 3.22 Завантаження файлу на контролер

Виберіть місце для програми, яку ви хочете завантажити і натисніть на значок USB. Повідомлення ненадовго з'явиться, яке зазначає, що файл передано.

Виберіть пункт призначення для завантаження, виберіть програму, яку ви хочете завантажити, а потім натисніть стрілку вліво (рис. 3.23).

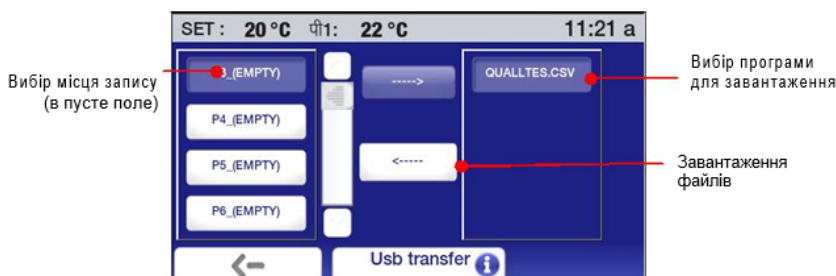


Рис. 3.23 Вибір місця для завантаження файлу на контролер

Після завершення передачі файлу, назва програми з'являтиметься в списках програм (рис.3.24)

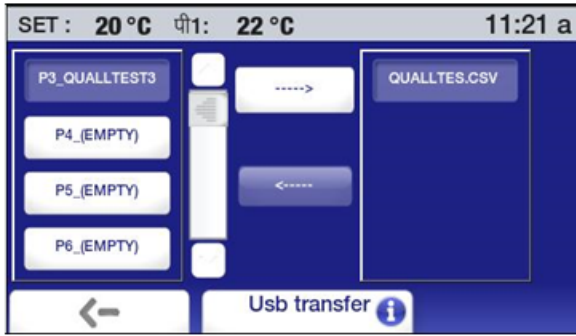


Рис.3.24 Передача файлу на контролер

Керування термостатом за допомогою інтернет – браузера

Контролер типу AP може бути підключений безпосередньо до ноутбука або настільного комп'ютера за допомогою підключення Ethernet або через маршрутизатор або мережевий комутатор. Будь-який тип підключення дозволяє управляти і / або контролювати роботу циркуляційного термостата в режимі реального часу за допомогою інтернет-браузера, ввівши його IP-адресу.

Для перегляду стану циркулятора за допомогою Інтернет-браузера, введіть його IP-адресу в адресному рядку браузера. З'явиться екран з наступною інформацією та інтерактивних полів (рис. 3.25):

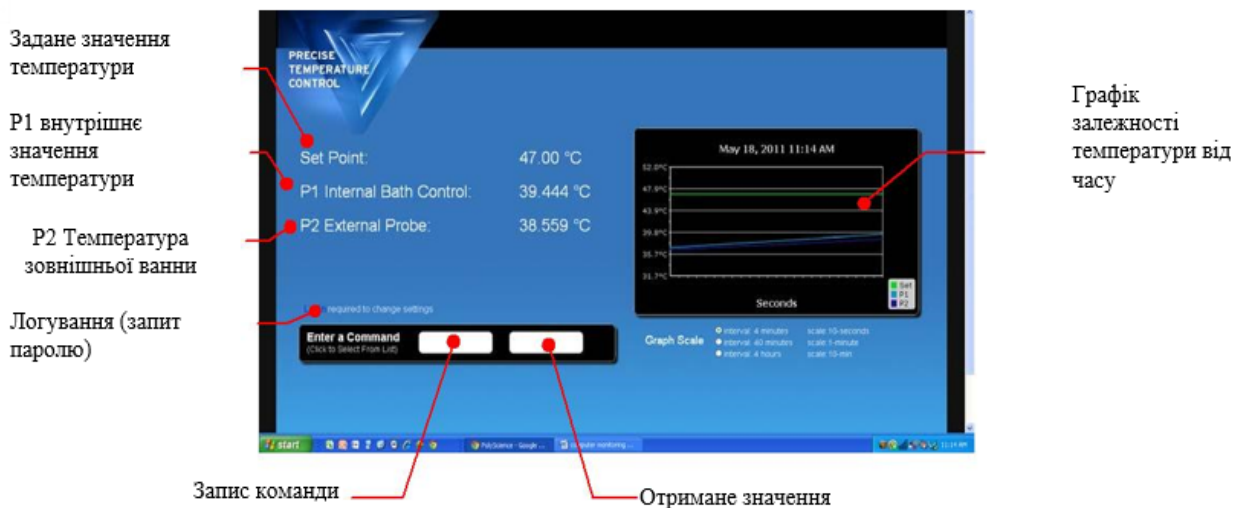


Рис. 3.25 Вікно веб-браузера для керування термостатом

Для моніторингу роботи (команди Reed) не вимагається підтвердження паролю, а для управління (команди Set) користувачу потрібно ввести пароль, який встановлений на контролері. Вікно логування зображено на рис. 3.26.

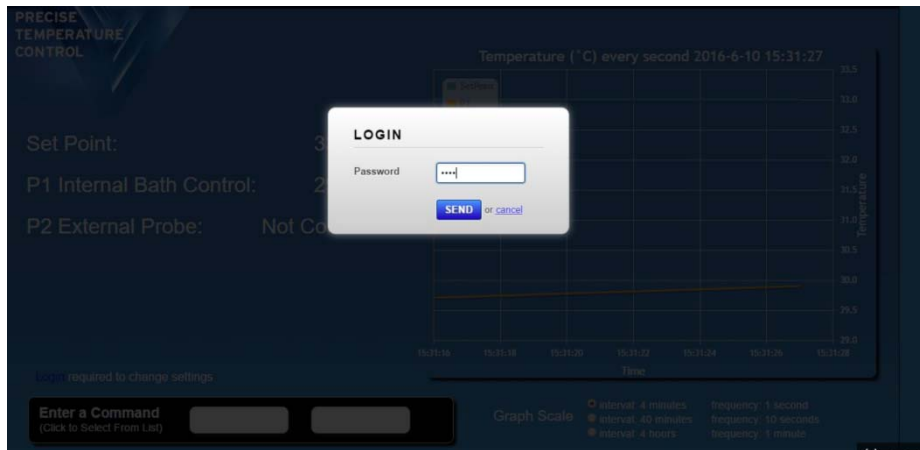






Рис.3.26 Вікно логування

Даний веб-застосунок містить готові команди для управління і моніторингу роботи термостата. Для виконання команди потрібно ввести її назву, наприклад RS або SM30, і натиснути ENTER. Успішне виконання команди відображає “!”. Всі команди протестовано і результати роботи наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Команди керування термостатом

Опис команди	Результат виконання
1 RB: Read Firmware Revision – зчитати версію прошивки ;	2 
RF: Read Fault (0=none,1=fault) – перевірити термостат на наявність помилок;	
RM: Read Pump Speed - зчитати швидкість підкачки помпи;	
RO: Read Run Status (0=standby,1=run)- зчитати поточний режим підключення (0 = в режимі очікування,	

1 = в режимі роботи) ;

RR: Read External Temperature – зчитати температуру зовнішньої підключеної посудини ;

RT: Read Internal Temperature – зчитати поточну температуру рідини в термостаті ;

RS: Read Setpoint – зчитати задане значення температури ;

RU: Read Units – зчитати одиниці вимірювання температури (C = градуси за шкалою Цельсія ,

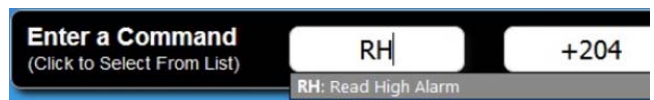
F = Фаренгейта) ;

RW: Read Autorestart (ON = 1, OFF = 0) – зчитати чи увімкнений автозапуск (1 = вкл., 0 = викл.);

RA: Read Auto Refrigerant Setpoint - зчитати задане значення температури автоохолодження;

RH: Read High Alarm - зчитати температуру сигналу тривоги високого рівня;

RL: Read Low Alarm - зчитати температуру сигналу



тривоги низького рівня;

RC: Read Current Program Step – зчитати поточний крок запущеної програми

(Error? = програма не запущена,

1,2,3...= поточний крок програми);

RE: Read Elapsed Program Time (hh:mm:ss) – зчитати тривалість виконання поточної програми ;

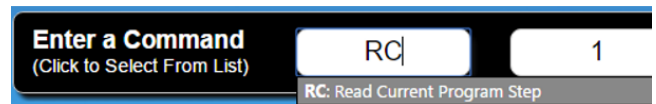
RG: Read Program Status(0=stop,1=run, 2=pause) – зчитати статус програми (0 = викл. ,1 = вкл. ,

2 = пауза) ;

RI: Read Current Program Loop - зчитати поточний цикл запущеної програми;

RK: Read Number Loops Program will Run – зчитати, яке число циклів програма буде виконуватись ;

RY: Read Number Steps Program will Run - зчитати, яке число кроків програма буде виконуватись ;



RV: Read Running Program Number Px – зчитати номер Px програми, яка запущена (x = [1;100]);

SM: x Set Pump Speed (x=5 to 100) – встановити швидкість підкачки помпи в межах

від 5 до 100%;

SE: i Set Echo(ON:i=1,OFF:i=0) - встановити відгук ;

SO: i Set Unit (On=1,OFF=0) -

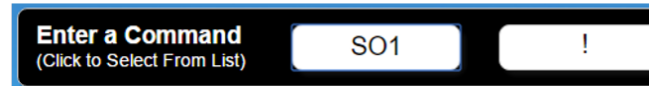
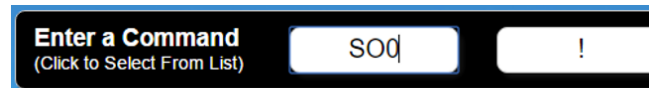
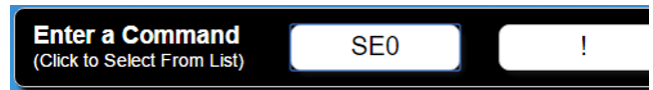
включити/виключити

контролер ;

SS: XXX.XX Change Setpoint – змінити задане значення температури в форматі SSXX або SSXX.XX ,де XX.XX температура у відповідник одиницях ;

SW: i Set Autorestart (ON=1,OFF=0) – встановити автозапуск;

SA: xx Set Auto Refrigeration Setpoint - задати значення температури автоохолодження ;



SH: xxx.xx Set High Alarm
– встановити температуру сигналу тривоги високого рівня ;

SL: xxx.xx Set Low Alarm
- встановити температуру сигналу тривоги низького рівня ;

SU: i Set Units (i=C,i=F) – встановити одиниці вимірювання температури, де i=C градуси за шкалою Цельсія , а i=F Фаренгейта;

SR: Stop the program - зупинити запущену програму;

SGP: i Schedule program immediately – команда ввімкнення/вимкнення термостата. Формат SGPi , де i = 1 або 2.

Enter a Command (Click to Select From List)	SH199	!
--	-------	---

Enter a Command (Click to Select From List)	RH	+199
--	----	------

Enter a Command (Click to Select From List)	SL-29	!
--	-------	---

Enter a Command (Click to Select From List)	RL	-29
--	----	-----

Enter a Command (Click to Select From List)	SUC	!
--	-----	---

Enter a Command (Click to Select From List)	RS	+33.00
--	----	--------

Enter a Command (Click to Select From List)	SUF	!
--	-----	---

Enter a Command (Click to Select From List)	RS	+91.40
--	----	--------

Enter a Command (Click to Select From List)	SR	!
--	----	---

Enter a Command (Click to Select From List)	SGP1	!
--	------	---

Enter a Command (Click to Select From List)	SGP2	!
--	------	---

Висновки

В даному розділі було представлено інструкції ручного створення, перегляду, запуску і редагування програм на циркуляційному термостаті AP15R-30, а також збереження і завантаження їх на зовнішній USB-пристрій. Наведені іструкції допоможуть оволодіти базовими навичками для керування циркуляційним термостатом. Наведено і протестовано всі команди веб-браузера для керування термостатом в режимі реального часу.

Набуті навички створення програми на основі використання часу або температури, як пріоритету, будуть слугувати для проведення лабораторних дослідів моделювання теплових систем та розуміння принципу роботи термостата.

Додатки.

СТВОРЕННЯ КОРИСТУВАЦЬКОЇ ПРОГРАМИ , АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ ПІДСИСТЕМИ

Опис і результати роботи підсистеми

Після успішного тестування у веб-браузері всіх команд керування циркуляційним термостатом, було розпочато розробку користувацької програми.

Після створення відповідної структури, згодом було розроблено команди в середовищі QT і протестовано їх на виконання. Всі команди наведено на рис.4.1.

```
//read
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Firmware Revision")),QString("RB"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Fault")),QString("RF"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Pump Speed")),QString("RM"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Run Status")),QString("RO"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read External Temperature")),QString("RR"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Internal Temperature")),QString("RT"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read SetPoint")),QString("RS"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Units")),QString("RU"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Autorestart")),QString("RW"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Auto Refrigerant Setpoint")),QString("RA"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read High Alarm")),QString("RH"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Low Alarm")),QString("RL"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Current Program Step")),QString("RC"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Elapsed Program Time")),QString("RE"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Program Status")),QString("RG"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Current Program Loop")),QString("RI"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Number Loops Program will Run")),QString("RK"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Number Steps Program will Run")),QString("RY"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Read Running Program Number Px")),QString("RV"),QString("none"));

//set
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Set Pump Speed")),QString("SM"),QString("int"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Set Echo")),QString("SE"),QString("bool"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Set Unit")),QString("SO"),QString("bool"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Change setPoint")),QString("SS"),QString("double"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Set Autorestart ")),QString("SW"),QString("bool"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Set Auto Refrigeration Setpoint")),QString("SA"),QString("int"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Set High Alarm")),QString("SH"),QString("double"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Set Low Alarm")),QString("SL"),QString("double"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Set Units")),QString("SU"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Stop the program")),QString("SR"),QString("none"));
new_cmo (&i,QString(QObject::tr("Schedule program immediately")),QString("SGP"),QString("bool_p"));
```

Рис. 0.1 Команди для управління термостатом.

Однією з переваг розробленої програми є українізація інтерфейсу. Перед текстом, що потребує перекладу, прописується оператор «tr» і це дозволяє в подальшому розпізнати його в застосунку QT Linguist. За допомогою QT Linguist здійснено переклад інтерфейсу. Також було перекладено і інші елементи, такі як кнопки чи лейбли. Фрагмент перекладу команд наведено на рис.4.2.

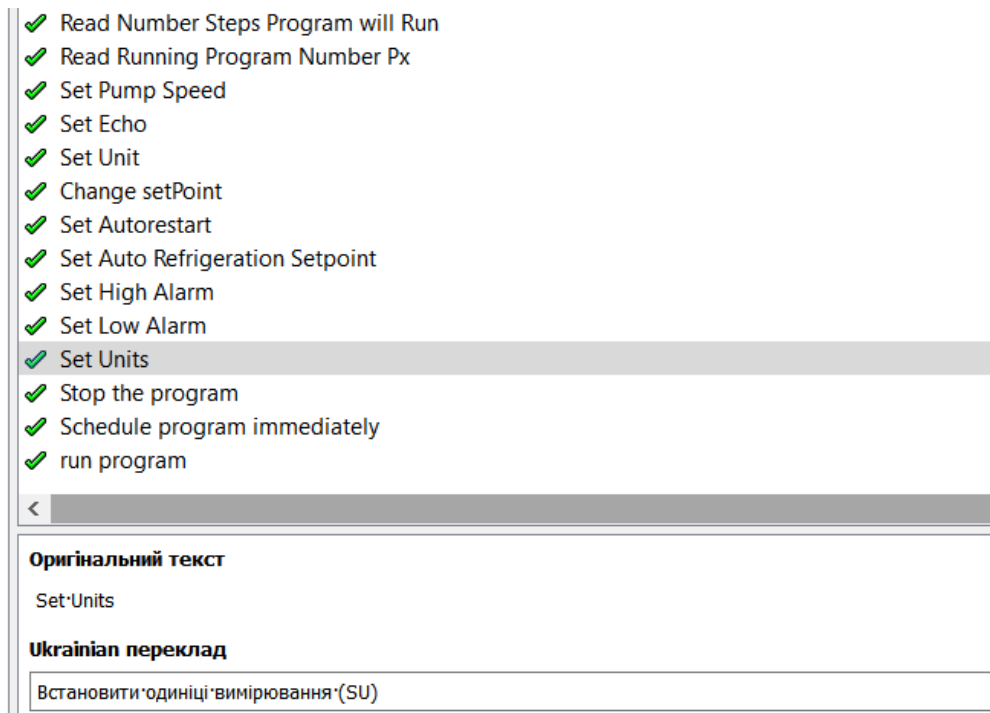


Рис. 0.2 Переклад команд за допомогою QT Linguist.

Після реалізації перекладу інтерфейсу, при запуску програми користувач може вибрати українську або англійську мову. Вікно вибору мови зображено на рис. 4.3.

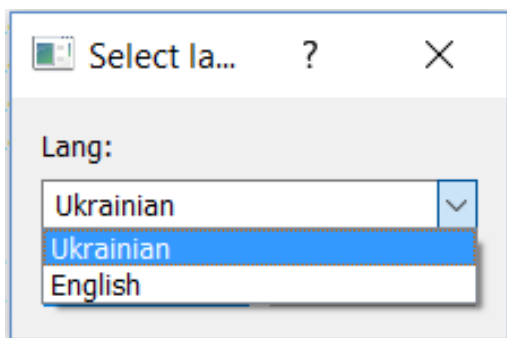


Рис. 0.3 Вікно вибору мови інтерфейсу.

Після вибору мови, здійснюється перехід на Головне вікно програми (рис. 4.4). Головне вікно програми складається з вкладок: «Параметри», «Дані» і «БД». Головне вікно також містить графік, побудова якого здійснюється при підключенні програми до термостата. У правому верхньому куті головного вікна знаходиться кнопка «ВКЛ/ВИКЛ», за допомогою якої можна відповідно включити термостат або перевести його в режим очікування (Standby).

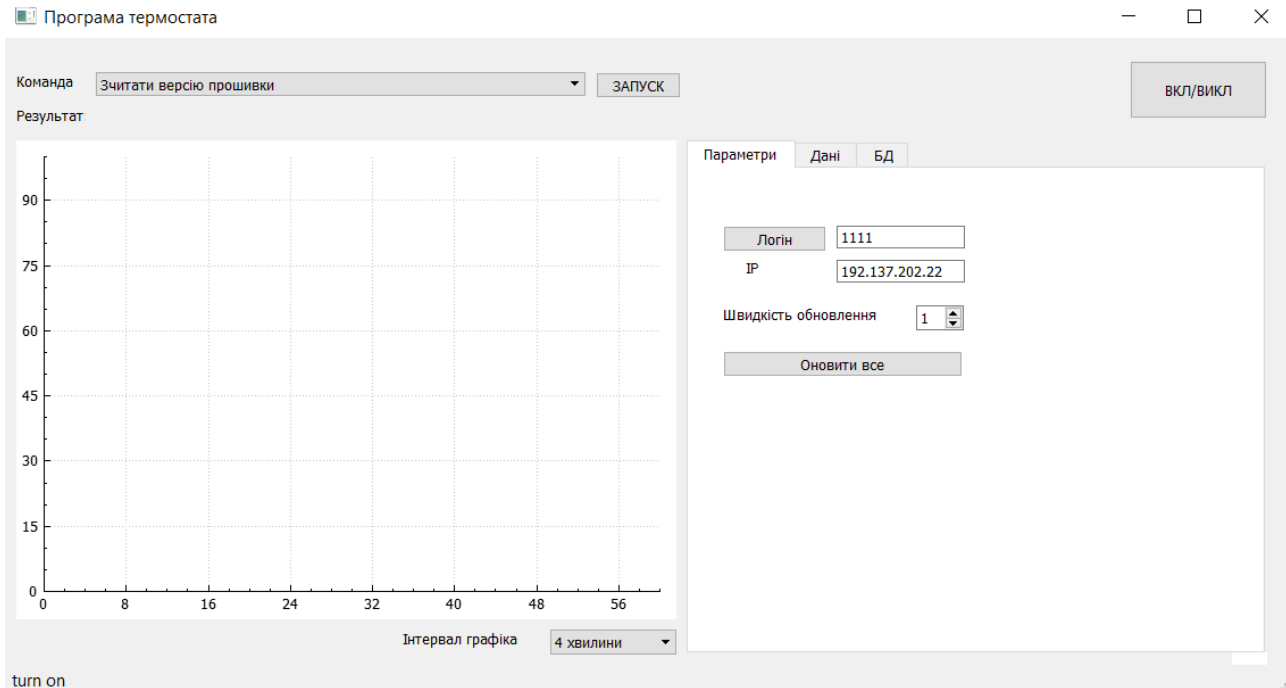


Рис. 0.4 Головне вікно програми

Для під'єднання комп'ютера до контролера термостата було використано кабель Ethernet. В налаштуваннях термостата встановлений пароль і статична IP-адреса. При підключенні програми ці параметри потрібно вписати у відповідні поля «Логін» і «IP». Потім натиснути кнопку «Логін» і відбудеться з'єднання (рис. 4.5).

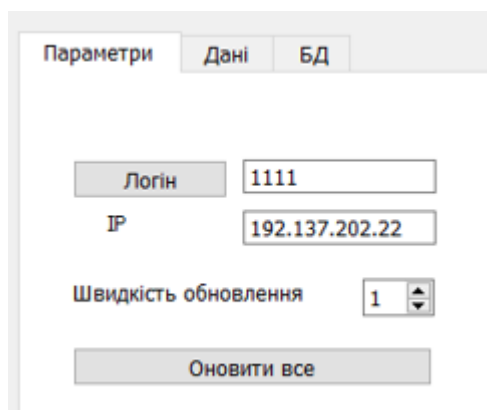


Рис. 0.5. Підключення до термостата

Без введення паролю можна моніторити роботу термостата (команди зчитування даних), а для встановлення даних, наприклад швидкості підкачки помпи чи зміни одиниць вимірювання, потрібно обов'язково підтвердити пароль.

При підключенні термостата відбувається побудова графіка зміни температури з часом (рис. 4.6).

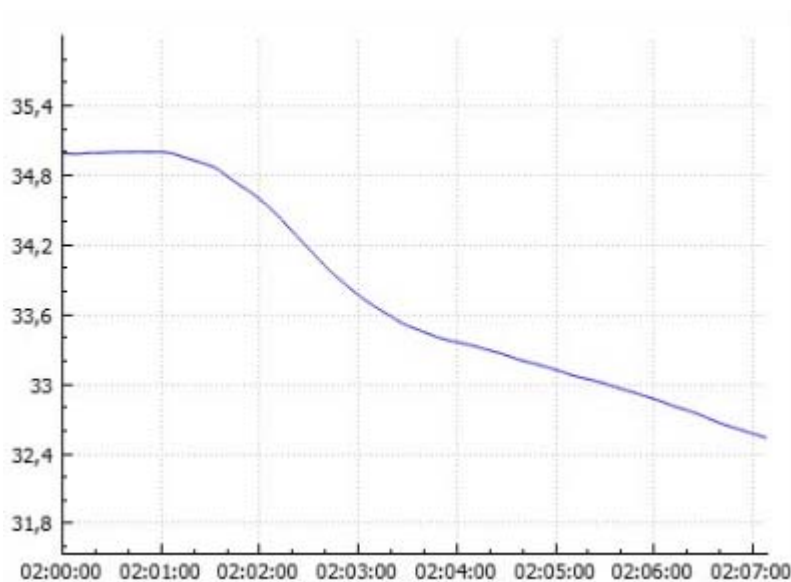


Рис. 0.6 Вікно побудова графіка

На рис. 4.7 наведено деякі з переліку команд, за допомогою яких і відбувається управління термостатом. Щоб запустити потрібну команду на виконання, її треба вибрати з існуючого перелік, а потім натиснути кнопку «ЗАПУСК».

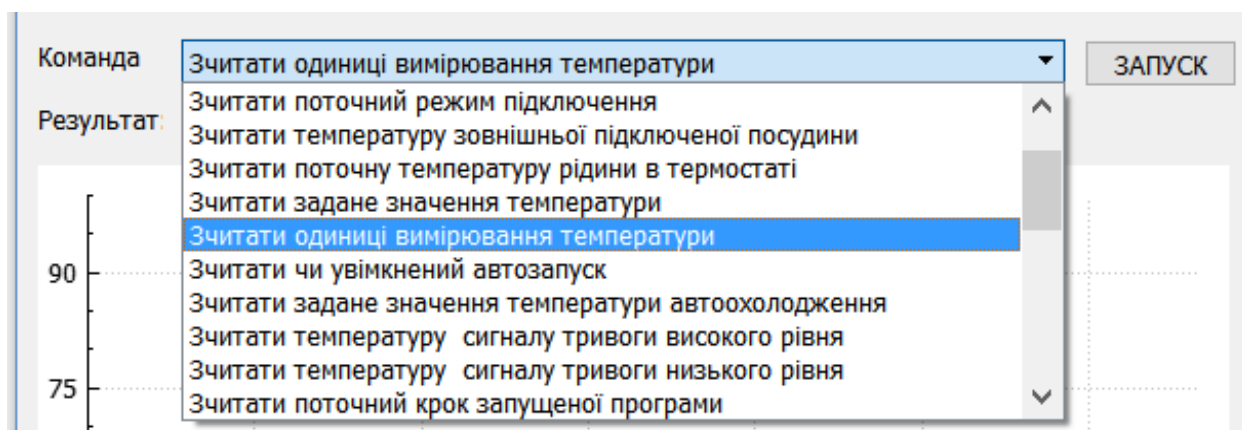


Рис. 0.7 Фрагмент переліку команд

На рис. 4.8 зображено виконання певних команд і у полі «Результат» ми отримаємо різні дані. Для команд зчитування це цифрові або буквинні символи, а для команд управління це знак «!» при успішному виконанні або «Error?» при помилці виконання.

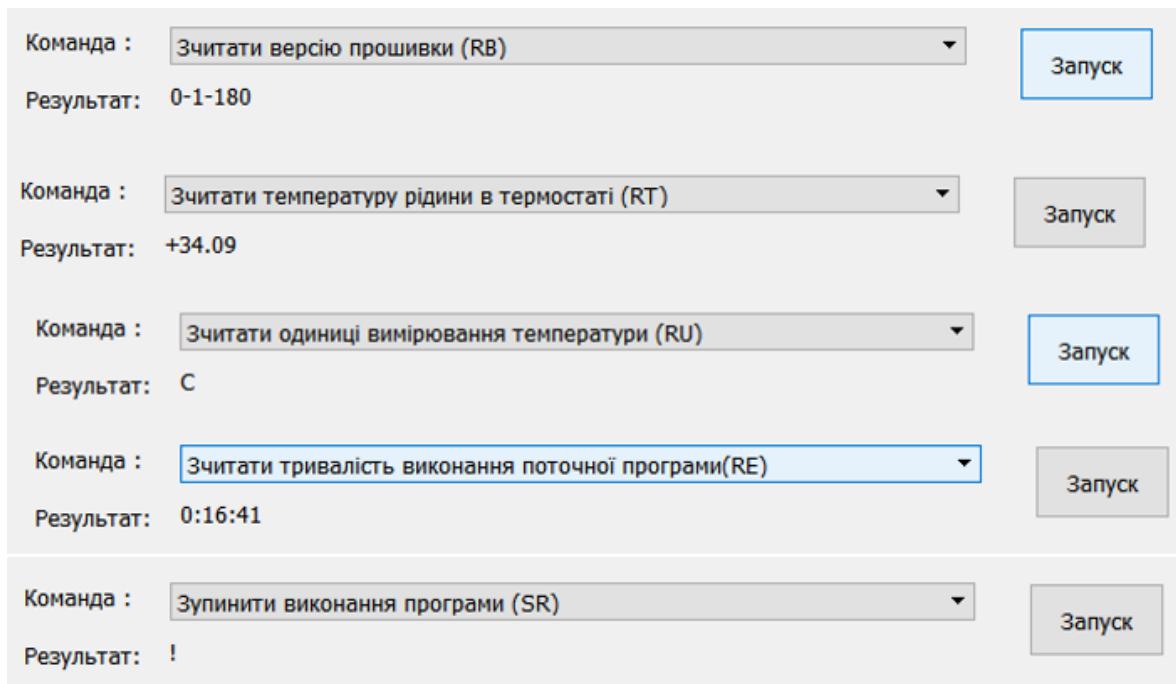


Рис. 0.8 Результати виконання команд

У вкладці «БД» можна записати файл бази даних при новому досліді, або відкрити вже існуючий файл. Для цього потрібно натиснути кнопку «Відкрити файл БД» (рис. 4.9), тоді відкриється провідник і потім треба вибрати шлях до файлу.

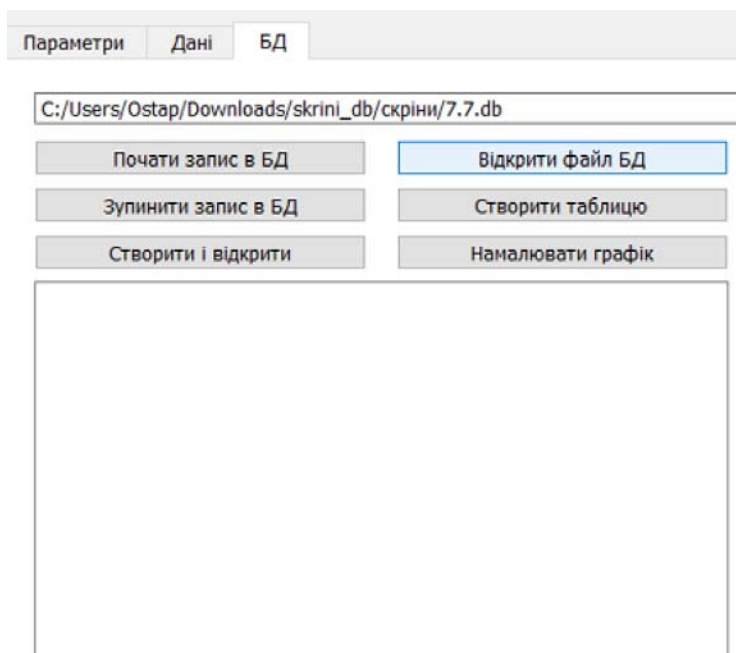


Рис. 0.9. Налаштування БД

Після відкриття файлу БД потрібно натиснути кнопку «Створити таблицю» (рис. 4.10) і в пустому вікні вкладки з'явиться таблиця БД (рис. 4.11). Після створення таблиці є можливість побудувати графік натиснувши відповідну кнопку і тоді в окремій формі з'явиться вікно з графіком (рис.4.12).

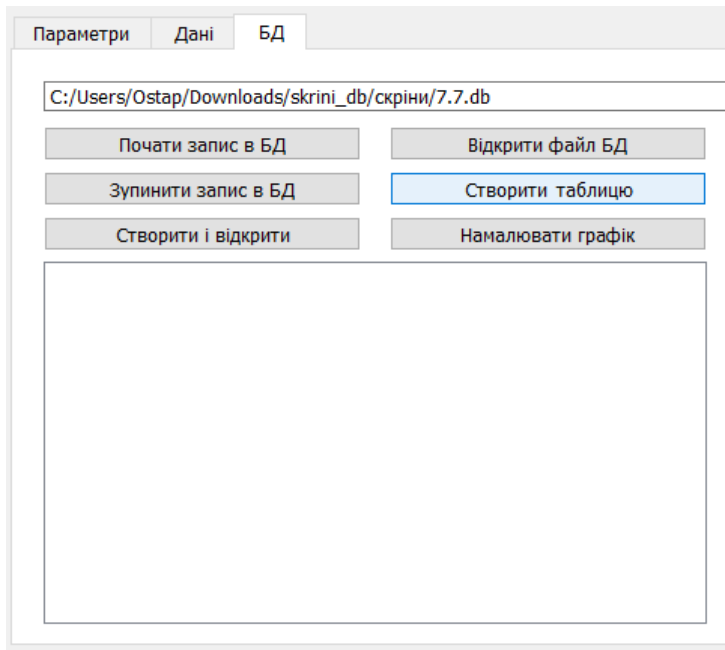


Рис. 0.10 Налаштування програми

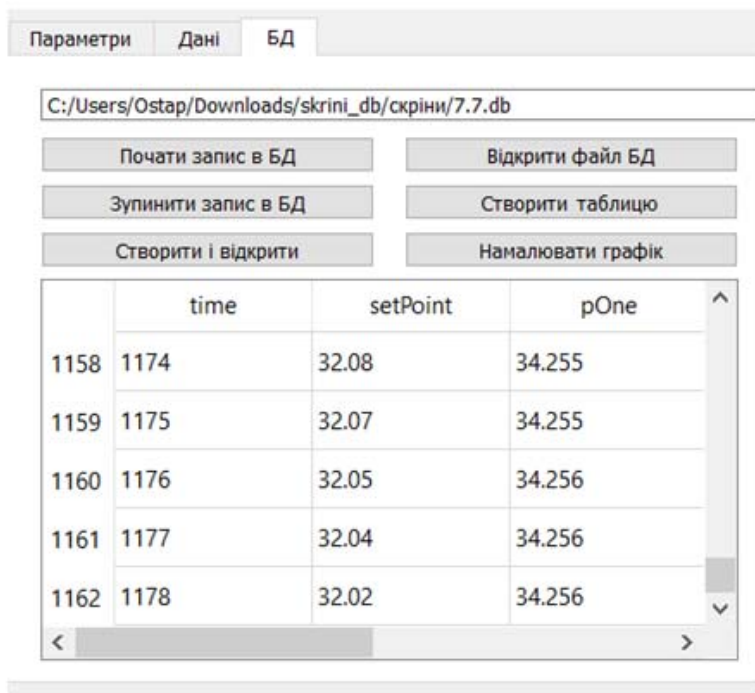


Рис. 0.11 Головне вікно

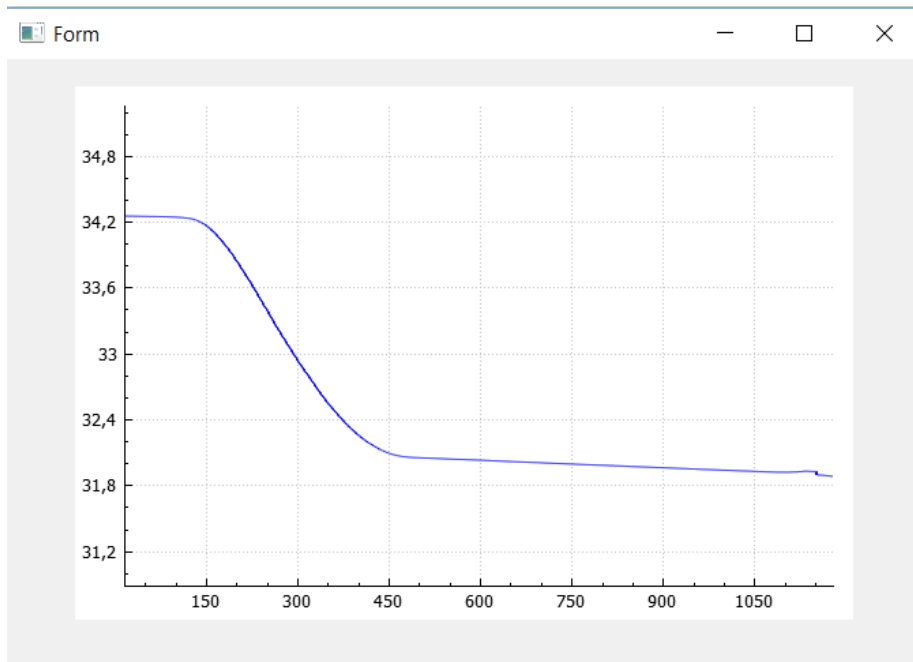


Рис. 0.12 Вікно окремої побудова графіка з файлу БД

Проведення досліду

Для проведення досліду було отримано мікросхему сигналізації «J-06 КОЖАК», яку було спаяно з відповідного набору елементів і протестовано чи вона працює. Дану мікросхему зображено на рис. 4.12 (вид зверху) і рис. 4.13 (вид збоку).

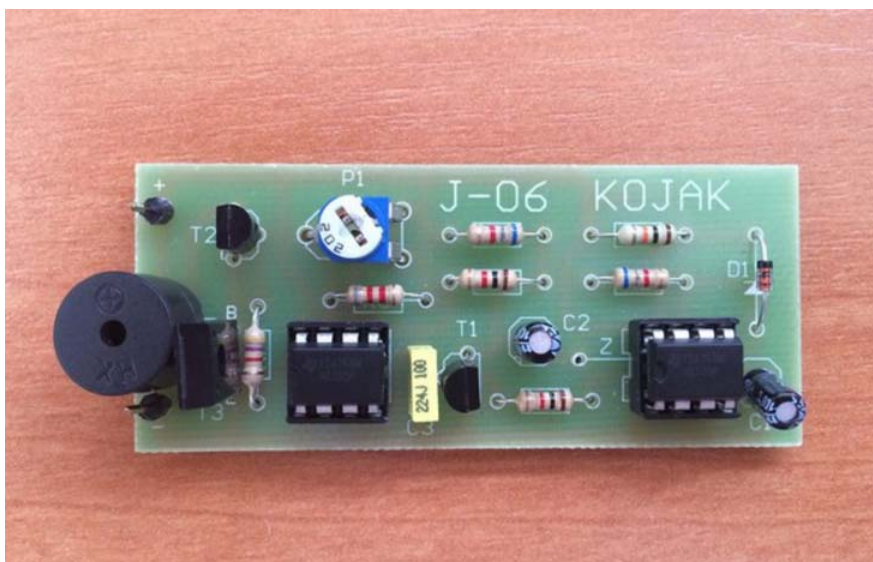


Рис. 4.12 Мікросхема сигналізації (вид зверху)

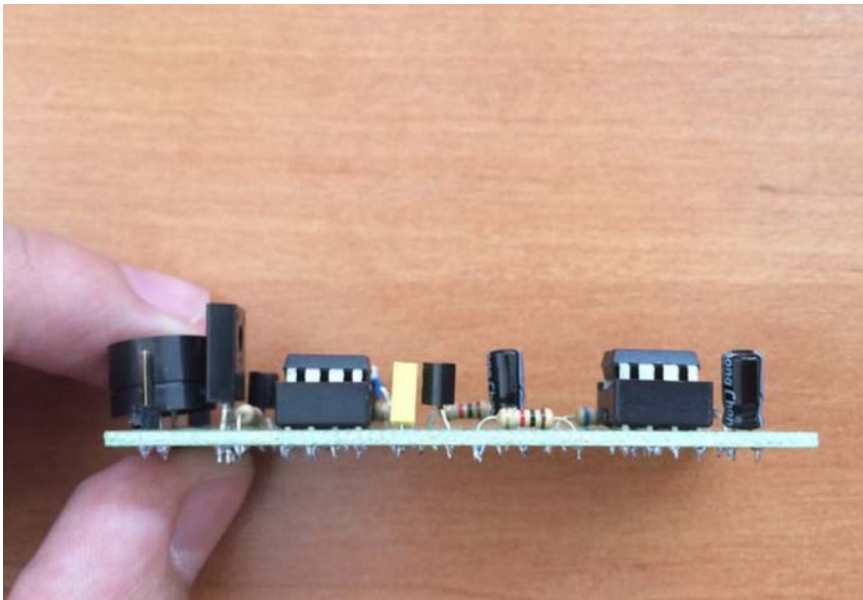


Рис. 4.13 Мікросхема сигналізації (вид збоку)

Провівши дослід з нагрівання мікросхеми у дистильованій воді на рис.4.14 і рис. 4.15 зображено графік залежності зміни температури з часом.

На рис. 4.14 ми бачимо, що температура збільшується рівномірно на всьому інтервалі часу, але варто зазначити, що при приближенні до встановленої температури швидкість зростання температури значно спадає, що зображено на рис. 4.15.

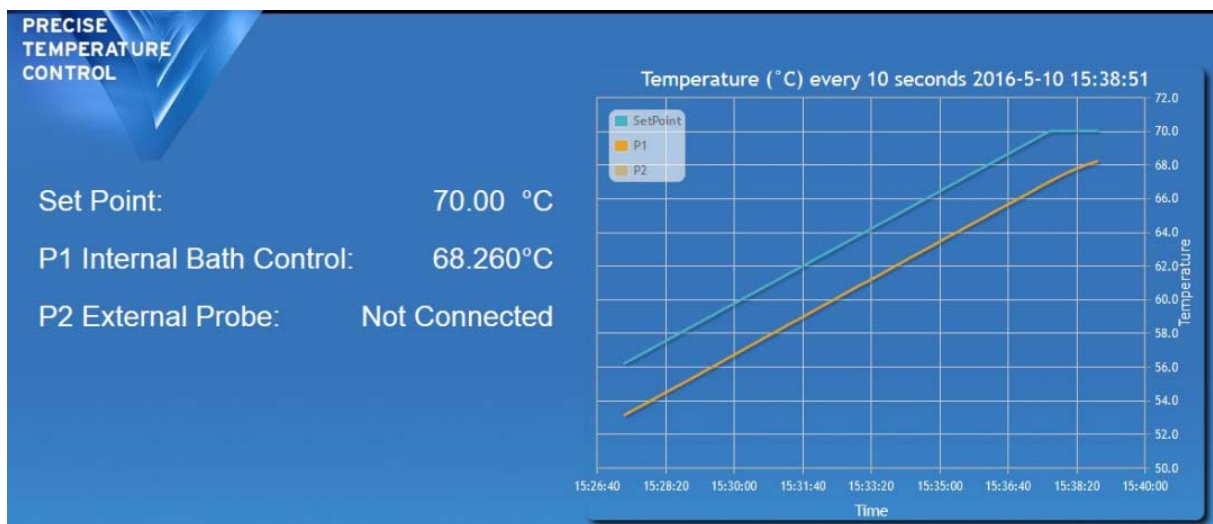


Рис. 4.14 Графік залежності зміни температури з часом

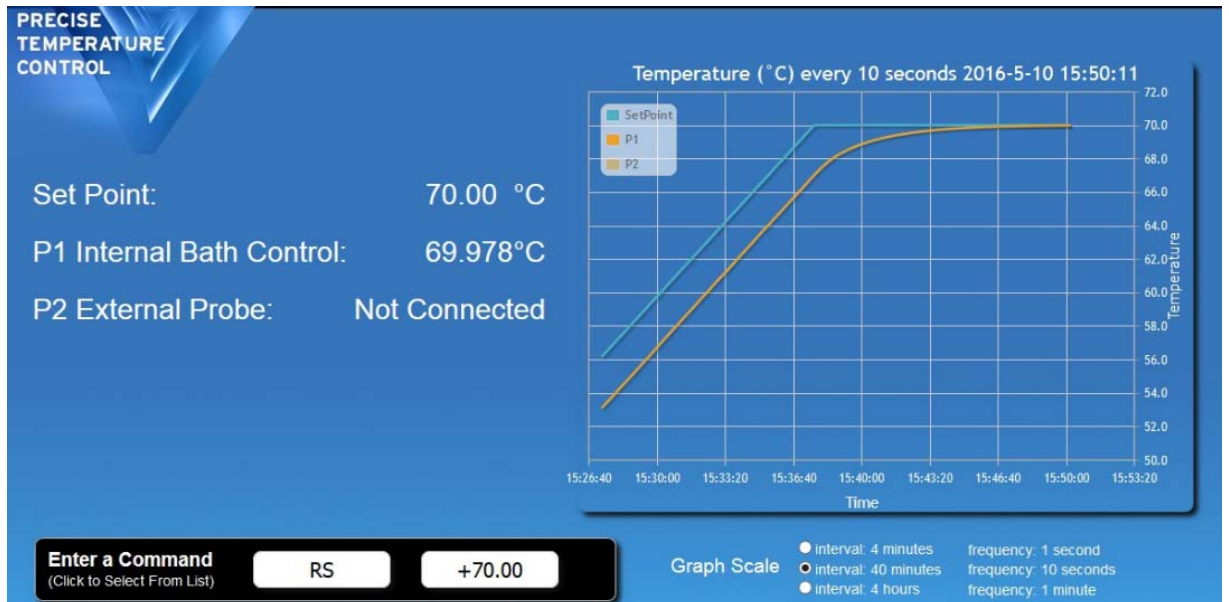


Рис. 4.15 Графік залежності зміни температури з часом

Після проведення досліду було протестовано мікросхему чи вона коректно працює або чи вона вийшла з ладу. Результат досліду показав, що дана мікросхема працює коректно і досліджено, що вона витримує нагрів до 70 °C.

Висновки

Отже, в даному розділі було продемонстровано і описано користувацький інтерфейс підсистеми, продемонстровано роботу команд керування термостатом, побудову графіка на основі даних нагріву дистильованої води в термостаті в режимі реального часу. Також дана підсистема дає можливість записувати дані у файл БД і при потребі з цих даних можна побудувати графік і залишити коментар до проведеного досліду.

Також під час проходження практики по темі БКР було проведено дослід по нагрівання мікросхеми у дистильованій воді до температури 70 °C, а результати цього досліду було наведено в даному розділі дипломної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Кикоин А.К., Кикоин И.К. (1976). Молекулярная физика (російська). Москва: Наука.

Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Донецьк : Донбас, 2004. — ISBN 966-7804-14-3.

Шилдт Г. , С++: базовый курс, 3-е издание . –М.: Вильямс, 2005. -624 ст.

Сергеев А.П., Терен А.Н., Программирование в Microsoft Visual С++ 2005. Самоучитель. –С.Пб.: Диалектика, 2006. -352 ст.

Грегори К., Использование Visual С++ 6. Специальное издание. –М.: Вильямс, 2000. -864ст.

В. Гольцман. MYSQL5. Библиотека программиста. Издательство: П. Год: 2010. – 253 с.

Жасмин Бланшет. Программирование gui на с++.: «Кудиц-пресс-Москва» -2008г.

Макс Шлее. Qt4. Профессиональное программирование на С++. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. — 880 с.

"Most Widely Deployed SQL Database Estimates". SQLite.org. Retrieved May 11, 2011.

SQLite Is A Zero-Configuration Database". SQLite.org. Retrieved August 3, 2015.

"Well-Known Users Of SQLite". SQLite. Retrieved August 5, 2015.

Зигель Р., Хауэл Дж. Теплообмен излучением.— М.: Мир, 1975.

Геращенко О. А., Гордов А. Н., Еремина А. К. Температурные измерения. Справочник.— К.:Наукова думка, 1989.

Левченко В. И., Клименко В. П., Система термостатирования опорных спаев // Приборы и техника эксперимента.— 1995.— № 6.— С. 164—167.

Скаржинюк Ф. К. Точный регулятор-стабилизатор температуры // 1985.— № 3.— С. 208—210.

Замрий В. Н., Роганов А. Б., Сиротин А. П. Прецизионный регулятор температуры со встроенным микропроцессором // 1991.— № 2.— с. 229.

Погорелов А. И. Тепломассообмен (Основы теории и расчета).— Одесса:

Черноморье, 1999.

ДОДАТОК А

Файл Mainwindow.cpp

```
#include "mainwindow.h"
#include "ui_mainwindow.h"
#include <QtNetwork/qnetworkrequest>
#include <QtNetwork/QNetworkAccessManager>
#include <QtNetwork/QNetworkReply>
#include <QFile>
#include <QMessageBox>
#include <QFileDialog>
#include "commands.h"
#include "getdata.h"
#include <QTimer>
#include < QSqlQuery>
#include < QSqlRecord>
#include <QTableWidget>
#include "chart_draw_db.h"

void msg(QString a)
{
    QMessageBox msg;
    msg.setText(a);
    msg.exec();
}

void MainWindow::change_res(QString a)
{
    ui->label_6->setText(a);
    //QMessageBox::information(NULL, "", "my ok");
}
```

```

}
void MainWindow::setPoint_read()
{
    if(!setPoin_r->gd_error)
    {
        int range_max,range_min;
        switch(ui->comboBox_2->currentIndex()){
            case 0:
                range_max=60*4-1;
                range_min=0;
                break;
            case 1:
                range_max=60*60*4-1;
                range_min=0;
                break;

        }

        #####
        //draw chart
        #####
        setPoin_r->read();
        ui->statusBar->showMessage(setPoin_r->standby.toInt()==1?tr("turn
off"):tr("turn on"));
        //while(!setPoin_r->result){};

        //add new point to array
        x.push_back(time);
        y.push_back(setPoin_r->pOne.toDouble());
        //QMessageBox::information(NULL,"",setPoin_r->pOne);
        if(x.size()>=range_max)

```

```

{
    //x.pop_front();y.pop_front();
    ui->widget->xAxis->setRange(time-range_max+1,time+1);
}
else
{
    ui->widget->xAxis->setRange(range_min,x.size());
}
ui->widget->xAxis->setTickLabelType(QCPAxis::ltDateTime);
// ui->widget->xAxis->setDateTimeFormat("ss MM/hh");

ui->widget->replot();
double max=y.at(0);double min=y.at(0);
for(int i=time>=range_max?time-range_max+1:0;i<y.size();i++)
{

    if(y.at(i)>max)max=y.at(i);
    if(y.at(i)<min)min=y.at(i);
}
//QMessageBox::information(NULL,"",QString::number(min));
ui->widget->yAxis->setRange(min-1,max+1);
//ui->widget->yAxis->setRange(10,40);
ui->widget->graph(0)->setData(x,y);
#####
//write db
#####
if(write_to_db)
{
    QSqlQuery query;

```

```

        query.prepare("insert into termo (setPoint,pOne,pTwo,time) values
(:setPoint,:pOne,:pTwo, :time)");
        query.bindValue(":setPoint",setPoin_r->setPoint);
        query.bindValue(":pOne",setPoin_r->pOne);
        query.bindValue(":pTwo",setPoin_r->pTwo);
        query.bindValue(":time",time);
        //(QString("insert into`termo` (setPoint,pOne,pTwo,time) values (") +
+QString(",")+setPoin_r->pOne+QString(",")+setPoin_r->pTwo
//      +QString(",")+QString::number(time)+QString(")"));
        query.exec();
    }

}
time++;
}
void MainWindow::new_cmo(int * i,QString a, QString b,QString c)
{
    command_m * nnb=new command_m;
    nnb->num=*i;
    nnb->name=a;
    nnb->short_com=b;
    nnb->type=c;
    *i++;
    com->all_coms.push_back(nnb);

    //return nnb;
}
MainWindow::MainWindow(QWidget *parent) :
    QMainWindow(parent),
    ui(new Ui::MainWindow)

```

```
{
    ui->setupUi(this);
\
    ui->pushButton->setText(tr("RUN"));
    ui->pushButton_2->setText(tr("Set T"));
    ui->pushButton_3->setText(tr("Set Pump"));
    ui->pushButton_4->setText(tr("Update_al"));
    ui->pushButton_5->setText(tr("ON/OFF"));
    ui->pushButton_6->setText(tr("Create & op db"));
    ui->pushButton_7->setText(tr("Open db file"));
    ui->pushButton_8->setText(tr("Start write to db"));
    ui->pushButton_9->setText(tr("Stop write to db"));
    ui->pushButton_10->setText(tr("draw chart"));
    ui->pushButton_11->setText(tr("draw table"));
    ui->pushButton_12->setText(tr("login"));

    ui->label->setText(tr("Command"));
    ui->label_2->setText(tr("Result:"));
    ui->label_3->setText(tr("Temp C"));
    ui->label_4->setText(tr("Speed P"));
    ui->label_5->setText(tr("Speed AutoUpdate"));
    //ui->label_6->setText(tr());
    //ui->label_7->setText(tr());
    ui->label_8->setText(tr("chart interval"));

    ui->tabWidget->setTabText(0,tr("Params"));
    ui->tabWidget->setTabText(1,tr("data"));
    ui->tabWidget->setTabText(2,tr("db"));

    ui->comboBox_2->addItem(tr("4 min"));
    ui->comboBox_2->addItem(tr("4 hours"));
```



```

com=new commands(ui->lineEdit->text(),this);

//connect(b,SIGNAL(),this,SLOT());
#####

//init commands
#####

int i=0;

//read
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read Revision")),QString("RB"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read Fault")),QString("RF"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read Speed")),QString("RM"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read Status")),QString("RO"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read Temperature")),QString("RR"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read Temperature")),QString("RT"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read SetPoint")),QString("RS"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read Units")),QString("RU"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read Autorestart")),QString("RW"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read Setpoint")),QString("RA"),QString("none"));
new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read

```

			Firmware
		Pump	
			Run
			External
			Internal
	Auto		Refrigerant
			High

```

Alarm")),QString("RH"),QString("none"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read
Alarm")),QString("RL"),QString("none"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read
Step")),QString("RC"),QString("none"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read
Time")),QString("RE"),QString("none"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read
Status")),QString("RG"),QString("none"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read
Loop")),QString("RI"),QString("none"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read
Run")),QString("RK"),QString("none"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read
Run")),QString("RY"),QString("none"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Read
Px")),QString("RV"),QString("none"));

    //set
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Set
Speed")),QString("SM"),QString("int"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Set
Echo")),QString("SE"),QString("bool"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Set
Unit")),QString("SO"),QString("bool"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Change
setPoint")),QString("SS"),QString("double"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Set
")),QString("SW"),QString("bool"));
    new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Set
Setpoint")),QString("SA"),QString("int"));

```

Low

Current Program

Elapsed Program

Program

Current Program

Number Loops Program will

Number Steps Program will

Running Program Number

Pump

Autorestart

Auto Refrigeration

```

        new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Set
Alarm")),QString("SH"),QString("double"));
        new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Set
Alarm")),QString("SL"),QString("double"));
        new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Set
Units")),QString("SU"),QString("none"));
        new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Stop
program")),QString("SR"),QString("none"));
        new_cmo(&i,QString(QObject::tr("Schedule
immediately")),QString("SGP"),QString("bool_p"));

```

High
Low

the
program

```

        new_cmo(&i,QString(QObject::tr("run
program")),QString("SVP"),QString("text"));

```

```

//new_cmo(&i,QString("standby"),QString("SGP"),QString("bool"));

```

```

for(int i=0;i<com->all_coms.size();i++)
    ui->comboBox->addItem(com->all_coms.at(i)->name);

//
write_to_db=false;
time=0;sec=0;
setPoin_r=new getData(ui->lineEdit->text(),this);
QTimer * get_d_t=new QTimer();
connect(get_d_t,SIGNAL(timeout()),this, SLOT(setPoint_read()));
get_d_t->start(1000);

```

```

//ui->comboBox->ad

ui->statusBar->showMessage("turn on");
//x.push_back(7.5);
//y.push_back(0);
//y.push_back(7.5);
//y.push_back(-1.5);
//msg(QString::number(x.size()));

//x.push_back(4);
//y.push_back(4);
ui->widget->yAxis->setRange(0,100);
ui->widget->xAxis->setRange(0,60);
ui->widget->addGraph();
ui->widget->graph(0)->setData(x,y);

//init thread getData xml
}

MainWindow::~MainWindow()
{
    delete ui;
}

void MainWindow::on_pushButton_clicked()
{
    //commands com(ui->lineEdit->text(),this);
    change_res(com->send(ui->comboBox->currentIndex()));
}

```

```

//ui->textEdit->setText("");
// QByteArray const data = ui->lineEdit->text().append("\r").toUtf8();

//ui->textEdit->setText("reply->readAll()");
/*
QFile file("C:\\users\\admin\\Desktop\\test.txt");
file.open(QIODevice::WriteOnly);
file.write(manager->post(request, data)->readAll());
file.close();*/
}

void MainWindow::finished(QNetworkReply *reply)
{
    //ui->textEdit->setText(ui->textEdit-
    >toPlainText().append(QString::fromUtf8(reply->readAll())));

}
/*
void MainWindow::on_pushButton_6_clicked()
{
    x.push_back(QString(ui->lineEdit->text()).toDouble());
    y.push_back(QString(ui->lineEdit_2->text()).toDouble());
    QMessageBox::information(this, "", QString::number(x.at(x.size()-1)));

    ui->widget->graph(0)->setData(x,y);
    ui->widget->replot();
}
*/

```

```

}

*/

void MainWindow::on_pushButton_7_clicked()
{
    ui->lineEdit_3->setText(QFileDialog::getOpenFileName(this));
    dataBase= new db(ui->lineEdit_3->text(),false);
}

void MainWindow::on_pushButton_6_clicked()
{
    QString fileSaveName=QFileDialog::getSaveFileName();
    //create data base file
    //QMessageBox::information(NULL," ",QDir::);
    //QFile::copy("D:\\termostat_db_template.db",fileSaveName);
    //write to linedit namefile
    dataBase= new db(fileSaveName,true);

    ui->lineEdit_3->setText(fileSaveName);
}

void MainWindow::on_pushButton_2_clicked()
{
    //commands com(ui->lineEdit->text(),this);
    //connect(&com,SIGNAL())
    //change_res(com.send(QString("SS30.0")));
    com->send(QString("SS")+ui->doubleSpinBox->text().replace(",","."));
    QString to_send("SS");
    to_send.append("");
}

```

```

void MainWindow::on_pushButton_8_clicked()
{

    dataBase= new db(ui->lineEdit_3->text(),false);
    write_to_db=true;
}

void MainWindow::on_pushButton_10_clicked()
{
    QSqlQuery queryd("SELECT COUNT(*) FROM termo");
    queryd.next();

    QVector <double>x,y;
    QSqlQuery query("SELECT * FROM termo");
    QSqlRecord my_r=query.record();
    //int idName = query.record().indexOf("name");
    int inc=0;

    while (query.next())
    {
        x.push_back(query.value(1).toInt());
        y.push_front(query.value(3).toDouble());

        /*QTableWidgetItem *b= new QTableWidgetItem();
        b->setText(query.value(1).toString());
        QTableWidgetItem *b1= new QTableWidgetItem();
        b1->setText(query.value(2).toString());

```

```

        QTableWidgetItem *b2= new QTableWidgetItem();
        b2->setText(query.value(3).toString());
        QTableWidgetItem *b3= new QTableWidgetItem();
        b3->setText(query.value(4).toString());
        ui->tableWidget->setItem(inc,0,b);
        ui->tableWidget->setItem(inc,1,b1);
        ui->tableWidget->setItem(inc,2,b2);
        ui->tableWidget->setItem(inc,3,b3);
        */
        inc++;
    }
    chart_draw_db * ry=new chart_draw_db(x,y);
    ry->show();
}

void MainWindow::on_pushButton_9_clicked()
{
    write_to_db=false;
}

void MainWindow::on_pushButton_11_clicked()
{
    QSqlQuery queryd("SELECT COUNT(*) FROM termo");
    queryd.next();

    QMessageBox::information(this,"",queryd.value(0).toString());

    ui->tableWidget->setRowCount(queryd.value(0).toInt());
    ui->tableWidget->setColumnCount(4);
    QStringList my;

```



```
my.push_back("time");my.push_back("setPoint");my.push_back("pOne");my.push_b  
ack("pTwo");
```

```
    ui->tableWidget->setHorizontalHeaderLabels(my);
```

```
    QSqlQuery query("SELECT * FROM termo");
```

```
    QSqlRecord my_r=query.record();
```

```
    //int idName = query.record().indexOf("name");
```

```
    int inc=0;
```

```
    while (query.next())
```

```
    {
```

```
        QTableWidgetItem *b= new QTableWidgetItem();
```

```
        b->setText(query.value(1).toString());
```

```
        QTableWidgetItem *b1= new QTableWidgetItem();
```

```
        b1->setText(query.value(2).toString());
```

```
        QTableWidgetItem *b2= new QTableWidgetItem();
```

```
        b2->setText(query.value(3).toString());
```

```
        QTableWidgetItem *b3= new QTableWidgetItem();
```

```
        b3->setText(query.value(4).toString());
```

```
        ui->tableWidget->setItem(inc,0,b);
```

```
        ui->tableWidget->setItem(inc,1,b1);
```

```
        ui->tableWidget->setItem(inc,2,b2);
```

```
        ui->tableWidget->setItem(inc,3,b3);
```

```
        inc++;
```

```
    }
```

```
}
```

```
void MainWindow::on_pushButton_12_clicked()
```

```
{
```

```

    commands com(ui->lineEdit->text(),this);
    //connect(&com,SIGNAL())
    com.login(ui->lineEdit_2->text().append("?"));

    ui->pushButton_12->setEnabled(false);
}

void MainWindow::on_pushButton_5_clicked()
{

    if(setPoin_r->standby.compare("1")!=0)com->sen("SO0");
    else if(setPoin_r->standby.compare("1")==0)com->sen("SO1");

}

void MainWindow::on_pushButton_3_clicked()
{
    com->sen(QString("SM").append(QString::number(ui->spinBox_2-
>value())));
}

```

Файл getdata.cpp

```

#include "getdata.h"
//#include <QString>
#include <QNetworkReply>
#include <QMessageBox>
#include <QFile>
#include <QEventLoop>
getData::getData(QString ip,QObject * parent) : QObject(parent)
{

```

```

this->ip=ip;

manager=new QNetworkAccessManager(parent);
//connect(manager, SIGNAL(finished(QNetworkReply*)), this,
SLOT(finish(QNetworkReply *)));
}
void getData::read()
{
gd_error=false;
result=false;
QNetworkRequest
request(QUrl(QStringLiteral("http://")+ip+QStringLiteral("/dynamic_files/setPoint.xml?figure1=5&figure2=1")));

request.setHeader(QNetworkRequest::ContentTypeHeader,QStringLiteral("text/html; charset=utf-8"));

QNetworkReply * reply= manager->get(request);
//connect(nm,SIGNAL(readyRead()),this,SLOT(finished()));

QEventLoop loop;
connect(reply, SIGNAL(finished()), &loop, SLOT(quit()));
loop.exec();

QString rea =QString(reply->readAll());
if(!rea.isEmpty())
{

```

```

    /*QMessageBox msg;
    msg.setText(QString(reply->readAll()));
    msg.exec();
    */

    setPoint=QString(rea.split("<set>").at(1)).split("</set>").at(0);
    pOne=QString(rea.split("<pOne>").at(1)).split("</pOne>").at(0);

    //QMessageBox::information(NULL,"",pOne);

    pTwo=QString(rea.split("<pTwo>").at(1)).split("</pTwo>").at(0);
    standby=QString(rea.split("<standby>").at(1)).split("</standby>").at(0);

    result=true;
}
else gd_error=true;
}

```

Файл commands.cpp

```

#include "commands.h"
#include <QString>
#include <QNetworkReply>
#include <QNetworkRequest>
#include "get_val.h"
#include <QMessageBox>
#include <QEventLoop>
#include <QLineEdit>
#include <QSpinBox>
#include <QDoubleSpinBox>
#include <QPushButton>
#include <QVBoxLayout>

```

```

#include <QCheckBox>
enum commands_v{change_set_p};
void commands::login(QString pass)
{
    QNetworkRequest
request(QUrl(QStringLiteral("http://")+ip+QStringLiteral("/cgi-bin/passSend.cgi")));

request.setHeader(QNetworkRequest::ContentTypeHeader,QStringLiteral("text/html;
charset=utf-8"));

    //data command
    QNetworkReply * reply=manager->post(request,
QString("SRL").append(pass).toStdString().c_str());
    QEventLoop loop;
    connect(reply, SIGNAL(finished()), &loop, SLOT(quit()));
    loop.exec();

}
commands::commands(QString ip,QMainWindow *b)
{
    w=b;
    this->ip=ip;
    manager = new QNetworkAccessManager();
    //login("1111?");
}
QString commands::sen(QString data)
{
    //connect(manager,SIGNAL(finished(QNetworkReply*)),this,
SLOT(finish(QNetworkReply*)));
}

```

```

        QNetworkRequest
request(QUrl(QStringLiteral("http://")+ip+QStringLiteral("/cgi-bin/CgiSend.cgi")));
        //QNetworkRequest
request(QUrl(QStringLiteral("http://")+ip+QStringLiteral("/")));

request.setHeader(QNetworkRequest::ContentTypeHeader,QStringLiteral("text/html;
charset=utf-8"));

        //data command
        QNetworkReply * reply =manager->post(request,
data.append("\r").toStdString().c_str());
        //connect(manager, SIGNAL(finished(QNetworkReply *)), this,
SLOT(finished(QNetworkReply *)));

        QEventLoop loop;
        connect(reply, SIGNAL(finished()), &loop, SLOT(quit()));
        loop.exec();

        //QMessageBox::information(NULL,"",reply->readAll());
        resul= reply->readAll().toStdString().c_str();
        return resul;
        //emit

    }

    QDialog *vn=new QDialog(w);
    vn->setModal(true);
    QVBoxLayout * iop=new QVBoxLayout(vn);

        //QMessageBox::information(NULL,"1",);

```

```

command_m * ghj=all_coms.at(com);
QString vnm=ghj->short_com;
if(ghj->type.compare("int")==0)
{
    QSpinBox * rt=new QSpinBox();
    //rt->show();
    //QPushButton *pt=new QPushButton();
    iop->addWidget(rt);
    //iop->addWidget(pt);
    vn->exec();
    vnm.append(QString::number(rt->value()).replace(",","."));
}
if(ghj->type.compare("bool")==0)
{
    QCheckBox * erty=new QCheckBox();
    iop->addWidget(erty);

    vn->exec();
    vnm.append(QString::number( (erty->isChecked())? 1 : 0));
    //QMessageBox::information(NULL,"",QString::number(          (erty-
>isChecked())? 1 : 0));

}
if(ghj->type.compare("double")==0)
{
    QDoubleSpinBox * rtb=new QDoubleSpinBox();
    iop->addWidget(rtb);
    vn->exec();
    vnm.append(QString::number(rtb->value()));
}

```

```

if(ghj->type.compare("bool_p")==0)
{
    QCheckBox * erty=new QCheckBox();
    iop->addWidget(erty);

    vn->exec();
    vnm.append(QString::number( (erty->isChecked())? 2 : 1));
    //QMessageBox::information(NULL,"",QString::number(          (erty-
>isChecked())? 2 : 1));
}
if(ghj->type.compare("text")==0)
{
    QLineEdit * erty=new QLineEdit();
    iop->addWidget(erty);

    vn->exec();
    vnm.append(erty->text());
    //QMessageBox::information(NULL,"",QString::number(          (erty-
>isChecked())? 2 : 1));
}
return sen(vnm);
}
QString commands::oth_data(int com)
{

}

```