

Міністерство освіти і науки України
Інженерний інститут
Запорізького національного університету

І. А. Овчинникова

АВТОМАТИЗАЦІЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Лабораторний практикум
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності «Металургія»,
освітньо-професійних програм
«Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів»,
«Обробка металів тиском»

Затверджено
вченою радою ЗНУ
Протокол № від

Запоріжжя
2020

УДК 681.5 : 669 (076)

О-355

Овчинникова І. А. Автоматизація металургійного виробництва : лабораторний практикум для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів», «Обробка металів тиском». Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 105 с.

Лабораторний практикум призначений для студентів спеціальності «Металургія», які виконують лабораторні роботи з курсу «Автоматизація металургійного виробництва». Лабораторний практикум містить завдання до лабораторних робіт, методики роботи з лабораторним обладнанням, список рекомендованої літератури для підготовки до виконання та захисту лабораторних робіт.

Для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів», «Обробка металів тиском».

Рецензент

Ю. В. Мосейко, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри металургії Інженерного інституту Запорізького національного університету

Відповідальний за випуск

М.Ю. Пазюк, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Інженерного інституту Запорізького національного університету

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Інструкція з техніки безпеки	6
Загальні теоретичні відомості та визначення.....	8
Лабораторна робота № 1	12
Лабораторна робота № 2	16
Лабораторна робота № 3	22
Лабораторна робота № 4	27
Лабораторна робота № 5	33
Лабораторна робота № 6	38
Лабораторна робота № 7	45
Лабораторна робота № 8	56
Лабораторна робота № 9	62
Лабораторна робота № 10	67
Лабораторна робота № 11	70
Лабораторна робота № 12	80
Лабораторна робота № 13	85
Список використаних джерел	90
Список рекомендованих джерел	91
Додаток А. Градувальна таблиця термометрів опору.....	92
Додаток Б. Градувальні таблиці термоелектричних термометрів.....	94
Додаток В. Визначення параметрів регулятора за видами перехідних процесів.....	104

ВСТУП

Прогрес в автоматизації управління є закономірним результатом зростання технічних і економічних потреб виробництва, що розвивається, і викликаного цим появи нових технічних засобів управління і перш за все обчислювальних машин.

Суть нового етапу розвитку автоматизації можна стисло охарактеризувати як перехід від автоматизації «дій» до автоматизації «ухвалення рішень». Протягом ряду попередніх десятиліть під автоматикою розумілося перш за все виконання без участі людини деяких дій, що однозначно зв'язують причини і наслідки. Новий етап – перш за все вибір деякої якнайкращої реакції з багатьох можливих.

Становлення нової концепції автоматизації в нашій країні відбувалося на фоні еволюції задач управління. Досвід показує, що будь-які прогресивні зрушення залежать від взаємозв'язаного рішення трьох задач:

1. Розробка нових технологічних процесів і типізація цих рішень;
2. Створення новітнього технологічного устаткування і забезпечення ним виробництва;
3. Розробка і упровадження ефективного управління процесами і устаткуванням на основі автоматизації.

Важливо, щоб всі ці три задачі розв'язувалися не послідовно, а одночасно і у взаємозв'язку.

Автоматизовані системи управління (АСУ) є тією формою синтезу традиційної «автоматики» і комплексної переробки задач управління, яка відповідає сучасним вимогам науково-технічного прогресу. Найважливішою особливістю АСУ є те, що їх успішне створення залежить від тісної взаємодії персоналу об'єкту, що автоматизується, і професійних фахівців у області автоматизації управління.

Основна задача при організації АСУ – гармонійний розвиток систем всіх класів для всіх рівнів виробничої ієрархії – від окремого агрегату до виробництва і підприємства в цілому.

Для вищих класів АСУ задачі управління технологічними процесами все більш стикуються із задачами організаційного управління виробництвом.

Їх комплексне рішення дає якісно нові результати в інтегрованих системах управління виробництвом.

До однієї з ключових проблем упровадження і ефективного використання сучасних АСУ слід віднести створення і розвиток математичного забезпечення, особливо зовнішнього (загального) системного.

Важливим моментом є розробка алгоритмів управління складними технологічними процесами і створення уніфікованих пакетів прикладних програм. Вони є основним засобом прискорення і здешевлення робіт, які будуть реалізувати задачі первинної обробки даних, контролю, ідентифікації і адаптації управління, розрахунку техніко-економічних параметрів.

Дисципліна розрахована на студентів 3 курсу спеціальності «Металургія». Курс доповнює та розширює знання та вміння студентів із загальних та професійних дисциплін: «Механічне обладнання металургійних цехів», «Стандартизація, метрологія та сертифікація», «Теорія металургійних процесів» та «Металургійні печі» «Моделювання об'єктів автоматизації на електронно-обчислювальних машинах». У свою чергу, знання та навички, набуті студентами при вивченні дисципліни «Автоматизація металургійного виробництва» використовуються при вивченні дисциплін «Проектування металургійних цехів», «Теоретичні основи гідрометалургійних процесів», Технологія вуглеграфітових та вуглецевих композиційних матеріалів», «Моделювання та оптимізація систем керування», а також при проходженні виробничої практики та при дуальній освіті.

Програма курсу складається із 3 тематичних розділів:

Розділ 1. Загальні поняття про структуру та склад систем автоматичного регулювання

Розділ 2. Характеристики систем автоматичного регулювання

Розділ 3. Проектування систем автоматичного регулювання

Мета курсу - засвоєння знань щодо технічних засобів вимірювання та контролю за металургійними процесами; побудови систем автоматичного регулювання, визначення їх характеристик та показників процесу.

Завдання курсу - ознайомлення із загальною структурою системи автоматичного керування; ознайомлення із математичними методами опису систем та об'єктів автоматичного керування; опанування інформації про побудову та призначення всіх складових систем автоматичного керування; опанування методик проектування типових систем автоматичного керування; набуття навичок розробки типових проектів автоматизації металургійних процесів та об'єктів, а також вибору приладів і засобів автоматизації.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

Знати:

- призначення та конструкцію первинних перетворювачів,
- принципи дії та технічні характеристики технічних засобів автоматизації;
- правила побудови функціональних схем автоматизації, особливості автоматизації металургійних процесів;

Уміти:

- читати технічні креслення контрольно-вимірювальних приладів, засобів з автоматизації та проектну документацію;
- вибирати прилади та обладнання для побудови систем автоматизації;
- визначити принципи побудови, статичні та динамічні характеристики систем, оптимальні параметри процесу.

Один кредит обсягу дисципліни відводиться на виконання лабораторних робіт. Теоретичні відомості, методики виконання з використанням стендового обладнання спеціалізованих лабораторіях та вимоги до оформлення і захисту результатів робіт наведені у лабораторному практикумі.

ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Інструкція з охорони праці, техніки безпеки, пожежної безпеки при роботі з лабораторним електрообладнанням (далі - Інструкція) встановлює основні вимоги щодо забезпечення охорони праці, техніки безпеки, пожежної безпеки при роботі з лабораторним електрообладнанням.

1. ОСНОВНІ ВИМОГИ

1.1 Студент зобов'язаний:

- піклуватися про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей в процесі виконання робіт чи під час перебування на території інституту;
- знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці,
- правила спілкування з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими
- засобами виробництва, користуватися засобами колективного захисту;
- проходити у встановленому законодавством порядку попередні та медичні огляди.

1.2 Студент несе безпосередню відповідальність за порушення вказаних вимог.

1.3 Небезпеку електричних уражень створює різноманітне лабораторне устаткування, яке знаходиться на кафедрі. Діючими установками вважаються такі установки, які містять в собі джерела електроенергії або знаходяться під напругою повністю або частково.

1.4 Прокладання електромережі, підключення спеціальних установок до електромережі здійснюється електрослужбою Інженерного інституту.

1.5 До роботи в лабораторії на приладах і стендах допускаються особи, які вивчили встановлене обладнання, правила його експлуатації та мають групу з електробезпеки не нижче.

1.6 Перед проведенням робіт студенти повинні пройти інструктаж з ТБ у керівника робіт з обов'язковою відміткою в журналі реєстрації інструктажів.

1.7 Студенти допускаються до проведення лабораторних робіт тільки під наглядом викладача після ознайомлення з безпечними методами правил ТБ при виконанні самостійної роботи.

2. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПЕРЕД ПОЧАТКОМ РОБОТИ

2.1 Перед вмиканням установки (приладу, стенду) необхідно візуально перевірити її справність. Поверхні приладів і стендів повинні бути чистими і сухими.

2.2 Перевірити справність та цілісність розеток, вилок, струмопідключених проводів, ізоляції на рукоятках інструменту.

2.3 Перевірити наявність і справність заземлюючого проводу і місць його кріплення.

2.4 Виконувати тільки доручену студентам роботу.

3. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ

3.1 При експлуатації приладів і стендів необхідно строго дотримуватись правил, викладених в технічному паспорті. Стаціонарні прилади повинні бути заземлені. Регулярно перевіряти працездатність електроприладів, стендів, та електрообладнання.

3.2 Всі електронагрівальні прилади повинні встановлюватися на теплоізолюючих та незгоряємих поверхнях, вони повинні бути чистими і сухими, не допускати попадання на них кислот, розчинів, солей та інш.

3.3 При порушенні роботи приладу і стенду (появі запаху, виділенні диму, зміні характеру шуму і т.д.) прилад, стенд відключають від електромережі і не використовують до перевірки та проведення необхідного ремонту.

3.4 При припиненні подачі електроструму в лабораторію необхідно відключити всі прилади і стенди.

Забороняється:

- використовувати в якості тимчасового заземлення водопровідні труби, мережі центрального опалення, каналізації, трубопроводи вкриті ізоляцією для захисту від корозії;

- залишати ввімкненими прилади і стенди на ніч.

- користуватися саморобними нагрівальними приладами, несправними розетками, виделками, вимикачами, електрошафами й іншим не працездатним обладнанням, а також робити ремонт електрообладнання особам, не пов'язаним з цією роботою.

4. ВИМОГИ ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБІТ

4.1 Вимкнути електрообладнання від мережі.

4.2 Вимкнути автомат і рубильник.

4.3 Провести прибирання робочого місця.

4.4 Йдучи з приміщення вимкнути світло і закрити вікна.

ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Автоматизація виробництва - це широке використання у виробничих процесах автоматичного і автоматизованого обладнання, в якому функції управління і контролю передані керуючим і автоматичним пристроям (автоматам).

Об'єкт управління – означає систему (технічну, біологічну, соціальну), в якій протікає керований процес.

Керуючий пристрій (регулятор) - технічний засіб (найчастіше мікропроцесорний пристрій), який впливає на об'єкт управління відповідно до закладеного законом управління.

Технічна система управління - сукупність технічних засобів, що мають між собою електричні, пневматичні, гідравлічні або інші інформаційні зв'язки, що використовуються для управління виробничими або іншими процесами.

Система автоматичного управління (САУ) – різновид систем управління, що включає технічні засоби, які забезпечують автоматичний збір, обробку інформації, в тому числі прийняття рішення і реалізацію прийнятого рішення. Витрати праці людини необхідні тільки для контролю функціонування і обслуговування системи. Автоматична система управління складається з керованого об'єкта і автоматичного керуючого пристрою, взаємодіючих між собою. Об'єктів і керуючих пристроїв в системі може бути кілька.

Автоматизована система управління (виробництвом або технологічним процесом) - різновид систем управління, що включає технічні засоби, які забезпечують заміну фізичної та розумової праці людини, але вимагають, однак, витрат праці для свого обслуговування і виконання окремих функцій управління.

Система автоматичного регулювання (САР) – замкнута САУ, побудована за принципом управління за відхиленням.

Регулятор – керуючий пристрій у замкнутій системі автоматичного регулювання.

Принципи управління:

- управління по відхиленню - використовують в замкнутих САУ. Наприклад, при регулюванні рівня води в баку водокачки неконтрольовані обурення по навантаженню об'єкта (зміна витрати води) або по каналу регулюючого впливу (зміна подачі насоса) автоматично компенсуються в процесі стабілізації регульованого параметра (рівня). Недолік управління по відхиленню - низькі експлуатаційні характеристики в разі значної інерційності об'єкта;

- управління за обуренням - використовують в розімкнутих САУ. Керуючий вплив приймають, виходячи з аналізу діючих на систему збурень. Наприклад, рішення про завантаження бункера приймають за результатами аналізу витрачання кормів у зв'язку з тим, що безперервний контроль рівня сипучих матеріалів скрутний; Недоліки управління з обуренням - накопичення

помилки регулювання і нездатність керуючого пристрою компенсувати незаплановані обурення;

- комбінованого управління - це комбінація принципів регулювання по відхиленню і обуренню. Наприклад, система управління обігрівом включає в себе замкнуту САУ температурою електрообігріву підлоги і розімкнуту систему включення інфрачервоного обігріву в залежності від температури повітря.

Стійкість систем регулювання. Лінійна система називається стійкою, якщо при виведенні її зовнішніми впливами зі стану рівноваги (спокою) вона повертається в нього після припинення зовнішніх впливів. Якщо після припинення зовнішнього впливу система не повертається до стану рівноваги, то вона є нестійкою. Для нормального функціонування системи управління необхідно, щоб вона була стійкою, тому що в іншому випадку в ній виникають великі помилки.

Якість управління - це комплекс вимог, які визначають поведінку системи в сталому і перехідному режимах відпрацювання керуючого впливу.

Класифікація показників якості складається з декількох груп:

прямі - визначаються безпосередньо по перехідній характеристиці процесу,

кореневі - визначаються по кореням характеристичного полінома,

частотні - по частотних характеристиках,

інтегральні - отримані шляхом інтегрування функцій.

Прямими показниками якості процесу управління, які визначаються безпосередньо по перехідній характеристиці є:

- Стале значення вихідної величини,
- Ступінь загасання,
- Час досягнення першого максимуму,
- Час регулювання,
- Помилка регулювання,
- Перерегулювання,
- Динамічний коефіцієнт регулювання,
- Показник коливальності.

Для реалізації процесу управління необхідно оперативно, безперервно та точно вимірювати технологічні параметри функціонування технологічного процесу. Для вирішення цієї задачі застосовуються перетворювачі фізичних величин, які є необхідною складовою усіх систем автоматичного управління.

Отримання якісної інформації про стан об'єкта управління - завдання таке ж важливе, як і забезпечення стійкості САУ та заданої якості керування. Цією проблемою опікується метрологія.

Метрологія - це наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності. Слово метрологія походить від двох грецьких слів: «метрон» - міра і «логос» - вчення, тобто дослівно метрологія - вчення про міри.

Принцип вимірювання - фізичне явище або сукупність фізичних явищ, покладених в основу виміру (наприклад, явище розширення рідин при збільшенні температури покладено в принцип вимірювання у рідинних скляних термометрів).

Метод вимірювання - сукупність прийомів використання принципів і засобів вимірювання. Методи вимірювання поділяються на 2 види:

- метод безпосередньої оцінки;
- метод порівняння.

Метод безпосередньої оцінки характеризується тим, що відлік значень вимірюваної величини виробляється безпосередньо по відліковому пристрою вимірювального приладу. Гідність методу - простота і малий час виміру. Недолік - порівняно мала точність.

Метод порівняння більш точний, що передбачає операцію порівняння вимірюваної величини з величиною, що відтворюється мірою в кожному вимірі. Існують такі різновиди методу порівняння:

а) нульовий метод, при якому результируючий ефект впливу на засіб вимірювання вимірюваної величини і величини, що відтворюється мірою доводиться до нуля (наприклад, вимір активних електричних опорів за допомогою врівноваженого моста). Нульовий метод є найбільш точним серед методів порівняння.

б) диференційний метод, при якому на вимірювальний прилад діє різниця між вимірюваною величиною і величиною, що відтворюється мірою. Використовується в тих випадках, коли просто і точно реалізується операція віднімання величин (найбільш часто застосовується для вимірювання довжин, переміщень, різниці потенціалів і деяких ін. величин);

в) метод заміщення, при якому вимірювана величина заміщується відомою величиною, що відтворюється мірою (наприклад, визначення ємності конденсатора, включеного в коливальний контур);

г) метод протиставлення - при якому вимірювана величина і величина, відтворена мірою одночасно впливають на вимірювальний прилад (наприклад, вимірювання маси на чашевих вагах).

Якість вимірювального приладу оцінюють похибкою (погрішністю), чутливістю, стабільністю основної робочої характеристики, діапазоном вимірювання, динамічними властивостями.

У основі будь-якого вимірювання лежать певний метод і інструмент порівняння, тому істинне значення вимірюваної величини завжди визначається з методичною і інструментальною погрішністю, сумарна похибка залежить від прийнятого методу і характеристик інструменту порівняння.

Прилад, що має мінімально можливу для цього типу інструментальну похибку, називається еталонним. Він виготовляється індивідуально і тому не може бути використаний в практиці вимірювань, а служить для перевірки зразкових. Менш точні, але технологічні при виготовленні серією, зразкові прилади, доступні для підприємств -

споживачів технічних приладів, служать для перевірки технічних приладів. Зразковий прилад повинен мати основну похибку у 3-5 разів менше, ніж технічний.

Похибка вимірювання може бути оцінена в різних одиницях в залежності від її використання. Розрізняють абсолютну, відносну і приведену похибки.

Абсолютна похибка - це алгебраїчна різниця між вимірним X_i і дійсним X_d значеннями вимірюваної величини :

$$\Delta = X_i - X_d$$

Відносна похибка δ обчислюється у відсотках або в долях одиниці як відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини в цій точці шкали приладу :

$$\delta = \frac{\Delta}{X_d} \cdot 100\%$$

Приведена похибка $\delta_{пр}$ обчислюється у відсотках як відношення абсолютної похибки до різниці між максимумом і мінімумом шкали приладу :

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta}{X_{шк}^{max} - X_{шк}^{min}} \cdot 100\%$$

Похибки вимірювання виникають як наслідок недосконалості методики і засобів, використовуваних при вимірюванні, так і в результаті дії безлічі зовнішніх чинників, що включають умови установки і експлуатації приладу, характеристики довкілля і тому подібне. Ці чинники можуть бути постійними або що змінюються випадково, що відповідно призводить до виникнення систематичних і випадкових похибок.

Для кожного типу приладів стандартами встановлюється допустима основна похибка, що називається класом точності. Зазвичай вона дається у вигляді допустимої приведенної похибки і вказується на шкалі приладу. Фактичний клас точності приладу оцінюється як найбільша в межах шкали основна його приведена похибка.

Точність вимірювань - це характеристика вимірювання, що відображає близькість їх результатів до істинного значення вимірюваної величини. Кількісно оцінка точності визначається як величина, зворотна відносною похибки вимірювання: $\varepsilon = 1/\delta$.

При вимірі будь-якої величини за допомогою системи пристроїв, які мають похибки $\delta_{пр1}, \delta_{пр2}, \dots, \delta_{прn}$ і включені послідовно, загальну похибка системи визначають за формулою:

$$\delta_{пр} = \sqrt{\delta_{пр1}^2 + \delta_{пр2}^2 + \dots + \delta_{прn}^2}$$

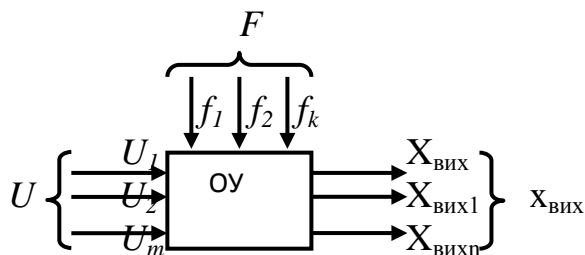
Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ

1 Електрична піч як об'єкт регулювання

Процес, агрегат, пристрій, що підлягають управлінню, називається *об'єктом управління (ОУ)*.

Якщо у системі реалізується тільки принцип управління за відхиленням, то термін уточнюється та об'єкт називається об'єктом регулювання. Абстрагуючись від фізичної природи процесів, що перебігають у об'єкті. Його конструктивних особливостей, стан найпростішого одномірного об'єкта визначається набором величин, представлених на рис. 1.1.



$X_{вих}$ – вектор стану, набір величин, за значенням яких судять про стан об'єкту управління; U – вектор управління, - сукупність дій на об'єкт, що управляють, забезпечують необхідне значення $X_{вих}$; F - вектор обурення.

Рисунок 1.1 – Характеристики об'єкту управління

Для вирішення задач аналізу та синтезу систем автоматичного регулювання (САР) необхідно формалізувати взаємозв'язок цих величин у вигляді статичних та динамічних характеристик.

Статичні характеристики встановлюють взаємозв'язок між вхідною і вихідною величинами в сталому режимі, тобто коли вхідні і обурюючі дії, що діють на об'єкт, не змінюються в часі.

Об'єкт, що має статичну характеристику, називається *статичним* об'єктом. Об'єкти, у яких після нанесення обурення не настає рівноважного стану і тому не можливо побудувати статичну характеристику, називаються *астатичними*.

Динамічні характеристики визначають зміну вихідної величини об'єкта в часі при зміні вхідної величини або обурення. Для дослідження динамічних властивостей об'єкта використовуються типові обурюючі впливи, найпоширенішим з яких є однократний ступінчастий вплив.

Крива розгону – це зміна вихідної величини в часі при одноразовій ступінчастій зміні вхідної величини.

Крива розгону може бути побудована із перехідної характеристики, яка отримана при рішенні неоднорідного дифференційного рівняння, що описує об'єкт, або отримана експериментально.

Із кривої розгону згідно з рис. 1.2 визначають динамічні параметри об'єкта: запізнення, сталу часу та коефіцієнт передачі.

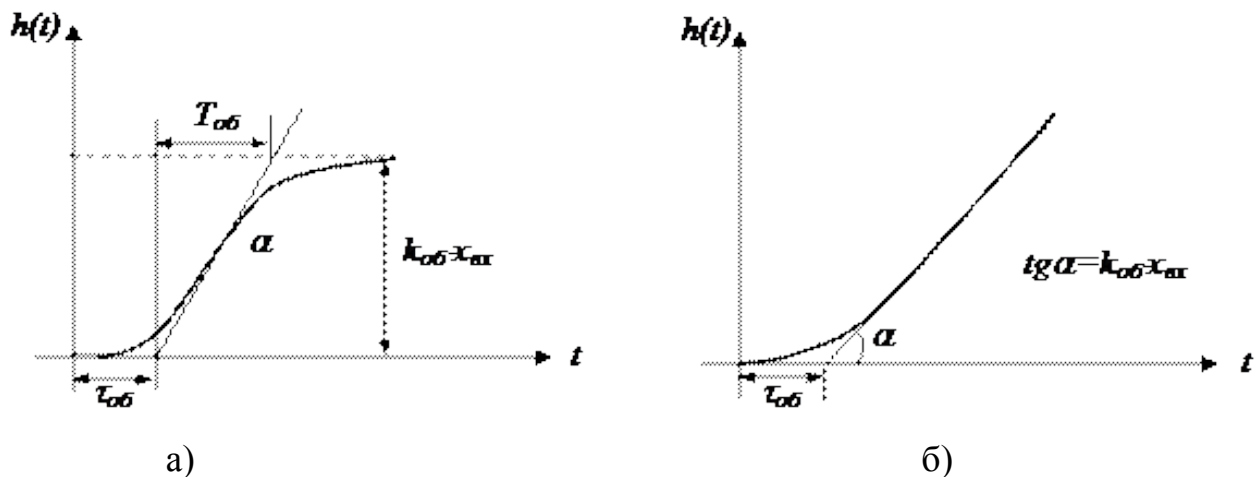


Рисунок 1.2 – Криві розгону та динамічні параметри статичного (а) та астатичного (б) об'єктів

Для визначення характеристик кривою розгону використовується метод дотичної: на найкрутішій ділянці кривої вибирається крапка і до неї проводиться дотична, яка відсікає на часовій вісі відрізки, відповідні транспортному запізнюванню і сталій часу об'єкту.

Величина запізнення складається із чистого (транспортного) та ємнісного (перехідного) запізнення.

Для статичних об'єктів відрізок часу від моменту перетину дотичної з лінією початкового сталого значення називається сталою часу об'єкту $T_{об}$.

Коефіцієнт передачі статичного об'єкту являє собою приріст вихідної величини об'єкту при переході із початкового до нового сталого стану, віднесене до величини обурення на вході. У загальному вигляді при різних величинах обурюючих впливів коефіцієнт передачі об'єкту визначається за кривою розгону із співвідношення:

$$K_{об} = \frac{X_{вих}(\infty) - X_{вих}(0)}{\Delta X_{вх}},$$

де $X_{вих}(0)$ – значення вихідної величини у початковому сталому стані;

$X_{вих}(\infty)$ - значення вихідної величини у новому сталому стані;

$\Delta X_{вх}$ – величина обурення, що наноситься на об'єкт.

Для астатичних об'єктів використовують умовних коефіцієнт передач, який визначається як стале значення швидкості зміни вихідної величини при одиничному обуренні. Тангенс кута нахилу дотичної до вісі абсцис визначає швидкість зміни вихідної величини (рис. 1.2, б):

$$\bar{K}_{об} = \frac{tg \alpha}{\Delta X_{вх}}$$

Стала часу визначається із співвідношення:

$$\bar{T}_{об} = \frac{1}{\bar{K}_{об}}$$

Розроховані параметри використовуються для спрощених інженерних методів вибору типу регулятора та розрахунку його налаштувань.

2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається із електричної печі опору та щита приладів і засобів автоматизації. У піч вмонтований термоелектричний перетворювач типу ТХК. На щиті розташовані вимірювальний та реєструючий прилад РП-160, автоматичний регулятор, перемикач режимів роботи, прибор для контролю напруги у печі КСП-1, автоматичний задавач та кнопочна станція або блок ручного керування.

3 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні ознайомитися із лабораторною установкою.

2. Включити живлення печі і приладів.

3. Відкрити передню кришку прибору РП-160, включити живлення та привід діаграмної стрічки, замкнувши клеми навпроти позначки 240 мм/год. Для створення натягнення діаграмної стрічки використати обтяжувачі.

4. Перемикач режимів перевести на режим «ручний».

5. Органами ручного керування встановити початкове нульове значення напруги (контролювати по прибору КСП-1). Зафіксувати початкову температуру печі по прибору РП-160.

6. Збільшити напругу печі на 10% та зняти криву розгону електричної печі. При цьому необхідно дочекатися сталого значення температури, яке має вигляд вертикальної лінії на діаграмній стрічці. Вертикальна ділянка має бути довжиною не менше 1 см для зручності подальшої обробки кривої розгону.

7. Занести значення напруги живлення печі та відповідної температури до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати експериментів

Напруга живлення печі, %	10	20	30	4	50	60	70	80
Температура печі при нагріванні, °С								
Температура печі при охолодженні, °С								

8. Повторити п.п. 6, 7 у всьому діапазоні напруги живлення.
9. За даними таблиці 1.1 побудувати статичну характеристику електричної печі у координатах $T = f(U)$.
10. За кривими розгону методом дотичної визначити динамічні показники об'єкта: транспортне запізнення, сталу часу та коефіцієнт передачі.
11. Розрахувати середні значення динамічних показників τ_{cp} , T_{cp} , K_{cp} .
12. Записати передавальну функцію електричної печі як об'єкта регулювання у вигляді:

$$W(s) = \frac{K_{cp}}{T_{cp} \cdot s + 1} e^{-\tau_{cp} \cdot s}$$

13. Зробити висновок про вид статичної характеристики об'єкта та характер зміни динамічних показників у залежності від температури.

4 Контрольні питання

1. Дайте визначення поняття статичної характеристики.
2. Перерахуйте види об'єктів з огляду на наявність або відсутність у них статичної характеристики.
3. Перерахуйте види статичних характеристик.
4. Дайте визначення поняття кривої розгону.
5. Опишіть сутність методу дотичної при визначенні динамічних властивостей об'єкта.
6. Перерахуйте динамічні властивості об'єкта.
7. Перерахуйте види типових елементарних ланок.
8. Дайте визначення поняття передавальної функції.
9. Перерахуйте види з'єднання ланок.
10. Апроксимація об'єктів типовими елементарними ланками.

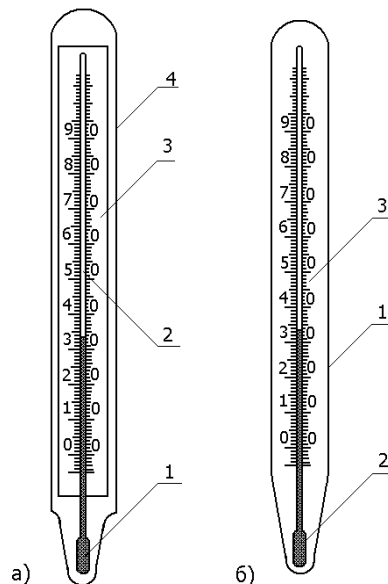
Лабораторна робота № 2

ПОРІВНЯННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РТУТНОГО, МАНОМЕТРИЧНОГО ТЕРМОМЕТРІВ І ТЕРМОМЕТРА ОПОРУ В КОМПЛЕКТІ З ЛОГОМЕТРОМ

1 Пристрій і принцип дії приладів

1.1 Рідинні скляні термометри

Рідинний скляний термометр (рис. 2.1) складається з термобалона 1, наповненого термометричною рідиною, капіляра 2, шкали 3 і захисної скляної оболонки 4.



1 - термобалон; 2 – капіляр; 3 – шкала; 4 – скляна оболонка

Рисунок 2.1 - Рідинний скляний термометр

При нагріванні термометрична рідина розширюється і переміщається по капіляру, що використовується для відліку температури за шкалою, градуйованою в градусах Цельсія. Найчастіше в якості термометричної рідини в таких термометрах використовується ртуть. При цьому нижня межа вимірювання складає $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ і обмежений температурою замерзання ртуті ($-39\text{ }^{\circ}\text{C}$). Температуру кипіння ртуті ($357\text{ }^{\circ}\text{C}$) можна підвищувати аж до критичної ($1460\text{ }^{\circ}\text{C}$), створюючи в капілярі тиск інертним газом. Проте із-за обмежень по міцності матеріалу для скляних термометрів верхня межа вимірювань дорівнює $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, для кварцевих – $750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Переваги ртуті як термометричної речовини - широкий діапазон вимірювання і незмочуваність скла. Недоліками є низький температурний коефіцієнт об'ємного розширення і токсичність її пари у разі руйнування резервуару термометра.

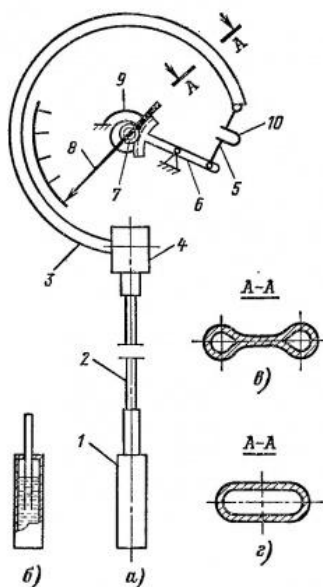
Окрім ртуті використовуються також етиловий і метиловий спирти (від - 80 до +80 °С), керосин (від - 60 до +300 °С), пентан (від - 200 до +20 °С) і толуол (від - 80 до +200 °С).

Скляні ртутні термометри випускаються також з двома постійно впаяними контактами або з одним контактом, упаяним в капіляр термометра, і другим рухливим, переміщуваним усередині капіляра спеціальним магнітним пристроєм. Такі електроконтактні ртутні термометри застосовуються для сигналізації і регулювання температури.

Основні допустимі похибки скляних термометрів складають: для технічних $\pm(1-2)$ °С, для зразкових - до $\pm 0,03$ °С. Найбільш значною є похибка, викликана відмінностями температур термометричної рідини, що знаходиться в термобалоні і в капілярі. На корпусах термометрів зазвичай наноситься риска, що відповідає рівню занурення термометра у вимірюване середовище при його градуюванні. Якщо такої риски немає, на висоту стовбчика, що виступає, вводиться поправка $\Delta t = n\beta(t - t_{BC})$, де n - висота стовпчика, що виступає, виражена в градусах; β - коефіцієнт видимого об'ємного розширення рідини (для ртуті $\beta = 16 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$); t - температура, що показується термометром, °С; t_{BC} - середня температура стовпчика, що виступає, °С.

1.2 Манометричні термометри

Дія манометричних термометрів ґрунтована на залежності між температурою і тиском робочої (термометричної) речовини в герметичній системі. Залежно від робочої речовини вони підрозділяються на газові, рідинні і конденсаційні (парорідинні).



1 – термобалон; 2 – капіляр; 3 – манометрична пружина; 4 – утримувач; 5 – поводок; 6 – сектор; 7 – шестерінка; 8 – стрілка; 9 – пружинка; 10 – температурний компенсатор

Рисунок 2.2 - Манометрический термометр

Термосистема термометра (рис. 2.2) складається з термобалона 1, занурюваного в контрольоване середовище, капіляра 2 і манометричної пружини 3. Один кінець пружини упаяний в утримувач 4, канал якого сполучає внутрішню порожнину манометричної пружини через капіляр з термобалоном. Другий кінець пружини герметизований і шарнірно за допомогою поводка 5 пов'язаний з сектором 6. Цей сектор сполучений зубчастим зачепленням з шестерінкою 7, на вісі якої посаджена вказівна стрілка 8. Для вибору зазору в передатному механізмі встановлена спіральна пружинка 9, кінець внутрішнього витка якої закріплений на вісі шестерінки. Біметалічний компенсатор 10, вбудований в поводок передатного меха-низма, служить для компенсації температурної похибки манометричної пружини. Випускають показуючі і самописні манометричні термометри. Привід діаграмного паперу здійснюється синхронним двигуном, а в деяких модифікаціях термометрів - годинниковим механізмом. Останнє дозволяє використати такі термометри у вибухонебезпечних приміщеннях. Випускають також показуючі електроконтактні термометри, які використовуються для сигналізації про досягнення граничних значень температур (чи регулювання). Капіляр термометрів виготовляють з латуні або сталі із зовнішнім діаметром 2,5 і внутрішнім 0,35 мм. Довжина капіляра може бути різною, але вона знаходиться зазвичай в межах наступного ряду: 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60 м. Капіляр поміщають в металеву оболонку, що оберігає його від ушкоджень. Газові манометричні термометри дозволяють вимірювати температуру - 150 до +600 °С. Як робочий газ використовується гелій, азот або аргон. При постійному об'ємі газу залежність тиску газу від температури виражається вираженням:

$$P_t = P_0(1 + \beta t)$$

де P_0 - тиск газу при температурі 0 °С;

β - температурний коефіцієнт розширення газу, K^{-1} .

Для зменшення похибки від коливань атмосферного тиску термо-систему газового термометра заповнюють при значному початковому тиску (1,5÷3,5 МПа), а для зменшення похибки від коливання температури навколишнього середовища прагнуть зменшити відношення внутрішнього об'єму пружини і капіляра до об'єму термобаллона. При цьому, чим довше капіляр, тим більше розміру балона. Так, при довжині капіляра 1,6 м довжина корпусу термобаллона виконується рівною 125 мм, а при довжині капіляра 40 м - 500 мм при одному діаметрі, рівному 20 мм. Зважаючи на великі розміри термобаллона газові термометри не скрізь можуть бути застосовані.

Рідинні термометри дозволяють вимірювати температуру - 50 до +300 °С. Як робоча речовина використовуються спеціальні органічні рідини (пропиловий спирт, силіконові рідини). При нагріві термобаллона рідина розширюється на об'єм ΔV , відповідно до якого збільшується об'єм $\Delta V_{мп}$ внутрішній порожнині манометричної пружини, оскільки рідина практично

нестискувана. Тому в рідинних термометрах тиск в термосистемі, на відміну від конденсаційних і газових, не пов'язаний строгою залежністю з початковим і кінцевим значеннями вимірюваної температури і початковим тиском. Визначальним тут являється $\Delta V_{мп}$, оскільки в манометричних пружинах різної жорсткості необхідне значення $\Delta V_{мп}$ може бути отримане при різних тисках. Чим більше жорсткості пружини, тим більшим має бути робочий тиск для отримання необхідного $\Delta V_{мп}$. При цьому гідростатична похибка стає несуттєвою, а зміна атмосферного тиску на свідчення рідинних термометрів практично не впливає.

Конденсаційні (парорідинні) манометричні термометри випускаються з межами вимірювання $-50 \div +300$ °С. Як термометрична речовина використовується фреон- 22 (межа вимірювання $-25 \div +80$ °С), пропілен ($-50 \div +60$ °С), ацетон ($+100 \div +200$ °С) і інші легкокиплячі рідини. Тут використовується залежність тиску насиченої пари від температури, тому термобалон конденсаційних термометрів має порівняно невеликі розміри (довжина 78, діаметр 16 мм). Довжина сполучного капіляра від 0,6 до 25 м. Характерна особливість конденсаційних термометрів - значна нерівномірність шкали. У термобалоні конденсаційного термометра робоча речовина знаходиться завжди в двох термодинамічних фазах: рідкій і газоподібній (пароподібній), кількісне відношення між якими визначає тиск в термосистемі і залежить від вимірюваної температури. У капілярі буде або газ (якщо вимірювана температура нижча температури навколишнього середовища), або рідина. Тому конденсаційним термометрам не властива похибка від зміни температур довкілля, але свідчення їх при малому тиску в термосистемі можуть істотно залежати від коливань атмосферного тиску. Крім того, коли вимірювана температура вище за температуру довкілля, їм властива гідростатична похибка.

1.3 Термометри опору

Дія термометрів опору ґрунтована на властивості речовин змінювати свій електричний опір зі зміною температури. Метали, призначені для виготовлення термометрів опору, повинні відповідати наступним вимогам:

- мати високу відтворюваність значень електричного опору в інтервалі робочих температур,
- не окислюватися,
- значення температурного коефіцієнта опору α має бути досить високо.

Температурний коефіцієнт опору прийнято вимірювати в інтервалі 0... 100 °С:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100},$$

де R_{100} і R_0 – опір зразка даного металу, виміряні відповідно при 100 і 0 °С.

Чиста платина найбільшою мірою відповідає усім вимогам, що пред'являються до металів для виготовлення чутливого елемента термометрів

опору. Вона стійка в окислювальному (повітряною) середовищі, може тривалий час зберігати свої градувальні дані. Чутливий елемент термометра має бути надійно захищений від можливого механічного ушкодження, попадання вологи, забруднення, згубної дії на нього відновних і агресивних газів, що містяться в середовищі, температуру якого вимірюють термометром. Платиновий термометр опору найбільш точний з числа первинних перетворювачів температури в діапазоні $-260 \div +750$ °С. До недоліків платини слід віднести відхилення від лінійного закону залежності її опору від температури.

Мідь як матеріал, вживаний для виготовлення чутливих елементів технічних термометрів опору типу ТСМ, має невисоку вартість, лінійну залежність електричного опору від температури. Проте питомі опори її малі, а при підвищених температурах мідь інтенсивно окислюється. Мідні термометри опору типу ТСМ можуть застосовуватися для тривалого вимірювання температури від -50 до $+180$ °С. По точності вони підрозділяються на два класи - 2-ий і 3-ій.

Датчики маркеруються наступним чином:

ТСМ – термометр опору, у чутливому елементі якого використовується мідь; градування 50М та 100М;

ТСП - термометр опору, у чутливому елементі якого використовується платина; градування 50П, 100П, Pt100, Pt500, Pt1000.

ТПТ – технічний платиновий термометр.

Граничні допустимі похибки платинових і мідних термометрів опору приведені у таблиці 2.1.

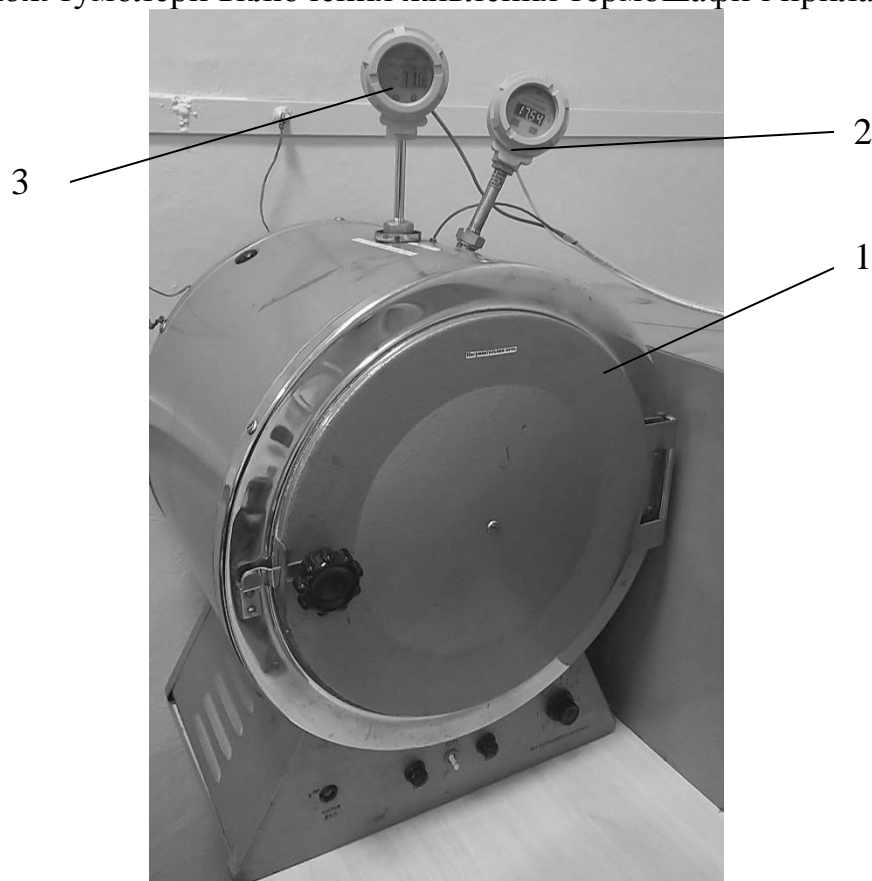
Таблиця 2.1 - Максимальні допустимі відхилення від даних градувальних таблиць термометрів опору ТСП и ТСМ

Тип термометра	Клас точності	Інтервал температур, °С	Максимальне допустиме відхилення, °С
ТСП	1	0...+650	$\pm(0,15+3,0 \cdot 10^{-3})$
ТСП	2	0...-200	$\pm(0,15+4,5 \cdot 10^{-3})$
ТСМ	2	0...+650	$\pm(0,3+4,5 \cdot 10^{-3})$
ТСМ	2	0...-200	$\pm(0,3+6,0 \cdot 10^{-3})$
ТСМ	3	-50...+180	$\pm(0,3+3,5 \cdot 10^{-3})$
ТСМ	3	-50...+180	$\pm(0,3+6,0 \cdot 10^{-3})$

У якості вторинного приладу в комплекті з термометром опору може застосовуватися логометр або міст.

2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 2.3) складається з термошафи, усередині якої розміщені термобаллон манометричного термометра та 2 термометри опору: мідний і платиновий. Показуючі прилади смонтовані на панелі. На ній розташовані також тумблери включення живлення термошафи і приладів.



1 – термошафа; 2 – показуючий прибор платинового термометра; 3 – показуючий прибор манометричного термометра

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд лабораторної установки

3 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні ознайомитися із лабораторною установкою.

2. Включити живлення термошафи і приладів.

3. При нагріванні термошафи з інтервалом у 1 хвилину записати в таблицю 1.2 показання усіх приладів. Кількість вимірювань – 7.

4. Приймавши свідчення платинового термометра опору за дійсні, розрахувати абсолютну, відносну і приведену похибки вимірювання манометричного термометра і мідного термометра опору.

5. Зробити висновки про відповідність класу точності манометричного термометра і мідного термометра опору.

Таблиця 2.2 - Результати вимірювань та розрахунків

Показання платинового термометра опору, °C	Манометрический термометр			Мідний термометр опору				
	Показання	Похибки			Показання	Похибки		
		абсолютна, °C	відносна, %	приведена, %		абсолютна, °C	відносна, %	приведена, %

4 Контрольні питання

1. Опишіть будову та принцип дії скляного рідинного термометра.
2. Назвіть межі вимірювання температури скляним ртутним термометром.

Причини, що його бумовлюють.

3. Перерахуйте основні похибки, що властиві скляним термометрам.
4. Перерахуйте типи манометричних термометрів, принцип дії.
5. Назвіть значення початкового тиску в термометричній системі газового термометра.
6. Опишіть призначення жорсткості манометричної пружини для рідинних термометрів.
7. Перерахуйте джерела похибок конденсаційних термометрів.
8. Перерахуйте вимоги, що пред'являються до металів для виготовлення чутливих елементів термометрів опору.
9. Назвіть межі вимірювання платинових і мідних термометрів опору.

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЛОГОМЕТРА

1 Пристрій і робота логометра

Логометри - прилади магнітоелектричної системи, призначені для вимірювання, а також для запису, позиційного регулювання і сигналізації температури в комплекті з термометрами опору. Вимірювальний механізм логометра (рис. 3.1) складається з двох жорстко скріплених між собою рамок 1 і 2, виготовлених з тонкого мідного дроту і поміщених в нерівномірний повітряний проміжок між полюсами постійного магніта і сердечником. Повітряний проміжок в логометрах різної конструкції може зменшуватися або збільшуватися від центру полюсних наконечників до їх країв, а магнітна індукція - відповідно зростати або убавати. Обертаючий і протидіючий моменти у логометра створюються електричним шляхом. Тому для підведення струму до рамок застосовують безмоментні введення або малопотужні

спіральні пружини, протидіючий момент яких істотно менше магнітоелектричного моменту рамок.

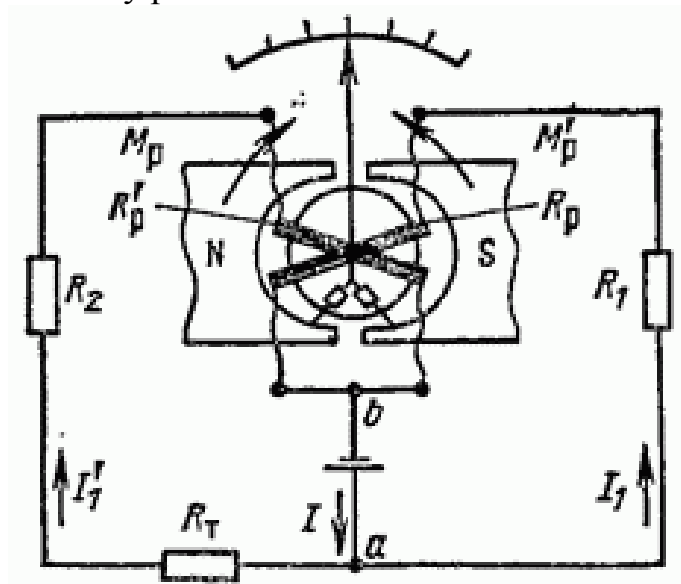


Рисунок 3.1 – Схема логометра

На рис. 3.1 видно, що електрична схема складається з двох паралельних гілок: резистор R_1 - рамка 1 та термометр опору R_T - резистор R_2 - рамка 2. При протіканні по рамках струмів i_1 і i_2 створюються магнітні поля, в результаті взаємодії яких з полем постійного магніта виникають обертаючі моменти M_1 і M_2 , спрямовані один назустріч одному. При однаковому опорі вказаних ланцюгів, тобто при $R_T = R_1 - R_2$, струми в гілках i_1 і i_2 рівні і покажчик приладу знаходиться в середині шкали. Якщо опір R_T внаслідок нагріву термометра збільшується, то $i_1 > i_2$, $M_1 > M_2$ і рамки будуть обертатися за годинниковою стрілкою. При цьому рамка 1 потрапляє в слабкіше магнітне поле і M_1 зменшується, момент M_2 , навпаки, збільшуватиметься. При певному значенні кута повороту φ моменти зрівнюються і рамки зупиняться. Таким чином, кут повороту покажчика логометра однозначно визначається відношенням струмів i_1/i_2 , яке за нормальних умов залежить тільки від R_T , тобто від температури вимірюваного середовища.

Теоретично свідчення логометра не залежать від напруги U джерела живлення. З урахуванням токопідводячих введень і тертя в опорах додаткові похибки при зміні U більш ніж на 10% все ж мають місце, і з метою їх зниження для живлення логометра доцільно використати стабілізоване джерело (зазвичай $U = 4$ В).

Для зменшення температурної похибки логометра опір манганинових резисторів R_1 і R_2 доводиться збільшувати, що знижує чутливість приладу. Внаслідок цього замість схеми, зображеної на рис. 3.1, застосовують мостові вимірювальні схеми (рис. 3.2). Рамки включені у вимірювальну діагональ складної мостової схеми. У іншій діагоналі $c - d$ моста підключено джерело живлення. Резистори R_1, R_2, R_3, R_6, R_K виготовлені з манганіну (зазвичай $R_2 = R_3$). Затиски 1-4 розташовані на клемній колодці приладу. До затисків 1 і 2 підключений термометр опору R_T за допомогою сполучної лінії з мідного або

алюмінієвого дроту ($R_{П1}$, $R_{П2}$). Для підгонки опору лінії до заданого значення використовуються манганинові підгоняльні котушки $R_{ПК1}$, $R_{ПК2}$. Контрольний резистор R_K призначений для перевірки правильності показань приладу. Резистор R_5 виготовлений з манганіну; мідний резистор R_4 забезпечує компенсацію температурної похибки логометра, що виникає із-за змін температури і відповідно опорів R рамок.

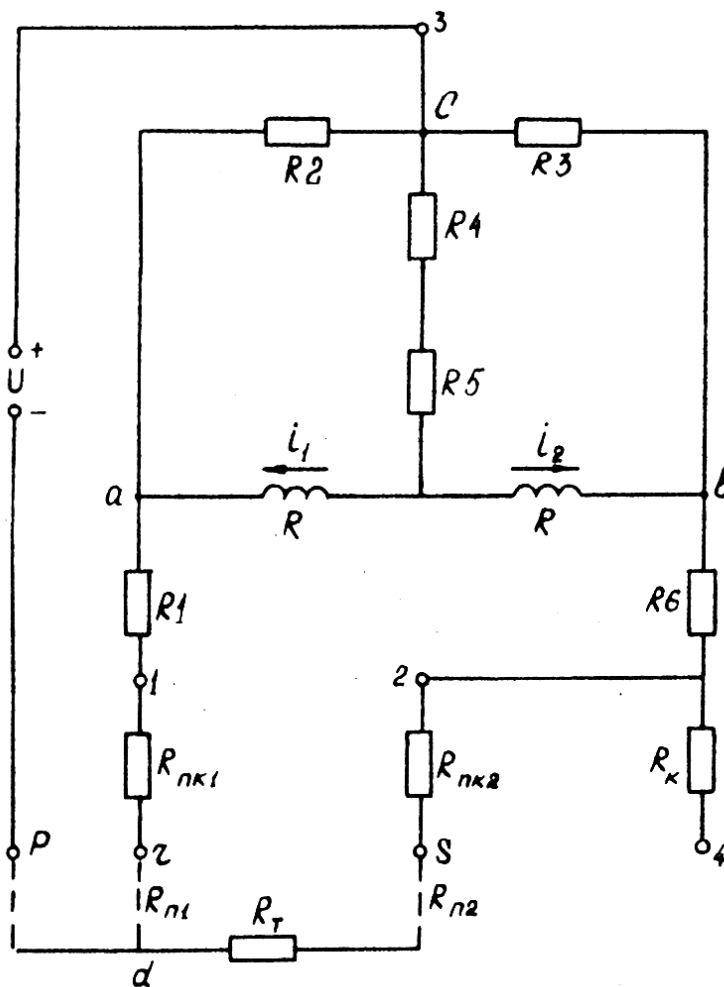


Рисунок 3.2 – Принципова електрична схема логометра

Якщо $R_1 + R_{ПК1} + R_{П1} = R_6 + R_{ПК2} + R_{П2} + R_T$, то потенціали точок a і b однакові, а струми i_1 і i_2 рівні і протилежні (міст знаходиться у рівновазі). При збільшенні R_T потенціал точки b збільшується, а точки a зменшується. Відповідно струм i_2 зменшується, а струм i_1 збільшується, тобто в мостовій схемі при зміні опору термометра змінюються (причому з різними знаками) струми в обох рамках, що забезпечує велику чутливість мостових схем. Логометри розраховані на підключення до них термометрів опору як за двопровідною, так і по трипровідною схемами при певних значеннях опору сполучної лінії:

$$R_{Л} = 2R_{ПК} + 2R_{П}$$

Номінальне значення $R_{Л}$, при якому відбувається градуювання приладу, встановлюються рівним 5 або 15 Ом і вказується на шкалі логометра. Задане значення $R_{Л}$ при зміні довжини сполучної лінії забезпечується за допомогою підганяльних котушок $R_{ПК1}$ і $R_{ПК2}$ шляхом змотування з них частини дроту. Номінальний опір кожної котушки дорівнює $0,5 R_{Л}$. Правильність підгонки лінії слід контролювати виміром її опору за допомогою моста постійного струму класу не нижче 0,05.

Для перевірки справності логометра в умовах експлуатації передбачений контрольний резистор $R_{К}$ (див. рис. 3.2). Після відключення джерела живлення і закорочення затисків на голівці термометра кінець дроту від $R_{ПК2}$, приєднаний до затиску 2, перемикають на затиск 4 і знову підключають джерело живлення. При справному приладі його покажчик повинен зупинитися на червоній контрольній відмітці, розташованій зазвичай на середині шкали. Відхилення від контрольної відмітки не повинне перевищувати допустиму основну похибка, вказану на шкалі приладу.

2 Опис лабораторної установки

Повіряння логометра відбувається на лабораторній установці УПТВ-2АМ, яка призначена для повіряння вторинних приборів теплоенергетичного контролю. На лабораторній установці можливо проводити повіряння логометра, автоматичного моста, пірометричного мілівольметра та автоматичного потенціометра. Частина лабораторної установки, призначена для повіряння логометра, наведена на рис. 3.3.



1 – логометр; 2 – магазин опору

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд лабораторної установки

3 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні ознайомитися із лабораторною установкою.
2. Включити живлення приладів.
3. Шляхом зміни опору на магазині опору II, встановити показчик шкали по черзі на всі оцифровані відмітки у прямому (від 0 до максимальної відмітки) та зворотньому напрямках. Результати вимірювань занести до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 -Результати вимірювань та розрахунків

Контроль на відмітка шкали, $^{\circ}\text{C}$	Опір магазину R , Ом		Опір по градувальній таблиці, $R_{гр}$, Ом	Абсолютна похибка, $^{\circ}\text{C}$		Відносна похибка, %	Приведе на похибка , %
	Прямий хід	Зворотній хід		Прямий хід	Зворотній хід		

4. Приймаючи значення опору із градувальної таблиці за дійсні, розрахувати абсолютну, відносну і приведену похибки вимірювання логометра.
5. Зробити висновки про відповідність логометра класу точності.

4 Контрольні питання

1. Опишіть будову та принцип дії логометра.
2. Назвіть призначення контрольного резистора R_K і порядок перевірки справності приладу.
3. Перерахуйте основні джерела додаткової похибки вимірювання і їх компенсація.
4. Назвіть призначення мідного резистора R_4 і механізм температурної компенсації.
5. Опишіть методику оцінки додаткової температурної похибки при використанні манганинового і мідного резистора.

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОМАТИЧНОГО УРІВНОВАЖЕНОГО МОСТА

1 Загальні відомості

1.1 Вимірювальні схеми

У якості вторинних приладів для роботи з термометрами опору найчастіше застосовують неурівноважені і урівноважені мости. Неурівноважені вимірювальні схеми дозволяють перетворювати опір термометра в напругу і отримувати відліки напруги безпосередньо за шкалою приладу. На рис. 4.1, а показана принципова схема неурівноваженого моста.

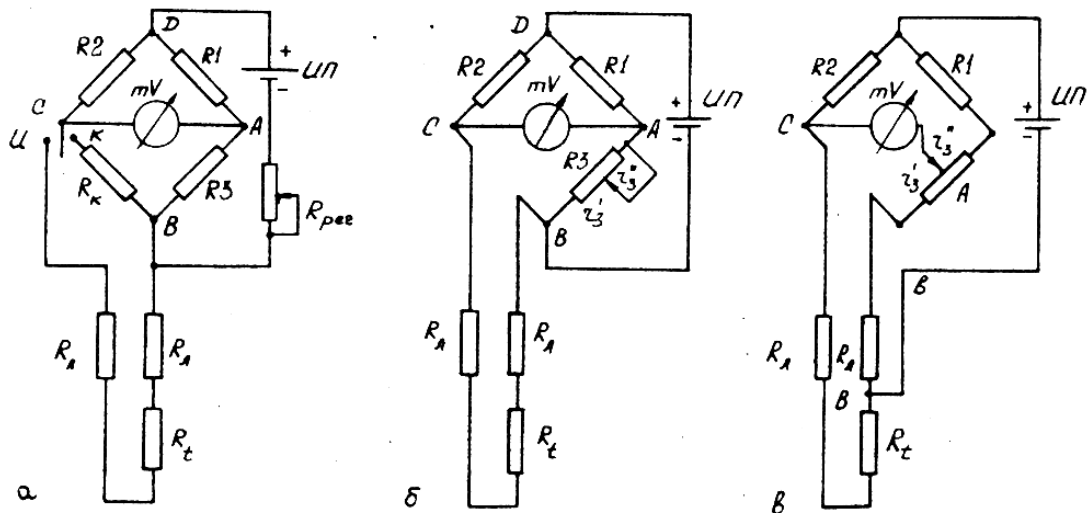


Рисунок 4.1 - Принципіальна схема неурівноваженого моста (а) та урівноваженого (б), (в) мостів

Плечі моста утворені постійними резисторами R_1 , R_2 , R_3 , і термометром опору R_t . У вимірювальну діагональ включений мілівольтметр mV . Живлення моста здійснюється від джерела ИП через живлячу діагональ. Напругу живлення моста в діагоналі ВД в процесі вимірювання необхідно підтримувати постійним. Для цієї мети служить регульовальний резистор $R_{рег}$, виконаний у вигляді реостата. Для забезпечення контролю напруги передбачається контрольний резистор R_k , що включається у схему моста замість термометра опору за допомогою перемикача П /положення К "контроль" /. Резистор R_k зазвичай має опір, рівний опору термометра, що відповідає двом третинам шкали приладу, і сполучних дротів. При підключенні R_k покажчик мілівольтметра у разі відповідності напруги $U_{ВД}$ необхідному значенню повинен встати на контрольну відмітку. Якщо напруга між точками В і Д не відповідає потрібному, виконується регулювання за допомогою $R_{рег}$ до

встановлення належного значення мілівольтметра. Після того, як встановиться необхідне значення напруги, перемикач П ставиться в положення И /"вимір"/ і по струму, що протікає через мілівольтметр, судять про опір R_t .

Таким чином, встановлюється відома залежність між відхиленням покажчика мілівольтметра і опором термометра, що дозволяє судити про температуру термометра, а, отже, і про температуру середовища, в якому він знаходиться. Недолік схеми - необхідність підтримки постійної напруги в діагоналі ВД і значна похибка, що виникає за рахунок нелінійності характеристики мілівольтметра. Нині для живлення неурівноважених вимірювальних мостових схем застосовують стабілізовані джерела живлення /ИПС/, що дозволяє усунути недолік вимірювальної схеми. У останні роки неурівноважені мости для вимірювання температур майже не застосовуються.

Найбільш поширеними приладами для вимірювання опору термометра є урівноважені чотирьохплічні мости.

Принципова схема урівноваженого моста з включеним термометром опору R_t зображена на рис. 4.1, б, де R_1 , R_2 , R_3 , - резистори з відомим опором. Один з них, наприклад R_1 , є порівняльним регульованим плечем. У одну з діагоналей моста / точки В і Д/ включено джерело живлення, в другу /точки А і С/ чутливий нульовий гальванометр.

Змінюючи опори порівняльного плеча, завжди можна добитися такого стану схеми, при якому потенціали точок А і С будуть рівні, і, отже, струм в нульовому приладі дорівнює нулю. Такий стан зазвичай називають **станом рівноваги схеми**. Рівновага схеми досягається за умови, що добутки опорів резисторів, розташованих в протилежних печках, рівні між собою:

$$R_t R_1 = R_2 R_3$$

Із цієї умови виходить, що урівноважити міст можна підбором опору резистора R_3 при постійному відношенні балансних плечей R_1/R_2 . Кожному значенню опору термометра відповідає цілком визначені значення опорів порівняльного плеча при постійно вибраному відношенні плечей R_1/R_2 . У вимірних мостах порівняльний резистор R_3 виконується у вигляді реохорда - змінного дротяного резистора з ковзаючим движком-контактом. Для урівноваження моста переміщують повзунок реохорда до тих пір, поки стрілка гальванометра не встановиться на нульовій відмітці шкали. При лінійній залежності опору реохорда від положення движка відлік робиться безпосередньо по положенню движка.

Деяку невизначеність в цій схемі може внести перехідний опір пересувного движка резистора R_3 . Для виключення впливу цього перехідного опору гальванометр підключають безпосередньо до движка реохорда так, як показано на рис. 4.1, в. У цій схемі пересувний контакт не відноситься до опору плечей, а включений в діагональ АС, опір якої в момент відліку / при нульовому струмі / практично не має значення.

У реальних схемах доводиться враховувати опір проводів, що з'єднують термометр з мостом. Для підгонки опорів проводів до заданого значення, зазначеного в паспорті вимірювального моста, послідовно з термометром опору включаються підганяльні манганінові опори R_L .

У процесі вимірювання може виникнути додаткова похибка за рахунок зміни опору проводів лінії, наприклад, при зміні температури середовища, в якому прокладена лінія. В цьому випадку рекомендується застосовувати трьохпроводну схему підключення термометра опору (рис. 4.1, в). В даній схемі живлення моста / точка В / перенесено безпосередньо до термометра, і в момент рівноваги при відсутності струму в діагоналі АСА справедливо відношення:

$$\frac{R_1 + r_3''}{r_3' + R_L} = \frac{R_2}{R_t + R_L}$$

Тоді:

$$R_t = \frac{R_2}{R_1 + r_3''} \cdot r_3' + \left(\frac{R_2}{R_1 + r_3''} - 1 \right) R_L$$

Очевидно, що при $\frac{R_2}{R_1 + r_3''} = 1$ опір R_t не залежить від R_L . Такий стан буде відповідати лише одній з точок шкали, припустимо, середньої, так як опір є величиною змінною.

У інших точках шкали можливі зміни опору будуть вносити додаткові похибки. Якщо значення R_1 і R_2 будуть в кілька разів більше, то в трьохпроводній схемі вплив величини ΔR_L буде істотно менше (на порядок і вище), ніж в двухпроводній схемою, навіть для самої несприятливої точки шкали.

1.2 Автоматичні урівноважені мости

Вимірювальна схема автоматичних урівноважених мостів в принципі не відрізняється від схеми лабораторного чотирьохплечного моста за винятком того, що урівноваження його, здійснюване зазвичай переміщенням движка по калібровані реохорд, проводиться не вручну, а автоматично за допомогою спеціальних систем, що стежать. Реохорд включається в одну з вершин вимірювальної діагоналі моста між двома плечима, в одне з яких включений термометр опору. У цьому випадку забезпечується лінійна залежність положення движка реохорда від опору R_t і можливість виконувати односторонні, безнульові і двосторонні шкали моста.

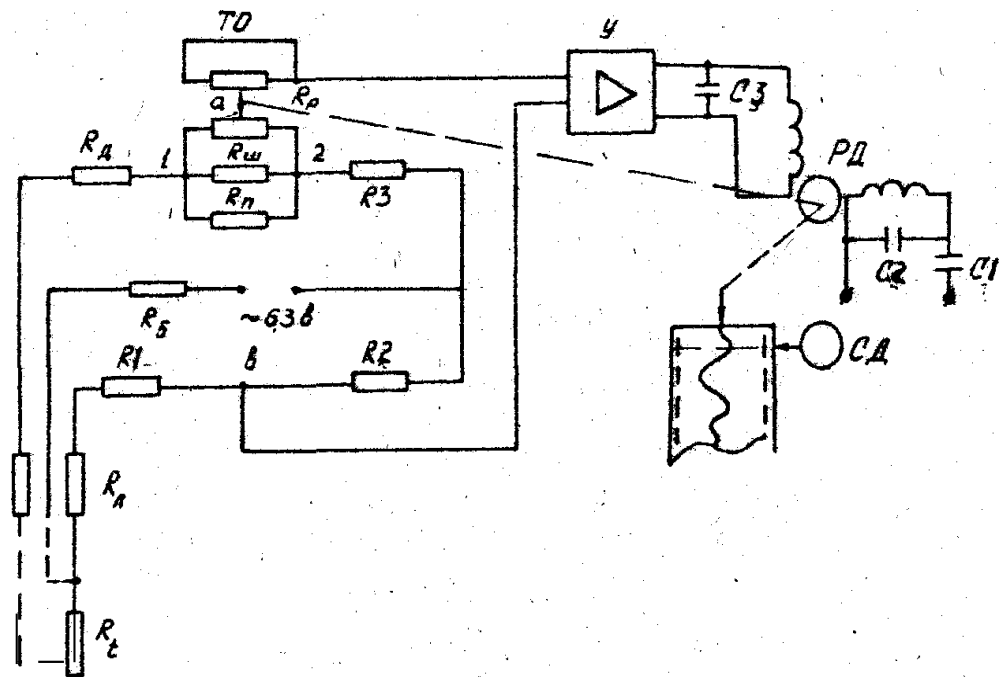


Рисунок 4.2 – Вимірювальна схема автоматичного урівноваженого моста

Вимірювальна схема автоматичного урівноваженого моста, зображена на рис. 4.2, може розглядатися як типова схема. На схемі прийняті такі позначення:

R_p - реохорд;

$R_{ш}$ - шунт реохорда, призначений для підгонки опору R_p до заданого нормованого значення $R_{нр}$:

$$R_{нр} = \frac{R_p \cdot R_{ш}}{R_p + R_{ш}} = 90 \text{ или } 100 \pm 0.1 \text{ Ом};$$

ТО - токовідвод ;

$R_{п}$ - резистор для встановлення діапазону вимірювання ;

$R_{д}$ - резистор для підгонки начального значення шкали ;

R_1, R_2, R_3 - резистори мостової схеми ;

$R_{б}$ - баластний резистор у ланцюзі живлення для обмеження струму;

R_t - термометр опору ;

$R_{л}$ - резистори для подгонки сопротивления лінії ;

РД - асинхронний конденсаторний реверсивний двигун;

СД - синхронний двигун;

C_1 і C_2 - конденсатори для створення необхідного базового зсуву на 90 град між магнітними потоками обмотки збудження і керуючої обмотки;

C_3 - конденсатор, шунтувальний керуючу обмотку реверсивного двигуна для компенсації індуктивної складової струму в цій обмотці.

Усі резистори вимірювальної схеми моста виготовляють з стабілізованого манганінового дроту.

При порушенні рівноваги мостової схеми приладу внаслідок зміни опору R_t термометра на вхід підсилювача подається напруга небалансу з вершин А і В. Ця напруга підсилюється підсилювачем до значення, достатнього для приведення в дію реверсивного двигуна. Вихідний вал двигуна, кінематично пов'язаний з двигуном реохорда і кареткою, пересуває їх до тих пір, поки напруга небалансу, зменшуючись, не дорівнюватиме нулю (точніше, менше величини, яку відчуває підсилювач). При досягненні рівноваги мостової схеми ротор реверсивного двигуна зупиняється, а движок реохорда і каретка з покажчиком і пером займає положення, відповідне вимірюваному опору термометра.

Автоматичні урівноважені мости, призначені для роботи в комплекті з термометрами опору, випускається із шкалами, градуйованими у градусах Цельсія. При цьому необхідно мати на увазі, що їх температурна шкала дійсна тільки для термометрів опору певного градуювання і заданого значення опору зовнішньої сполучної лінії.

Типи приладів, побудованих на базі мостових схем: автоматичний показуючий міст КМ 140; автоматичний урівноважений міст КСМ 3; КСМ 2.

Також мостові схеми є складовою багатофункціональних приладів, які в одному корпусі поєднують декілька вимірювальних схем. Наприклад, РП 160, КСУ 2, регістратор Р10, ДИСК 250, КПМ 1 та інші.

Мости, які випускаються серійно, мають класи точності від 0,02 до 5 на постійному струмі і від 0,1 до 5 - на змінному.

2 Опис лабораторної установки

Повіряння автоматичного моста відбувається на лабораторній установці УПТВ-2АМ, яка призначена для повіряння вторинних приборів теплоенергетичного контролю. На лабораторній установці можливо проводити повіряння логометра, автоматичного моста, пірометричного мілівольтметра та автоматичного потенціометра. Частина лабораторної установки, призначена для повіряння автоматичного моста, наведена на рис. 4.3.

3 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні ознайомитися із лабораторною установкою.

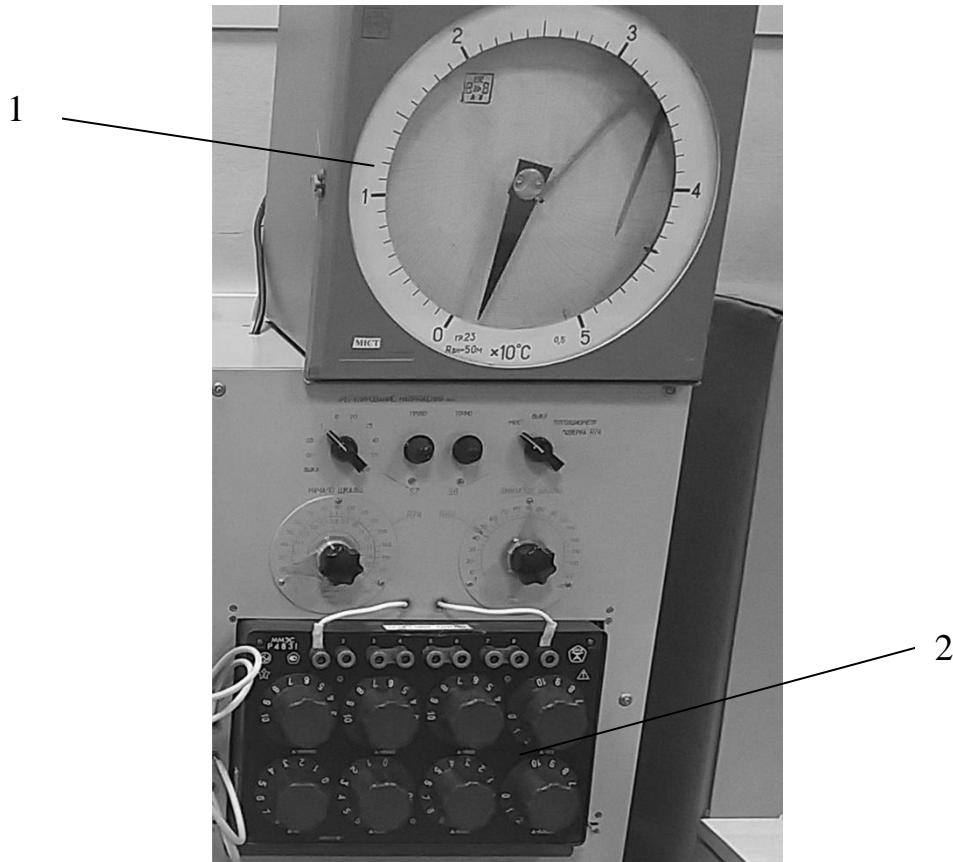
2. Ознайомитися і навчитися користуватися магазином опору, що імітує термометр опору.

3. Включити прилад. На магазині опорів встановити значення опору, відповідне першої оцифрованої позначці шкали (нулю) згідно градуюванню, зазначеному на шкалі приладу. Показання приладу записати в таблицю вимірювань.

4. Провести перевірку приладу по всім оцифрованим значенням шкали, заповнивши таблицю вимірюванні і розрахунків.

5. Розрахувати абсолютну, відносну та приведену похибки вимірювання моста.

6. Зробити висновки про придатність автоматичного моста до експлуатації.



1 – автоматичний міст; 2 – магазин опоры

Рисунок 4.3 – Загальний вигляд лабораторної установки

Таблиця 3.1 -Результати вимірювань та розрахунків

Контроль на відмітка шкали, T, °C	Опір магазину опоры, R, Ом		Значення опоры із градуовальної таблиці, Rгр, Ом	Абсолютна похибка Δ, Ом		Відносна похибка, δ, %		Приведе на похибка, δпр, %
	прямий хід	зворотній хід		прямий хід	зворотній хід	прямий хід	зворотній хід	

4 Контрольні питання

1. Опишіть будову та принцип дії урівноважених і неуврівноважених вимірювальних мостових схем.

2. Опишіть механізм компенсації впливу контактних опорів на результат вимірювання, отриманий за допомогою врівноваженого моста.
3. Назвіть вплив зміни напруги живлення на роботу урівноваженого і неурівноваженого мостів.
4. Перерахуйте переваги трехпроводної схеми включення термометра опору і область застосування.
5. Перерахуйте особливості вимірювальної схеми автоматичних мостів
6. Перерахуйте переваги і недоліки неурівноважених мостів у порівнянні з урівноваженими.
7. Опишіть методи зміни меж вимірювання моста.

Лабораторна робота № 5

ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИМ МІЛВОЛЬТМЕТРОМ

1 Загальні відомості

1.1 Термоелектричний термометр

Термометр складається з двох різнорідних провідників, які називаються **термоелектродами**. У найменуванні термометра позитивний електрод називають першим. Два кінця термоелектродів зварені або скручені між собою і утворюють **робочий кінець** термометра. Його поміщають в середу, температуру якої треба вимірювати. До вільних кінців термоелектродів приєднують вимірювальний прилад безпосередньо або за допомогою з'єднувальних проводів.

У разі рівності температур робочого і вільного кінців термометра термоЕРС дорівнює нулю. Якщо температуру вільних кінців термометра підтримувати постійною, показання приладу при інших рівних умовах будуть залежати від температури робочого спаю. При цьому необхідно, щоб температура вільних кінців збереглася рівною тій, при якій вони знаходилися під час градування (зазвичай $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

У реальних умовах практично неможливо підтримувати температуру холодних кінців не тільки рівною $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а й просто постійною. Тому похибка комплексу вимірювання від недотримання умови $t_{хк} = \text{const}$ усувають компенсуючими пристроями, до яких відносяться такі:

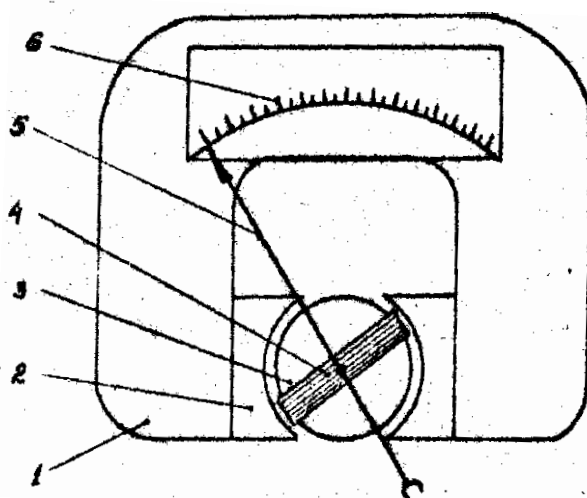
а) компенсаційні дроти (КД), що застосовуються замість звичайних сполучних. З огляду на те, що КД (в парі) представляють собою термометр з характеристикою в межах $0 \dots + 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, що збігається з робочою, потрібна додаткова компенсація на температуру холодних кінців компенсаційних проводів на клеммах приладу. Вона досягається за допомогою мідного опору,

включеного в якості шунта між клемми приладу або в якості плеча в мостовій схемі, що включається послідовно в вимірювальний ланцюг термометра;

б) неурівноважений міст з автономним живленням (коробка холодних спаїв КТ), одне з плечей якого виконано з мідного дроту і розташоване в районі клем приладу. Тому небаланс такого моста пропорційний температурі холодних кінців, і струм небалансу, збігаючись у напрямку зі струмом в вимірювальній ланцюга, компенсує похибку.

1.2 Мілівольтметр

При вимірюванні температури термоелектричним термометром (термопарою) в якості вторинного приладу може використовуватися магнітоелектричний мілівольтметр. Вимірювальний механізм мілівольтметра (рис. 5.1) складається з постійного магніту 1, скріпленого з полюсними наконічниками 2 із магнітом'якої сталі, нерухомого сердечника 3 (також із магнітом'якої сталі) і рухомої рамки 4. Обмотка рамки виконується з декількох десятків витків тонкого ізольованого мідного дроту. Для відліку показань мілівольтметра рамка забезпечена легкою алюмінієвою стрілкою 5, яка вказує значення вимірюваної величини на шкалі 6.



1 – постійний магніт; 2 – полюсні наконічники; 3 – нерухомий сердечник;
4 – рухома рамка; 5 – стрілка; 6 - шкала

Рисунок 5.1 - Вимірювальний механізм магнітоелектричного мілівольтметра

При проходженні струму по обмотці рамки на неї діє обертаючий момент, пропорційний силі струму:

$$M_{вр} = C_1 \cdot I$$

Протидіючий момент, пропорційний куту повороту рамки створюється спіральними пружинками, які служать також для підведення струму до рамки:

$$M_{\text{пр}} = C_2 \cdot \varphi,$$

де C_2 - коефіцієнт, що характеризує жорсткість пружини.

У момент рівноваги:

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}},$$

Звідки:

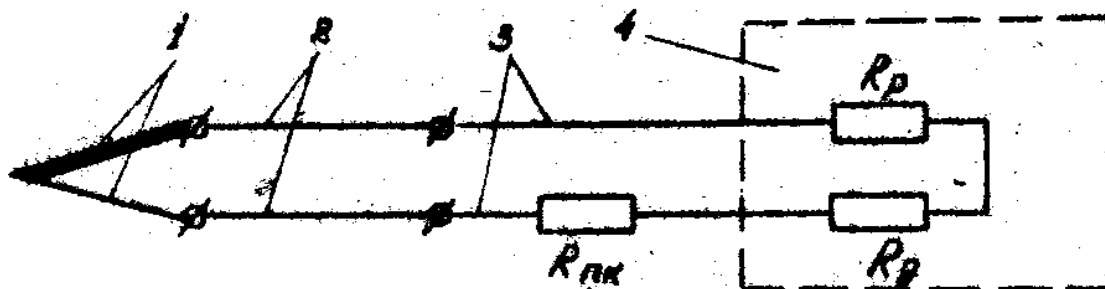
$$C_1 \cdot I = C_2 \cdot \varphi,$$

Отже:

$$\varphi = (C_2/C_1) \cdot I,$$

тобто кут повороту рамки і положення стрілки на шкалі пропорційні I .

Електрична схема вимірювання температури мільвольтметром (рис. 5.2) складається з термоелектричного термометра 1, подовжувальних термоелектродних дротів 2, сполучних дроти 3, підгінним котушки і мілівольтметра 4.



1 - термоелектричний термометр; 2 – подовжувальні термоелектродні дроти; 3 – сполучні дроти; 4 - мілівольтметр

Рисунок 5.2 - Електрична схема вимірювання температури мільвольтметром

Опір мідної обмотки рамки має значний температурний коефіцієнт (0,4% на 1°C), тому для зменшення похибки вимірювання мілівольтметром, при зміні температури зовнішнього середовища, послідовно з рамкою включають додатковий резистор, намотаний проводом з манганіна. Манганін - спеціальний сплав, температурний коефіцієнт опору якого близький до нуля.

При цьому загальний внутрішній опір мілівольтметра:

$$R_{\Gamma} = R_{\text{р}} + R_{\text{д}}$$

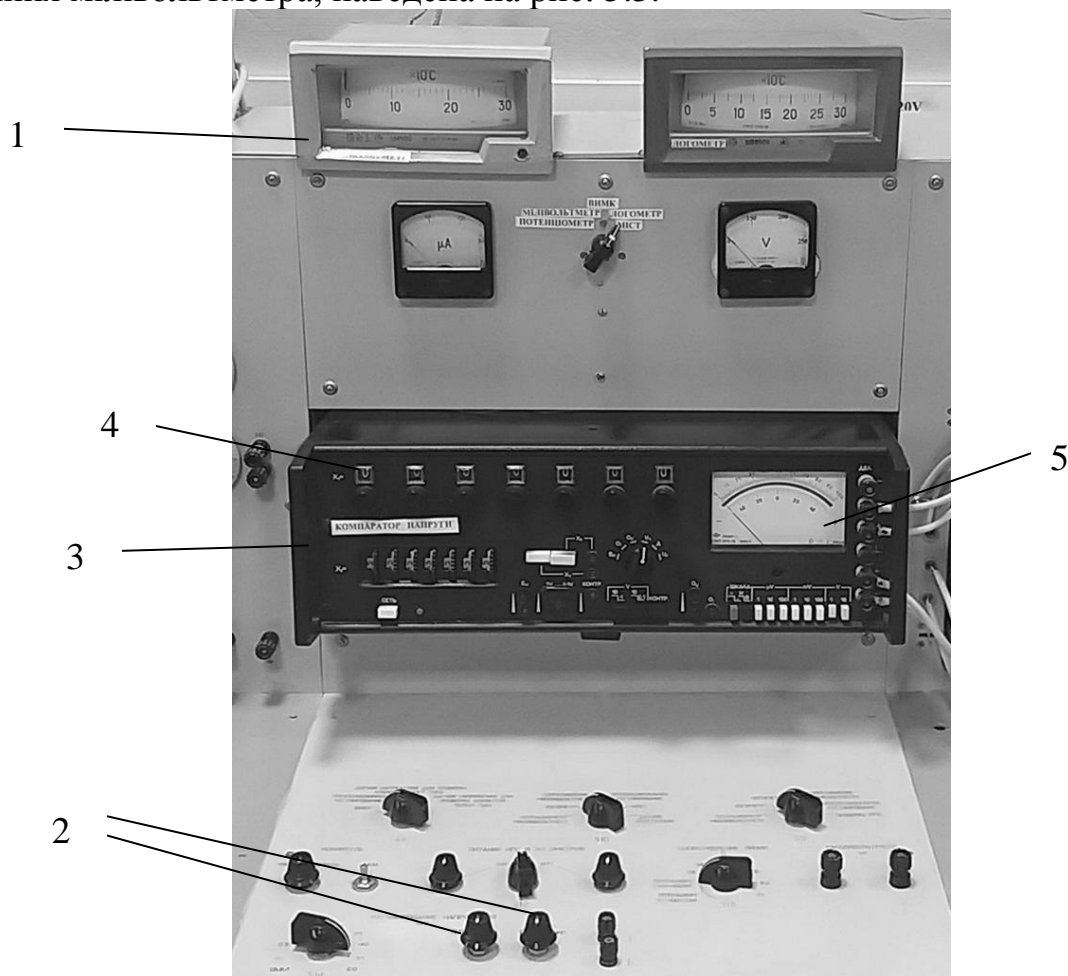
Зовнішній опір мілівольметра складається з опору термометра R_t , опору подовжуючих термоелектродних проводів і опору підгінних котушок. Останні служать для підгонки загального зовнішнього опору до значення, при якому мілівольметр був відградуваний:

$$R_{\text{вн}} = R_t + R_{\text{УПТ}} + R_{\text{ПК}} = \text{const}$$

Значення R_t і $R_{\text{вн}}$ вказуються на шкалі приладу.

2 Опис лабораторної установки

Повірення пірометричного мілівольметра відбувається на лабораторній установці УПТВ-2АМ, яка призначена для повірення вторинних приборів теплоенергетичного контролю. На лабораторній установці можливо проводити повірення логометра, автоматичного моста, пірометричного мілівольметра та автоматичного потенціометра. Частина лабораторної установки, призначена для повірення мілівольметра, наведена на рис. 5.3.



1 – пірометричний мілівольметр; 2 – джерело регульованої напруги; 3 – компаратор напруги; 4 - магазин X1; 5 - нуль-прибор

Рисунок 5.3 – Загальний вигляд лабораторної установки

3 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні ознайомитися із лабораторною установкою.

2. Включити установку, встановити на виході джерела регульованої напруги (ДРН) 2 напругу, відповідну нульовому положенню стрілки на шкалі мілівольтметра 1.

3. За допомогою магазину X1 4 на панелі компаратора напруги 3 встановити значення, при якому стрілка нуль-прибору 5 встановиться на нуль.

3. Записати в таблицю вимірювань і розрахунків значення напруги, магазину X1 4 і показання мілівольтметра 1.

4. Повторити пункти 2 і 3 за всіма оцифрованими значеннями шкали мілівольтметра.

5. Розрахувати абсолютну, відносну та приведену похибки.

6. Зробити висновки про придатність мілівольтметра до експлуатації.

Таблиця 5.1 -Результати вимірювань та розрахунків

Контроль на відмітка шкали, T, °C	Напруга магазину X1, U, мВ		Значення термоЕРС із градууювальної таблиці, Uгр, мВ	Абсолютна похибка Δ, Ом		Відносна похибка, δ, %		Приведе на похибка, δпр, %
	прямий хід	зворотній хід		прямий хід	зворотній хід	прямий хід	зворотній хід	

3 Контрольні питання

1. Опишіть будову та принцип дії термоелектричного термометра.

2. Перерахуйте вимоги, що пред'являються до матеріалів термоелектродів.

3. Назвіть види термоелектричних термометрів і діапазони вимірюваних температур.

4. Опишіть будову та принцип дії мілівольтметра.

5. Назвіть склад зовнішнього ланцюга мілівольтметра.

6. Назвіть призначення подовжуючих термоелектродних (компенсаційних) проводів.

7. Назвіть призначення та опишіть принцип дії пристроїв компенсації температури.

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОМАТИЧНОГО ПОТЕНЦІОМЕТРА

1 Загальні відомості

1.1 Компенсаційний метод вимірювання термоЕРС

Компенсаційний метод вимірювання заснований на зрівнянні невідомої ЕРС задалегідь відомою різницею потенціалів, що створюється допоміжним джерелом струму. Суть методу можна проілюструвати за допомогою найпростішої схеми, зображеної на рис. 6.1.

Вимірювана термоЕРС термопари E_x при зустрічному включенні джерела живлення ІП і термопари ТП порівнюється із падінням напруги на ділянці ab ланцюга від джерела живлення ІП. Ознакою компенсації є відсутність струму в ланцюзі нульового приладу НП.

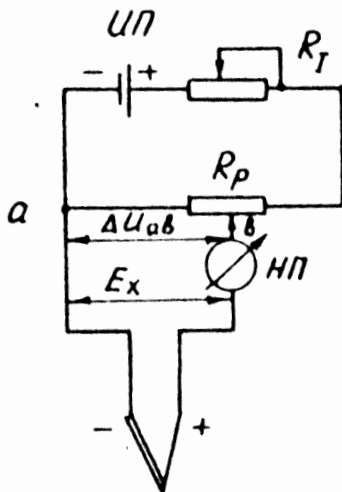


Рисунок 6.1 - Схема вимірювання ЕРС компенсаційним методом

Величину ΔU_{AB} можна змінювати двома методами:

1. Підтримуючи постійною силу струму I в компенсаційному ланцюзі і змінюючи значення опору R_p ;
2. Зберігаючи опір R_p постійним і змінюючи силу струму в компенсаційному ланцюзі.

Найбільшого поширення набув перший метод, званий **потенціометричним**.

Змінюючи опір R_p домагаються рівності:

$$E_x = IR_{pAB} = \Delta U_{AB}$$

Для спрощення і полегшення вимірювань в якості змінного резистора R_p використовують дротяний реохорд з лінійною залежністю опору від положення движка і відлік відбувається по положенню движка.

Для підтримки постійної сили струму I в компенсаційному ланцюгу застосовують стабілізовані по струму і напрузі джерела живлення. У разі використання гальванічних елементів доводиться періодично контролювати силу струму I за допомогою стандартної міри електрорушійної сили нормального елемента.

При компенсаційному методі вимірювання опір зовнішньої ланцюга, перехідних контактів і самого нуль-приладу не впливає на результат вимірювання, так як відлік проводиться при повній компенсації, тобто при відсутності струму в вимірювальному ланцюгу.

Потенціометричний метод вимірювання покладено в основу цілого ряду приладів, які називаються **потенціометрами**.

1.2 Потенціометри переносні і лабораторні

Потенціометри переносні і лабораторні з причини високої точності отримали широке застосування в практиці технологічних вимірювань. Спрощена принципова схема потенціометра показана на рис. 6.2. У компенсаційний ланцюг цієї схеми включені:

R_i - регульований резистор;

ПП - джерело живлення;

R_p - реохорд;

R_k - контрольний резистор, призначений для установки робочого струму.

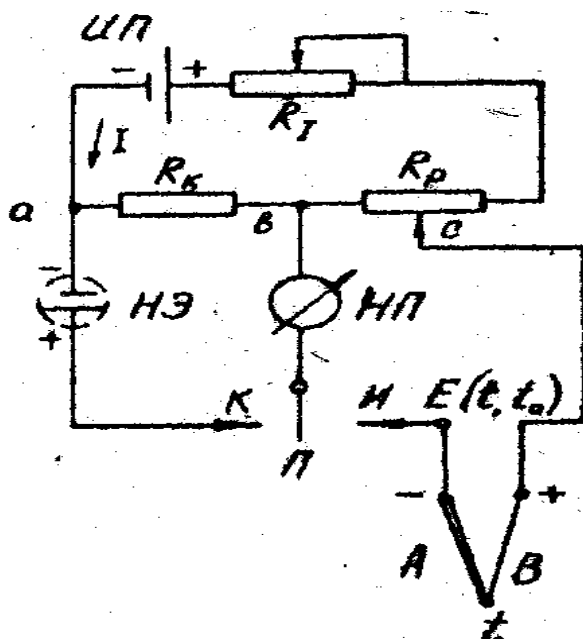


Рисунок 6.2 - Схема переносного потенціометра

За допомогою перемикача П нуль-прилад $НП$ можна включати в ланцюг нормального елемента HE або в ланцюг термоелектричного термометра AB .

Нормальні елементи, що застосовуються в якості міри електрорушійної сили, характеризуються великою постійністю E_{PC} , що розвивається ними.

Нормальні елементи є оборотними гальванічними елементами і виконуються двох типів: насичені (класів точності 0,001; 0,002 і 0,005) і ненасичені (клас точності 0,02). Для першого типу в якості електроліту застосовують насичений розчин сульфату, а для другого - такий же ненасичений розчин.

Для встановлення певного значення робочого струму I перемикач II встановлюють в положення K . При цьому HE разом з послідовно включеним нуль-приладом виявляється приєднаним до затискачів a й b контрольного резистора R_k . Струм в компенсаційному ланцюзі регулюють резистором R_i до тих пір, поки падіння напруги на R_k не дорівнюватиме ЕРС нормального елемента. При цьому показчик нуль-приладу встановлюється на нульовій позначці шкали і має місце рівність:

$$E_{нэ} = IR_k,$$

звідки:

$$I = \frac{E_{нэ}}{R_k}$$

Після установки робочого струму I перемикач II повертають в середнє положення, а движок c встановлюють в положення, яке приблизно відповідає значенню вимірюваної ЕРС. Потім перемикач II встановлюють в положення I та, спостерігаючи за відхиленням показчика нульового приладу, переміщують движок R_p до тих пір, поки показчик нульового приладу не повернеться на нульову позначку шкали, тобто поки компенсуюча напруга на ділянці реохорда між точками b і c не стане рівною вимірюваній термоЕРС термометра:

$$E(t, t_0) = I m R_p = \frac{E_{нэ}}{R_k} m R_p,$$

де $m = \frac{R_p'}{R_p}$, R_p' - частина опору реохорда лівіше движка C .

Цей вираз справедливо лише за умови сталості опору компенсаційного ланцюга і значення робочого струму I в продовженні всього часу вимірювання. Тому при вимірюванні необхідно періодично контролювати значення робочого струму. При правильно підібраній потужності джерела живлення III стандартизація струму проводиться через кілька годин роботи потенціометра. Для вимірювання термоЕРС в лабораторних умовах в залежності від необхідної точності вимірювань застосовуються потенціометри класів точності 0,005; 0,015; 0,02 або 0,05.

Реальні схеми потенціометрів в порівнянні зі схемою, зображеною на рис. 6.2, кілька ускладнюються. Для підвищення точності відліку термоЕРС і розширення меж вимірювання опір виконують у вигляді послідовно включених ступеневої реостата і опору, який плавно змінюється, а ланцюг термометри підключають до компенсаційного ланцюга, виконаного за мостовою схемою.

1.3 Автоматичні потенціометри

В автоматичних потенціометрах, на відміну від розглянутих переносних і лабораторних, регулювання компенсуючої напруги, а отже, і урівноваження вимірюваної термоЕРС термометра, здійснюється автоматичним переміщенням движка по каліброваному реохорду за допомогою безперервно діючого стежачого пристрою.

Вимірювальні схеми автоматичних потенціометрів в принципі не відрізняються від схем неавтоматических потенціометрів, хоча в них і включаються деякі додаткові елементи. У зв'язку з появою простих стабілізованих джерел живлення схеми автоматичних потенціометрів дещо спростилися, відпала необхідність в ланцюгах для стандартизації робочого струму. В автоматичних потенціометрах використовується компенсаційна мостовавимірювальна схема, показана на рис. 6.3.

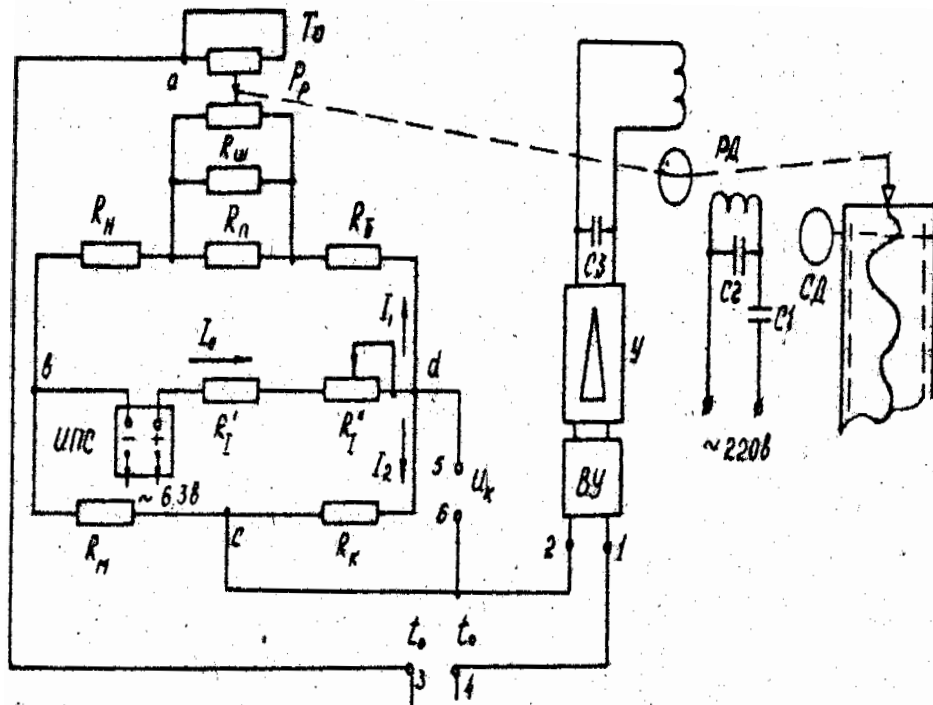


Рисунок 6.3 - Принципова схема автоматичного потенціометра

На цій схемі прийняті наступні позначення:

R_p - реохорд;

$R_{ш}$ - шунт реохорда, служить для підгонки опору реохорда до заданого нормованого значення $R_{нр}$;

T_0 - струмовідвод;

R_n - резистор для встановлення діапазону вимірювання;

R_H - резистор для встановлення початкового значення шкали;

R_b - резистор баластовий для установки при різних градуювання певного значення опору верхньої гілки вимірювальної схеми bad , а отже, і робочого струму I_1 , зазвичай рівного 3 мА;

R_m - допоміжний резистор з мідного дроту для автоматичного введення поправки на зміну термоЕРС термометра при змінах температури його вільних кінців;

R_k - контрольний резистор робочого струму у вимірювальній схемі при градуюванні приладу або при його повірці;

ІСП - джерело живлення стабілізоване;

R_1', R_1'' - резистори в ланцюзі ІПС відповідно для обмеження та регулювання робочого струму при градуюванні і повірці приладу;

АВ - термоелектричний термометр;

А1В1- термоелектродні (компенсаційні) дроти;

5-6 - затискачі, до яких під час градуювання приладу або при його перевірці приєднують нульовий прилад (наприклад, гальванометр) і насичений нормальний елемент;

ВУ - вхідний пристрій підсилювача, перетворює сигнал небалансу постійного струму в сигнал змінного струму;

КР - каретка з вказівним пером,

У - підсилювач;

РД - реверсивний синхронний двигун конденсаторного типу з вбудованим в його корпус редуктором;

C_1 і C_2 конденсатори для створення необхідного фазового зсуву (90 град) між магнітними потоками відповідно обмотки збудження і керуючої обмотки;

C_3 - конденсатор, шунтуючий керуючу обмотку реверсивного двигуна для компенсації індуктивної складової струму;

СД - синхронний двигун для просування діаграмної стрічки.

Всі резистори вимірювальної схеми автоматичних потенціометрів, крім R_m виготовляють з стабілізованою манганінового дроту. У сучасних приладах для підвищення стійкості проти стирання реохорд R_p і струмовідвод $ТO$ виготовляють з дроту сплаву паладій-вольфрам.

Напруга, яка компенсує вимірювану ЕРС термоелектричного термометра АВ, в цій схемі виходить як різниця потенціалів в двох точках. Потенціал однієї з точок a визначається положенням движка реохорда, а потенціал іншої вузлової точки c - плечима вимірювального моста. Таким чином, вимірювана термоЕРС порівнюється з напругою розбаланса моста, який виступає в якості регульованої напруги. При нерівності напруг некомпенсована частина напруги подається на вхідний пристрій підсилювача ВУ, перетворюється в сигнал змінного струму, посилюється електронним підсилювачем ЕУ і надходить в одну з обмоток двофазного реверсивного двигуна РД.

Залежно від значення і знака некомпенсованої напруги двигун РД переміщує у відповідному напрямку движок реохорда так, що зменшується некомпенсована напруга до нуля або, точніше, до значення, обумовленого чутливістю підсилювача. Одночасно переміщається стрілка покажчика і перо самописця.

Застосування мостового компенсаційного ланцюга дозволяє здійснити автоматичне введення поправки на зміну термоЕРС термометра, що викликається відхиленням температури вільних кінців від 0°C . У потенціометрів, що працюють в комплекті з термометрами градувань ПП, ХА, ХК та ін., резистор R_m знаходиться у безпосередній близькості до вільних кінців термоелектродних проводів $A1B1$, що з'єднують термопару АВ з приладом. При зміні температури вільних кінців термометра змінюється значення термоЕРС термометра. Якби при цьому всі опори вимірювальної схеми залишалися незмінними, то стежача система змістила б движок реохорда вліво або вправо в залежності від знака зміни термоЕРС, і потенціометр при постійній температурі робочого кінця термометра показав би неправильну температуру. Насправді зі зміною температури вільних кінців змінюється опір мідного резистора, що знаходиться в однакових температурних умовах з вільними кінцями термометра, змінюються струми I_1 та I_2 , разом з тим змінюється компенсуюча напруга U_k . Опір резистора R_m підбирається таким, щоб компенсуюча напруга між точками a і b змінювалася на те ж значення, що і термоЕРС термометра. В цьому випадку показання приладу залишаються без зміни в межах прийнятої похибки.

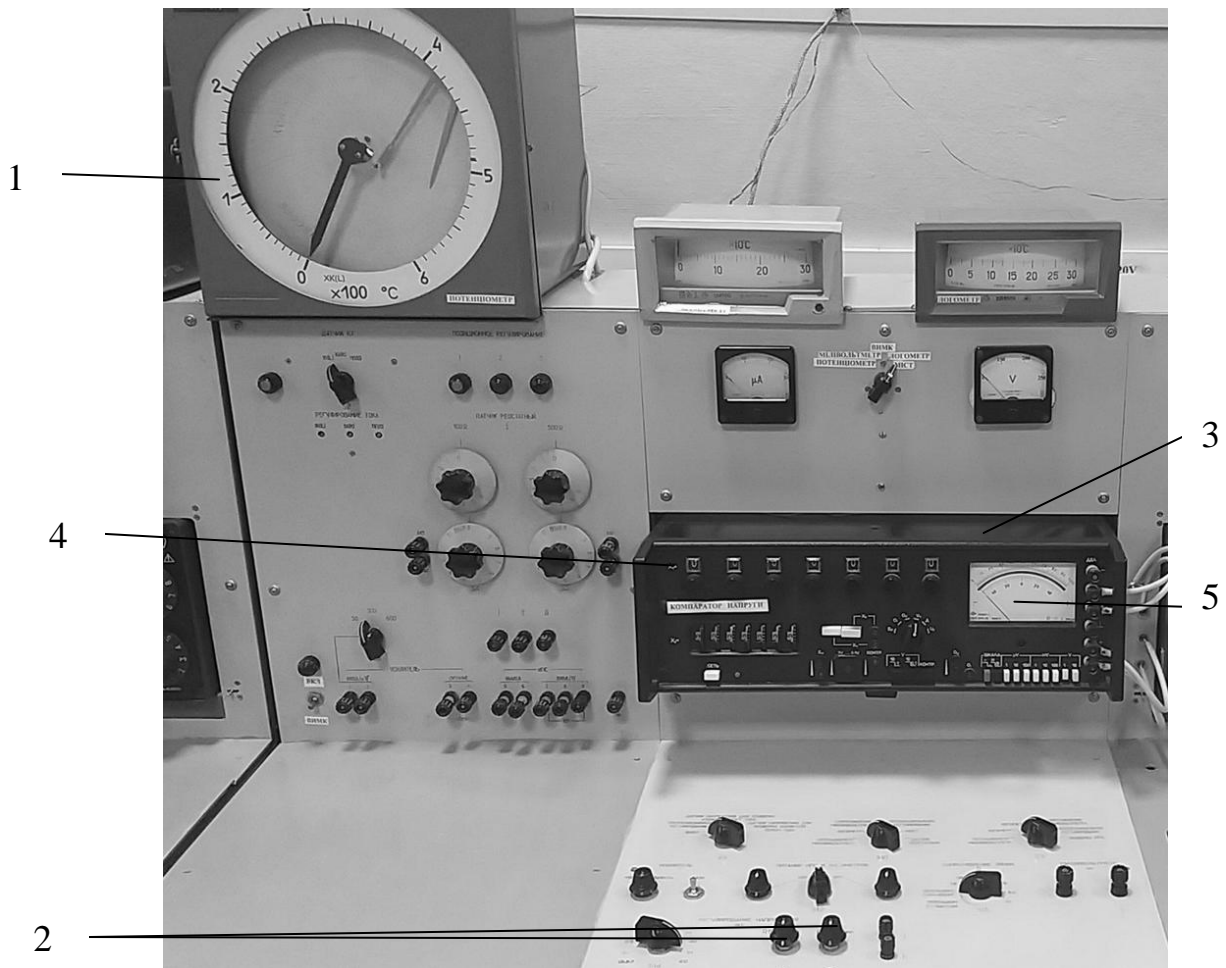
В автоматичних потенціометрах застосовуються підсилювачі змінного струму, які забезпечуються вхідним пристроєм для перетворення напруги небалансу постійного струму, що надходить з вимірювальної схеми приладу на його вхід, в напругу змінного струму частотою 50 Гц.

Для живлення вимірювальної схеми автоматичних потенціометрів застосовують джерело стабілізованого живлення постійного струму ІПС.

Серійно випускаються такі типи автоматичних потенціометрів: КСП 2, КСП 4, КП 150, КД 140 та інші.

2 Опис лабораторної установки

Повіряння автоматичного потенціометра відбувається на лабораторній установці УПТВ-2АМ, яка призначена для повіряння вторинних приборів теплоенергетичного контролю. На лабораторній установці можливо проводити повіряння логометра, автоматичного моста, пірометричного мілівольтметра та автоматичного потенціометра. Частина лабораторної установки, призначена для повіряння потенціометра, наведена на рис. 6.4.



1 – автоматичний потенціометр; 2 – джерело регульованої напруги; 3 – компаратор напруги; 4 - магазин X1; 5 - нуль-прибор

Рисунок 6.4 – Загальний вигляд лабораторної установки

3 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні вивчити лабораторну установку та взаємодію її основних блоків.

2. Включити установку, встановити на виході джерела регульованої напруги 2 (ДРН) напругу, відповідну нульовому положенню стрілки на шкалі потенціометра 1.

3. За допомогою магазину X1 4 на панелі компаратора напруги 3 встановити значення, при якому стрілка нуль-прибору 5 встановиться на нуль.

3. Записати в таблицю вимірювань і розрахунків значення напруги, магазину X1 4 і показання потенціометра 1.

4. Повторити пункти 2 і 3 за всіма оцифрованими значеннями шкали потенціометра.

5. Розрахувати абсолютну, відносну та приведену похибки.

6. Зробити висновки про придатність потенціометра до експлуатації.

Таблиця 6.1 -Результати вимірювань та розрахунків

Контроль на відмітка шкали, T, °C	Напруга магазина X1, U, мВ		Значення термоЕРС із градуовальної таблиці, Uгр, мВ	Абсолютна похибка Δ, Ом		Відносна похибка, δ, %		Приведе на похибка, δпр, %

4 Контрольні питання

1. Опишіть сутність компенсаційного методу вимірювання ЕРС.
2. Назвіть призначення моста в вимірювальної схемою потенціометра.
3. Назвіть призначення мідного резистора R_m у мостовій вимірювальній схемі потенціометра.
5. Назвіть призначення нормального елемента в схемі переносного потенціометра.
6. Опишіть вплив на результати вимірювання за допомогою потенціометрів опору сполучних проводів, опору термоелектричних термометрів, перехідних контактів в ланцюзі

Лабораторна робота № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ОПТИЧНОГО ПІРОМЕТРА

1 Загальні відомості

1.1 Вимірювання температури тіл за їх тепловим випромінюванням

Методи вимірювання температури тіл за їх тепловим випромінюванням часто називають методами пірометрії випромінювання; засоби випромінювань температури тіл по їх тепловим випромінюванням - **пірометрами випромінювання** або просто пірометрами. Вони широко застосовуються в металургійній та інших галузях промисловості, а також при проведенні наукових досліджень для вимірювання температури тіл від 300 до 600 °C. Спеціальні прилади, що використовують зазначені методи, можуть застосовуватися для вимірювання температур, що виходять за ці межі.

При вимірюванні температури пірометрами температурне поле об'єкта не спотворюється, так як вимір не вимагає безпосереднього контакту якого-небудь

теплоприймача з нагрітим тілом. Тому такі методи вимірювання температур тіл прийнято називати **безконтактними**.

Безконтактні методи теоретично не мають верхньої температурної межі свого застосування.

У тих випадках, коли для тривалого вимірювання температур об'єктів можуть застосовуватися поряд з пірометрами випромінювання прилади, що використовують контактні методи, останнім слід віддати перевагу, так як вони зазвичай забезпечують більш високу точність вимірювання температури в порівнянні з пірометрами випромінювання.

Методи вимірювання температур, які використовують різні властивості теплового випромінювання тіл, що випливають із законів випромінювання абсолютно чорного тіла, знайшли широке практичне застосування. Під **абсолютно чорним тілом** розуміють тіло, яке поглинає всю падаючу на нього променисту енергію. Такі тіла в природі відсутні, але модель чорного тіла можна здійснити з достатнім ступенем наближення.

У пірометрії випромінювання в якості величин, що характеризують теплове випромінювання тіл, застосовують енергетичну світність (інтенсивність випромінювання) і енергетичну яскравість (яскравість випромінювання). При цьому слід розрізняти повну і спектральну світність і яскравість.

Під **повною енергетичною світністю** тіла розуміють повну (інтегральну) поверхневу щільність випромінюваної потужності:

$$R(T) = \int_0^{\infty} R(\lambda, T) d\lambda,$$

де $R(T)$ – повна енергетична світність при температурі T , Вт/м²;

$R(\lambda, T)$ – спектральна енергетична світність, віднесена до дуже вузької області спектра $d\lambda$ (от λ до $\lambda+d\lambda$), Вт/м²;

λ - довжина хвилі випромінювання, м.

Енергетичною яскравістю тіла в даному напрямку називається потужність випромінювання в одиничний тілесний кут з одиниці площі проекції поверхні тіла на площину, перпендикулярну до цього напрямку. **Повна енергетична яскравість** тіла:

$$B(T) = \int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda,$$

де $B(T)$ – повна енергетична яскравість при температурі T , Вт/(ср·м²);

$B(\lambda, T)$ – спектральна енергетична яскравість, віднесена до дуже вузької області спектра $d\lambda$, Вт/(ср м²).

Джерела випромінювання, яскравість яких від напрямку не залежить, підкоряється закону Ламберта. Їх енергетична світність і яскравість пов'язані між собою співвідношеннями:

$$R_0(T) = \lambda \cdot B_0(T);$$

$$R_0(\lambda, T) = \lambda \cdot B_0(\lambda, T)$$

Таким випромінювачем є тільки абсолютно чорне тіло.

Енергетична яскравість - основна величина, безпосередньо сприймається людським оком, а також всіма пірометрами, заснованими на вимірюванні температури по яскравісному випромінюванню.

Всі реальні тіла за ступенем поглинання ними променевої енергії відрізняються від чорного тіла і мають коефіцієнт поглинання менше одиниці. Випромінювальна здатність реальних тіл також відрізняється від хвилевипускної здатності чорного тіла і може характеризуватися повним або спектральним коефіцієнтом випромінювання.

Повний коефіцієнт випромінювання $\varepsilon_{\lambda, T}$ служить мірою, що визначає ту частину повної енергії, яку становить випромінювання даного тіла від повного випромінювання чорного тіла при тій же температурі, тобто:

$$\varepsilon_T = \frac{B(T)}{B_0(T)}, \quad (7.1)$$

де $B(T)$ та $B_0(T)$ – повна енергетична яскравість відповідно реального і чорного тіла при температурі T , Вт/(ср. м²).

Позначаючи через $\varepsilon_{\lambda, T}$ спектральний коефіцієнт випромінювання, що характеризує відносну випромінювальну здатність тіла при даних λ і T , аналогічно виразу (7.1) можна записати:

$$\varepsilon_{\lambda, T} = \frac{B(\lambda, T)}{B_0(\lambda, T)},$$

де $B(\lambda, T)$ и $B_0(\lambda, T)$ – спектральна енергетична яскравість відповідно реального і чорного тіла, Вт/(ср.м²).

На основі закону Кірхгофа спектральний коефіцієнт випромінювання будь-якого тіла дорівнює спектральному коефіцієнту поглинання:

$$\varepsilon_{\lambda, T} = \alpha_{\lambda, T}$$

Для всіх реальних тіл:

$$\begin{aligned} B(T) < B_0(T); \\ B(\lambda, T) < B_0(\lambda, T), \end{aligned}$$

тобто:

$$0 < \varepsilon_T < 1;$$

$$0 < \varepsilon_{\lambda, T} < 1$$

Коефіцієнти випромінювання ε_T і $\varepsilon_{\lambda, T}$ залежать від речовини тіла, стану його поверхні, температури тощо.

Застосовуючи пірометри, градуйовані по випромінюванню абсолютно чорного тіла, для вимірювання температури реальних тел в більшості випадків отримуємо значення температур, що відрізняються від дійсних температур цих тіл, оскільки їх випромінювання не відповідає випромінюванню чорного тіла. Температури реальних тіл, виміряні по тепловому випромінюванню, називаються **умовними**. Це - принциповий недолік методів вимірювання температури по тепловому випромінюванню.

Властивості теплового випромінювання абсолютно чорного тіла, що впливають із законів випромінювання, покладені в основу безконтактних методів випромінювання температури реальних тел.

Залежність спектральної енергетичної світності (інтенсивності випромінювання) абсолютно чорного тіла від довжини хвилі і температури описується **рівнянням Планка**, Вт / м³:

$$R_0(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1)^{-1},$$

де C_1 і C_2 – постійні коефіцієнти; $C_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²; $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ м·К;
 T – температура, К.

Звідси спектральні енергетична яскравість абсолютно чорного тіла, Вт/м³:

$$B_0(\lambda, T) = C_1' \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1),$$

де $C_1' = \frac{C_1}{\lambda} = 1,191 \cdot 10^{-16}$ (Вт·м²)/ср.

В обмеженому інтервалі температур і при малих значеннях довжин хвиль може бути використано **рівняння Віна**:

$$B_0(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} \quad (7.2)$$

Це рівняння зручніше для практичного застосування в пірометрії, але з достатньою точністю справедливо до температури 3000 К.

На рис. 7.1 показано сімейство кривих енергетичної яскравості (інтенсивності випромінювання) $R_0(\lambda, T)$ абсолютно чорного тіла залежно від довжини хвилі, побудованих за формулою Планка, при різних температурах. Ці криві показують, що спектральна (енергетична) яскравість зі збільшенням температури швидко зростає. У видимій області спектра, наприклад при $\lambda = 0,65$ мкм, спектральна яскравість чорного тіла зростає приблизно в 20 разів швидше, ніж температура. Дана обставина дозволяє вимірювати температуру по зміні яскравості тіла в даній довжині хвилі. Умовну температуру реального

тіла, виміряну цим методом, називають **яркiсною** температурою. Для вимірювання яркiсної температури у видимій частині спектру використовують оптичні та фотоелектричні пірометри.

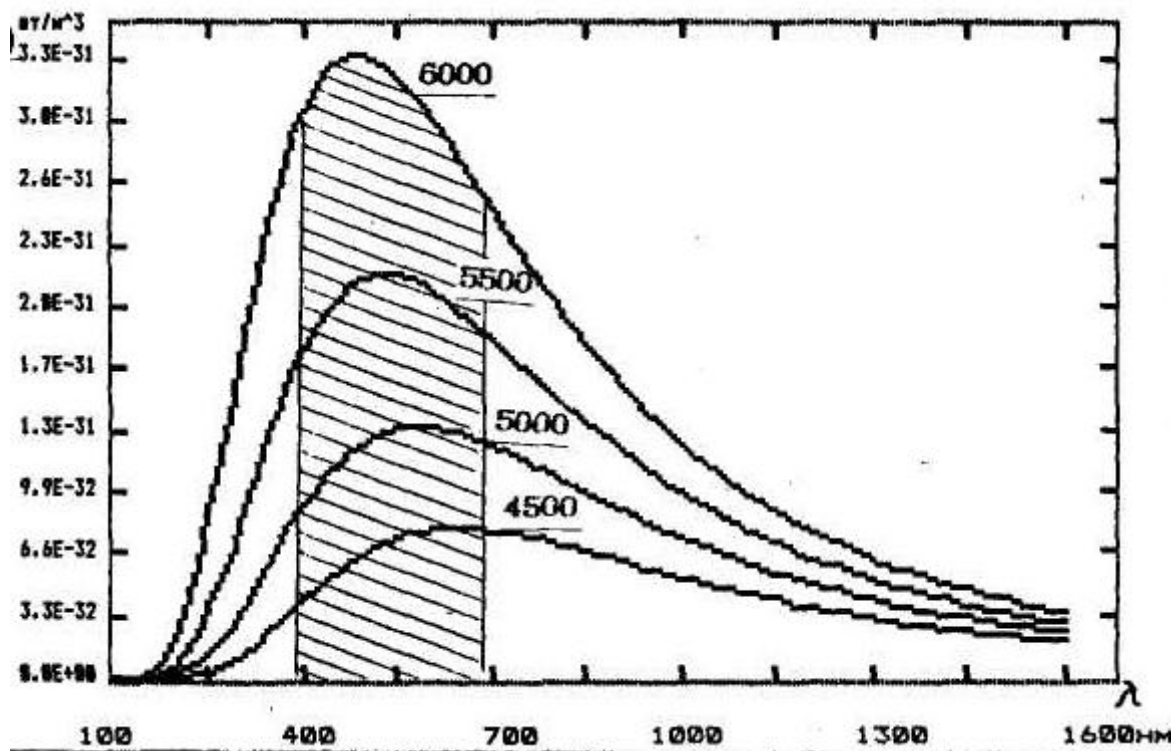


Рисунок 7.1 – Залежність енергетичної яскравості $R_0(\lambda, T)$ абсолютно чорного тіла від довжини хвилі

У видимій частині спектру зміщення максимуму кривої розподілу енергії випромінювання і, отже, перерозподілу енергії, що викликається зміною температури тіла, призводить до зміни його кольору. Це і послужило підставою для того, щоб методи вимірювання температур тіл, що базуються на зміні температури розподілу енергії всередині даної ділянки спектра випромінювання, називати **колірними методами**. Умовна температура тіла, виміряна даними методами, - **колірна температура**; прилади, засновані на колірних методах вимірювання температури, - **колірні прилади**.

Як видно з рис. 7.1, повна потужність випромінювання абсолютно чорного тіла у всьому спектрі від $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$, при температурі T може бути визначена по формулі Планка:

$$R_0(T) = \int_0^{\infty} R_0(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\infty} C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda,$$

інтегруючи яку, доходимо виразу, Вт/м²:

$$R_0(T) = \sigma_0 \cdot T^4,$$

де σ_0 – постійна, дорівнює $5,6696 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Цей вираз називається законом Стефана-Больцмана.

Закон Стефана-Больцмана має вигляд:

- для інтегральної енергетичної яскравості:

-

$$B_0(T) = \sigma_0'' \cdot T^4,$$

де $\sigma_0'' = \frac{\sigma_0}{\lambda} = 1,8047 \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{К}^4$;

- для реальних тіл:

-

$$R(T) = \varepsilon_T \cdot \sigma_0 \cdot T^4,$$

де ε_T – ступінь чорноти реального тіла при температурі T .

Закон Стефана-Больцмана покладено в основу методу вимірювання температур за їх повним тепловим випромінюванням. Умовну температуру реального тіла, виміряну цим методом, прийнято називати **радіаційною температурою**, або температурою повного випромінювання. Пірометри, призначені для вимірювання радіаційної температури, називаються **пірометрами повного випромінювання**, або радіаційними.

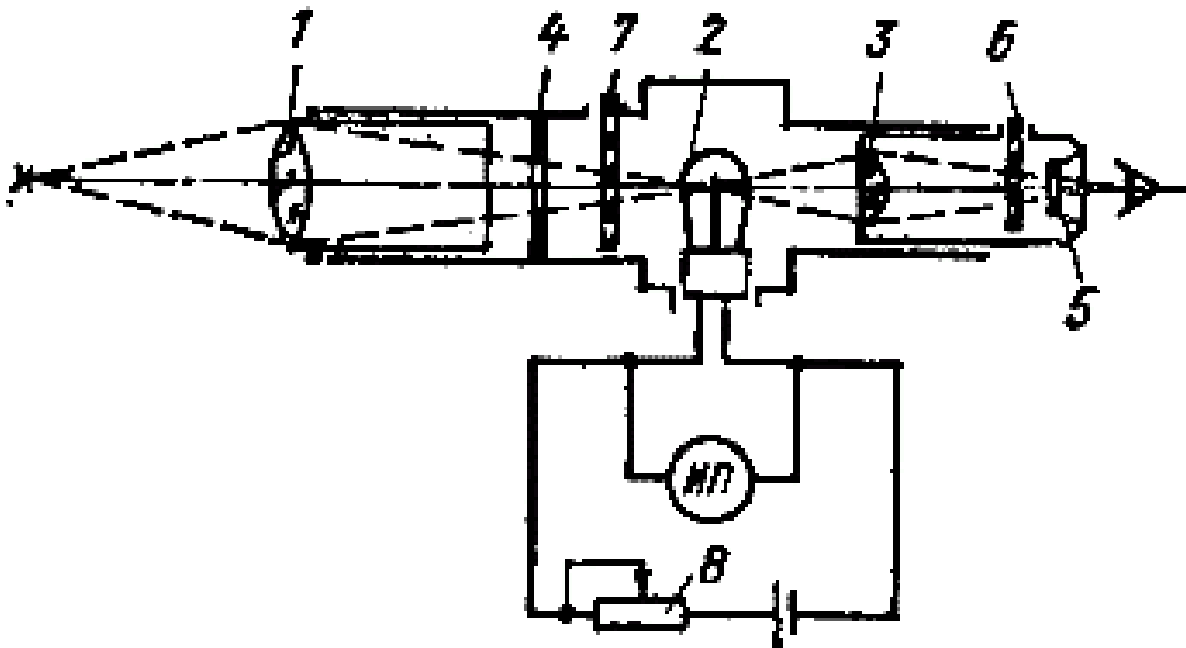
1.2 Принцип дії і конструкція оптичних пірометрів

Оптичні пірометри, або так звані пірометри візуальні з «зникаючою» ниткою змінної напруги, широко застосовуються для вимірювання яркісної температури у видимій області спектра. Інтервал вимірюваних температур для загальнопромислових пірометрів з «зникаючою» ниткою становить 700 ... 5000 °С.

Вимірювання яркісних температур пірометрами з «зникаючою» ниткою засноване на порівнянні в світлі ефективної довжини хвилі у видимій області спектра яскравості досліджуваного тіла з яскравістю нитки пірометричної лампи. При цьому в якості чутливого елемента (хвилеприймача) для фіксування (наявності або відсутності) рівності яркостей зображень двох тел служить око спостерігача. Внаслідок цього вимір температури пірометром з «зникаючою» ниткою відрізняється відомою суб'єктивним, що слід мати на увазі при їх застосуванні.

Пірометр (рис. 7.2) складається з первинного перетворювача (телескопа), вимірювального приладу і джерела живлення. Зображення об'єкта, температуру якого необхідно виміряти, за допомогою об'єктива 1 створюється в фокальній площині телескопа. У цій же площині розташована шляхом утворення пірометричної лампи 2. Окуляр 3 телескопа, призначений для спостереження нитки лампи на тлі зображення джерела (об'єкта), може переміщатися уздовж оптичної осі, що дає можливість встановлювати необхідну видимість нитки лампи на тлі зображення об'єкта.

Для сталості та обмеження кутів входу і виходу в оптичній системі телескопа встановлені дві діафрагми 4,5. Оптична система забезпечує незалежність показань пірметра від вимірювання відстані від джерела випромінювання до об'єкту.



1 - об'єктив; 2 - пірметрична лампа; 3 - окуляр телескопа; 4,5 – діафрагми; 6 - червоний світлофільтр; 7 – поглинаюче скло; 8 - реостат

Рисунок 7.2 - Схема пристрою оптичного пірметра з «зникаючою» ниткою розжарення

Між окуляром і вихідній діафрагмою знаходиться скляний червоний світлофільтр 6 для монохроматизації пучка променів, що потрапляють в око спостерігача. Цей світлофільтр можна вивести з поля зору для полегшення наведення і фокусування телескопа при невеликій яскравості джерела випромінювання, але в момент зрівнювання яркостей і зміни він повинен бути обов'язково введений в поле зору. Напруження нитки пірметричної лампи, а отже, і її яскравість залежать від сили струму, що протікає по нитці, яка регулюється реостатом 8.

У загальнопромислових оптичних пірметрах в якості вимірювального приладу використовується або мілівольтметр, що включається паралельно до нитки розжарювання, або міліамперметр, що включається послідовно з ниткою розжарювання.

При фокусуванні телескопа об'єктив переміщується вздовж оптичної осі, домагаючись видимості об'єкта і збіги площини його зображення з площиною нитки лампи. Коли телескоп фокусуватися на об'єкт, температура якого вимірюється, в поле зору на тлі об'єкта видна верхня частина дуги нитки лампи. Якщо при цьому яскравість буде менше яскравості фону зображення джерела, нитка виглядає чорною; якщо фон має меншу в порівнянні з ниткою яскравість, нитка буде виглядати як світла дуга на більш темному тлі. Змінюючи опір

реостата, можна встановити таку силу струму, при якій в межах контрастної чутливості людського ока рівність яркостей нитки і фону створює ефект зникнення нитки, яка перестає бути видимою. Відповідна цій рівності яркостей напруга на затискачах лампи, або сила струму, що протікає через нитку лампи, відраховується по вимірювальному приладу. Для зручності застосування робочих показуючих пірометрів вимірювальні прилади забезпечуються звичайною шкалою, що дозволяє відраховувати безпосередньо яркісну температуру, виражену в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$).

В оптичних пірометрах для монохроматизації світла застосовують світлофільтр з червоного скла з ефективною довжиною хвилі близько $0,65 \text{ мкм}$.

Надійність роботи оптичних пірометрів визначається головним чином стабільністю характеристик пірометричної лампи і постійністю показань вимірювального приладу. Досвід показав, що у пірометричній лампи з вольфрамовою ниткою дуже довгий час зберігається сталість характеристик, тобто залежність яскравості нитки від сили струму, що протікає через неї, якщо нитка лампи не піддається нагріву вище $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Тому для вимірювання яскравості температури вище $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ телескоп оптичного пірометра постачають поглинаючим склом 7, поміщеним між об'єктивом і пірометричною лампою (димчастий або сірий світлофільтр). У приладах з верхньою межею вимірювань $2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ встановлюють поглинаюче скло такої оптичної щільності, щоб при яркісній температурі об'єкта $2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ яркісна температура зображення не перевищувала $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$. З урахуванням останнього пірометр має дві шкали: з діапазоном $700 \dots 1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, по якій відлік проводиться при виведеному димчастому світлофільтрі, і з діапазоном $1200 \dots 2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, яка використовується при введеному димчастому світлофільтрі.

Загальний вигляд пірометра, конструкція та ілюстрація принципу дії наведені на рис. 7.3.

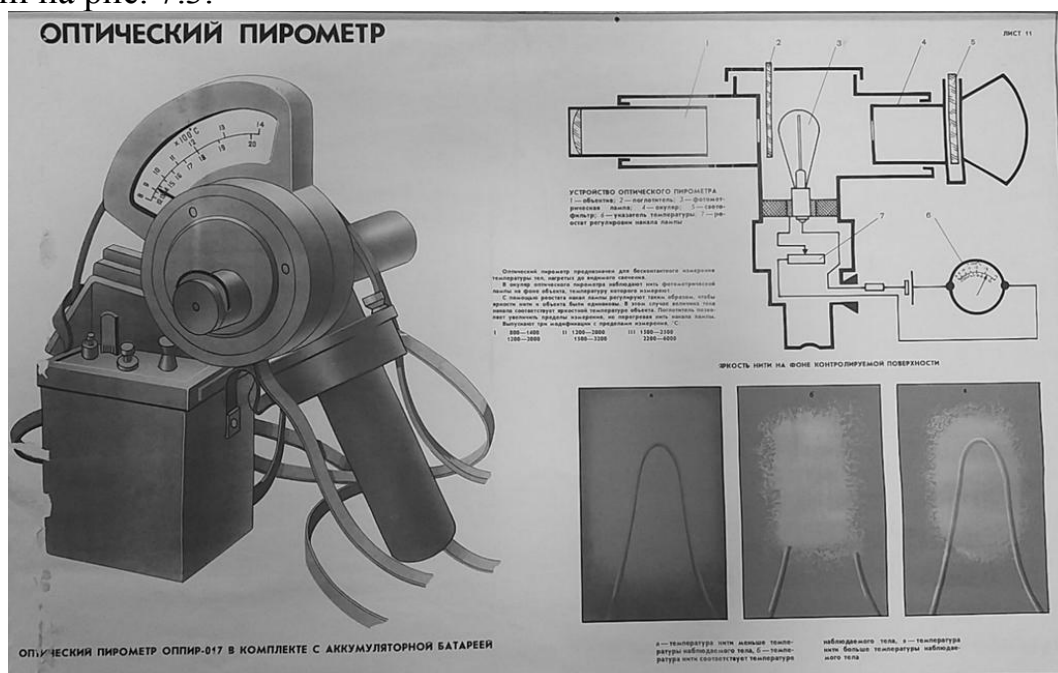


Рисунок 7.3 – Загальний вигляд та принцип дії оптичного пірометра

Яркісною температурою реального тіла θ в світлі довжини λ_e хвилі називається така температура чорного тіла, при якій спектральні енергетичні яскравості реального тіла, що має температуру T , і абсолютно чорного тіла в променях тієї ж довжини хвилі рівні між собою. Згідно з цим визначенням маємо:

$$B(\lambda_e, T) = \varepsilon_\lambda \cdot B_0(\lambda_e, T) = B_0(\lambda_e, \theta),$$

де ε_λ - коефіцієнт випромінювання тіла при довжині хвилі λ_e .

Підставивши у це рівняння значення спектральних яскравостей за формулою (17.2), отримаємо:

$$\varepsilon_\lambda \cdot C_1'' \cdot \lambda_e^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda_e \cdot T}} = C_1'' \cdot \lambda_e^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda_e \cdot \theta}}$$

Після скорочення подібних членів та логарифмування вираз приймає остаточний вигляд:

$$\frac{1}{\theta} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda_e}{C_2} \cdot \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \quad (7.3)$$

Рівняння (7.3) за умови $T \leq 3000\text{K}$ дозволяє обчислити дійсну температуру фізичного тіла T , знаючи його спектральний коефіцієнт випромінювання ε_λ і температуру яскравості θ , виміряну пірометром. Яркісна температура θ тим більше відрізняється від дійсної T , чим менше ступінь чорноти (спектральний коефіцієнт випромінювання). Так як $0 < \varepsilon_\lambda < 1$, права частина рівняння (7.3) завжди позитивна і яркісна температура фізичних тіл завжди менше їх дійсної температури. Необхідність перерахунку показань пірометра з метою отримання значень дійсної температури - один з недоліків.

2 Опис лабораторної установки

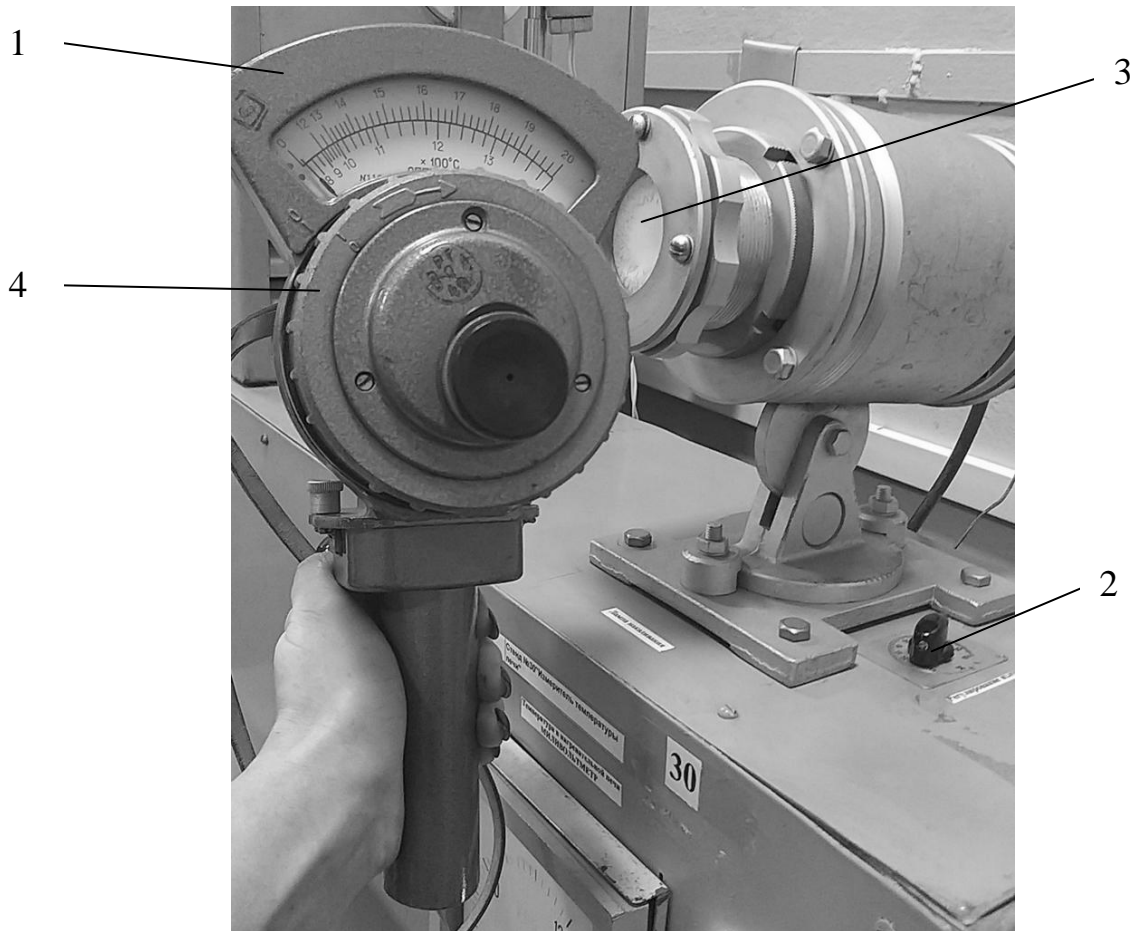
Лабораторна установка складається із контрольованого тіла автотрансформатора та оптичного пірометра (рис. 7.4). Контрольованим тілом є лампа розжарювання, закрита матовим екраном; струм через лампу встановлюється вручну за допомогою автотрансформатора. Напруга контролюється вольтметром.

В якості вимірювального приладу використовується оптичний пірометр типу ОППР-09.

3. Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні вивчити лабораторну установку та взаємодію її основних блоків.

2. Включити установку, встановити на виході автотрансформатора 2 напругу близько 40-50%, при якій лампа розжарювання 3 щойно почне світитися.



1 – оптичний пірометр; 2 – автотрансформатор; 3 – лампа розжарювання;
4 – реостат оптичного пірометра

Рисунок 7.4 - Загальний вигляд лабораторної установки

3. Виміряти температуру контрольованого тіла (лампи розжарювання) 3 оптичним пірометром 1 шляхом зміни сили струму, переміщуючи реостат до момента зникнення верхньої частини пірометричної нитки.

4. Вимір провести 2-3 рази, по черзі кожним виконавцем.

5. Збільшити напругу автотрансформатора на 10 % та повторити пункти 3 і 4. Останнє вимірювання виконати при 100% напруги.

6. Записати в таблицю вимірювань і розрахунків значення напруги та відповідні їй значення виміряних яркісних температур.

7. Розрахувати середнє значення яркісної температури θ . Записати отримані значення у відповідну колонку таблиці 7.1.

8. За номограмою (рис. 7.5) визначити значення поправок при кожному значенні яркісної температури θ , маючи на увазі, що ступінь чорноти вольфрамової нитки $\epsilon_\lambda = 0,41$. Записати отримані значення у відповідну колонку таблиці 7.1.

9. Визначити дійсне значення температури $T_{\text{вим}}$ як суму яркісної температури θ і поправки. Записати отримані значення у відповідну колонку таблиці 7.1.

10. Із формули (7.3) виразити дійсне значення температури T , та розрахувати його, маючи на увазі, що $\lambda_e = 0,65$ мкм. **Усі значення фізичних величин у рівнянні повинні бути представлені у одиницях системи СІ.** Записати отримані значення у відповідну колонку таблиці 7.1.

11. Приймавши температуру, розраховану у п.10 за дійсне значення, а у п. 9 – за виміряне, розрахувати абсолютну, відносну та приведену похибки.

12. Зробити висновки про придатність потенціометра до експлуатації.

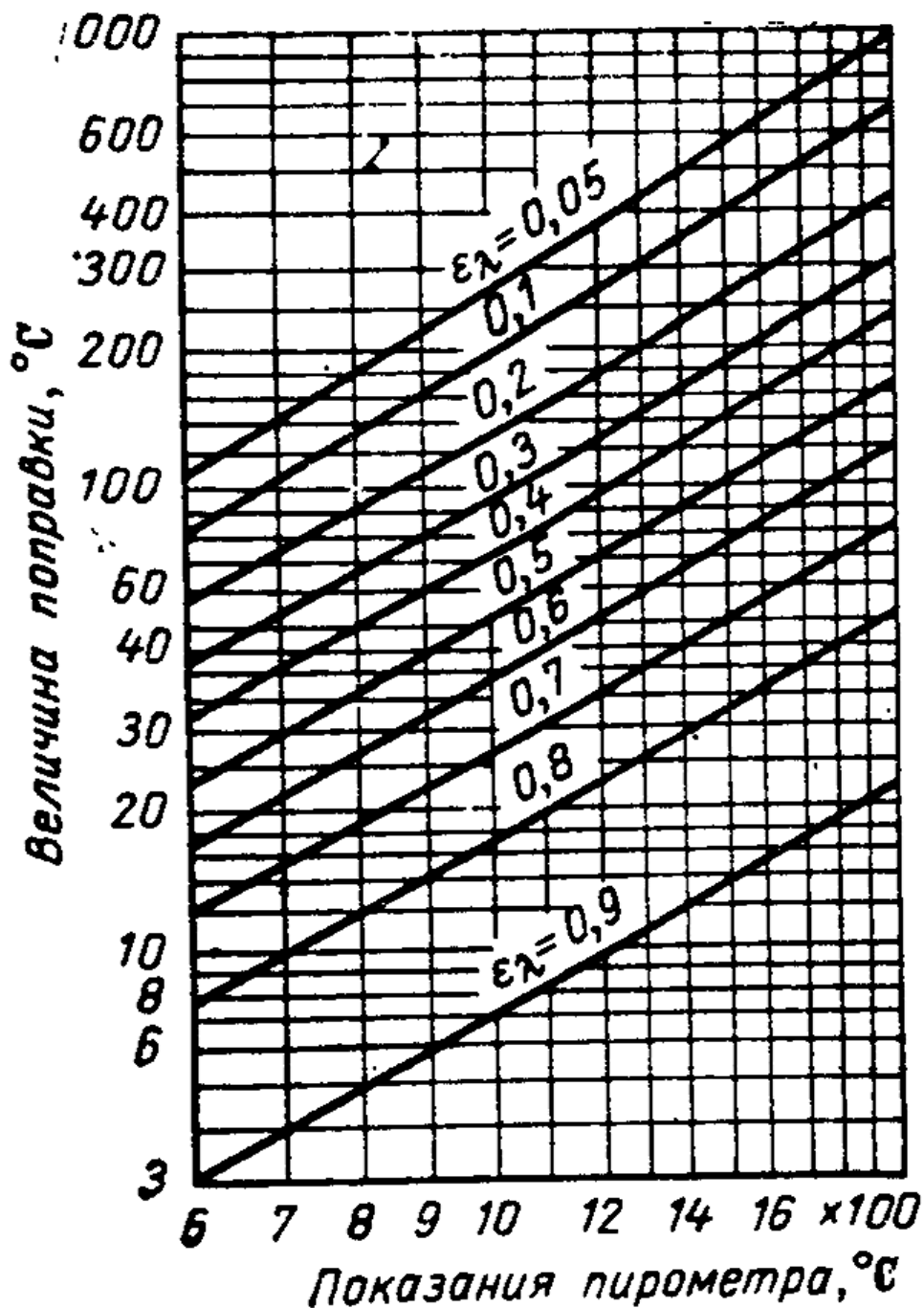


Рисунок 7.5 - Номограма поправок

Таблиця 7.1 -Результати вимірювань та розрахунків

Напруга автотрансформатора, В	Показання пірометра, °С			Середнє значення яркісної температури θ , °С	Поправка на неповноту вимірювання по номограмме, С	Дійсна температура з урахуванням поправки, $T_{\text{вим}}, ^\circ\text{C}$	Дісна температура, розраховане значення T , °С	Абсолютна похибка	Відносна похибка, δ , %	Приведена похибка, $\delta_{\text{пр}}$, %
	1	2	3							

4 Контрольні питання

1. Перерахуйте закони, які покладені в основу роботи оптичного пірометра
2. Назвіть призначення червоного світлофільтра.
3. Назвіть призначення димчастого світлофільтра.
4. Опишіть вплив ступіня чорноти контрольованого тіла на показання пірометра
5. Перерахуйте причини виникнення додаткових похибок при вимірюванні температури оптичними пірометрами.
6. Опишіть способи визначення дійсної температури за яркісною.
7. Дайте визначення поняття яркісної температури.

Лабораторна робота 8 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ ТА ПРИНЦИПУ ДІЇ ДЕФОРМАЦІЙНИХ МАНОМЕТРІВ

1. Методи та засоби вимірювання тиску

Тиск - найбільш поширений вимірюваний параметр. Без вимірювання тиску палива, що спалюється, неможлива безпечна робота газотопливною господарства. У котельних установках вимірюють тиск пари в барабані, за яким контролюють ефективність спалювання палива і тепловіддачі до труб в топці, а також безпеку роботи котельного обладнання, тиск перегрітої первинного і вторинного пара для визначення економічності роботи енергоблоку, відкладень солей на внутрішній поверхні трубопроводів. Для оцінки працездатності насосів і вентиляторів вимірюють тиск живильної води, пара для ежекторів і

продувки форсунок, повітря після воздухоподогревателя, тобто, у всіх напірних лініях трубопроводів, і розрідження димових газів у верхній частині топки, вакуум в конденсаторі турбіни.

Тиск як фізична величина визначається у вигляді енергії речовини (рідина або газ), віднесеної до одиниці об'єму, і є поряд з температурою основним параметром його фізичного стану. Вплив тиску речовини на зовнішній об'єкт проявляється у вигляді сили F , що діє на одиницю площі S , тобто $P = F / S$.

В СІ за одиницю тиску прийнятий Паскаль (Па). Паскаль - це тиск силою в один Ньютон на площу в один квадратний метр ($\text{Па} = 1 \text{ Н} / \text{м}^2$). Широко застосовують кратні одиниці кПа і МПа.

При вимірах розрізняють абсолютний, вакуумметричний і надмірний тиск. Під абсолютним тиском розуміється повний тиск, що дорівнює сумі атмосферного і надлишкового:

$$P_{\text{абс}} = P + P_{\text{атм}}$$

Вакуумметричний тиск нижче атмосферного:

$$P_{\text{в}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{абс}}$$

Прилади тиску в залежності від вимірюваної величини поділяють на манометри (для вимірювання надлишкового або абсолютного тиску), барометри (для вимірювання атмосферного тиску), вакуумметри (для виміру вакуумметричного тиску).

Манометри, призначені для вимірювання малих надлишкових тисків (до 40 кПа), називають **напороміри**, а призначені для вимірювання малих вакуумметричних тисків (до 40 кПа) - **тягоміри**. Прилади тиску, які мають двосторонню шкалу з межами вимірювання ± 20 кПа, називають **тягонапороміри** (значення нуль на шкалі відповідає атмосферному тиску). Для вимірювання різниці тисків використовують **диференціальні манометри** (дифманометри).

За принципом дії чутливого елемента пристрої для вимірювання тиску поділяють на

рідинні,
деформаційні,
вантажопоршневі
електричні.

В якості зразкових, за якими здійснюється перевірка робочих приладів, застосовують вантажопоршневі манометри.

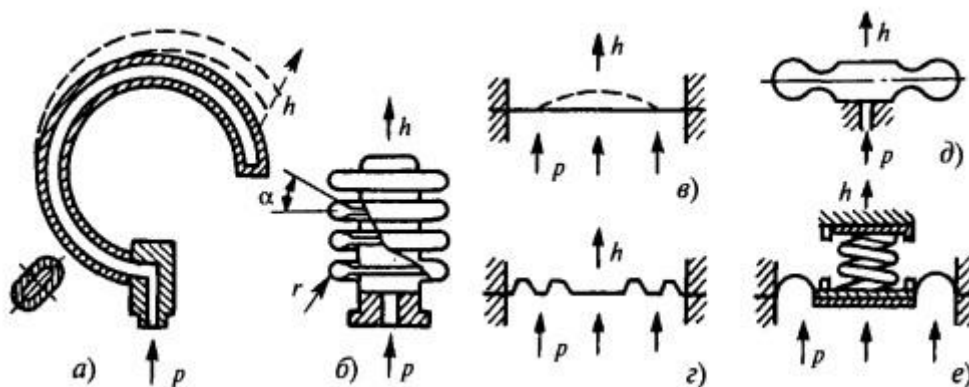
Передача сигналу, одержаного від чутливого елемента первинного перетворювача, до вторинних автоматичним приладів здійснюється або механічно в показуючих приладах, або за допомогою перетворювачів диференційно-трансформаторних, феродинамічних, з магнітною або силовою компенсацією і тензоперетворювачі типа «Сапфір».

2. Конструкція та принцип дії приладів для вимірювання тиску і різниці тисків з пружною деформацією чутливих елементів

Прилади для вимірювання тиску, засновані на пружній деформації чутливих елементів під дією вимірюваної величини, широко застосовують в діапазоні від 50 Па до 1000 МПа. Деформація або сила, пропорційна тиску, перетворюється в показання приладу або в зміну вихідного сигналу. Такі прилади виготовляють у вигляді тягомірів, напоромірів, манометрів і вакуумметрів.

В якості пружних чутливих елементів приладів для вимірювання тиску застосовують мембрани (рис. 8.1, а, б), мембранні коробки (рис. 8.1, в), сильфони (рис. 8.1, г), трубчасті пружини (рис. 8.1, д). Мембрани, мембранні коробки і сильфони використовують також і в дифманометрах.

Чутливий елемент приладу характеризується залежністю переміщення його робочої точки ΔX від діючого тиску або різниці тисків P (рис. 8.1, е). Зазвичай цю залежність в приладі прагнуть отримати лінійною, для чого використовують міцні сплави кольорових металів з високим модулем пружності.



а, б - мембрани, в - мембранна коробка, г - сильфон, д - трубчаста пружина; е – статична характеристика

Рисунок 8.1 - Пружні чутливі елементи приладів для зміни тиску і їх статичні характеристики

Із ростом вимірюваного тиску пружні деформації перейдуть в пластичні і залежність ΔX від P стане нелінійною. При експлуатації приладів тиску зона пружних деформацій може зменшитися через підвищення температури навколишнього середовища, тому первинні прилади доводиться розміщувати далеко від гарячих об'єктів. Крім того, з плином часу через циклічні навантаження під дією тиску пружні властивості чутливих елементів втрачаються і накопичуються пластичні деформації. Таким чином, обидва ці фактори негативно впливають на надійність чутливих елементів приладів тиску, що необхідно враховувати при їх експлуатації.

Манометри з трубчастою пружиною в більшості випадків є приладами, в яких вимірюваний тиск послідовно перетворюється в переміщення незакріпленого кінця пружини і пов'язаного з ним показуючого, реєструючого та сигналізуючого пристрою (в первинних приладах) або перетворювачем тиску в уніфікований електричний сигнал (в схемах дистанційної передачі сигналів вторинного приладу).

В даний час випускають показуючі і самописні манометри з одновитковою (МТ, МП) трубчастою пружиною. Верхня межа вимірюваного тиску визначається стандартним рядом:

$$(0,6; 1; 1,6; 2,5; 4) \cdot 10^n \text{ МПа,}$$

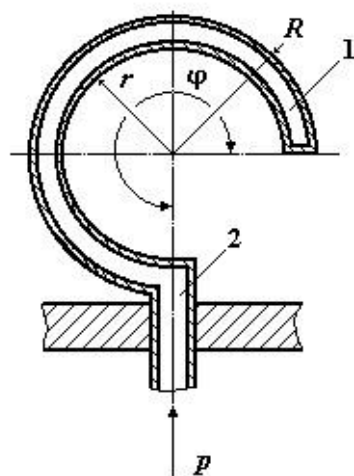
де $n = -1; 0; 1; 2; 3$.

Пружинні вакуумметри мають діапазон вимірювання від $-0,1$ до 0 МПа.

Принцип дії манометрів з трубчастою пружиною показаний на рис. 8.2, де зображений манометр МТ. Чутливий елемент манометра виконаний у вигляді порожнистої одновиткової трубчастої пружини 3, центральна вісь якої є дугою окружності з кутом $200-270$ град. Один кінець пружини, в який через радіальний штуцер 5 надходить тиск, закріплений, а другий (закритий) може переміщатися. Перетин трубчастих пружин може бути у вигляді еліпсоїда (пружина Бурдона) або плоскоовальна.

При подачі в трубку тиску перетин деформується (пунктирні лінії на рис. 8.2, а) і пружина прагне розпрямитися, переміщаючись в напрямку величини ΔX . Її чутливість тим більше, чим більше радіус кривизни R чим менше товщина стінки перетину δ .

Трубчасто-пружинні манометри випускають з диференційно-трансформаторними перетворювачами, вбудованими в корпус приладу. Інші манометри МПЕ випускають з перетворювачами магнітної або силової компенсації. Верхні межі вимірювань тиску цих манометрів від 4 до 60 МПа і від 4 до 100 МПа.



1 – стрілка; 2,3 – пружини; 4 – поводок; 5 - штуцер
Рисунок 8.2 - Пристрій манометра з одновитковою пружиною

У пружинних манометрах застосовують також пневматичні перетворювачі, що дозволяють отримувати на виході уніфікований сигнал по тиску повітря.

Такі манометри типу МП-П випускають на ті ж межі вимірювань, що і МПЕ. Для сигналізації граничних відхилень тиску в ланцюгах захисту і позиційного регулювання служать електроконтактні манометри (ЕКМ), в яких додатково введені стрілки-електроконтакти, що встановлюються навпроти значення тиску, яке необхідно сигналізувати. Показуюча стрілка також має контакт. При її поєднанні з будь-якої додаткової стрілкою виникає електричний сигнал.

Різновидом приладів для вимірювання тиску з пружною пружиною в якості чутливого елемента є колокольні діфманометри, призначені для дистанційного вимірювання різниці тисків, надлишкового та вакуумметричного тиску.

У іншій групі приладів для вимірювання тиску чутливі елементи виконують у вигляді сільфона.

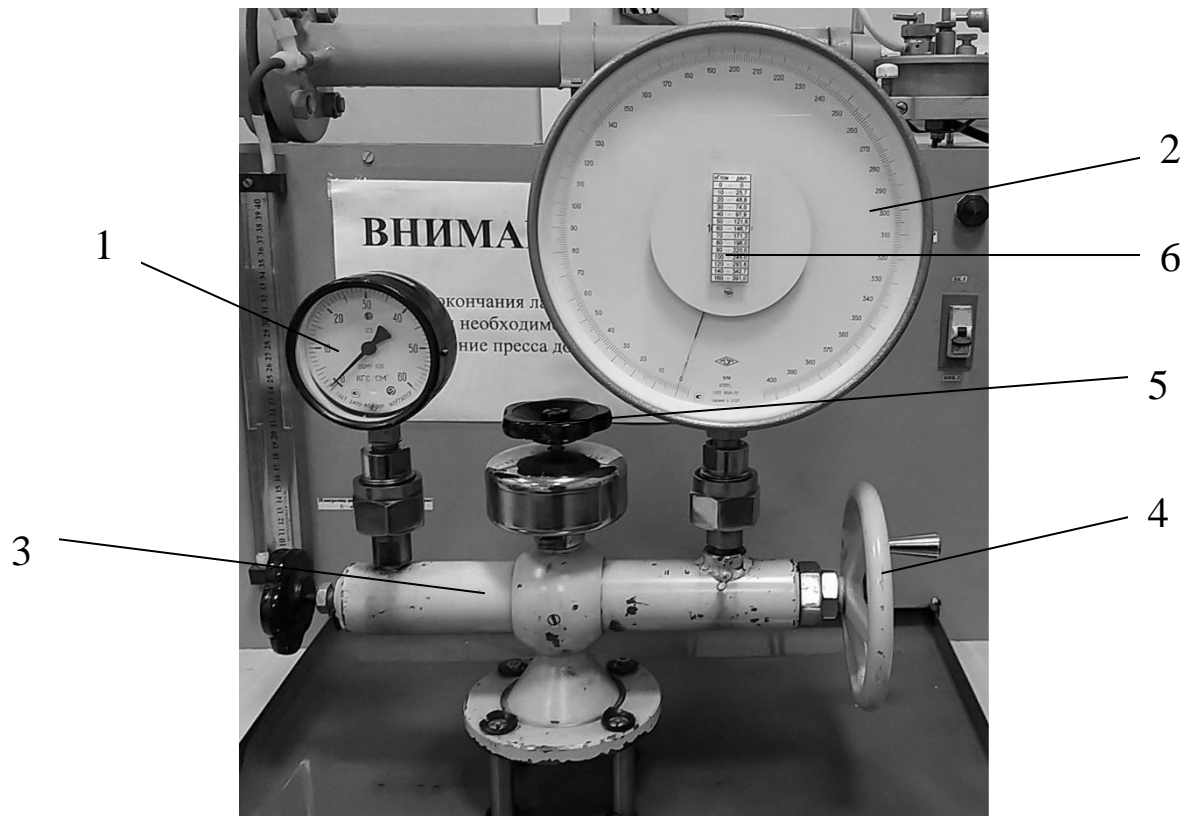
Сільфон (див. рис. 8.1, г) являє собою тонкостінну трубку з кільцевими гофрами на бічній поверхні. Його пружність визначається матеріалом і товщиною стінки, числом гофр і їх кривизною. Первинні прилади з сільфоном випускаються показуючими (індекс «П») і самописними (індекс «С»). Оскільки сільфони більш чутливі до зміни тиску, ніж трубчасті пружини, прилади з ними застосовують для вимірювання порівняно невеликих розрідження і тисків.

Найрізноманітнішими по конструкції чутливих елементів є прилади з мембранними елементами. Плоска мембрана (див. рис. 8.1, а) являє собою гнучку пластину, закріплену по колу. При подачі тиску в одну з камер, розділених мембраною, центр її окружності переміщається на величину ΔX . Статична характеристика плоскої мембрани має нелінійний вигляд, тому такі мембрани в приладах тиску не використовуються. Для лінеаризації статичної характеристики застосовують гофровані мембрани (див. рис. 8.1, б) і мембранні коробки (см. рис. 8.1, в). Найчастіше використовують мембранні коробки, жорсткість яких менше ніж жорсткість окремої мембрани. Це призводить до зростання крутизни статичної характеристики і збільшення зони переміщень, пропорційних прикладеному тиску.

Мембранні чутливі елементи мають статичну характеристику залежності (ΔX від P) більш круту, ніж сільфони, що дозволяє широко використовувати їх для вимірювання малих напорів і розрідження.

3 Схема лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 8.3) для перевірки деформаційного манометра 05М1-100 складається з досліджуваного приладу 1, зразкового манометра 2 та масляного пресу 3 із ручним гвинтовим приводом 4 для створення тиску.



1 – манометр, що повіряється; 2 – зразковий манометр; 3 – масляний прес;
4 – гвинтовий привід; 5 – зрівняльний кран; 6 – таблиця співвідношення
одиниць вимірювання

Рисунок 8.3 - Загальний вигляд лабораторної установки

4. Порядок виконання роботи

1. Відкрити зрівняльний кран 5 для скидування тиску у вимірювальній системі.

2. Повністю викрутити гвинтовий привід 4, преміщуючи його проти годинникової стрілки.

3. Закрити зрівняльний кран.

4. Змінюючи тиск шляхом обертання гвинтового приводу 4 за годинниковою стрілкою, встановити стрілку досліджуваного манометра 1 на позначки від 0 до 30 кгс/см² із кроком 5 кгс/см² і у зворотньому напрямку. Одночасно зняти показання зразкового манометра 2.

5. За допомогою таблиці 6, яка знаходиться на шкалі зразкового манометра, перевести показання цього прибору у одиниці «кгс/см²».

6. Записати в таблицю 8.1 результати вимірювань значення тиску, виміряних досліджуваним 1 та зразковим 2 манометрами.

Таблиця 8.1 -Результати вимірювань та розрахунків

Тиск, вимірний досліджуван им манометром, кгс/см ²	Тиск, вимірний зразковим манометром, кгс/см ²		Абсолют на похибка, Δ , °С	Відносна похибка, δ , %	Приведена похибка, $\delta_{пр}$, %
	прямий хід	зворотній хід			

7. Приймаючи тиск, вимірний зразковим манометром, за дійсне значення, а досліджуваним манометром – за вимірне, розрахувати абсолютну, відносну та приведену похибки.

8. Зробити висновки про придатність деформаційного манометра 05М1-100 до експлуатації.

5 Контрольні питання

1. Дайте визначення поняття тиску.
2. Перерахуйте системні та позасистемні одиниці вимірювання тиску.
3. Назвіть кратні одиниці вимірювання тиску.
4. Назвіть види манометрів, які застосовуються для вимірювання різних видів тисків
5. Опишіть класифікацію приладів для вимірювання тиску.
6. Опишіть принцип вимірювання деформаційних манометрів.
7. Назвіть види конструкцій чутливих елементів деформаційних манометрів.
8. Назвіть діапазон вимірювання деформаційних манометрів.

Лабораторна робота 9

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЮ І ПРИНЦИПУ ДІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ МЕТРАН-100

1 Пристрій і принцип дії перетворювача тиску

Перетворювач тиску Метран-100 призначений для точного перетворення тиску газів, рідин і пари в електричний аналоговий або цифровий сигнал для передачі і використання в схемах автоматичного управління, а також для

перетворення різниці тисків на звужуючих пристроях при вимірюванні витрати і перетворення різниці гідростатичних тисків при вимірюванні рівня.

Залежно від вимірюваного тиску розрізняють наступні модифікації перетворювача:

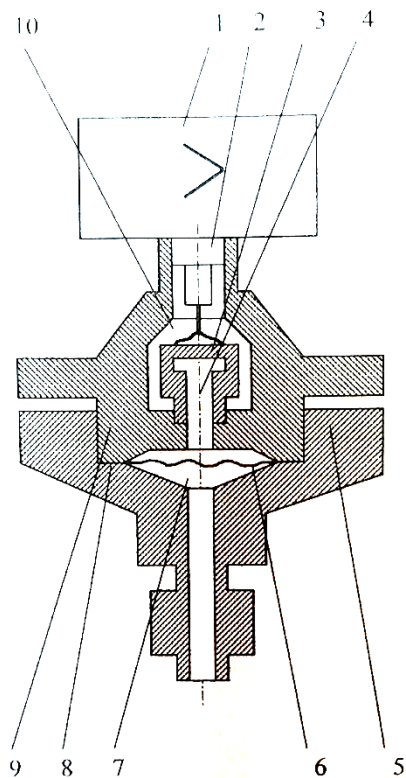
- для вимірювання надлишкового тиску Метран-100 ДІ;
- для вимірювання розрідження і вакуумметричного тиску Метран-100 ДВ;
- для вимірювання абсолютного тиску Метран-100 ДА;
- для вимірювання перепаду тиску Метран-100 ДД
- для вимірювання гідростатичного тиску Метран-100 ДГ.

Метран встановлюється поблизу місця відбору тиску і забезпечений ЖК-дисплеєм для відображення вимірюваного сигналу. Живлення електричної схеми перетворювача здійснюється постійною напругою 36 В, що подається від індивідуального блоку живлення БП-36.

Принцип дії перетворювача заснований на використанні тензоелектричного ефекту в плівці кремнію, вирощеної на поверхні монокристалічної пластини з штучного сапфіра. Чутливий елемент з монокристалічною структурою кремнію на сапфірі є основою всіх сучасних сенсорних блоків.

При деформації чутливого елемента під впливом вхідної вимірюваної величини змінюється електричний опір кремнієвих п'єзореzисторів в мостовій схемі на поверхні цього чутливого елемента. Зміна опору моста перетворюється на стандартний аналоговий сигнал постійного струму і (або) в цифровий сигнал. Перетворення здійснюється електронним пристроєм датчика.

Пристрій перетворювача тиску Метран-100 наведено на рис. 9.1.



- 1 – електронний пристрій, 2 - вивід, 3 – тензоперетворювач; 4 – внутрішня порожнина; 5 – фланець; 6 – мембрана; 7 – вимірювальна камера; 8 – прокладка; 9 – основа; 10 – порожнина

Рисунок 9.1 - Пристрій перетворювача тиску Метран-100:

Перетворювач складається з вимірювального блоку та електронного пристрою 1. У вимірювальному блоці мембранний тензоперетворювач розміщений усередині основи 9. Внутрішня порожнина 4 тензоперетворювача 3 заповнена кремнійорганічною рідиною та відділена від вимірюваного середовища металеву гофрованою мембраною 6, привареною по зовнішньому контуру до основи 9. Порожнина 10 з'єднана з оточуючим середовищем. Вимірюваний тиск подається у камеру 7 фланца 5, який ущільнений прокладкою 8, та впливає на мембрану 6 та через рідину – на мембрану тензоперетворювача, що призводить до її прогину та зміни опору тензорезисторів. Електричний сигнал від тензоперетворювача передається від вимірювального блоку до електронного пристрою 1 по дротам через вивід 2.

Принципова схема розміщення тензорезисторів на поверхні сапфірової мембрани наведена на рис. 9.2. Обираючи точки розміщення тензорезисторів, можна забезпечити збільшення чутливості вимірювальної схеми та можливість введення температурної компенсації.

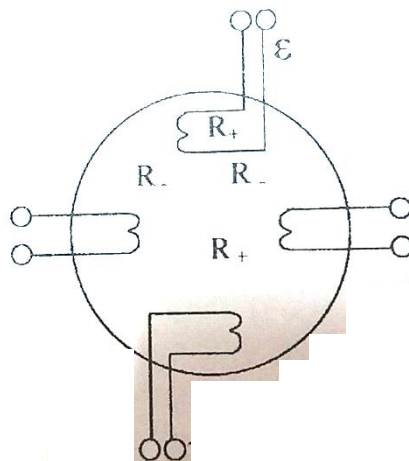


Рисунок 9.2 – Спрощена схема розміщення напівпровідникових тензорезисторів на поверхні чутливої мембрани

Для зниження похибки вимірювання при відхиленні умов вимірювання від нормальних в пам'яті датчика зберігаються результати калібрування датчика у всьому діапазоні робочих температур і тисків. Ці дані використовуються для розрахунку коефіцієнтів корекції вихідного сигналу.

У сенсорному блоці виробляється цифровий сигнал, який разом з коефіцієнтом корекції надходить на вхід електронного перетворювача, мікропроцесор якого коригує сигнал по температурі і лінеаризує його. На виході електронного блоку вихідний сигнал перетвориться з цифрового в необхідний стандартний.

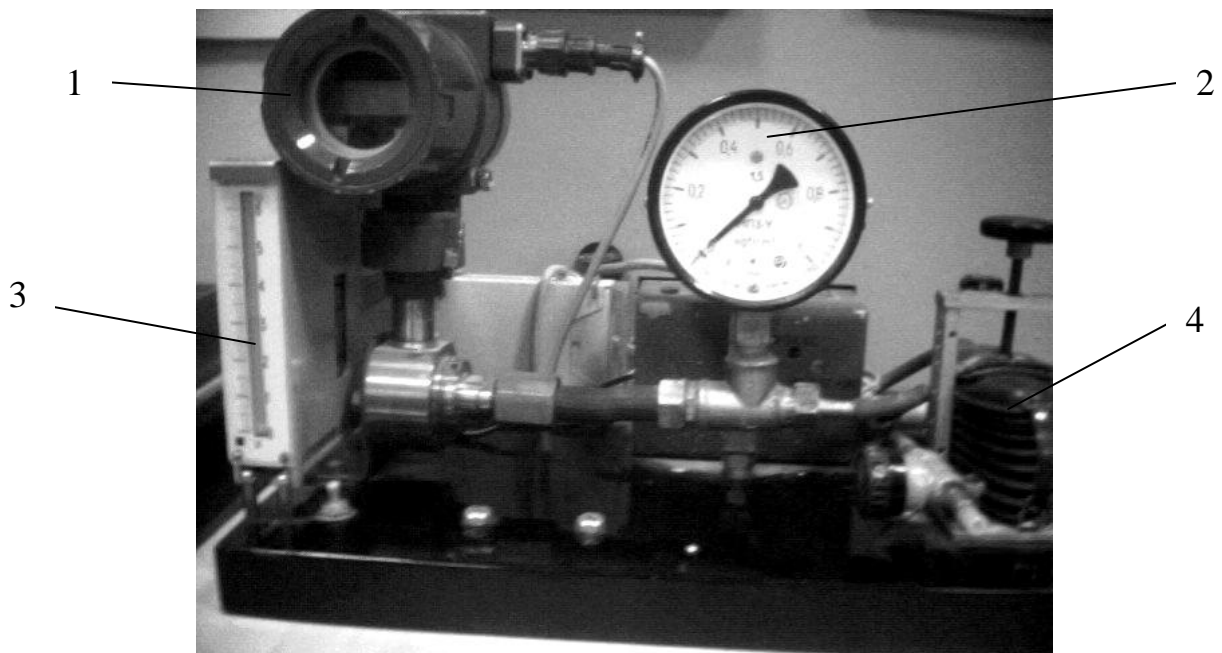
2 Контроль налаштування параметрів датчика

Для підготовки датчика до експлуатації необхідно звільнити доступ до кнопочних перемикачів, відвернувши кришку електронного перетворювача. Вибір контрольованого параметра здійснюється послідовним натисненням кнопки "1" (при першому натисканні з утриманням в натиснутому стані не менше 2 сек), при цьому на дисплеї індикатора відповідні цифрові значення встановлених параметрів, що контролюються, і символів режимів настройки, що зберігаються протягом 10 сек, якщо не проводиться наступне натискання кнопки "1".

Вихід з режиму контролю налаштувань параметрів датчика відбувається автоматично через 10 сек від останнього натискання кнопки.

3 Схема лабораторної установки

Лабораторна установка для перевірки перетворювача тиску (рис. 9.3) складається з досліджуваного приладу Метран-100-ДІ 1 з блоком живлення, манометра МПЗ-У2, показуючого приладу А-501 3 груші 4 для створення тиску на чутливих елементах приладів. Класи точності приладів складають 0,5; 1,5 і 1 відповідно.



1 – перетворювач тиску Метран-100; 2 – манометр; 3 – показуючий прилад; 4 - груша

Рисунок 9.3 - Схема лабораторної установки

4. Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні вивчити лабораторну установку та взаємодію її основних блоків.

2. Включити установку, встановити грушею 4 тиск, що відповідає нульовому положенню покажчика шкали приладу А-501 3.

3. Змінюючи тиск грушею, зняти показання Метран-100 1 і показуючого прибору при збільшенні тиску від мінімального до максимального значення і при зменшенні тиску.

4. Записати в таблицю 9.1 результати вимірювань значення тиску, виміряних тензоперетворювачем Метран-100 та показуючим приладом.

5. Приймавши тиск, виміряний перетворювачем Метран-100, за дійсне значення, а вимірювальним приладом – за виміряне, розрахувати абсолютну, відносну та приведену похибки.

6. Зробити висновки про придатність перетворювача Метран-100 до експлуатації.

Таблиця 9.1 -Результати вимірювань та розрахунків

Тиск, виміряний тензоперетворювачем, кПа	Показання вторинного прибору, кПа	Абсолют на похибка, Δ , °С	Відносна похибка, δ , %	Приведена похибка, $\delta_{пр}$, %

5 Контрольні питання

1. Опишіть принцип вимірювання перетворювача Метран-100.

2. Опишіть метод вимірювання, який покладено в основу роботи перетворювача Метран-100.

3. Перерахуйте системні та позасистемні одиниці тиску.

4. Опишіть методику контролю налаштувань параметрів.

5. Опишіть схему підключення тензорезистрів.

6. Назвіть основні характеристики Метран-100.

7. Перерахуйте основні модифікації Метран-100.

Лабораторна робота № 10

ВИМІР ВИТРАТ РІДИНИ, ГАЗУ І ПАРА ЗА ДОПОМОГОЮ РОТАМЕТРА

1 Принцип дії і конструкція ротаметра

Ротаметр є конічною трубкою, що розширюється догори, в якій знаходиться поплавков (рис. 10.1). Кільцеподібний простір між поплавком і стінками трубки грає роль звужуючого пристрою.

Якщо знехтувати силою тертя об бічну поверхню поплавця в зв'язку з її незначним значенням, то рівновага поплавка визначається рівністю:

$$G + P_2f = P_1f, \quad (10.1)$$

де G - вага поплавка;

P_1 - тиск контролююмого середовища перед поплавком;

P_2 - тиск за поплавком;

f - площа поперечного перерізу поплавка.



1 – конічна трубка; 2 – поплавок

Рисунок 10.1 - Схема ротаметра

Перепад тиску на поплавку визначається з попередньої рівності:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{Gn}{f}$$

Отже, при всіх витратах в діапазоні вимірювання перепад тисків залишається незмінним. Площа кільцевого зазору між поплавком і стінками трубки:

$$F_{к.з} = \frac{\pi}{4} \left(D_0 + 2Htg \frac{\beta}{2} \right)^2 - f, \quad (10.2)$$

де D_0 - внутрішній діаметр трубки при нульовому положенні поплавка, м;
 H - висота підйому поплавка над нульовим рівнем, м;
 β - центральний кут трубки.

Так як для кожного ротаметра значення D_0 , β і f постійні, площа кільцевого зазору є лише однозначною функцією висоти H . Тому із загального рівняння витрати через звуження потоку:

$$Q = \alpha \varepsilon F_{к.з} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

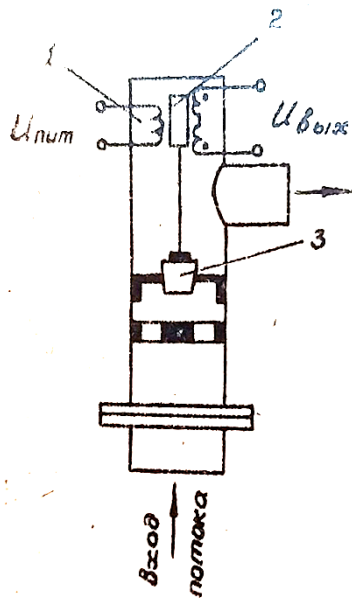
впливає, що функцією витрати середовища через ротаметр є площа кільцевого зазору $F_{к.з}$ або, з урахуванням рівняння (11.3), висота підйому поплавка. Таким чином, в ротаметрі витрати визначаються по положенню поплавка. Щоб поплавок стабілізувався по осі трубки, в ньому роблять косі пази або отвори, завдяки яким поплавок приводиться в обертання протікаючим середовищем і центрується.

У показуючих ротаметрів трубка виконана зі скла, і відлік показань проводиться по положенню верхнього краю поплавка щодо шкали, нанесеної на трубку або розташованої на металевій пластинці вздовж трубки.

Показуючі ротаметри зі скляною трубкою застосовуються для вимірювання витрати газів або прозорих рідин, що знаходяться під статичним тиском не більше 600 кПа (6,0 атм). Поплавок в таких ротаметрах виготовляється з ебоніту, алюмінію або нержавіючої сталі, в залежності від чого змінюється межа вимірювання приладу.

В даний час випускаються ротаметри з електричним дистанційним передаванням показань. Трубка в цих приладах металева немагнітна, що дозволяє застосовувати прилади для великого числа речовин і для великих статичних тисків, а поплавки з'єднані із вихідним перетворювачем.

На рис. 10.2 показана принципова схема ротаметричного датчика витрати типу РЕ, забезпеченого диференційно-трансформаторним перетворювачем 1. Тут у зв'язку з обмеженим робочим ходом плунжера 2 перетворювача застосований більший кут конусності і поплавок 3 типу сідельного клапана.

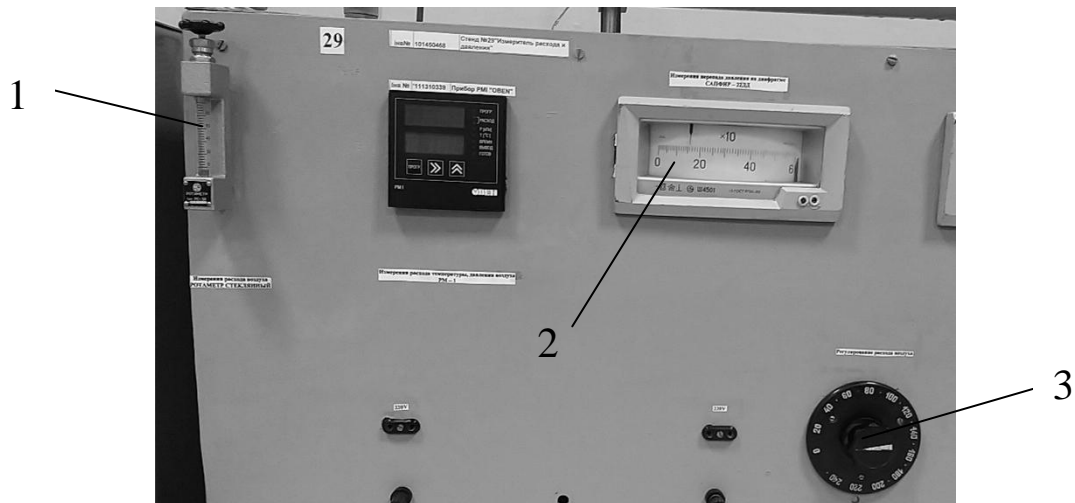


1 - диференційно-трансформаторний перетворювач; 2 – плунжер; 3 - поплавок

Рисунок 10.2 – Схема ротаметра з електричною дистанційною передачею показань

2 Схема лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 10.3) складається із скляного ротаметра типу РЕ, зразкового вторинного приладу та компресора для створення витрати повітря у трубопроводі, потужність якого змінюється реостатом у межах від 0 В до 220 В.



1 – скляний ротаметр; 2 – вторинний прилад; 3 – регулятор потужності компресора

Рисунок 10.3 - Загальний вигляд лабораторної установки

3 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні вивчити лабораторну установку та взаємодію її основних блоків.
2. Включити живлення установки і вторинного приладу.
3. Змінюючи потужність компресора та витрати повітря, встановити показчик зразкового вторинного приладу на всі оцифровані відмітки шкали по черзі.
4. Зняти показання ротаметра при зміні витрат від мінімального значення до максимального та у зворотньому напрямку.
5. Розрахувати абсолютну, відносну та приведену похибки.
6. Зробити висновки про придатність ротаметра до експлуатації.

4 Контрольні питання

1. Опишіть будову та принцип дії ротаметра.
2. Опишіть реалізацію дистанційної передачі показань.
3. Перерахуйте джерела додаткових похибок ротаметра.

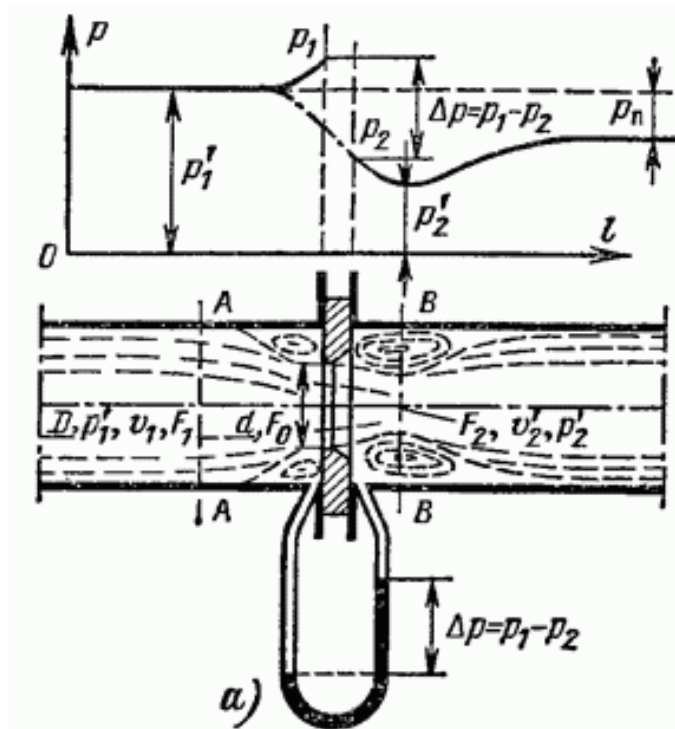
Лабораторна робота № 11

ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ ПОВІТРЯ СТАНДАРТНОЮ ДІАФРАГМОЮ

1 Метод змінного перепаду тиску на пристрої звуження потоку

Одним з найбільш поширених і універсальних способів вимірювання витрат є спосіб вимірювання витрати рідин, газів і парів в трубопроводах за перепадом тиску в пристрої звуження потоку. Звуження потоку створюється у поперечному перерізі трубопроводу, внаслідок чого при протіканні речовини підвищується швидкість в звуженому перетині в порівнянні зі швидкістю потоку до звуження (рис.11.1).

Збільшення швидкості і кінетичної енергії супроводжується зниженням статичного тиску. Зниження або перепад статичного тиску, створюваний звужуючим пристроєм, залежить при сталості інших факторів від витрати речовини, що протікає в трубопроводі.



Риунок 11.1 - Розподіл статичного тисків потоку по довжині трубопроводу при установці в ньому стандартної діафрагми

Збільшення швидкості і кінетичної енергії супроводжується зниженням статичного тиску. Зниження або перепад статичного тиску, створюваний звужуючим пристроєм, залежить при сталості інших факторів від витрати речовини, що протікає в трубопроводі.

У якості звужуючих пристроїв для вимірювання витрат використовуються сопла, сопла Вентурі і, найчастіше, діафрагми. **Діафрагма** (рис. 11.1) являє собою тонкий диск, що має круглий отвір, центр якого збігається з центром перетину труби. З боку входу потоку отвір має циліндричну форму з подальшим конічним розширенням. Звуження потоку починається до діафрагми, за діафрагмою потік досягає мінімального перетину, після чого поступово розширюється до повного перерізу трубопроводу.

Відповідним чином змінюється також статичний тиск: до звуження - P_1' , мінімального значення P_2' , досягає в найвужчому перерізі 2-2, в подальшому збільшується, але початкового значення (P_1') не досягає (P_n - втрата тиску). Суцільною лінією на рис.11.1 показано розподіл тиску вздовж стінки, а штрих пунктирною - по осі трубопроводу. Витрата характеризується перепадом тиску $\Delta P = P_1 - P_2$, причому тиску P_1 і P_2 відбираються безпосередньо до і після звужуючого пристрою. Подібним чином змінюється статичний тиск при установці в трубопроводі сопел і сопел Вентурі.

1.1 Рівняння витрати

Для отримання рівняння витрати розглядають перетини потоку 1-1, 2-2 (див.рис. 11.1) і записують для них рівняння Бернуллі:

$$\frac{P'_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P'_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2}, \quad (11.1)$$

та рівняння нерозривності струменя:

$$\rho_1 V_1 F_1 = \rho_2 V_2 F_2, \quad (11.2)$$

де індекси 1,2 характеризують величини в перетинах 1-1, 2-2;

P' – статичний тиск, Па;

ρ - щільність середовища, кг/м³;

V - середня швидкість руху середовища, м/с;

F - площа поперечного перетину потоку, м².

У результаті спільного рішення (11.1) і (11.2) з урахуванням ряду припущень і перетворення визначають швидкість V_2 , об'єму:

$$Q_m = V_2 F_2$$

та масову:

$$Q_m = Q_o \rho$$

витрати речовини. Відповідні формули мають вигляд, кг/с, м³/с:

$$Q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_o \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta P} \quad (11.3)$$

$$Q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_o \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho}}, \quad (11.4)$$

де $\alpha = \frac{\mu \xi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}}$ - коефіцієнт витрати;

ε - поправочний множник на розширення вимірюваного середовища внаслідок зниження статичного тиску при її проходженні через звуження потоку;

F_o - площа отвору звужуючого пристрою, м;

$\Delta P = P_1 - P_2$;

$\mu = \frac{F_2}{F_o}$ - коефіцієнт звуження струменя;

ξ - поправочний коефіцієнт, що враховує наявність сил тертя і в'язкості для умов реального середовища, а також відміну тисків P_1 і P_2 , вимірюваних безпосередньо до і після звуженого пристрою, від тисків P'_1 і P'_2 , що входять в вихідні формули (11.1) і (11.2);

$m = \frac{F_o}{F_1} = \frac{d^2}{D^2}$ - модуль звужуючого пристрою;

d, D - діаметри отвору звужуючого пристрою і трубопроводу відповідно, м).

Коефіцієнти ξ і μ не можуть бути визначені з достатньою точністю незалежно один від одного. Тому вони об'єднані в один загальний коефіцієнт витрати α , значення якого отримані експериментально.

1.2 Коефіцієнт витрати

У формулах (11.3) і (11.4) величини F_0 , ρ , ΔP , Q можуть бути розраховані або виміряні; невизначеними є коефіцієнти α і ε , а для рідин - тільки α ($\varepsilon = 1$). Значення коефіцієнта витрати були обчислені за (11.4) з використанням експериментальних даних по ΔP і Q , отриманих з високою точністю на спеціальних гідравлічних моделюючих установках в широких діапазонах зміни різних змінних. В результаті ретельного фахового і математичного аналізу отриманих даних із залученням теорії подібності емпіричну залежність коефіцієнта α від визначальних чинників вдалося представити з необхідною точністю в критеріальній формі:

$$\alpha(Re, m), \quad (11.5)$$

де Re - число Рейнольдса

$$Re = 0,354 \frac{Q_0 \rho}{D \eta}; \quad (11.6)$$

η - динамічна в'язкість середовища, Па·с.

Встановлено, що при $Re > Re_{gr}$ (граничне число Re) коефіцієнт α залежить тільки від m , тобто для конкретних умов є постійною величиною. Це значно спрощує рівняння витрати і робить його придатним для використання у виробничих умовах. Значення m і Re , а також m і α для діафрагм наведені в табл. 11.1 та 11.2.

Таблиця 11.1 - Граничні значення числа Рейнольдса для стандартних діафрагм

m	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
$Re_{gr}^* \cdot 10^{-5}$	0,23	0,30	0,42	0,57	0,73	0,90	1,1	1,34	1,58	1,85	2,1	2,4	2,7	3,0

Таблиця 12.2 - Вихідний коефіцієнт витрати для стандартних діафрагм

m	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
α_n	0,5978	0,6020	0,6078	0,6160	0,6238	0,6340	0,6459
m	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70
α_n	0,6600	0,6764	0,6950	0,7160	0,7398	0,7679	0,8019

Експериментальні дослідження з метою отримання залежності (11.5) проводилися для трубопроводу із спеціально обробленою гладкою

внутрішньою поверхнею. Підвищені вимоги пред'являлися також до гостроти вхідної крайки отвору діафрагми. При вимірюванні витрати в виробничих умовах використовуються звичайні шорсткі труби, а вхідні кромка діафрагми в процесі експлуатації поступово притупляється, тому коефіцієнт витрати для діафрагм:

$$\alpha = \alpha_n K_{ш} K_n, \quad (11.7)$$

де $K_{ш}$, K_n - поправочні множники відповідно на шорсткість трубопроводу і неостроту вхідної крайки діафрагми.

Значення $K_{ш}$, K_n залежать від модуля звужуючого пристрою m і діаметру трубопроводу D . Це дозволяє для певної величини з використанням даних табл. 11.2 і формули (11.7) отримати залежність $m\alpha$ від m , яка необхідна при розрахунку звужуючих пристроїв потоку.

Як приклад, в табл. 11.3 наведені значення m і $m\alpha$, для стандартних діафрагм при $D = 200$ мм.

Таблиця 11.3 - Значення m і $m\alpha$ для стандартних діафрагм при $D = 200$ мм

m	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$m\alpha$	0,0302	0,0607	0,1236	0,1911	0,2652	0,3495	0,4467

Для умов лабораторної роботи ($D = 80$ мм, $d = 53,5$ мм):

$$K_{ш}=1.0115; \quad K_n=1.0075 \quad (11.8)$$

1.3. Поправочний множник ε

Поправочний множник ε на розширення вимірюваного середовища для рідин дорівнює одиниці, а для газів і пара в загальному випадку залежить від $\Delta P/P$, m і показника адиабати K . Для сопел і сопел Вентурі величина ε може бути визначена аналітично, а для діафрагм - за емпіричною формулою:

$$\varepsilon = 1 - (0,3707 + 0,3184m^2) \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta P}{P_1} \right)^{\frac{1}{K}} \right]^{0,935} \quad (11.9)$$

Із (11.9) видно, що при зміні витрати, а отже, і ΔP , буде змінюватися значення ε . Врахувати і реалізувати залежність $\varepsilon(\Delta P)$ в промислових витратомірах досить складно. Тому розрахунок звужуючого пристрою виконують для середнього значення $\varepsilon_{ср}$, яке обчислюють за формулою (11.9) для $\Delta P_{ср}$:

$$\Delta P = \Delta P_H \left(\frac{Q_{cp}}{Q_{в.п}} \right)^2 \quad (11.10)$$

де ΔP_H - граничний номінальний перепад тиску дифманометра;

Q_{cp} , $Q_{в.п}$ - відповідно середня витрата і верхня межа вимірювання витратоміра.

Значення показника адіабати K для повітря при нормальних умовах ($t_n = 20^\circ\text{C}$, $P_n = 101325 \text{ Па}$, відносна вологість $\varphi = 0$) $K = 1,4$.

1.4 Щільність вимірюваного середовища

Щільність середовища, що протікає по трубопроводу, визначають з таблиць, безпосереднім вимірюванням або розрахунком в залежності від температури і тиску середовища перед звужуючим пристроєм.

Якщо відома щільність ρ_n сухого газу в нормальних умовах, то його щільність в робочому стані при P_1 і T_1 визначають за формулою:

$$\rho = \rho_n \frac{P_1 T_n}{P_n T_1 K_c}, \quad (11.11)$$

де K_c - коефіцієнт стисливості газу, що характеризує відмінність властивостей даного газу від ідеального.

1.5 Реалізація методу

Вимірювальний комплект витратоміра складається з ряду елементів. У трубопроводі, по якому протікає вимірюване середовище, встановлюють стандартний звужуючий пристрій. Перепад тиску на звужуючому пристрої, який є мірою витрати, вимірюють диференціальним манометром, забезпеченим передаючим перетворювачем з вихідним уніфікованим електричним або пневматичним сигналом, який за допомогою системи дистанційної передачі передається на вторинний прилад. Відлік витрати проводиться за шкалою вторинного приладу. Можливо також використання дифманометрів-витратомірів з відліковими пристроями, градуйованих в одиницях витрати.

Розглянутий метод вимірювання витрати є простим, надійним і ефективним, але при розрахунку, виготовленні та встановленні звужуючих пристроїв потребує виконання ряду вимог нормативних документів. Дотримання цих правил дозволяє виготовляти звужуючі пристрої за результатами розрахунку і використовувати їх без індивідуального градування.

Стандартні звужують пристрої застосовуються для вимірювання витрати рідин, газів і парів в круглих горизонтальних, вертикальних і похилих трубопроводах діаметром не менше 50 мм.

Необхідно, щоб вимірювана речовина заповнювала весь переріз трубопроводу перед звужуючим пристроєм і за ним. Пара повинна бути перегрітою, потік в трубопроводі - сталим. Фазовий стан речовини не повинен змінюватися при проходженні через звужуючий пристрій. Конденсат і пил (при вимірюванні витрати газу або пари), а також гази або опади (при вимірюванні витрати рідини) не повинні накопичуватися в трубопроводі поблизу звужуючого пристрою.

При розрахунку стандартної діафрагми визначають тільки діаметр її отвору d . Решта розмірів (товщина, довжина циліндричного отвору, кут конусності), в також чистота обробки, вимоги до обробки вхідної кромки встановлені стандартами і повинні строго виконуватися.

Місцеві опори (коліна, трійники, відводи, регулюючі органи і т.д.), розташовані поруч із звужуючим пристроєм, будуть спотворювати розподіл швидкостей по перетину трубопроводу, внаслідок чого дійсний коефіцієнт витрати буде відрізнитися від вихідного. Значення похибки для всіх можливих випадків визначити важко. Тому звужуючі пристрої необхідно встановлювати на досить довгих прямих ділянках трубопроводу, вільних від місцевих опорів. Дослідження показали, що необхідна довжина l_1 прямої ділянки трубопроводу до звужуючого пристрою залежить від модуля m , виду місцевого опору і способу відбору тиску на звужуючому пристрої (через окремі циліндричні отвори або за допомогою кільцевих камер), а після звужує пристрої l_2 - тільки від модуля m . Тому засувки і вентиля, як правило, встановлюють за звужучим пристроєм. Зазвичай значення l_1 і l_2 представлені у вигляді відносин l_1/D і l_2/D . Максимальне значення l_1/D досягає 100 (при установці до звужуючого пристрою регулюючого органу), в той час як l_2/D не перевищує 8. При використанні кільцевих камер, а також при зниженні значення m довжини прямих ділянок значно зменшуються.

З'єднання пристрою звуження з дифманометром для передачі тисків P_1 і P_2 виконують трубою проводкою (сполучна лінія). Дифманометр встановлюють за місцем (підлога, труба, колона, спеціальні підставки) по можливості ближче до звужуючого пристрою. Доцільно, щоб відстань від місця відбору тиску до дифманометра не перевищувало 15 м. Найбільша довжина сполучних ліній допускається до 50 м. Внутрішній діаметр сполучних ліній повинен бути не менше 8 мм.

Залежно від вимірюваного середовища (газ, рідина, пара), її параметрів (температура, тиск) і ступеня агресивності стандартами регламентуються місце розташування відбору тиску (по перетину трубопроводу), розташування динамометра щодо звужуючого пристрою, ухил сполучних ліній, наявність запірних вентилів, продувних вентилів сполучної лінії, газозбірників, конденсатозбірників, зрівняльних судин (температура рідини вище 120 °С), а також умови нормальної експлуатації звужуючого пристрою, сполучної лінії та дифманометра.

При вимірюванні витрати **неагресивного** середовища сполучна лінія і дифманометр заповнені цим середовищем, а в разі пари - її конденсатом. Якщо

середовище **агресивне**, то сполучна лінія до розділових судин заповнена вимірюваним середовищем, а лінія після судин та дифманометр - спеціальної розділової рідиною, яка не реагує з вимірюваним середовищем і не руйнує чутливий елемент і інші деталі дифманометра. Дифманометр заповнюють відповідною рідиною до підключення до сполучної лінії.

Вторинні прилади динамометрів встановлюють, як правило, на щитах і з'єднують з дифманометрами електричною або пневматичною проводкою (лінія зв'язку). Довжина лінії зв'язку може досягати 5 км.

1.6 Основні розрахункові формули

У промислових умовах зустрічаються випадки, коли перепад тиску вимірюється в кілограм-силах на квадратний метр, діаметри трубопроводу і звужуючого пристрою - в міліметрах, щільність - в кілограмах на кубічний метр.

Із урахуванням зміни розмірностей ΔP_1 , F_0 та зміни $F_0 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot d^2 = m D^2$ рівняння витрати (11.3), (11.4) набувають вигляду:

$$Q_m = 1,252 \cdot 10^{-2} \alpha \cdot m \cdot \varepsilon \cdot D^2 \sqrt{\Delta P \rho}; \quad (11.12)$$

$$Q_m = 1,252 \cdot 10^{-2} \alpha \cdot m \cdot \varepsilon \cdot D^2 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

і є основними при розрахунку витрати речовини, що протікає через звуження потоку.

У рівняннях (11.12) всі змінні вимірюються або розраховуються в робочих умовах і їх значення повинні визначатися при відповідних значеннях температури, тиску і вологості вимірюваного середовища. Перепад тиску вимірюється дифманометром, значення діаметрів d і D розраховуються з урахуванням поправочних множників $d = d_{20} K'_t$, $D = D_{20} K''_t$ (при температурі від -20 °C до $+60$ °C $K'_t = K''_t = 1$).

Стосовно до робочих умов розраховується також витрата Q_o , але для зручності сприйняття інформації спостерігачем шкала вторинного приладу градується для нормального стану вимірюваного середовища. Перерахунок витрати сухого газу в робочому стані при P_1 і T_1 на витрату Q_n в нормальних умовах виконують за формулою, аналогічною (11.11):

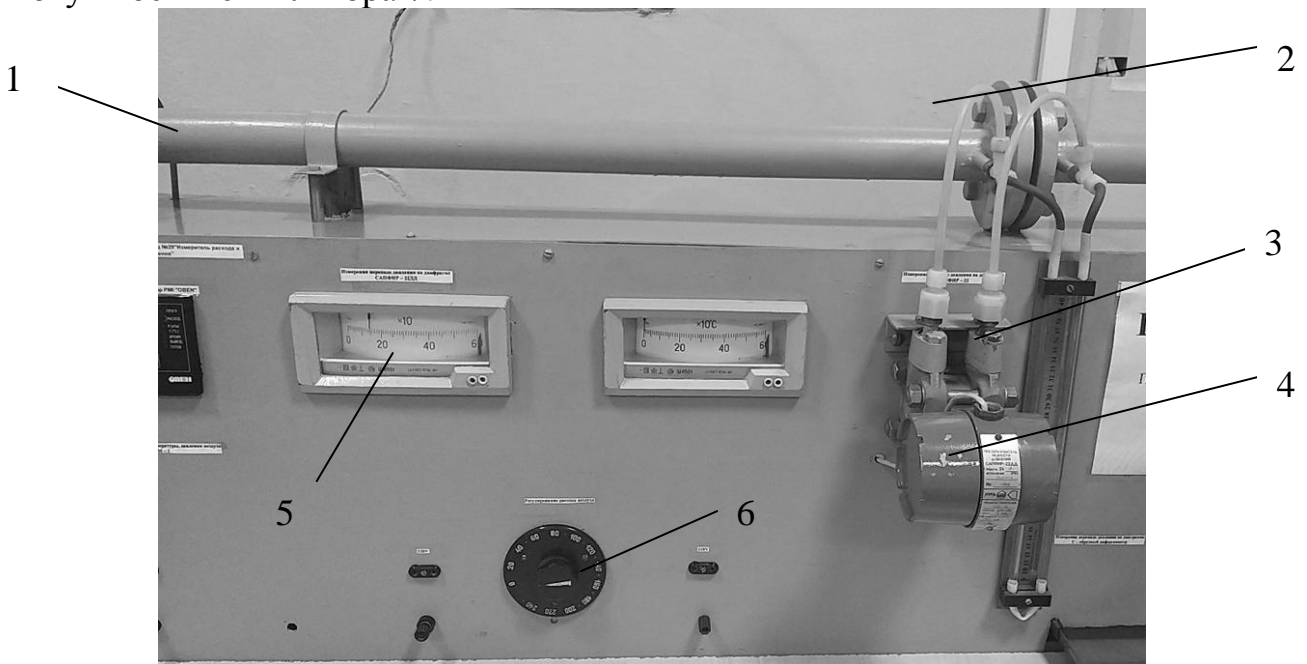
$$Q_n = Q_o \frac{P_1 T_n}{P_n T_1 K_c}$$

Якщо витрати вимірюють в умовах, при яких параметри вимірюваного середовища відрізняються від параметрів, прийнятих для розрахунку звужуючого пристрою, свідчення витратоміра слід відкоригувати, множачи їх

на $\sqrt{\frac{\rho}{\rho_0} P_0}$ (об'ємна витрата) або на $\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho} P}$ (масова витрата) (ρ і ρ_0 - щільність середовища для розрахункових і дійсних умов). Коли параметри середовища змінюються порівняно рідко, ручний метод введення поправки цілком можливий і не представляє складності. У той же час на практиці зустрічаються ситуації, коли деякі з параметрів або всі разом змінюються в широких межах непередбаченим чином і з великою частотою. Для вимірювання витрати в цих умовах промисловість випускає дифманометри з автоматичною компенсацією зміни одного, двох або трьох параметрів вимірюваного середовища (температура, тиск, вологість).

2 Схема лабораторної установки

Вимірюваним середовищем в лабораторній установці (рис. 11.2) є повітря, яке подається вентилятором 1 в трубопровід 2. У трубопроводі встановлена стандартна діафрагма 3, перепад тиску на якій вимірюється U-подібним дифманометром 4 і перетворювачем тиску 5. Вихідний сигнал з перетворювача тиску 5 передається на вторинний прилад 6 (витратомір), встановлений на щиті. Зміна витрати повітря здійснюється регулятором потужності вентилятора 7.



1 – трубопровід; 2 – діафрагма; 3 - U-подібний дифманометр; 4 – перетворювач тиску Сапфір; 5 – вторинний прилад; 6 – регулятор потужності

Рисунок 11.2 - Схема лабораторної установки

3 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні вивчити лабораторну установку та взаємодію її основних блоків.

2. Послідовно змінюючи потужність вентилятора за допомогою регулятора, записати свідчення вторинного приладу (м³/год) і U-подібного манометра (кгс/м²). Результати вимірювань занести в колонки 1 і 2 табл.11.4.

3. За вимірним значенням перепаду тиску розрахувати об'ємну витрату повітря [див. формулу (11.12)].

Вихідні дані:

$$P_1 = 10442 \text{ кгс/м}^2; \quad t_1 = 20^\circ\text{C}; \quad T_H = 293 \text{ K}; \quad P_H = 10332 \text{ кгс/м}^2;$$

$$\alpha = 53,5 \text{ мм}; \quad D = 80 \text{ мм}; \quad K_c = 1; \quad K = 1,4;$$

$$\rho_H = 1,205 \text{ кг/м}^3; \quad \eta = 1.8 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

3.1 Щільність повітря обчислити за формулою (11.11);

3.2 Модуль звужуючого пристрою $m = d^2/D^2$;

3.3 Поправочний множник ϵ обчислити за формулою (11.9) при $\Delta P = \Delta P_{\text{ср}}$. Величину $\Delta P_{\text{ср}}$ в зв'язку з малістю відносини $\Delta P/P$ визначити як середнє арифметичне результатів вимірювання по U-подібному манометру;

3.4 За формулою (11.6) обчислити значення Re , якщо $Re > Re_{\text{кр}}$ (див. табл. 11.1), то при відомому значенні m з табл. 12.2 лінійною інтерполяцією визначити вихідний коефіцієнт

$$\alpha_u = \alpha_{u1} + \frac{(\alpha_{u2} - \alpha_{u1})(m - m_1)}{m_2 - m_1},$$

де m_1, α_{u1} - найближчі менші табличні значення m і α_u ;

m_2, α_{u2} - найближчі більші табличні значення m і α_u .

Коефіцієнт витрати α знайти з (11.7) і (11.8).

4. Результати розрахунку об'ємних витрат занести у колонку 3 табл. 11.4.

5. Приймаючи за дісні витрати t_i , що розраховані (колонка 3), а за вимірюні - свідчення вторинного приладу (колонка 1), розрахувати абсолютну, відносну та приведену похибки.

6. Зробити висновки про придатність комплекта вимірювання витрати до експлуатації.

Таблиця 11.4 -Результати вимірювань та розрахунків

Витрати по вторинном у приладу, м ³ /год	Перепад тиску по U-подібному манометру, кгс/м ²	Розрахункові витрати, м ³ /год	Абсолютна похибка, Δ, °С	Відносна похибка, δ, %	Приведена похибка, δпр, %
1	2	3	4	5	6

4 Контрольні питання

1. Опишіть сутність методу змінного перепаду тиску.
2. Запишіть рівняння витрати.

3. Назвіть стандартні звужуючі пристрої.
4. Опишіть вимірювальний комплект витратоміра і основні характеристики його елементів.
5. Дайте визначення коефіцієнту витрати.
6. Назвіть граничне значення числа Рейнольдса для звужуючих пристроїв.
7. Дайте визначення поправочного множника на розширення вимірюваного середовища.
8. Перерахуйте способи забезпечення сталості коефіцієнтів α і ε в рівнянні витрати.
9. Опишіть вплив на показання витратоміра зміни параметрів вимірюваного середовища.
10. Назвіть правила вибору верхніх меж вимірювання дифманометрів-витратомірів по перепаду тиску і по витраті
11. Перерахуйте основні вимоги до установки звужуючих пристроїв, дифманометра вторинного приладу і до з'єднувальним лініях.
12. Назвіть основні обмеження методу змінного перепаду тиску.
13. Перерахуйте вихідні дані, завдання та методика розрахунку стандартних пристроїв звуження потоку.

Лабораторна робота № 12

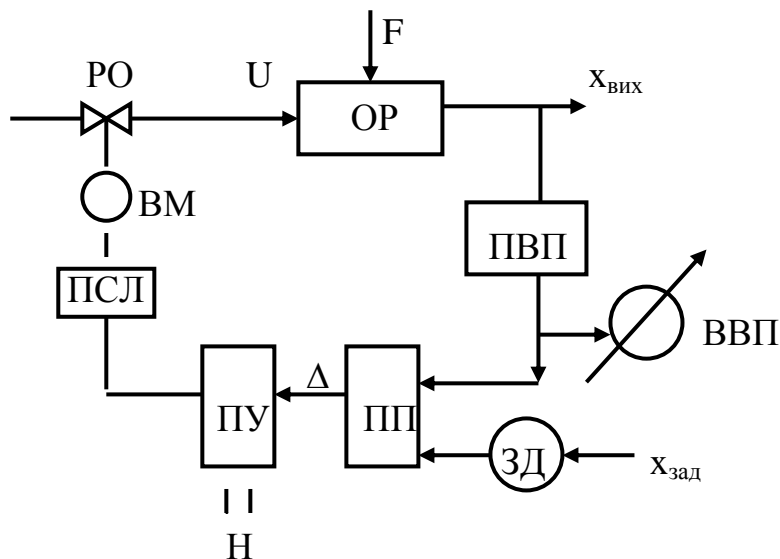
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОМАТИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ

1 Склад та принцип дії регуляторів

Регулятором називається управляючий пристрій, включений в ланцюг негативного зворотного зв'язку по відношенню до об'єкту і впливає на об'єкт таким чином, що забезпечується необхідне значення вихідної величини об'єкту незалежно від прикладених обурень.

На рис. 12.1 наведена загальна схема автоматичного управління, в якій елементарні ланки розділені за виконуваними функціями.

Представлена схема працює таким чином: сигнал, що характеризує стан об'єкту (Хвих), за допомогою первинного перетворювача перетворюється з неелектричного в електричний. Далі цей сигнал передається одночасно на вторинний показуючий прибор для моніторингу і на пристрій порівняння. Для оцінки стану об'єкту поточний сигнал порівнюється з іншим сигналом, який визначає бажаний стан об'єкту. Цей сигнал називається завданням і вводиться в пристрій порівняння за допомогою задатчика. Завдання може бути встановлене оператором уручну або бути одержано від ЕОМ.



ПВП – первинний вимірювальний перетворювач (термопара, датчик аналізатора); *ВВП* – вторинний вимірювальний прибор для можливого візуального контролю; *Н* – настройки; *ОР* – об'єкт регулювання; *ЗД* – задатчик; *ПП* – пристрій порівняння; *ПУ* – управляючий пристрій (регулятор); *ПСЛ* – підсилювач; *ВМ* – виконавчий механізм; *РО* – регулюючий орган

Рисунок 12.1 - Функціональна схема системи автоматичного регулювання

Пристрій порівняння формує сигнал розузгодження $\Delta = X_{\text{зад}} - X_{\text{вих}}$, який поступає на управляючий пристрій, де формується управляюча дія U . Оскільки цей сигнал дуже слабкий, то перед виконавчим механізмом ставиться підсилювач потужності. Регулюючий орган змінює матеріальний або енергетичний потік, що поступає в об'єкт регулювання.

У конкретних випадках окремі елементи можуть бути суміщені, віднесені до об'єкта управління або взагалі виключені. Наприклад, частіше до об'єкта відносять виконавчі механізми та регулюючі органи.

2 Типові закони регулювання

Рівняння, яке встановлює взаємозв'язок в часі між вхідною величиною регулятора $\Delta(p)$ і вихідний величиною $U(p)$, називається законом *регулювання* або *алгоритмом управління*.

Алгоритм управління реалізується в регуляторі за допомогою настройок.

1. Пропорційний або П-закон регулювання

Вихідна величина регулятора (управляюча дія) U визначається рівнянням:

$$U = k_{\text{рег}} \cdot \Delta,$$

а передавальна функція регулятора:

$$W(p) = k_{\text{рег}}$$

Достоїнства: 1. Швидко включається в роботу (безінерційний);
2. Має одну настройку Крег.

Недолік: наявність статичної помилки.

2. Інтегральний або І-закон регулювання

Алгоритм управління реалізує рівняння:

$$U = \varepsilon \int \Delta dt$$

У І-регуляторі при появі сигналу розузгодження змінюється швидкість переміщення регулюючого органу:

$$\frac{dU}{dt} = \varepsilon \cdot \Delta,$$

де ε – швидкість регулювання або коефіцієнт передачі.

Достоїнства: 1. Відсутність статичної помилки;

2. Має одну настройку ε .

Недолік: регулювання затягується в часі.

3. *III (пропорційно-інтегральний або ізодромний) закон регулювання* реалізує алгоритм управління:

$$U = k_{рег} \cdot \Delta + \varepsilon \int \Delta dt = k_{рег} \left(\Delta + \frac{1}{T_i} \int \Delta dt \right)$$

де $k_{рег}$ – коефіцієнт передачі регулятора;

T_i – час ізодрома.

У даному регуляторі суміщені достоїнства П-регулятора (швидкодія) і І-регулятора (відсутність статичної помилки).

Передавальна функція:

$$W_{рег}(p) = \frac{U(p)}{\Delta(p)} = k_{рег} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right)$$

Структурна схема – це дві паралельно з'єднаних ланки: пропорційна ланка і інтегруюча ланка. При виникненні сигналу розузгодження ПІ-регулятор в перший момент часу працює як пропорційний (швидко включається в роботу і зменшує розузгодження), а потім як інтегральний (компенсує статичну помилку) регулятор.

ПІ-регулятор має 2 настроювання: Крег та T_i .

4. ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний або ізодромний регулятор з передуванням)

Алгоритм управління представляється рівнянням:

$$U = k_{рег} \left(\Delta + \frac{1}{T_i} \int_0^{\infty} \Delta dt + T_d \frac{d\Delta}{dt} \right),$$

де $k_{рег}$ – коефіцієнт передачі регулятора;

T_i – час ізодрома;

T_d – час диференціювання (передування).

Достоїнство: висока якість регулювання.

Недолік: 3 настроювання, потрібен попередній розрахунок настройок.

ПІД-регулятор має 3 настроювання: Крег, T_i та T_d .

Перед практичним використанням регуляторів виконують градування параметрів регулятора. Градування відбуваються шляхом зняття ряду кривих розгону регулятора при різних настроюваннях.

3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається із електричної печі опору та щита приладів і засобів автоматизації. У піч вмонтований термоелектричний перетворювач типу ТХК. На щиті розташовані вимірювальний та реєструючий прилад РП-160, автоматичний регулятор, перемикач режимів роботи, прибор для контролю напруги у печі КСП-1, автоматичний задавач та кнопочна станція або блок ручного керування.

4 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні ознайомитися із лабораторною установкою.

2. Висунути автоматичний регулятор, відкривши доступ до органів керування

3. Включити живлення приладів на щиті.

4. Провести градування настроювання Крег за наступним алгоритмом:

4.1. Перемикач режимів роботи встановити у положення «ручний».

4.2. Настроювання T_i виключити.

4.3. Орган настроювання Крег встановити на першу оцифровану відмітку.

4.4. На задатчику встановити завдання 10-20 %

4.5. Перемикач режимів роботи переключити у положення «автоматичний»

4.6. По прибору КСП-1 зафіксувати значення вихідного сигналу регулятора. Дані занести до табл. 12.1.

4.7. Повторити підпункти 4.1-4.6 для всіх значень градування Крег.

Таблиця 12.1 – Результати градуювання настроювання Крег

Настроювання Крег, встановлене на регуляторі	Величина завдання, %	Величина вихідного сигналу, %	Розраховане значення настроювання К*рег

4.8. Розрахувати значення настроювання К*рег:

$$K_{рег}^* = \frac{X_{вих}}{X_{завд}}$$

5. Провести градуювання настроювання Ті за наступним алгоритмом:

5.1. Перемикач режимів роботи встановити у положення «ручний».

5.2. Встановити значення настроювання Крег в діапазоні від 1 до 10.

Підбирається дослідним шляхом для конкретного регулятора.

5.3. При відключеному настроюванні Ті встановити завдання на рівні 10-50% та переключити перемикач режимів роботи переключити у положення «автоматичний».

5.4. Зафіксувати та запам'ятати значення вихідного сигналу на приборі КСП-1.

5.5. Перемикач режимів роботи встановити у положення «ручний».

5.6. Орган настроювання Ті встановити на першу оцифровану відмітку.

5.7. Перемикач режимів роботи переключити у положення «автоматичний»

5.8. За допомогою секундоміра зафіксувати час удвоєння вихідного сигналу. Відлік починати з моменту, коли стрілка прибору КСП-1 досягне значення за п. 5.4 та закінчити, коли стрілка пройде такий же відрізок по шкалі. Наприклад, у п. 5.4 стрілка пройшла від 0 до 25 %, отже, секундомір включається на відмітці 25%, а виключається на 50%.

5.9. Дані достілень занести у таблицю 12.2.

Таблиця 12.2 – Результати градуювання настроювання Ті

Настроювання Ті, встановлене на регуляторі, с				
Час удвоєння вихідного сигналу регулятора Туд, с				

6. Побудувати градуювальні графіки настроювань регулятора у вигляді $K_{рег}^* = f(K_{рег})$ та $T_i = f(T_{уд})$.

7. Да формулами, наведеними у Додатку В, розрахувати настроювання для П та ІІІ-законів регулювання для всіх видів перехідних процесів.

5 Контрольні питання

1. Дайте визначення поняття регулятора.

2. Дайте опис складу та принципу дії регулятора
3. Перерахуйте типові закони регулювання
4. Запишіть диференційні рівняння та передавальні функції типових законів регулювання.
5. Дайте опис методики проведення градування настроювань регулятора.
6. Нарисуйте криві розгону типових законів регулювання.

Лабораторна робота № 13

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ

1 Стійкість систем автоматичного регулювання

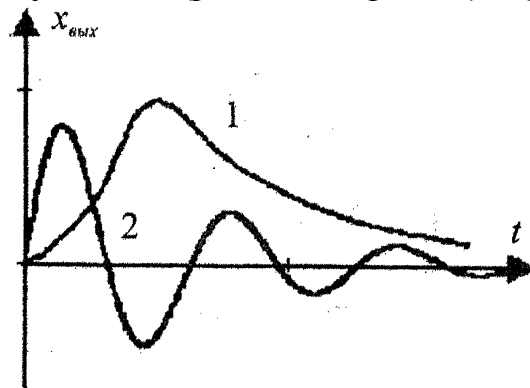
Будь-яка система автоматичного управління повинна бути працездатною, тобто забезпечувати поставлену мету управління. Так, в системі, що стежить, вихідний сигнал повинен якомога точніше повторити дію завдання. Будь-яка реальна дія, зазвичайно, обмежена по амплітуді, тому в працездатній системі вихідний сигнал також обмежений. Якщо вихідний сигнал з часом необмежено зростає, то система є непрацездатною.

Під *стійкістю системи* розуміється здатність системи повертатися до початкового або близького до початкового рівноважного стану при припиненні дії обурення.

Вимога забезпечення стійкої роботи є першою і обов'язковою вимогою, яка пред'являється до системи. Про стійкість судять по вигляду перехідних процесів, які виникають в системі.

З точки зору стійкості системи підрозділяються на:

- **стійкі**, характеризуються наявністю в системі аперіодичних (рис. 13.1, крива 1) або коливальних затухаючих (рис. 13.1, крива 2) перехідних процесів.

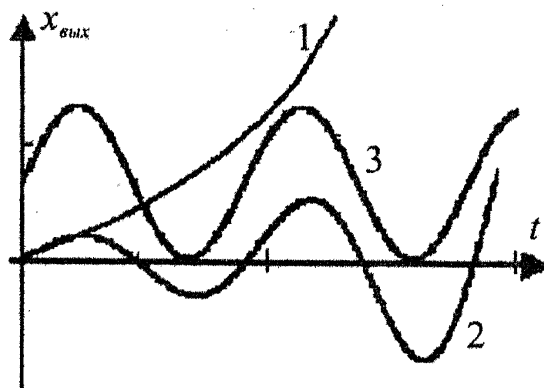


1 – аперіодичний перехідний процес; 2 – коливальний перехідний процес

Рисунок 13.1 - Перехідні процеси в стійких системах

- **нестійкі**, характеризуються наявністю в системі коливальних процесів, що розходяться (рис. 13.2, крива 2) і перехідних, у вигляді монотонного нескінченного зростання або зростання вихідної величини (рис. 3.2, крива 1).

- **на межі стійкості**, що характеризуються наявністю в системі коливальних незгасаючих перехідних процесів, які носять назву *автоколивань* (рисунок. 13.2, крива 3).



1 – аперіодичний перехідний процес; 2 – коливальний перехідний процес; 3 – автоколивальний перехідний процес

Рисунок 13.2 - Перехідні процеси в нестійких системах

При рішенні задач синтезу САУ вид перехідного процесу невідомий, тому виникає задача теоретичного аналізу стійкості системи шляхом знаходження коренів характеристичного рівняння диференційного рівняння, яке описує перехідні процеси у системах.

У загальному випадку корені характеристичного рівняння записується у вигляді комплексних чисел $z=\alpha\pm i\beta$. Розташувавши корені на комплексній площині, можна зробити висновок про стійкість системи. Для стійкості системи необхідно, щоб все корені знаходилися з лівого боку комплексної площини (тобто були лівими).

Якщо корені потрапляє на вісь ординат ($\alpha=0$) – то система знаходиться на межі стійкості. Праві корені свідчать про нестійкість системи.

У зв'язку з неможливістю аналітичного знаходження коренів характеристичного рівняння вище за другий порядок, були розроблені критерії, які дозволяють, не вирішуючи рівняння, зробити висновок про стійкість системи. На практиці застосовуються алгебраїчний критерій Гурвиця-Рауса та частотні критерії Михайлова та Найквіста-Михайлова.

2 Якість регулювання. Прямі показники якості регулювання

Вимога забезпечення стійкої роботи є обов'язковою вимогою, але недостатньою. Практичну придатність застосування системи визначають за показниками якості перехідного процесу, що виникає при одноразовій ступінчастій дії.

Для оцінки якості регулювання використовують наступні показники перехідного процесу (рис. 13.3):

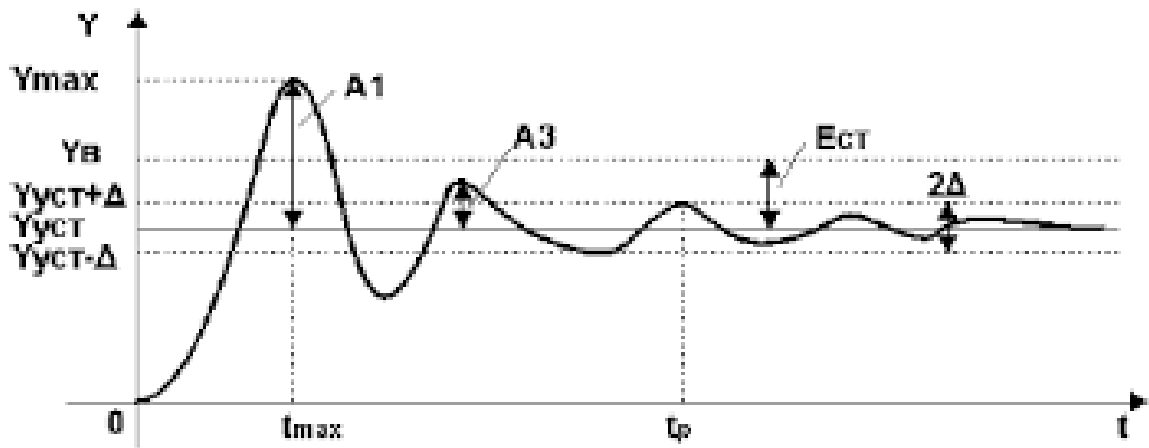


Рисунок 13.3 – Показники якості перехідного процесу

1. Статична похибка

$\Delta = Y_{уст} - Y_{вих}(\infty)$ - різниця між заданим і вихідним сигналом в сталому режимі.

2. Динамічна похибка

Динамічна похибка

$\Delta x_{вих}^{max}$ – це найбільше відхилення вихідної величини від завдання в процесі регулювання:

$$\Delta y_{вих}^{max} = A_1 = Y_{уст} - y_{max}$$

3. Час регулювання (тривалість перехідного процесу)

Δt_p – час, за який вихідна величина зміниться до сталого значення

4. Коливальність перехідного процесу

- ступінь перерегулювання $\delta = \frac{A_2}{A_1} \cdot 100\%$

- ступінь загасання $\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_2}$

Ці показники визначаються безпосередньо по кривій перехідного процесу, тому вони називаються прямими показниками якості.

3 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається із електричної печі опору та щита приладів і засобів автоматизації. У піч вмонтований термоелектричний перетворювач типа ТХК. На щиті розташовані вимірювальний та реєструючий прилад РП-160, автоматичний регулятор, перемикач режимів роботи, прибор для контролю напруги у печі КСП-1, автоматичний задавач та кнопочна станція або блок ручного керування.

4 Порядок виконання роботи

1. При відключеному живленні ознайомитися із лабораторною установкою.
2. Перемикач режимів перевести на режим «ручний».
3. Перемикач виду роботи встановити у положення «Система».
4. Відкрити передню кришку прибору РП-160, включити живлення та привід діаграмної стрічки, замкнувши клеми навпроти позначки 240 мм/год. Для створення натягнення діаграмної стрічки використати обтяжувачі.
5. Висунути автоматичний регулятор, відкривши доступ до органів керування.
6. За результатами розрахунків за п. 7 та градувальними графіками Лабораторної роботи № 12 встановити на регуляторі значення настроювані Крег та Ті, що відповідають аперіодичному перехідному процесу.
7. На задатчику встановити завдання 10-20 %. При подальшій роботі значення завдання необхідно збільшувати або зменшувати на 10-30 %.
8. Перемикач режимів роботи переключити у положення «автоматичний»
9. Спостерігаючи за прибором РП-160, дочекатися завершення перехідного процесу. Індикатором завершення є сталість значення температури, яке має вигляд вертикальної лінії на діаграмній стрічці. Вертикальна ділянка має бути довжиною не менше 1 см для зручності подальшої обробки перехідного процесу.
10. Перемикач режимів перевести на режим «ручний».
11. Повторити п. 6, 7, 8, 9, 10 для коливальних перехідних процесів.
12. Зняти не менше 2 перехідних процесів на 1 студента.
12. Зняти діаграмну стрічку з прибору.
13. За графіками перехідних процесів визначити прямі показники якості. Занести результати у табл. 13.1.

Таблиця 13.1 – Прямі показники якості

Вид п.п Показ- ник якості	Аперіодичний	Із 20-відсотковим перерегулюванням	Із 40-відсотковим перерегулюванням
Статична похибка			
Динамічна похибка			
Час регулювання			
Ступінь перерегулювання			
Ступінь загасання			

14. Зробити висновок про якість системи автоматичного регулювання.

5. Контрольні питання

1. Дайте визначення стійкості САР.
2. Розподіл САР з погляду стійкості.
3. Випадки використання критеріїв стійкості.
4. Перерахуйте прямі показники якості.
5. Дайте визначення статичної похибки.
6. Дайте визначення динамічної похибки.
7. Дайте визначення часу регулювання.
8. Дайте визначення ступіні перерегулювання.
9. Нарисуйте перехідні процеси у стійкій системі.
- 10 Нарисуйте перехідні процеси у нестійкій системі.
11. Назвіть системи, у яких виникають автоколивання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Основні

1. Проць Я. І., Савків В. Б., Шкодзінський О. К., Ляшук О. Л. Автоматизація виробничих процесів : навчальний посібник. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344с.
2. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
3. Иванов Н. И., Парсункин Б. Н., Рябков В. М. Автоматизация производственных процессов в черной металлургии : учеб. пособие для вузов. Москва : Металлургия, 1980. 303 с.
4. Асоціація Підприємств Промислової Автоматизації України. URL: <https://appau.org.ua> (дата звернення 04.09.2019 р.).
5. Школа для електрика. Датчики технологічних параметрів. URL: <http://electricalschool.info> (дата звернення 04.09.2019 р.).
6. Контеч-Систем.ЛТД. Датчики тиску. URL: <http://kontech-system.com.ua/articles/datchiki-davlenija-tipy-harakteristiki-osobennosti-podbor/> (дата звернення 04.09.2019 р.).

Додаткові

1. Гончаров А. Н. Автоматизация моделирования систем управления технологическими процессами на основе человеко-машинного комплекса имитации. *Математичні машини і системи*. 2009. № 1. С. 110-116.
2. Дуэль М. А., Канюк Г. И. Автоматизация технологических процессов и ее влияние на эффективность энергопроизводства ТЭС и АЭС. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 5/8(53). С. 15-22.
3. *Измерительные приборы и системы*: научно-технический журнал. 2008. № 4. 80 с.
4. Алиев Т. М., Алиев Р. А., Халдей З. В. Автоматизация информационных процессов в интегрированных АСУ промышленными предприятиями. Москва : Энергоиздат, 1981. 141 с.
5. Березовский С. В., Зубенко А. В., Кривицкий А. В. Реальная автоматизация предприятий Украины. *Корпоративные системы*. 2002. № 4. С. 24-29.
6. Богуслаев А. В., Мозговой В. Ф., Балушок К. Б. Автоматизация технологической подготовки производства ОАО «Мотор Сич» в среде АСПП на базе TechCARD/Search. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2010. № 3/3(45). С. 9-12.
7. Коваль І. Інновації в металургії: як «цифра» запобігає «втомі металу». URL: <https://mind.ua/publications/20203042-innovaciyi-v-metalurgiyi-yak-cifra-zapobigae-vtomi-metalu> (дата вернення 25.02.2020 р.)

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

Основні

1. Теорія автоматичного управління : підручник для внз / Г. Ф. Зайцев та ін. ; за заг. ред. Г. Ф. Зайцевевої. Київ : Техніка, 2002. 686 с.
2. Пазюк М. Ю., Овчинникова І. А. Автоматизація технологічних процесів : методичні вказівки до розробки технічного проекту систем автоматизації. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 74 с.
3. Асоціація Підприємств Промислової Автоматизації України. URL: <https://appau.org.ua> (дата звернення 04.09.2019 р.).
4. Школа для електрика. Датчики технологічних параметрів. URL: <http://electricalschool.info> (дата звернення 04.09.2019 р.).
5. Контеч-Систем.ЛТД. Датчики тиску. URL: <http://kontech-system.com.ua/articles/datchiki-davlenija-tipy-harakteristiki-osobennosti-podbor/> (дата звернення 04.09.2019 р.).
6. Ельперін І. В., Пупена О. М., Сідлецький В. М., Швед С. М. Автоматизація виробничих процесів : підручник. Київ : Ліра-К, 2015. 378 с.

Додаткові

1. *Измерительные приборы и системы*: научно-технический журнал. 2008. № 4. 80 с.
2. Альперович М. Е. Автоматизация и оптимизация основных процессов спецэлектрометаллургии. Москва : Металлургия. 1990. 177 с.
3. Вольфман И. Б., Буглак Л. И., Ефроймович С. Ю. Автоматизация методических печей. Москва : Металлургия, 1981. 195 с.

Додаток А
Градувальні таблиці термометрів опору

Температура, °С	Опір, Ом		
	гр. 23	гр. 21	гр. 50М
-260		0,187	
-250		0,470	
-200		7,950	
-150		17,847	
-100		27,440	
-90		29,330	
-80		31,210	
-70		33,080	
-60		34,940	
-50	41,710	36,800	39,345
-45	42,840		40,410
-40	43,970	38,650	41,475
-35	45,100		42,540
-30	46,230	40,500	43,610
-25	47,360		44,675
-20	48,480	42,340	45,740
-15	49,610		46,805
-10	50,740	44,170	47,870
-5	51,870		48,935
0	53,000	46,000	50,000
5	54,130	47,824	51,065
10	55,260		52,130
15	56,390		53,195
20	57,520	49,643	54,260
25	58,650		55,325
30	59,770	51,450	56,390
35	60,900		57,460
40	62,030	53,264	58,525
45	63,160		59,590
50	64,290	55,060	60,655
55	65,420		61,720
60	66,550	56,862	62,785
65	67,680		63,850
70	68,810	58,653	64,915
75	69,930		65,980
80	71,060	60,438	67,045
85	72,190		68,110
90	73,320	62,210	69,175
95	74,450		70,240
100	75,580	63,992	71,310
105	76,710		72,375
110	77,840	65,761	73,440
115	78,970		74,505
120	80,090	67,524	75,570
125	81,320		76,635

130	82,350	69,282	77,700
135	83,480		78,765
140	84,610	71,030	79,830
145	85,740		80,895
150	86,870	72,782	81,960
155	88,000		83,025
160	89,130	74,523	84,095
165	90,250		85,160
170	91,380	76,259	86,225
175	92,510		87,290
180	93,640	77,990	88,355
185			89,420
190		79,715	90,485
195			91,550
200		81,435	92,615
210		83,150	
220		84,859	
230		86,562	
240		88,262	
250		89,960	
260		91,642	
270		93,330	
280		95,001	
290		96,680	
300		98,338	
350		106,600	
400		114,720	
450		122,700	
500		130,550	
550		138,270	
600		145,850	
650		153,300	
700		160,508	
750		167,656	
800		174,671	
850		181,549	
900		188,293	
950		194,902	
1000		201,377	

Додаток Б
Градувальні таблиці термоелектричних термометрів

Хромель-копелева термопара (тип L)

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Термо ЕРС, мВ									
-20	-1,27	-1,35	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
-0	0	-0,06	-0,13	-0,19	0,26	-0,32	-0,38	0,45	-0,51	-0,58
+0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,93
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,23	14,33	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38

Хромель-алюмелева термопара (тип К)

Термо ЕРС, мВ

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366
470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644

200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366
470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905
600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330
610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755
620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179
630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602
640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025
650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447
660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869
670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289
680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710
690	28.710	28.752	28.794	28.835	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129
700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.338	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548
710	29.548	29.589	29.631	29.673	29.715	29.757	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965
720	29.965	30.007	30.049	30.090	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.382
730	30.382	30.424	30.466	30.507	30.549	30.590	30.632	30.674	30.715	30.757	30.798
740	30.798	30.840	30.881	30.923	30.964	31.006	31.047	31.089	31.130	31.172	31.213
750	31.213	31.255	31.296	31.338	31.379	31.421	31.462	31.504	31.545	31.586	31.628
760	31.628	31.669	31.710	31.752	31.793	31.834	31.876	31.917	31.958	32.000	32.041
770	32.041	32.082	32.124	32.165	32.206	32.247	32.289	32.330	32.371	32.412	32.453
780	32.453	32.495	32.536	32.577	32.618	32.659	32.700	32.742	32.783	32.824	32.865
790	32.865	32.906	32.947	32.988	33.029	33.070	33.111	33.152	33.193	33.234	33.275

800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644	33.685
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.848	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053	34.093
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460	34.501
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.826	34.867	34.908
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273	35.313
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677	35.718
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484	36.524
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885	36.925
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286	37.326
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686	37.726
910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455	40.494
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.256	47.293	47.330	47.367
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436	48.473
1190	48.473	48.509	48.546	48.582	48.619	48.656	48.692	48.729	48.765	48.802	48.838
1200	48.838	48.875	48.911	48.948	48.984	49.021	49.057	49.093	49.130	49.166	49.202
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529	49.565
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890	49.926
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250	50.286
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608	50.644
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965	51.000
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320	51.355
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673	51.708
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025	52.060
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375	52.410
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.654	52.689	52.724	52.759
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071	53.106
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417	53.451
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761	53.795
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104	54.138
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445	54.479
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785	54.819
1370	54.819	54.852	54.886								

Платинородій-платинова термопара (тип S)

Термо ЕРМ, мВ											
Температура °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50	-0,226										
-40	-0,188	-0,192	-0,196	-0,200	-0,204	-0,208	-0,211	-0,215	-0,219	-0,223	-0,226
-30	-0,145	-0,150	-0,154	-0,158	-0,163	-0,167	-0,171	-0,175	-0,180	-0,184	-0,188
-20	-0,100	-0,105	-0,109	-0,114	-0,119	-0,123	-0,128	-0,132	-0,137	-0,141	-0,145
-10	-0,051	-0,056	-0,061	-0,066	-0,071	-0,076	-0,081	-0,086	-0,091	-0,095	-0,100
0	0,000	-0,005	-0,011	-0,016	-0,021	-0,026	-0,031	-0,036	-0,041	-0,046	-0,051
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,021	0,027	0,032	0,038	0,043	0,049	0,054
10	0,054	0,060	0,065	0,071	0,077	0,082	0,088	0,094	0,100	0,105	0,111
20	0,111	0,117	0,123	0,129	0,135	0,141	0,147	0,153	0,159	0,165	0,171
30	0,171	0,177	0,183	0,189	0,195	0,201	0,207	0,214	0,220	0,226	0,232
40	0,232	0,239	0,245	0,251	0,258	0,264	0,271	0,277	0,284	0,290	0,296
50	0,296	0,303	0,310	0,316	0,323	0,329	0,336	0,343	0,349	0,356	0,363
60	0,363	0,369	0,376	0,383	0,390	0,397	0,403	0,410	0,417	0,424	0,431
70	0,431	0,438	0,445	0,452	0,459	0,466	0,473	0,480	0,487	0,494	0,501
80	0,501	0,508	0,516	0,523	0,530	0,537	0,544	0,552	0,559	0,566	0,573
90	0,573	0,581	0,588	0,595	0,603	0,610	0,618	0,625	0,632	0,640	0,647
100	0,647	0,655	0,662	0,670	0,677	0,685	0,693	0,700	0,708	0,715	0,723
110	0,723	0,731	0,738	0,746	0,754	0,761	0,769	0,777	0,785	0,792	0,800
120	0,800	0,808	0,816	0,824	0,832	0,839	0,847	0,855	0,863	0,871	0,879
130	0,879	0,887	0,895	0,903	0,911	0,919	0,927	0,935	0,943	0,951	0,959
140	0,959	0,967	0,976	0,984	0,992	1,000	1,008	1,016	1,025	1,033	1,041
150	1,041	1,049	1,058	1,066	1,074	1,082	1,091	1,099	1,107	1,116	1,124
160	1,124	1,132	1,141	1,149	1,158	1,166	1,175	1,183	1,191	1,200	1,208
170	1,208	1,217	1,225	1,234	1,242	1,251	1,260	1,268	1,277	1,285	1,294
180	1,294	1,303	1,311	1,320	1,329	1,337	1,346	1,355	1,363	1,372	1,381
190	1,381	1,389	1,398	1,407	1,416	1,424	1,433	1,442	1,451	1,460	1,469
200	1,469	1,477	1,486	1,495	1,504	1,513	1,522	1,531	1,540	1,549	1,558
210	1,558	1,567	1,575	1,584	1,593	1,602	1,611	1,620	1,629	1,639	1,648
220	1,648	1,657	1,666	1,675	1,684	1,693	1,702	1,711	1,720	1,729	1,739
230	1,739	1,748	1,757	1,766	1,775	1,784	1,794	1,803	1,812	1,821	1,831

Термо ЕРМ, мВ											
Температура °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
240	1,831	1,840	1,849	1,858	1,868	1,877	1,886	1,895	1,905	1,914	1,923
250	1,923	1,933	1,942	1,951	1,961	1,970	1,980	1,989	1,998	2,008	2,017
260	2,017	2,027	2,036	2,046	2,055	2,064	2,074	2,083	2,093	2,102	2,112
270	2,112	2,121	2,131	2,140	2,150	2,159	2,169	2,179	2,188	2,198	2,207
280	2,207	2,217	2,226	2,236	2,246	2,255	2,265	2,275	2,284	2,294	2,304
290	2,304	2,313	2,323	2,333	2,342	2,352	2,362	2,371	2,381	2,391	2,401
300	2,401	2,410	2,420	2,430	2,440	2,449	2,459	2,469	2,479	2,488	2,498
310	2,498	2,508	2,518	2,528	2,538	2,547	2,557	2,567	2,577	2,587	2,597
320	2,597	2,607	2,617	2,626	2,636	2,646	2,656	2,666	2,676	2,686	2,696
330	2,696	2,706	2,716	2,726	2,736	2,746	2,756	2,766	2,776	2,786	2,796
340	2,796	2,806	2,816	2,826	2,836	2,846	2,856	2,866	2,876	2,886	2,896
350	2,896	2,906	2,916	2,926	2,937	2,947	2,957	2,967	2,977	2,987	2,997
360	2,997	3,007	3,018	3,028	3,038	3,048	3,058	3,068	3,079	3,089	3,099
370	3,099	3,109	3,119	3,130	3,140	3,150	3,160	3,171	3,181	3,191	3,201
380	3,201	3,212	3,222	3,232	3,242	3,253	3,263	3,273	3,284	3,294	3,304
390	3,304	3,315	3,325	3,335	3,346	3,356	3,366	3,377	3,387	3,397	3,408
400	3,408	3,418	3,428	3,439	3,449	3,460	3,470	3,480	3,491	3,501	3,512
410	3,512	3,522	3,533	3,543	3,553	3,564	3,574	3,585	3,595	3,606	3,616
420	3,616	3,627	3,637	3,648	3,658	3,669	3,679	3,690	3,700	3,711	3,721
430	3,721	3,732	3,742	3,753	3,764	3,774	3,785	3,795	3,806	3,816	3,827
440	3,827	3,838	3,848	3,859	3,869	3,880	3,891	3,901	3,912	3,922	3,933
450	3,933	3,944	3,954	3,965	3,976	3,986	3,997	4,008	4,018	4,029	4,040
460	4,040	4,050	4,061	4,072	4,083	4,093	4,104	4,115	4,125	4,136	4,147
470	4,147	4,158	4,168	4,179	4,190	4,201	4,211	4,222	4,233	4,244	4,255
480	4,255	4,265	4,276	4,287	4,298	4,309	4,319	4,330	4,341	4,352	4,363
490	4,363	4,373	4,384	4,395	4,406	4,417	4,428	4,439	4,449	4,460	4,471
500	4,471	4,482	4,493	4,504	4,515	4,526	4,537	4,548	4,558	4,569	4,580
510	4,580	4,591	4,602	4,613	4,624	4,635	4,646	4,657	4,668	4,679	4,690
520	4,690	4,701	4,712	4,723	4,734	4,745	4,756	4,767	4,778	4,789	4,800
530	4,800	4,811	4,822	4,833	4,844	4,855	4,866	4,877	4,888	4,899	4,910
540	4,910	4,922	4,933	4,944	4,955	4,966	4,977	4,988	4,999	5,010	5,021
550	5,021	5,033	5,044	5,055	5,066	5,077	5,088	5,099	5,111	5,122	5,133

Термо ЕРМ, мВ											
Температура °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
560	5,133	5,144	5,155	5,166	5,178	5,189	5,200	5,211	5,222	5,234	5,245
570	5,245	5,256	5,267	5,278	5,290	5,301	5,312	5,323	5,335	5,346	5,357
580	5,357	5,368	5,380	5,391	5,402	5,414	5,425	5,436	5,447	5,459	5,470
590	5,470	5,481	5,493	5,504	5,515	5,527	5,538	5,549	5,561	5,572	5,583
600	5,583	5,595	5,606	5,618	5,629	5,640	5,652	5,663	5,674	5,686	5,697
610	5,697	5,709	5,720	5,731	5,743	5,754	5,766	5,777	5,789	5,800	5,811
620	5,811	5,823	5,834	5,846	5,857	5,869	5,880	5,892	5,903	5,915	5,926
630	5,926	5,938	5,949	5,961	5,972	5,984	5,995	6,007	6,018	6,030	6,041
640	6,041	6,053	6,065	6,076	6,088	6,099	6,111	6,122	6,134	6,146	6,157
650	6,157	6,169	6,180	6,192	6,204	6,215	6,227	6,238	6,250	6,262	6,273
660	6,273	6,285	6,297	6,308	6,320	6,332	6,343	6,355	6,367	6,378	6,390
670	6,390	6,402	6,413	6,425	6,437	6,448	6,460	6,472	6,484	6,495	6,507
680	6,507	6,519	6,531	6,542	6,554	6,566	6,578	6,589	6,601	6,613	6,625
690	6,625	6,636	6,648	6,660	6,672	6,684	6,695	6,707	6,719	6,731	6,743
700	6,743	6,755	6,766	6,778	6,790	6,802	6,814	6,826	6,837	6,849	6,861
710	6,861	6,873	6,885	6,897	6,909	6,921	6,933	6,944	6,956	6,968	6,980
720	6,980	6,992	7,004	7,016	7,028	7,040	7,052	7,064	7,076	7,088	7,100
730	7,100	7,112	7,124	7,136	7,148	7,160	7,172	7,184	7,196	7,208	7,220
740	7,220	7,232	7,244	7,256	7,268	7,280	7,292	7,304	7,316	7,328	7,340
750	7,340	7,352	7,364	7,376	7,389	7,401	7,413	7,425	7,437	7,449	7,461
760	7,461	7,473	7,485	7,498	7,510	7,522	7,534	7,546	7,558	7,570	7,583
770	7,583	7,595	7,607	7,619	7,631	7,643	7,656	7,668	7,680	7,692	7,704
780	7,704	7,717	7,729	7,741	7,753	7,766	7,778	7,790	7,802	7,815	7,827
790	7,827	7,839	7,851	7,864	7,876	7,888	7,901	7,913	7,925	7,937	7,950
800	7,950	7,962	7,974	7,987	7,999	8,011	8,024	8,036	8,048	8,061	8,073
810	8,073	8,085	8,098	8,110	8,123	8,135	8,147	8,160	8,172	8,185	8,197
820	8,197	8,209	8,222	8,234	8,247	8,259	8,272	8,284	8,296	8,309	8,321
830	8,321	8,334	8,346	8,359	8,371	8,384	8,396	8,409	8,421	8,434	8,446
840	8,446	8,459	8,471	8,484	8,496	8,509	8,521	8,534	8,546	8,559	8,571
850	8,571	8,584	8,596	8,609	8,622	8,634	8,647	8,659	8,672	8,685	8,697
860	8,697	8,710	8,722	8,735	8,748	8,760	8,773	8,785	8,798	8,811	8,823
870	8,823	8,836	8,849	8,861	8,874	8,887	8,899	8,912	8,925	8,937	8,950

Термо ЕРМ, мВ											
Температура °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
880	8,950	8,963	8,975	8,988	9,001	9,014	9,026	9,039	9,052	9,064	9,077
890	9,077	9,090	9,103	9,115	9,128	9,141	9,154	9,166	9,179	9,192	9,205
900	9,205	9,218	9,230	9,243	9,256	9,269	9,282	9,294	9,307	9,320	9,333
910	9,333	9,346	9,359	9,371	9,384	9,397	9,410	9,423	9,436	9,449	9,461
920	9,461	9,474	9,487	9,500	9,513	9,526	9,539	9,552	9,565	9,577	9,590
930	9,590	9,603	9,616	9,629	9,642	9,655	9,668	9,681	9,694	9,707	9,720
940	9,720	9,733	9,746	9,759	9,772	9,785	9,798	9,811	9,824	9,837	9,850
950	9,850	9,863	9,876	9,889	9,902	9,915	9,928	9,941	9,954	9,967	9,980
960	9,980	9,993	10,006	10,019	10,032	10,045	10,059	10,072	10,085	10,098	10,111
970	10,111	10,124	10,137	10,150	10,163	10,176	10,190	10,203	10,216	10,229	10,242
980	10,242	10,255	10,268	10,282	10,295	10,308	10,321	10,334	10,347	10,361	10,374
990	10,374	10,387	10,400	10,413	10,427	10,440	10,453	10,466	10,479	10,493	10,506
1000	10,506	10,519	10,532	10,546	10,559	10,572	10,585	10,599	10,612	10,625	10,638
1010	10,638	10,652	10,665	10,678	10,692	10,705	10,718	10,731	10,745	10,758	10,771
1020	10,771	10,785	10,798	10,811	10,825	10,838	10,851	10,865	10,878	10,891	10,905
1030	10,905	10,918	10,931	10,945	10,958	10,972	10,985	10,998	11,012	11,025	11,038
1040	11,038	11,052	11,065	11,079	11,092	11,106	11,119	11,132	11,146	11,159	11,173
1050	11,173	11,186	11,200	11,213	11,226	11,240	11,253	11,267	11,280	11,294	11,307
1060	11,307	11,321	11,334	11,348	11,361	11,375	11,388	11,402	11,415	11,429	11,442
1070	11,442	11,456	11,469	11,483	11,496	11,510	11,524	11,537	11,551	11,564	11,578
1080	11,578	11,591	11,605	11,618	11,632	11,646	11,659	11,673	11,686	11,700	11,714
1090	11,714	11,727	11,741	11,754	11,768	11,782	11,795	11,809	11,822	11,836	11,850
1100	11,850	11,863	11,877	11,891	11,904	11,918	11,931	11,945	11,959	11,972	11,986
1110	11,986	12,000	12,013	12,027	12,041	12,054	12,068	12,082	12,096	12,109	12,123
1120	12,123	12,137	12,150	12,164	12,178	12,191	12,205	12,219	12,233	12,246	12,260
1130	12,260	12,274	12,288	12,301	12,315	12,329	12,342	12,356	12,370	12,384	12,397
1140	12,397	12,411	12,425	12,439	12,453	12,466	12,480	12,494	12,508	12,521	12,535
1150	12,535	12,549	12,563	12,577	12,590	12,604	12,618	12,632	12,646	12,659	12,673
1160	12,673	12,687	12,701	12,715	12,729	12,742	12,756	12,770	12,784	12,798	12,812
1170	12,812	12,825	12,839	12,853	12,867	12,881	12,895	12,909	12,922	12,936	12,950
1180	12,950	12,964	12,978	12,992	13,006	13,019	13,033	13,047	13,061	13,075	13,089
1190	13,089	13,103	13,117	13,131	13,145	13,158	13,172	13,186	13,200	13,214	13,228

Термо ЕРМ, мВ											
Температура °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1200	13,228	13,242	13,256	13,270	13,284	13,298	13,311	13,325	13,339	13,353	13,367
1210	13,367	13,381	13,395	13,409	13,423	13,437	13,451	13,465	13,479	13,493	13,507
1220	13,507	13,521	13,535	13,549	13,563	13,577	13,590	13,604	13,618	13,632	13,646
1230	13,646	13,660	13,674	13,688	13,702	13,716	13,730	13,744	13,758	13,772	13,786
1240	13,786	13,800	13,814	13,828	13,842	13,856	13,870	13,884	13,898	13,912	13,926
1250	13,926	13,940	13,954	13,968	13,982	13,996	14,010	14,024	14,038	14,052	14,066
1260	14,066	14,081	14,095	14,109	14,123	14,137	14,151	14,165	14,179	14,193	14,207
1270	14,207	14,221	14,235	14,249	14,263	14,277	14,291	14,305	14,319	14,333	14,347
1280	14,347	14,361	14,375	14,390	14,404	14,418	14,432	14,446	14,460	14,474	14,488
1290	14,488	14,502	14,516	14,530	14,544	14,558	14,572	14,586	14,601	14,615	14,629
1300	14,629	14,643	14,657	14,671	14,685	14,699	14,713	14,727	14,741	14,755	14,770
1310	14,770	14,784	14,798	14,812	14,826	14,840	14,854	14,868	14,882	14,896	14,911
1320	14,911	14,925	14,939	14,953	14,967	14,981	14,995	15,009	15,023	15,037	15,052
1330	15,052	15,066	15,080	15,094	15,108	15,122	15,136	15,150	15,164	15,179	15,193
1340	15,193	15,207	15,221	15,235	15,249	15,263	15,277	15,291	15,306	15,320	15,334
1350	15,334	15,348	15,362	15,376	15,390	15,404	15,419	15,433	15,447	15,461	15,475
1360	15,475	15,489	15,503	15,517	15,531	15,546	15,560	15,574	15,588	15,602	15,616
1370	15,616	15,630	15,645	15,659	15,673	15,687	15,701	15,715	15,729	15,743	15,758
1380	15,758	15,772	15,786	15,800	15,814	15,828	15,842	15,856	15,871	15,885	15,899
1390	15,899	15,913	15,927	15,941	15,955	15,969	15,984	15,998	16,012	16,026	16,040
1400	16,040	16,054	16,068	16,082	16,097	16,111	16,125	16,139	16,153	16,167	16,181
1410	16,181	16,196	16,210	16,224	16,238	16,252	16,266	16,280	16,294	16,309	16,323
1420	16,323	16,337	16,351	16,365	16,379	16,393	16,407	16,422	16,436	16,450	16,464
1430	16,464	16,478	16,492	16,506	16,520	16,534	16,549	16,563	16,577	16,591	16,605
1440	16,605	16,619	16,633	16,647	16,662	16,676	16,690	16,704	16,718	16,732	16,746
1450	16,746	16,760	16,774	16,789	16,803	16,817	16,831	16,845	16,859	16,873	16,887
1460	16,887	16,901	16,915	16,930	16,944	16,958	16,972	16,986	17,000	17,014	17,028
1470	17,028	17,042	17,056	17,071	17,085	17,099	17,113	17,127	17,141	17,155	17,169
1480	17,169	17,183	17,197	17,211	17,225	17,240	17,254	17,268	17,282	17,296	17,310
1490	17,310	17,324	17,338	17,352	17,366	17,380	17,394	17,408	17,423	17,437	17,451
1500	17,451	17,465	17,479	17,493	17,507	17,521	17,535	17,549	17,563	17,577	17,591
1510	17,591	17,605	17,619	17,633	17,647	17,661	17,676	17,690	17,704	17,718	17,732

Термо ЕРМ, мВ											
Температура °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1520	17,732	17,746	17,760	17,774	17,788	17,802	17,816	17,830	17,844	17,858	17,872
1530	17,872	17,886	17,900	17,914	17,928	17,942	17,956	17,970	17,984	17,998	18,012
1540	18,012	18,026	18,040	18,054	18,068	18,082	18,096	18,110	18,124	18,138	18,152
1550	18,152	18,166	18,180	18,194	18,208	18,222	18,236	18,250	18,264	18,278	18,292
1560	18,292	18,306	18,320	18,334	18,348	18,362	18,376	18,390	18,404	18,417	18,431
1570	18,431	18,445	18,459	18,473	18,487	18,501	18,515	18,529	18,543	18,557	18,571
1580	18,571	18,585	18,599	18,613	18,627	18,640	18,654	18,668	18,682	18,696	18,710
1590	18,710	18,724	18,738	18,752	18,766	18,779	18,793	18,807	18,821	18,835	18,849
1600	18,849	18,863	18,877	18,891	18,904	18,918	18,932	18,946	18,960	18,974	18,988
1610	18,988	19,002	19,015	19,029	19,043	19,057	19,071	19,085	19,098	19,112	19,126
1620	19,126	19,140	19,154	19,168	19,181	19,195	19,209	19,223	19,237	19,250	19,264
1630	19,264	19,278	19,292	19,306	19,319	19,333	19,347	19,361	19,375	19,388	19,402
1640	19,402	19,416	19,430	19,444	19,457	19,471	19,485	19,499	19,512	19,526	19,540
1650	19,540	19,554	19,567	19,581	19,595	19,609	19,622	19,636	19,650	19,663	19,677
1660	19,677	19,691	19,705	19,718	19,732	19,746	19,759	19,773	19,787	19,800	19,814
1670	19,814	19,828	19,841	19,855	19,869	19,882	19,896	19,910	19,923	19,937	19,951
1680	19,951	19,964	19,978	19,992	20,005	20,019	20,032	20,046	20,060	20,073	20,087
1690	20,087	20,100	20,114	20,127	20,141	20,154	20,168	20,181	20,195	20,208	20,222
1700	20,222	20,235	20,249	20,262	20,275	20,289	20,302	20,316	20,329	20,342	20,356
1710	20,356	20,369	20,382	20,396	20,409	20,422	20,436	20,449	20,462	20,475	20,488
1720	20,488	20,502	20,515	20,528	20,541	20,554	20,567	20,581	20,594	20,607	20,620
1730	20,620	20,633	20,646	20,659	20,672	20,685	20,698	20,711	20,724	20,736	20,749
1740	20,749	20,762	20,775	20,788	20,801	20,813	20,826	20,839	20,852	20,864	20,877
1750	20,877	20,890	20,902	20,915	20,928	20,940	20,953	20,965	20,978	20,990	21,003
1760	21,003	21,015	21,027	21,040	21,052	21,065	21,077	21,089	21,101		

Додаток В

Визначення параметрів регулятора за видами перехідних процесів

Вид п.п. Тип регулятора	Аперіодичний	Із 20-відсотковим перерегулюванням	Із 40-відсотковим перерегулюванням
П	$K_p = \frac{0,3T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$	$K_p = \frac{0,7T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$	$K_p = \frac{0,9T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$
І	$\varepsilon = \frac{1}{4,5 \cdot K_{об} \cdot T_{об}}$	$\varepsilon = \frac{1}{1,7 \cdot K_{об} \cdot T_{об}}$	$\varepsilon = \frac{1}{1,7 \cdot K_{об} \cdot T_{об}}$
ПІ	$K_p = \frac{0,6T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$ $T_i = 0,6 \cdot T_{об}$	$K_p = \frac{0,7T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$ $T_i = 0,7 \cdot T_{об}$	$K_p = \frac{T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$ $T_i = 1 \cdot T_{об}$
ПІД	$K_p = \frac{0,95T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$ $T_i = 2,4 \cdot T_{об}$ $T_d = 0,4 \cdot T_{об}$	$K_p = \frac{1,2T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$ $T_i = 2 \cdot T_{об}$ $T_d = 0,4 \cdot T_{об}$	$K_p = \frac{0,95T_{об}}{K_{об} \cdot \tau_{об}}$ $T_{и} = 1,3 \cdot T_{об}$ $T_d = 0,5 \cdot T_{об}$

Навчальне видання
(українською мовою)

Овчинникова Ірина Анатоліївна

АВТОМАТИЗАЦІЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Лабораторний практикум
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальностей «Металургія»,
освітньо-професійних програм
«Металургія чорних металів», «Металургія кольорових металів»,
«Обробка металів тиском»

Рецензент *Ю.В. Мосейко*
Відповідальний за випуск *М.Ю. Пазюк*
Коректор *І.А. Овчинникова*