

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

КОНТРОЛЬ ТА КЕРУВАННЯ ХІМІКО- ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Лабораторний практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра заочної форми навчання
за освітньою програмою «Хімічні технології та інженерія»
спеціальності 161/G1 Хімічні технології та інженерія

Укладачі: С.Г. Бондаренко, О. В. Сангінова, А. М. Шахновський

Електронне мережеве навчальне видання

Київ

КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО

2026

УДК 66.011:681.5(075.8)

Б81

Укладачі: *Бондаренко Сергій Григорович*, канд. техн. наук, доц.
Сангінова Ольга Вікторівна, канд. техн. наук, доц.
Шахновський Аркадій Маркусович, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Лістовицький Л.К.*, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів ННІ енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Феденко Ю.М.*, канд. техн. наук, доц.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 03. 04. 2026 р.)
за поданням вченої ради хіміко-технологічного факультету
(протокол № 3 від 30. 03. 2026 р.)

Контроль та керування хіміко-технологічними процесами [Електронний
81 Б ресурс] : практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра заочн.
Форми навчання за освіт. програмою «Хімічні технології та інженерія» спец.
161/G1 Хімічні технології та інженерія / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. Г.
Бондаренко, О. В. Сангінова, А. М. Шахновський. – Електрон. текст. дані
(1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 112 с.

Електронне мережне навчальне видання розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 161/G1 Хімічні технології та інженерія. Навчальна дисципліна закладає основу професійних знань щодо приладів та технічних засобів контролю, регулювання та керування технологічними процесами. Дисципліна «Контроль та керування хіміко-технологічними процесами» відноситься до циклу професійної підготовки і є базовою у підготовці бакалаврів вказаної спеціальності. Представлені матеріали мають за мету закріплення знань та набуття вміння правильно обирати параметри контролю та регулювання, обґрунтовано обирати прилади контролю та керування для схем автоматизації технологічних процесів. У даному виданні наведений перелік тем, які здобувач повинен вивчити, та матеріали, на основі яких виконуються лабораторні роботи.

УДК 66.011:681.5(075.8)

Реєстр. № НП xxxxxxxx. Обсяг 5,1 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

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

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

Зміст

Передмова.....	5
Загальні відомості про системи автоматичного контролю та керування.....	7
Лабораторна робота № 1. Перетворювачі сигналів.....	11
1.1. Основні теоретичні відомості	11
1.2. Опис лабораторної установки	23
1.3. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи	25
1.4. Послідовність виконання роботи	25
1.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту	27
1.6. Контрольні запитання та завдання до самоперевірки	28
Лабораторна робота № 2. Виконавчі механізми і регулюючі органи	30
2.1. Основні теоретичні відомості	30
2.2. Опис лабораторної установки	49
2.3. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи	50
2.4. Послідовність виконання роботи.....	50
2.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту	51
2.6. Контрольні запитання та завдання до самоперевірки	53
Лабораторна робота № 3. Релейне регулювання	56
3.1. Основні теоретичні відомості	56
3.2. Опис лабораторної установки	70
3.3. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи	72
3.4. Послідовність виконання роботи.....	72
3.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту	74
3.6. Контрольні запитання та завдання до самоперевірки	76

Лабораторна робота № 4. Аналогово-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі сигналів	78
4.1. Основні теоретичні відомості	78
4.2. Опис лабораторної установки	84
4.3. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи	85
4.4. Послідовність виконання роботи.....	86
4.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту	87
4.6. Контрольні запитання та завдання до самоперевірки	88
Список рекомендованої літератури	90
Додаток А. Заходи безпеки під час виконання лабораторних робіт....	93
Додаток Б. Градувальні таблиці стандартних термопар	97
Додаток В. Індивідуальні завдання до лабораторної роботи № 1	106
Додаток Г. Індивідуальні завдання до лабораторної роботи № 2	107
Додаток Д. Закони неперервного регулювання	108
Додаток Є. Індивідуальні завдання до лабораторної роботи № 3	111
Додаток Ж. Індивідуальні завдання до лабораторної роботи № 4 ...	112

Передмова

Широке впровадження автоматизованих систем контролю та керування в хімічну технологію потребує від професіоналів вивчення технічних засобів, які забезпечують якісну роботу локальних та комп'ютерно-інтегрованих систем керування. Здобувачі першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161/G1 «Хімічні технології та інженерія» мають сформувати в процесі навчання здатність обирати і використовувати відповідне обладнання, інструменти та методи для вирішення складних задач контролю та керування технологічних процесів хімічних виробництв.

Навчальний посібник розроблено відповідно до освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів «Хімічні технології та інженерія» для здобувачів заочної форми навчання і є складовою частиною дисципліни «Контроль та керування хіміко-технологічними процесами». Навчальна дисципліна є базовою у підготовці бакалаврів за вказаною освітньою програмою; у даній дисципліні детально розглядаються засоби систем контролю та керування, у тому числі й цифрові, та структура автоматизованих систем керування технологічними процесами.

Самостійна робота над матеріалом є основним видом занять для здобувачів заочної форми навчання. З цією метою в посібнику наведені загальні відомості про системи автоматичного контролю та керування, мета та завдання до кожної лабораторної роботи, стисло викладений необхідний теоретичний матеріал та зазначено літературу для поглибленого вивчення дисципліни, подано описи експериментальних установок для виконання лабораторних робіт, надано порядок виконання робіт та обробки результатів експериментів, перелічено вимоги до оформлення звітів та порядку їх подання, наведено приклади оформлення результатів лабораторних робіт, сформульовано контрольні питання для самопідготовки здобувачів вищої

освіти та визначені засоби безпеки, яких слід дотримуватися при виконанні робіт.

Представлений лабораторний практикум має за мету закріплення на практиці знань та вмінь, отриманих в процесі вивчення дисципліни «Контроль та керування хіміко-технологічними процесами», а також сприяє набуттю досвіду з обрання параметрів контролю та регулювання, вибору приладів контролю та керування для схем автоматизації технологічних процесів, визначення метрологічних характеристик приладів контролю та керування.

Загальні відомості про системи автоматичного контролю та керування

Широке впровадження автоматизованих систем контролю та керування в хімічну технологію потребує від професіоналів вивчення технічних засобів, які забезпечують якісну роботу локальних та комп'ютерно-інтегрованих систем керування. Сучасний рівень автоматизації потребує від здобувачів професійної підготовки з питань побудови схем автоматизації та їх застосування у виробництві.

Автоматичний контроль – це процес безперервного або періодичного вимірювання, перетворення, передавання та реєстрації параметрів технологічного процесу без безпосереднього втручання оператора в сам процес вимірювання. *Автоматичне керування* – це цілеспрямований вплив на об'єкт керування, що здійснюється технічними засобами за заданим алгоритмом без участі людини в поточному формуванні керуючих дій. У такій системі всі функції порівняння, прийняття рішення та формування впливу реалізуються автоматично.

Автоматизоване керування – це керування технологічним процесом із використанням технічних засобів автоматизації за обов'язкової участі людини-оператора. У цьому випадку частина функцій (вибір режиму роботи, зміна уставок, аналіз аварійних ситуацій, прийняття оптимізаційних рішень) покладається на оператора, тоді як вимірювання, обробка сигналів і реалізація локальних регулюючих впливів виконуються автоматично.

Отже, ключова відмінність між «автоматизованим» і «автоматичним» керуванням полягає в ступені участі людини: в *автоматичних* системах керування процес відбувається без участі оператора, в той час як в *автоматизованих* системах людина входить до контуру керування як активний елемент системи прийняття рішень.

У хіміко-технологічних процесах переважно застосовується саме автоматизоване керування, оскільки виробництва характеризуються складністю, багатозв'язністю параметрів, можливістю виникнення нестандартних і аварійних ситуацій, що потребують інженерного аналізу та відповідальних рішень оператора або технолога.

Об'єкт керування (регулювання) – це технологічна установка, апарат, агрегат, машина тощо, в якій необхідно виконати мету керування (регулювання). Для позначення об'єкта керування часто використовують аббревіатуру ТОК (технологічний об'єкт керування).

Об'єктами керування в хімічній технології можуть бути реактори, теплообмінники, ректифікаційні колони, сушарки, абсорбери, насоси, трубопровідні системи та інші технологічні апарати. Параметрами контролю зазвичай виступають температура, тиск, витрата, рівень, концентрація компонентів, показник рН, вологість, склад газових сумішей тощо.

Хіміко-технологічні процеси мають низку специфічних особливостей, серед яких:

- інерційність і запізнення реакції системи;
- нелінійність характеристик;
- багатозв'язність параметрів;
- наявність випадкових збурень;
- вибухо- та пожежонебезпечність середовищ.

Ці фактори зумовлюють підвищені вимоги до точності вимірювань, швидкодії регуляторів, надійності виконавчих механізмів та правильного вибору алгоритмів керування.

До основних завдань автоматизації хіміко-технологічних процесів належать:

- підтримання стабільності технологічних параметрів;

- забезпечення якості готової продукції;
- зменшення витрат сировини та енергії;
- підвищення рівня безпеки виробництва;
- зниження впливу людського фактора;
- оперативна діагностика та запобігання аваріям.

Автоматизація дозволяє перейти від ручного керування до систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень, що особливо актуально в умовах цифровізації промисловості.

Сукупність технічних засобів, програмного забезпечення та алгоритмів, що забезпечують вимірювання, передавання, обробку інформації та формування керуючих впливів за участі або без участі людини, утворює *систему автоматичного (або автоматизованого) керування*.

Типова система керування технологічним процесом включає такі основні елементи:

- Первинний вимірювальний перетворювач (датчик) – сприймає фізичну величину та перетворює її у сигнал (електричний, пневматичний, цифровий).
- Вторинний прилад призначений для відображення виміряної інформації.
- Регулятор – здійснює порівняння виміряного значення із заданим (уставкою) та формує регулюючий (керуючий) вплив відповідно до закладеного алгоритму (закону керування).
- Виконавчий механізм – реалізує керуючий вплив на об'єкт через регулюючий орган (регулюючий клапан, частотний перетворювач електродвигуна, заслінка, дозувальний пристрій тощо).

У замкнених системах використовується принцип зворотного зв'язку, коли інформація про фактичне значення регульованого параметра повертається до регулятора для корекції керуючого впливу. Наявність

зворотного зв'язку забезпечує підвищення точності, стійкості та завадостійкості системи.

У випадку автоматизованого керування до структури системи також входить оператор (людино-машинний інтерфейс), який здійснює контроль за станом процесу, змінює уставки, аналізує сигнали тривоги та приймає рішення в нестандартних ситуаціях. Таким чином, сучасна система керування хіміко-технологічним процесом є людино-машинною системою, в якій технічні засоби автоматизації та інженер працюють у тісній взаємодії.

Класифікація систем керування. Системи керування класифікують за різними ознаками:

За принципом дії:

- розімкнені (без зворотного зв'язку);
- замкнені (із зворотним зв'язком).

За характером сигналів:

- безперервні (аналогові);
- дискретні.

За функціональним призначенням:

- системи стабілізації;
- системи програмного керування;
- слідкуючі системи керування;
- адаптивні системи.

У сучасній практиці широкого застосування набули мікропроцесорні регулятори, програмовані логічні контролери (PLC), розподілені системи керування (DCS), що забезпечують інтеграцію технологічного обладнання в єдину інформаційно-керуючу мережу підприємства.

Лабораторна робота № 1

Перетворювачі сигналів

Мета та основні завдання роботи. Дослідити роботу перетворювачів сигналів. Ознайомитися з конструкціями та принципом дії електропневматичного та пневмоелектричного перетворювачів і отримати статичні характеристики цього обладнання.

1.1. Основні теоретичні відомості

Як вже зазначалося вище, системи автоматизованого керування технологічними процесами є комплексом технічних і програмних засобів, що забезпечують автоматизацію виробничих операцій з метою підвищення ефективності, безпеки та якості продукції. До їх основних функцій належать безперервний контроль технологічних параметрів, регулювання режимів роботи обладнання, аварійна сигналізація, реєстрація та архівування даних, а також передавання інформації до верхнього рівня керування. Такі системи можуть функціонувати в автоматичному режимі (без участі людини в оперативному керуванні) або в автоматизованому режимі – під контролем оператора.

Для забезпечення коректної роботи системи керування необхідно перетворити фізичні параметри процесу (температуру, тиск, витрату, рівень, концентрацію тощо) у сигнали, придатні для подальшої передачі, обробки та аналізу. Саме цю функцію виконують перетворювачі сигналів.

Первинні перетворювачі сигналів (датчики) безпосередньо сприймають контрольовану фізичну величину та перетворюють її у зручну для вимірювання форму – найчастіше електричний або пневматичний сигнал. Наприклад, термопара генерує термо-ЕРС, пропорційну температурі, а тензометричний датчик формує електричний сигнал залежно від деформації чутливого елемента.

Оскільки сигнали від датчиків можуть мати різну природу, амплітуду та нелінійні характеристики, для їх уніфікації застосовують нормувальні перетворювачі (нормалізатори). Вони перетворюють вхідний сигнал у стандартний діапазон, прийнятий у промисловій автоматизації (наприклад, 0–10 В або 4–20 мА). Нормалізація забезпечує сумісність різних пристроїв і підвищує завадостійкість системи.

Крім того, у схемах автоматизації використовують перетворювачі виду енергії – електропневматичні, пневмоелектричні, частотні та інші. Вони забезпечують узгодження роботи елементів, що функціонують на різних фізичних принципах, наприклад, між електронним контролером і пневматичним виконавчим механізмом.

Первинні перетворювачі призначені для отримання сигналів вимірювальної інформації щодо технологічного параметру у формі, зручній для дистанційної передачі, подальшого перетворення та використання.

Первинні вимірювальні перетворювачі дозволяють отримати інформацію про поточний стан об'єкта контролю та регулювання. Вони забезпечують вимірювання необхідних технологічних параметрів: температури, тиску, рівня, витрати тощо. Характерною особливістю їх є те, що вони встановлюються безпосередньо на об'єкті і взаємодіють з контрольованим середовищем. Рис. 1.1 відображає схему автоматичного контролю технологічного параметру.



Рисунок 1.1 – Місце первинного вимірювального перетворювача у ланцюгу перетворення: ПВП – первинний вимірювальний перетворювач; ВП – вторинний прилад

Первинний вимірювальний перетворювач (ПВП) сприймає вимірюваний фізичний параметр та служить для перетворення вимірюваного параметра в інший фізичний параметр, який зручно передавати лініями зв'язку (наприклад, електричний струм, тиск стисненого повітря тощо).

Вторинний прилад вимірює сигнал, що надходить на його вхід із лінії зв'язку та несе інформацію про значення вимірюваного параметра, і перетворює його у візуальну форму.

На рис. 1.2 показані уніфіковані сигнали Державної системи промислових приладів і засобів автоматизації (ДСП).



Рисунок 1.2 – Місце первинного вимірювального перетворювача у ланцюгу перетворення: ПВП – первинний вимірювальний перетворювач; ВП – вторинний прилад

Раніше ПВП іноді називали **датчик**; проте вихідний сигнал датчика, на відміну від сигналу ПВП, має бути уніфікованим (стандартним) за розміром та формою.

Датчик – конструктивно відокремлений первинний вимірювальний перетворювач, що сприймає зовнішню дію: тиск, температуру, деформацію, частоту, електричну напругу тощо. Датчик сприймає зміну фізичного параметра і перетворює його в стандартний сигнал. Наприклад, термопара сприймає зміну температури, і на виході отримуємо термоЕРС (мВ). Сучасні термопари мають вбудований нормалізатор, який перетворює сигнал у стандартний.

Перетворювачі сигналів – це пристрої, які змінюють один тип сигналу на інший, наприклад, перетворюють пневматичний сигнал в електричний або навпаки, цифровий сигнал – в аналоговий тощо.

Перетворювачі класифікують за місцем розташування, функціональними ознаками та за типом сигналів, які вони перетворюють. На рис. 1.3 показано місце перетворювачів у схемі системи автоматичного регулювання (САР).

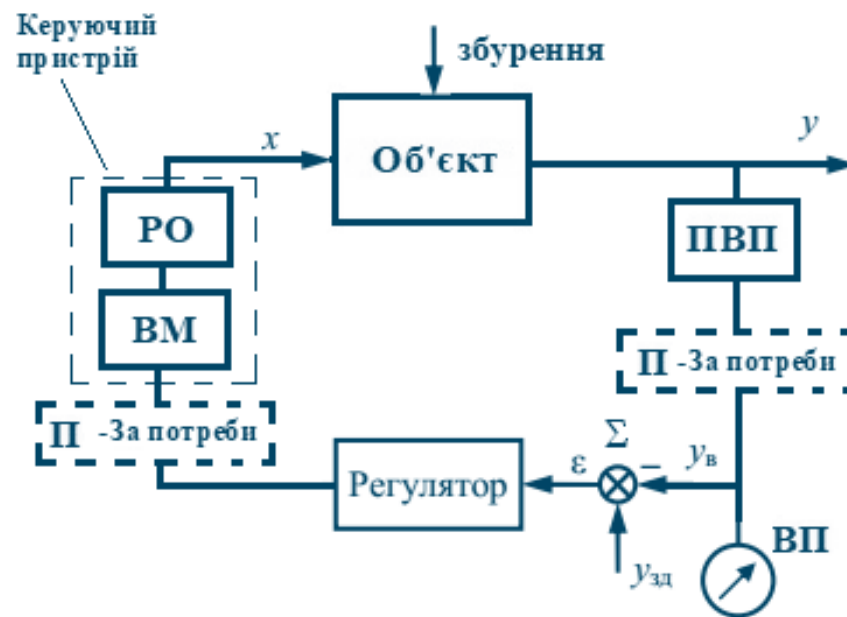


Рисунок 1.3 – Система автоматичного регулювання: ПВП – первинний вимірювальний перетворювач, ВП – вторинний прилад, П – перетворювач, ВМ – виконавчий механізм, РО – регулюючий орган, Σ – суматор, y_{ϵ} – виміряне (поточне) значення, y_{zd} – задане значення, ϵ – сигнал неузгодження

САР дозволяє керувати технологічним процесом без участі людини. Сигнал з об'єкту керування поступає на первинний вимірювальний перетворювач. Далі за необхідності встановлюють перетворювач (наприклад, якщо потрібно перетворити пневматичний сигнал в електричний або навпаки). Виміряне значення відображає вторинний прилад. Суматор здійснює алгебраїчне сумування поточного і заданого значень регулюємої величини з метою визначення неузгодження $\varepsilon = y_{zd} - y_v$.

Виконавчий механізм (ВМ) – елемент, який за сигналом, отриманим від регулятора, переміщує регулювальний орган (РО) і змінює потік речовини або енергії, яка поступає на об'єкт регулювання або виходить з нього.

Для перетворення вихідних сигналів первинних перетворювачів в уніфікований сигнал використовуються **нормувальні перетворювачі (нормалізатори)**.

Сучасні вимірювальні прилади не тільки перетворюють фізико-хімічні величини в електричні (гидравлічні, пневматичні) сигнали, але і перераховують їх за власними алгоритмами. Наприклад, сигнали можуть складатися, відніматися, апроксимуватися і так далі. Розглянемо деякі приклади згаданої обробки – пристрої додавання і віднімання сигналів, структурні схеми яких показані на рис. 1.4.

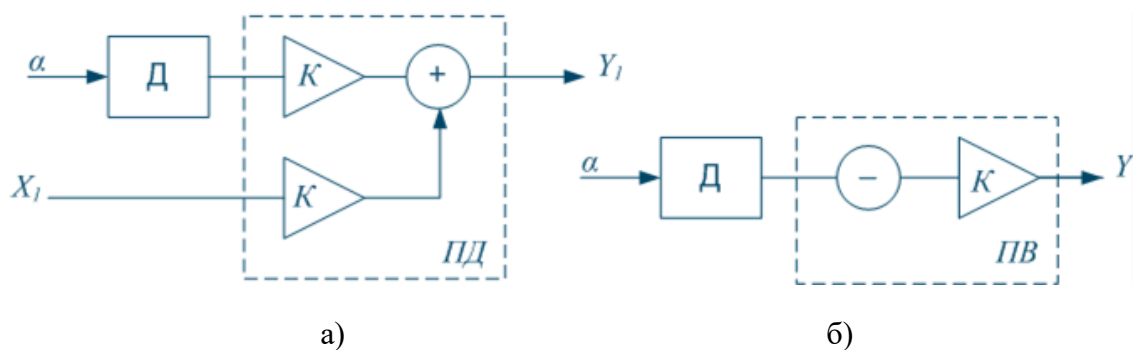


Рисунок 1.4 – Пристрої додавання та віднімання: а – пристрій додавання, б – пристрій віднімання

Перетворювач реалізує наступне рівняння: $Y_1 = Y_0 + F(X_1)$ (рис. 1.5):

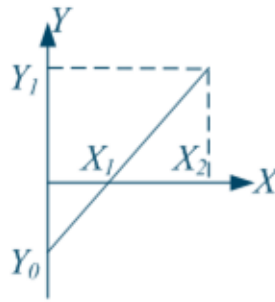
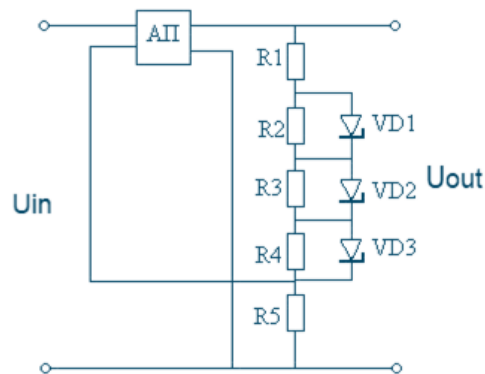


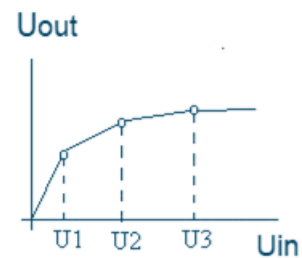
Рисунок 1.5 – Перетворювач

До перетворювачів сигналів належить й апроксимуючий перетворювач (АП), який замінює нелінійну функцію зміни вхідного сигналу U_{in} низкою лінійних функцій.

Схема апроксимуючого перетворювача показана на рис. 1.6, а. У перетворювачі використовується властивість вольт-амперної характеристики стабілітрона.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Апроксимуючий перетворювач: а – схема,
б – характеристика вхід-вихід

Якщо стабілітрони VD1...VD3 підібрати так, щоб їх напруга пробою відповідала значенням відповідно U1...U3, отримаємо характеристику вхід-вихід, яка показана на рисунку 1.6, б.

Статична характеристика вимірювального перетворювача – це залежність між вхідною і вихідною величинами в сталому режимі (рис. 1.7).

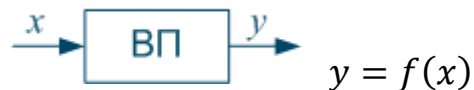


Рисунок 1.7 – Статична характеристика вимірювального перетворювача

Часто необхідно перетворити сигнал, отриманий в одній формі, в іншу. Наприклад, електричний сигнал, отриманий з термопари, за певних умов виробництва необхідно перетворити в пневматичний з метою використання в подальших елементах схеми регулювання. Або пневматичний сигнал, що знімається з датчика, перетворити в електричний для зменшення часу запізнювання в каналах передачі сигналу.

У лабораторній роботі розглядаються перетворювачі виду енергії – електропневматичні та пневмоелектричні, які дозволяють здійснити перехід між електричним та пневматичним сигналом і навпаки.

Розглянемо будову та принцип роботи цих перетворювачів.

Електропневматичні перетворювачі (ЕП) призначені для перетворення стандартного струмового сигналу в пневматичний сигнал, наприклад, для управління пневматичним виконавчим механізмом. Перетворювачі перетворюють електричні сигнали 0...5, 0...20 або 4...20 мА в тиск повітря 20...100 кПа. Принципову схему перетворювача показано на рис. 1.8.

Вхідний електричний сигнал подається на котушку, в якій розташовано постійний магніт. Магніт з силою, що пропорційна I_e , притягує важіль. Як

наслідок, відстань між соплом і заслінкою зменшується, а тиск P_1 і тиск на виході системи $P_{вих}$ збільшуються.

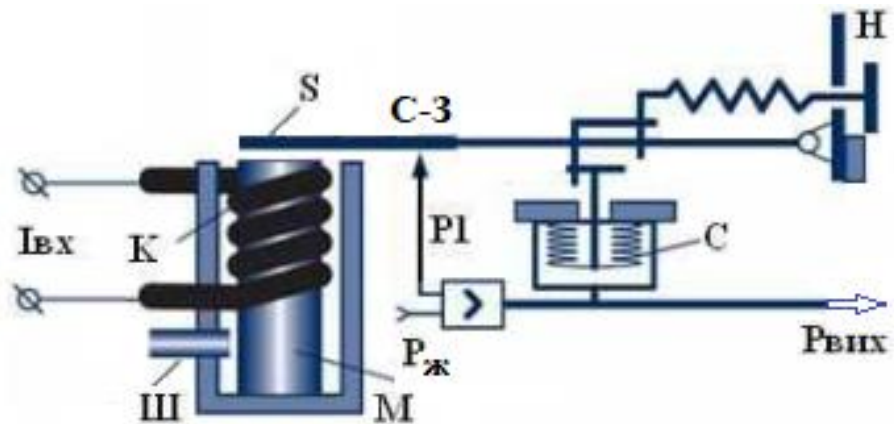


Рисунок 1.8 – Схема електропневматичного перетворювача: $I_{вх}$ – вхідний електричний сигнал, К – котушка, Ш – шунт магнітопроводу, S – важіль, М – магніт, С-3 – перетворювач сопло-заслінка, P_1 – тиск, $P_{ж}$ – тиск живлення, С – сильфон зворотного зв'язку, Н – гвинт, $P_{вих}$ – тиск на виході системи

Тиск $P_{вих}$ подається на наступний елемент у схемі контролю/ регулювання (наприклад, на пневматичний виконавчий механізм, який переміщує регулюючий орган). Сильфон зворотного зв'язку відновлює рівновагу сумарних сил на важелі (в сильфон також подається тиск $P_{вих}$). Настроювання перетворювача здійснюється гвинтом, який змінює відстань від вісі сильфона до вісі обертання важеля, а точне настроювання діапазону здійснюється шунтом магнітопроводу.

Пневмоелектричний перетворювач (ПЕ) потрібен для зв'язку пневматичних систем з електричними. Він дозволяє інтегрувати пневматичне обладнання в електричні системи керування технологічними процесами та вимірвальні системи.

Вхідний тиск $P_{вх}$ надходить в одновиткову трубчасту пружину 1. В результаті вільний кінець трубчастої пружини переміщається вгору і розтягує

пружину 2, яка впливає на важіль 3. Важіль 3 обертається навколо точки обертання. При повороті важеля прапорець 4 наближається до плоскої котушки 5, що призводить до збільшення її індуктивного опору, яке пристроєм 6 перетворюється сигнал постійного струму I . Струм I надходить на вихід перетворювача, а також на котушку 7 електросилового перетворювача 8, який забезпечує компенсуючу дію на важіль (зворотній зв'язок). Схему перетворювача зображено на рис. 1.9.

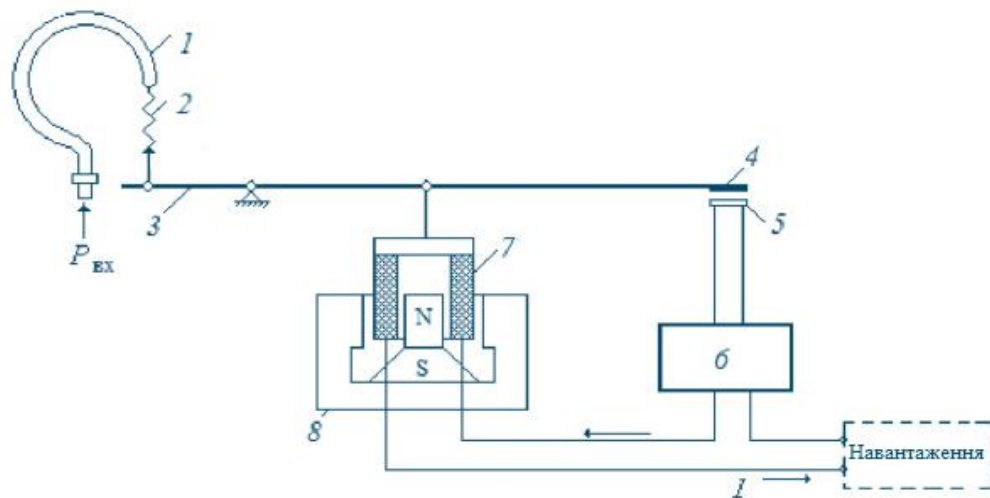


Рисунок 1.9 – Схема пневмoeлектричного перетворювача: 1 – одновиткова трубчаста пружина, 2 – пружина, 3 – важіль, 4 – прапорець, 5, 7 – котушка

Прилад призначений для перетворення уніфікованого пневматичного сигналу ($0,2 \dots 1 \text{ кгс/см}^2 - 20 \dots 100 \text{ кПа}$) в уніфікований електричний сигнал постійного струму ($0 \dots 5 \text{ мА}$). Перетворений сигнал можна передати на відстань для подальшого використання за допомогою систем дистанційного та телевимірювання.

Системи дистанційного вимірювання. Дистанційне вимірювання забезпечує передачу вимірювальної інформації на великі відстані з малим запізненням. Результати вимірювання будь-якої фізичної величини зазвичай видаються вимірювальним приладом у вигляді кутових або поступальних

переміщень. Тому завдання систем дистанційного вимірювання – передача кута повороту або величини лінійного переміщення.

Слідкуюча потенціометрична система показана на рис. 1.10. Переміщення повзунка реохорда вимірювальної системи викликають зсув повзунка лівого потенціометра. Внаслідок небалансу в схемі виникає електричний сигнал на вході в підсилювач, що викликає обертання ротора електричного двигуна, що переміщає стрілку показчика і двигун другого потенціометра. При симетричному положенні обох повзунків реохордів сигнал на вході підсилювача добігає до нуля, і електродвигун зупиняється.

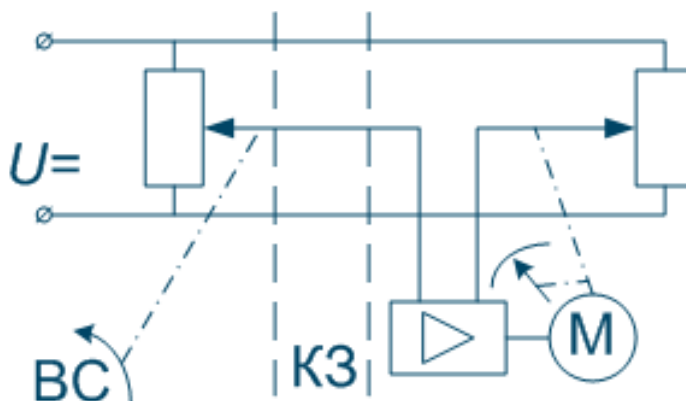


Рисунок 1.10 – Слідкуюча потенціометрична система: ВС – вимірювальна система, КЗ – канал зв'язку, М – електричний двигун

Сельсинна дистанційна передача змінного струму (Рис. 1.11) також призначена для передачі кутових переміщень. В якості передавального і приймаючого сельсинів застосовують асинхронні електричні двигуни, що самосинхронізуються, з контактними кільцями. Також застосовують безконтактні сельсини з безобмоточним ротором. При порушенні симетричного положення роторів передавального і приймаючого сельсинів в роторних обмотках індукуються різні за величиною електрорушійні сили (ЕРС), по лініях зв'язку течуть зрівняльні струми і виникає момент синхронізації, що обумовлює поворот ротора приймаючого сельсина. Такий режим включення сельсинів (Рис. 1.11, а) називають індикаторним.

При трансформаторному режимі (рис. 1.11, б) ротор приймаючого сельсина загальмований. Показання вольтметра, підключеного до обмотки статора приймаючого сельсину, змінюються пропорційно куту повороту передавального сельсина.

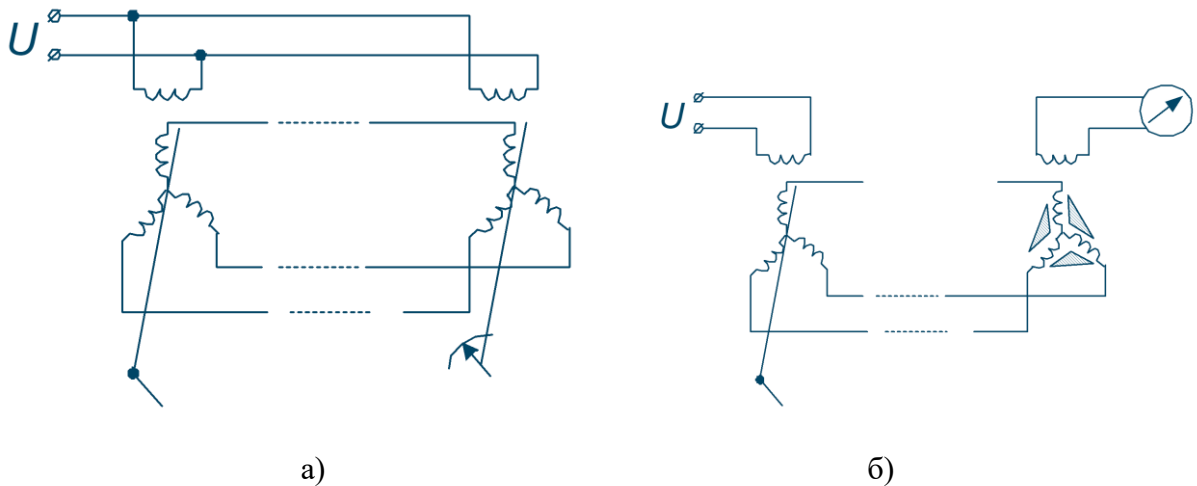


Рисунок 1.11 – Слідкуюча потенціометрична система: а – індикаторний режим включення сельсина, б – трансформаторний режим включення сельсина

Телевимірювання. Для передачі результатів вимірювання на великі відстані, коли зміна параметрів лінії зв'язку може вплинути на точність передачі, застосовують системи телевимірювання. Ці системи відрізняються тим, що результати вимірювання кодуються перед передачею їх по лініях зв'язку і дешифруються на пункті прийому. Найбільш поширеними є число-імпульсні, час-імпульсні (рис. 1.12) та частотні системи (рис. 1.13).

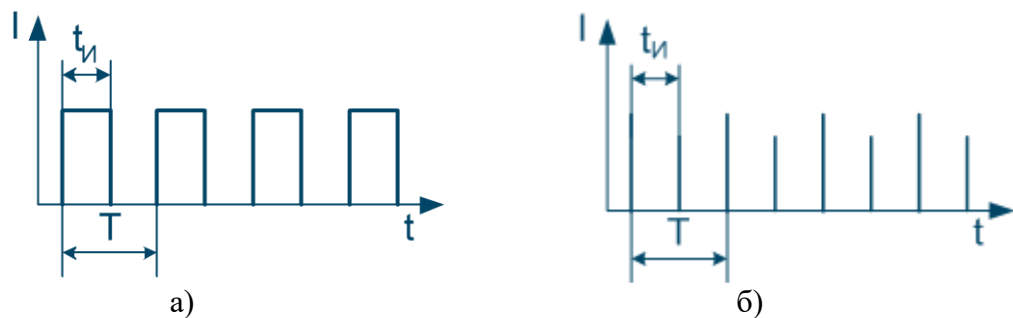


Рисунок 1.12 – Імпульсні системи телевимірювання: а – число-імпульсні, б – час-імпульсні

Принцип дії число-імпульсних систем (рис. 1.12, а) полягає в тому, що кожному значенню вимірюваної величини відповідає певне число передаваних по лінії зв'язку імпульсів струму. Декодування здійснюється за допомогою лічильника імпульсів.

Передавальні пристрої час-імпульсної системи (рис. 1.12, б) перетворюють вимірювану величину в імпульси змінної тривалості. Така модуляція називається широтною. Якщо система передає вимірювальну величину за допомогою двох імпульсів – нульового і відлікового які відсікають певну частину періоду слідування імпульсів T , що пропорційна вимірній величині u , то модуляцію називають фазовою.

Для кодування виміряної величини застосовують обігаючі пристрої, а для дешифровки – детектори.

Частотні системи. Розрізняють частотну та частотно-імпульсну модуляцію. Сигнали частотно-імпульсної модуляції можна знімати з валиків вимірювальної системи, що обертається з частотою, пропорційній вимірній величині. Прийом сигналів здійснюють за допомогою детекторів або накопичувальних конденсаторів.

Частотна модуляція реалізуються на змінному струмі. Передавальним пристроєм є генератор синусоїдальних коливань із змінною ємністю або індуктивністю в резонансному контурі; їх зміна здійснюється вимірювальною системою при зміні значення вимірної величини. Переданий сигнал через підсилювальний каскад поступає на пристрій-детектор, що дозволяє вимірювати струм або напругу пропорційно частоті сигналу. Приклади передаваних сигналів для різних за значенням зміряних величин показані на рис. 1.13.

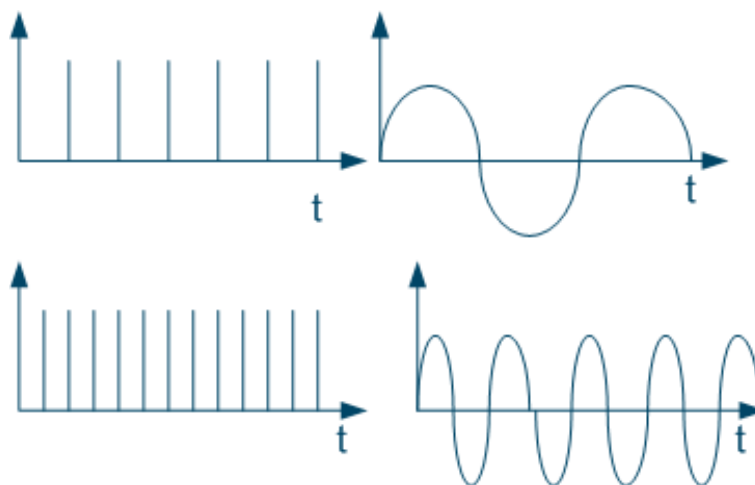


Рисунок 1.13 – Приклад сигналів у частотних системи телевимірювання

У цифрових системах керування, широко використовуються **аналого-цифрові** та **цифро-аналогові перетворювачі** (АЦП та ЦАП). Будова та опис роботи цих перетворювачів розглянуто у лабораторній роботі № 4 – Цифрове вимірювання температури.

З метою більш поглибленого вивчення теоретичних основ даної лабораторної роботи рекомендується використати конспект лекцій з навчальної дисципліни та список рекомендованої літератури для даного навчального посібника.

1.2. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 1.14) складається з пристроїв, які послідовно перетворюють ЕРС (в інтервалі температур $0...300\text{ }^{\circ}\text{C}$) в електричний ($0...5\text{ мА}$) і пневматичний ($0,2... 1\text{ кгс/см}^2$) сигнали, а також пневматичний сигнал ($0,2... 1\text{ кгс/см}^2$) у електричний ($0...5\text{ мА}$). Застосування ряду вимірювальних приладів дозволяє виміряти вхідні та вихідні сигнали перетворювачів.

Електрорушійна сила, яку потрібно перетворити, задається блоком регульованої напруги (БРН) з  і подається на вхід нормувального

перетворювача та на мілівольтметр 5. БРН потрібно ввімкнути, клацнувши мишею на кульці перемикача.

Нормувальний перетворювач призначений для перетворення ЕРС в уніфікований струмовий сигнал (0...5 мА). Вихідний сигнал перетворювача, контрольований міліамперметром 5, подається на вхід перетворювача 1, де перетворюється в аналоговий пневматичний сигнал (0,2... 1 кгс/см²). Вихідний сигнал з перетворювача 1, контрольований вимірювальними приладами 7 і 6, надходить на вхід пневмоелектричного перетворювача 2, вихід якого контролюється міліамперметром 8.

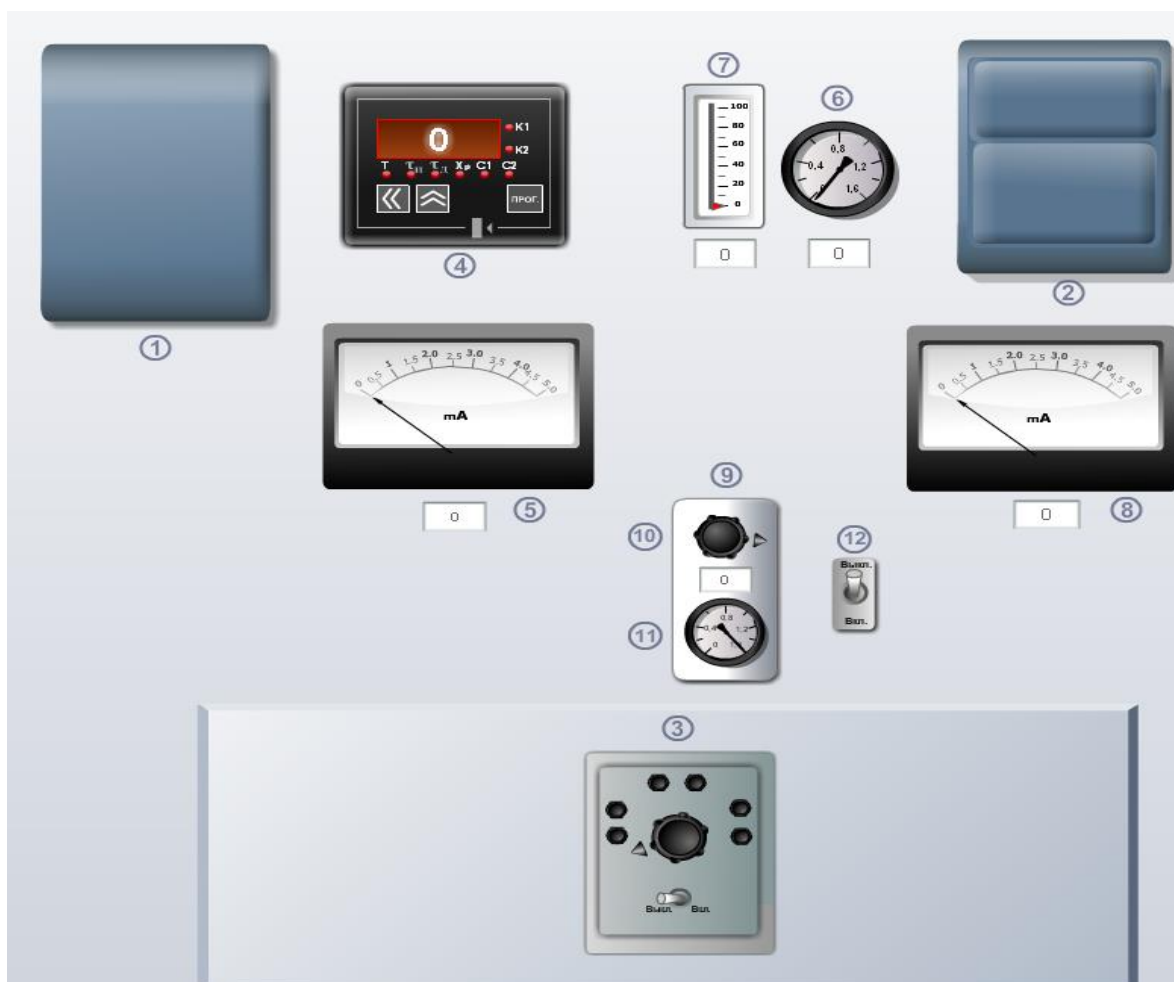


Рисунок 1.14 – Схема лабораторної установки: 1 – електропневматичний перетворювач, 2 – пневмоелектричний перетворювач, 3 – блок регульованої напруги, 4 – цифровий вимірювач температури, 5 – мілівольтметр, 6, 7 - вимірювальні прилади, 8 – міліамперметр, 9 - панель дистанційного керування, 10 – редуктор, 11 - манометр

Пневматичні прилади 1, 2 і 7 живлять стисненим повітрям із тиском 0,14 МПа. Тиск живлення задають редуктором 10 на панелі дистанційного керування 9, і контролюють за манометром 11.

1.3. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні лабораторної роботи «Перетворювачі сигналів» наведені у [Додатку А](#).

1.4. Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
2. Подати електричне живлення на стенд тумблером 12 (клацнувши мишею на кульці перемикача).
3. Увімкнути БРН 3, клацнувши мишею на кульці перемикача на панелі БРН.
4. Повертаючи ручку редуктора 10  за годинниковою стрілкою встановити живлення стисненого повітря на рівні 0,14МПа (1,4 кгс/см²).
5. Задати декілька значень температури,¹ повертаючи ручку потенціометра  за годинниковою стрілкою на панелі БРН 3. Значення температури відображається на шкалі цифрового вимірювача температури 4. Значення ТЕРС, котре заноситься в таблицю, взяти з градуювальної таблиці (Додаток Б).
6. Значення сигналу, яке поступає з БРН на вхід електропневматичного перетворювача, проконтролювати і зняти з приладу 5 (міліамперметр).

¹ За вказівкою викладача

7. Значення вихідного сигналу, яке поступає з електропневматичного перетворювача на вхід пневмоелектричного перетворювача, проконтролювати і зняти з приладів 6 (манометр) та 7 (вторинний прилад).
8. Значення вихідного сигналу з пневмоелектричного перетворювача проконтролювати і зняти з приладу 8 (міліамперметр).
9. Виконати вимірювання при зростанні значень температури (прямий хід), а також при зменшенні значень температури (зворотний хід) за тих самих значень, що у прямому ході.
10. Результати експерименту (прямий та зворотний хід) занести до таблиць за наведеним зразком:

Таблиця 1.1 – Результати експерименту

Показання з приладу 4, $T, ^\circ\text{C}$	ТЕРС, що відповідає температурним точкам, e , mV	Показання міліамперметру 5, I_1 , mA	Показання манометру 6, P , kgf/cm^2	Показання вторинного приладу 7, P %	Показання міліамперметру 8, I_2 , mA	Похибка ланцюга перетворення, mA
Прямий хід						
Зворотний хід						

1.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

Використовуючи отримані значення (занесені до таблиці), побудувати за допомогою MS Excel статичні характеристики перетворювачів $P = f(I_1)$, $I_2 = f(P)$.

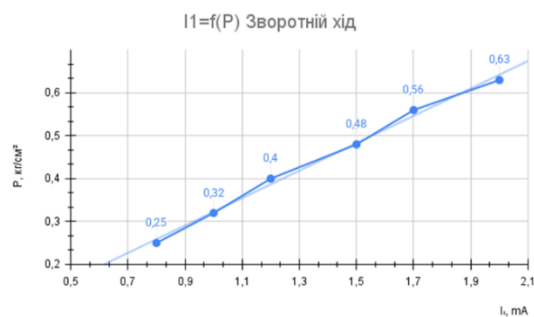
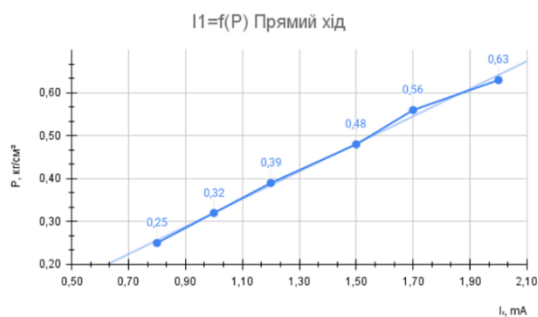
Розрахувати похибку ланцюга перетворювань для кожного значення температури $\Delta = |I_2 - I_1|$.

Приклад оформлення таблиці результатів:

Таблиця 1.2 – Приклад оформлення таблиці результатів

Показання з приладу 4, $T, ^\circ\text{C}$	ТЕРС, що відповідає температурним точкам, e, mV	Показання міліамперметру 5, I_1, mA	Показання манометру 6, $P, \text{кг/см}^2$	Показання вторинного приладу 7, $P, \%$	Показання міліамперметру 8, I_2, mA	Похибка ланцюга перетворення, mA
Прямий хід						
46	1,776	0,80	0,25	15	0,7	0,1
61	2,436	1,00	0,32	20	0,9	0,1
75	3,059	1,20	0,39	25	1,1	0,1
91	3,723	1,50	0,48	30	1,4	0,1
106	4,344	1,70	0,56	35	1,6	0,1
120	4,92	2,00	0,63	40	1,9	0,1
Зворотний хід						
120	4,92	2	0,63	40	1,9	0,1
106	4,344	1,7	0,56	35	1,6	0,1
91	3,723	1,5	0,48	30	1,4	0,1
75	3,059	1,2	0,4	25	1,1	0,1
61	2,436	1	0,32	20	0,9	0,1
47	1,899	0,8	0,25	15	0,7	0,1

Приклади оформлення статичних характеристик:



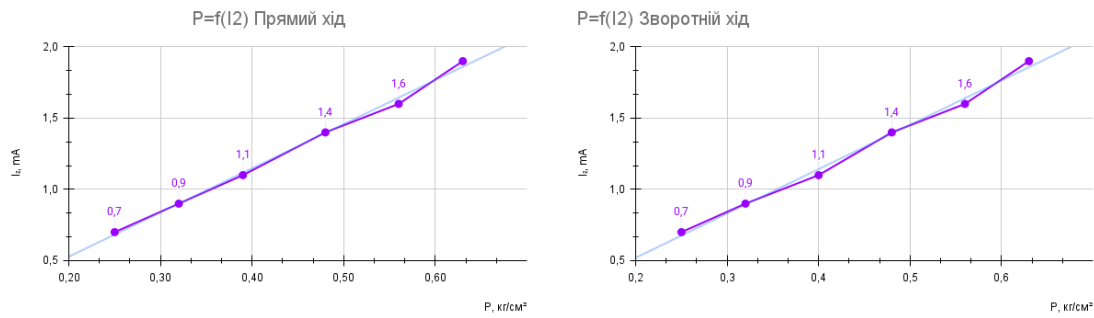


Рисунок 1.15 – Приклади оформлення статичних характеристик

У звіт про виконану роботу слід включити:

- тему та мету роботи;
- короткі теоретичні відомості;
- опис та схеми електропневматичного та пневмоелектричного перетворювачів;
- опис лабораторної установки та методику проведення вимірювань;
- таблиці отриманих результатів;
- статичні характеристики перетворювачів;
- аналіз отриманих результатів та основні висновки.

1.6. Контрольні запитання та завдання до самоперевірки

1. Місце та мета використання перетворювачів сигналів у структурі систем автоматизації технологічних процесів.
2. Поняття статичної характеристики елемента системи автоматизації.
3. Порядок отримання статичної характеристики експериментальним шляхом.
4. Які діапазони вимірювання уніфікованих сигналів (пневматичних, гідравлічних, електричних).
5. Яке призначення нормувальних перетворювачів?
6. Формування вимірювального сигналу у формі, зручній для телевимірювальної передачі.

7. Формування вимірювального сигналу у формі, зручній для дистанційної передачі.
8. Принцип дії та будова електропневматичного перетворювача сигналів.
9. Принцип дії та будова пневмоелектричного перетворювача сигналів.
10. Розрахуйте середнє значення похибки вимірювального перетворювача за наведеними даними:

Показання з приладу 4, T, °C	ТЕРС, що відповідає температурним точкам, e, mV	Показання міліамперметру 5, I1, mA	Показання манометру 6, P кгс/см ²	Показання вторинного приладу 7, P %	Показання міліамперметру 8, I2, mA
Прямий хід					
30	0.002	0.52	0.16	10	0.48
60	0.006	0.93	0.32	20	1.08
90	0.025	1.56	0.47	30	1.53
120	0.053	1.98	0.63	40	1.99
150	0.092	2.59	0.79	50	2.54
180	0.105	3.02	0.94	60	3.06

11. Визначте ТЕРС за наведеними даними (тип термопар - В):

Показання з приладу 4, T, °C	Показання міліамперметру 5, I1, mA	Показання манометру 6, P кгс/см ²	Показання вторинного приладу 7, P %	Показання міліамперметру 8, I2, mA
Прямий хід				
53	0,9	0,28	17	0,8

Лабораторна робота № 2

Виконавчі механізми і регулюючі органи

Мета та основні завдання роботи. Дослідити роботу виконавчих механізмів та регулюючих органів і отримати метрологічні характеристики цього обладнання.

2.1. Основні теоретичні відомості

Виконавчий механізм (ВМ) – елемент, який за сигналом, отриманим від регулятора, переміщує регулювальний орган і змінює потік речовини або енергії, яка поступає на об'єкт регулювання або виходить з нього.

Регулювальний орган (РО) – елемент, переміщення якого призводить до зміни матеріальних потоків речовини на вході чи виході об'єкта керування.

ВМ та РО можна об'єднати у виконавчий пристрій, як показано на рисунку 2.1. Виконавчі пристрої різноманітні за будовою, але всі вони включають дві частини: силовий привід і регулюючий орган.

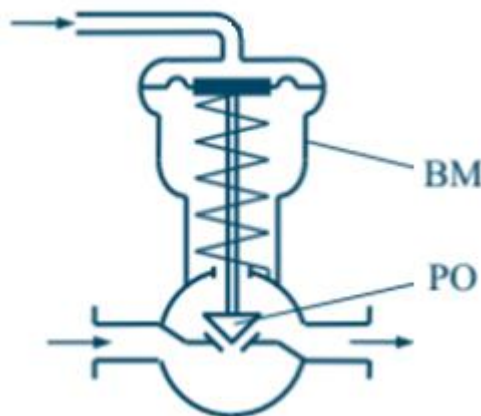


Рисунок 2.1 – Виконавчий пристрій: ВМ – виконавчий механізм;
РО – регулюючий орган

За видом енергії, що використовується, ВМ розділяються на пневматичні, гідравлічні, електричні, та комбіновані.

Найбільшого поширення набули електричні ВМ. Пневматичні і гідравлічні виконавчі механізми застосовуються у разі необхідності отримання великої потужності при переміщенні робочого органу та у вибухонебезпечних середовищах.

Електричні виконавчі механізми забезпечують переміщення регулюючого органу об'єкту при дії управляючих імпульсів, які надходять від регулятора або від оператора (за ручного керування).

До складу електричних виконавчих механізмів зазвичай входять реверсивний електродвигун, редуктор, кінцеві та шляхові вимикачі, датчики положення, гальмувальний пристрій, ручний привід (рис. 2.2).

Електродвигун з редуктором здійснюють перетворення електричної енергії у механічну, достатню для подолання опору середовища регулювальним органом.

Кінцеві вимикачі використовуються для вимикання пускового пристрою у разі досягнення РО крайніх положень, тобто виконують захисні функції, а шляхові вимикачі – для обмеження діапазону переміщення вихідного елемента РО в автоматичному режимі.

Датчики положення формують сигнал, пропорційний куту повороту вихідного вала ВМ. Цей сигнал надходить на пульт оператора, а також може використовуватись у системі керування як сигнал зворотного зв'язку за положенням РО.

Гальмувальні пристрої встановлюються у ВМ під час зупинки електродвигуна після припинення дії керуючого впливу.

Ручний привід передбачений у ВМ для забезпечення можливості переміщення РО у разі виходу з ладу пускового пристрою або електродвигуна.

Потужність електродвигунів коливається від значень, менших за Вт, до декількох кВт.

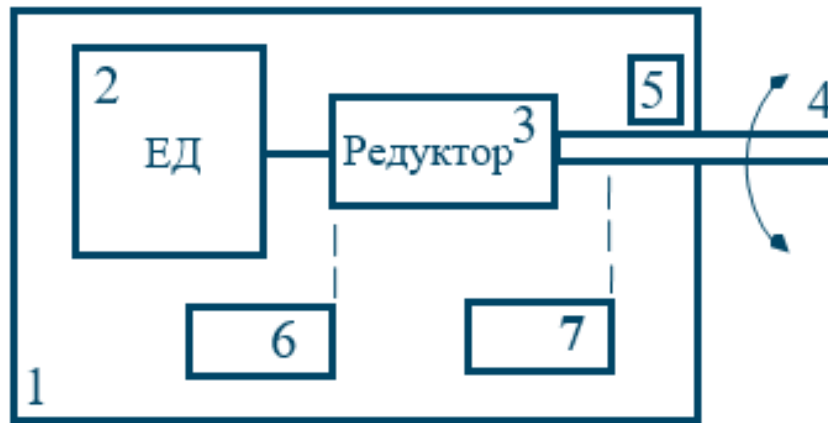


Рисунок 2.2 – Схема електричного виконавчого механізму: 1 – корпус, 2 – електричний двигун, 3 – редуктор, 4 – вал, 5 – блок кінцевих вимикачів, 6 – гальмівна система, 7 – блок датчику положення РО (валу двигуна)

Змінну швидкість обертання валу двигуна може забезпечити асинхронний двигун з частотним перетворювачем (в цьому випадку асинхронний двигун живиться напругою зі змінною частотою).

Приклади виконання електричних ВМ показані на рис. 2.3.

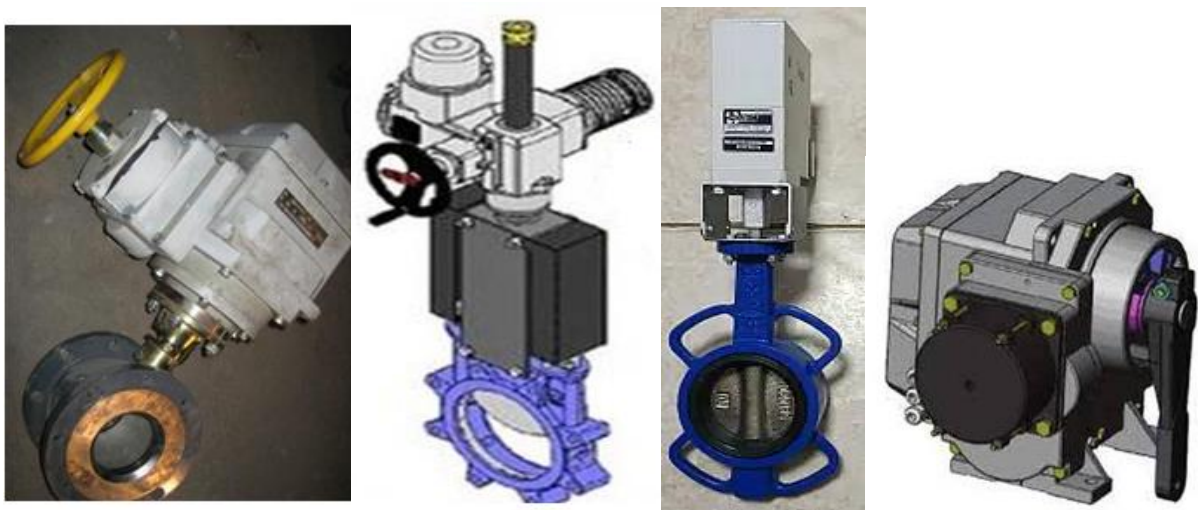


Рисунок 2.3 – Приклади виконання електродвигунів

На деяких об'єктах автоматизації використання електричних виконавчих механізмів є дуже небезпечним.

Пневматичні засоби керування задовольняють найжорсткішим вимогам пожаро- і вибухобезпечності, можуть працювати за наявності агресивних домішок в навколишньому середовищі і застосовуються для автоматизації виробничих процесів у хімічній, нафтохімічній, харчовій і інших галузях промисловості. В енергетиці пневматичні прилади знаходять застосування в системах управління водопідготовчими установками теплових і атомних електростанцій.

Із пневматичних приводів у системах автоматизації найбільш широке застосування знайшли мембранно-пружинні і поршневі прилади.

Пересувне зусилля у цих механізмах утворюється за рахунок дії стисненого повітря на чутливий елемент (мембрана, поршень, сильфон). Пневматичні приводи можуть бути пружинними або безпружинними.

У пружинних ВМ переставне зусилля в одному напрямі створюється силою стисненого повітря, а у зворотному – силою стиснутої пружини. Значна частина зусилля, що створюється, витрачається на стиснення пружини.

У безпружинних ВМ пересувне зусилля у протилежних напрямках утворюється дією тиску з обох боків чутливого елемента – тиск з одного боку підвищується, а з другого – зменшується, або ж навпаки.

Приклади **мембранно-пружинних** виконавчих механізмів показані на рис. 2.4. Верхня кришка і мембрана утворюють робочу порожнину, куди поступає командний пневмосигнал. Тиск діє на мембрану та її жорсткий центр й створює зусилля, яке врівноважується пружиною.

Переміщення мембрани та її жорсткого центру призводить до переміщення штоку і відповідно РО.

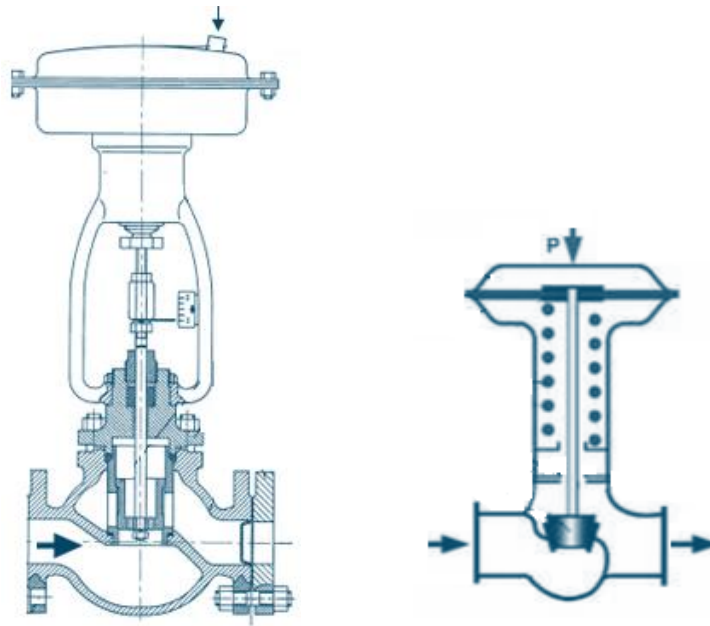


Рисунок 2.4 – Приклади мембранно-пружинних виконавчих механізмів

Зі зменшенням командного пневмосигналу в камері над мембраною сила стиснення пружини перевищить силу, утворену тиском p на мембрані (переставне зусилля), і тоді пружина почне розтискатися, і шток знову зміщуватиметься вгору.

Хід штока пропорційний величині керуючої дії. Мембранні ВМ зазвичай поставляються разом з регулювальними органами. Оскільки при знятті тиску мембрана завжди переміщується вгору, то залежно від конструкції РО розрізняють **нормально відкриті (НВ)** і **нормально закриті (НЗ)** клапани.

Якщо за відсутності пневматичного керувального сигналу шток приводу переводиться в крайнє нижнє положення, такий привід називається нормально-закритим (рис. 2.5, а). Якщо за відсутності пневматичного сигналу шток приводу переводиться в крайнє верхнє положення, такий привід називається нормально-відкритим (рис. 2.5, б).

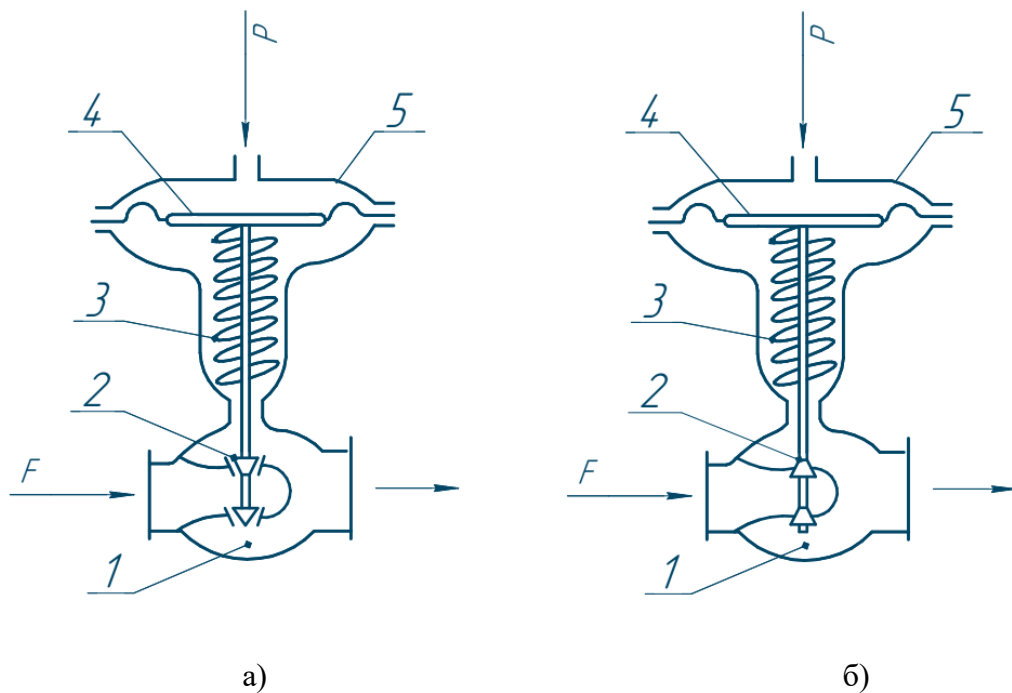


Рисунок 2.5 – Мембранно-пружинні виконавчі механізми з нормально відкритим (а) та нормально закритим (б) регулюючим органом: 1 – корпус, 2 – шток, 3 – пружина, 4 – мембрана, 5 – кришка

Мембранні ВМ можуть бути укомплектовані ручними дублерами (бічними або верхніми), призначеними для керування клапаном за відсутності тиску в мережі керуючого повітря.

Мембранні ВМ мають порівняно низьку чутливість, значний люфт і гістерезис, тому вони застосовуються в системах регулювання з відносно невисокими вимогами до якості регулювання.

Для підвищення чутливості швидкодії, збільшення перестановочного зусилля і зменшення гістерезису мембранного ВМ застосовуються додаткові підсилювачі потужності зі зворотним зв'язком за положенням РО (позиціонери), необхідні при роботі клапана в умовах в'язких середовищ, високого тиску регульованого середовища, при значних відстанях між регулятором і виконавчим механізмом.

Позиціонер є регулятором положення рухливої системи регулювального клапана, і, як кожен регулятор, він має об'єкт регулювання, параметр, завдання, сигнал неузгодження і вихідний сигнал керування. Об'єкт керування – це виконавчий механізм регулювального клапана, параметр – положення штока клапана, завдання – керуючий сигнал від системи керування або регулятора, сигнал неузгодження – різниця між керуючим сигналом і дійсним положенням штока, а вихід – тиск стисненого повітря, що поступає в робочу порожнину виконавчого механізму або зусилля тарованої пружини. Змінюючи вихідний тиск або зусилля пружини, позиціонер забезпечує відповідність положення штока клапана керуючому сигналу, компенсуючи зусилля, що діють на рухливу систему клапана.

Розрізняють позиціонери, що працюють за схемою компенсації переміщень, і за схемою компенсації сил. В обох типах вони охоплюються негативним зворотним зв'язком за положенням штока.

Поршневі ВМ (рис. 2.6), на відміну від мембранних, дозволяють отримати велике переміщення штока, що в деяких випадках визначає доцільність їх застосування.

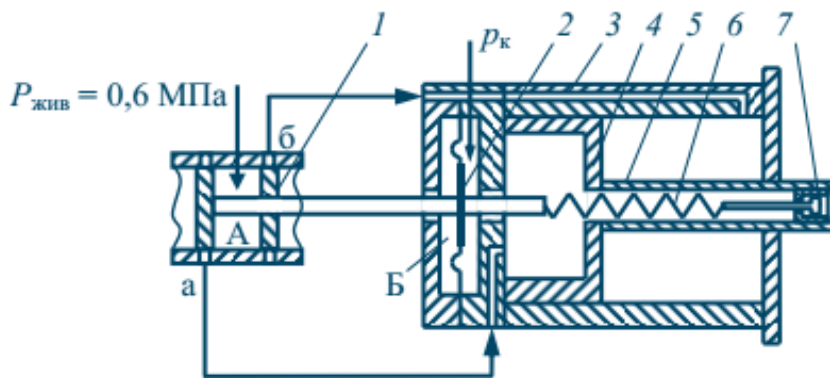


Рисунок 2.6 – Пневмопоршневий привід: 1 – золотник, 2 – мембрана, 3 – циліндр, 4 – поршень, 5 – порожнистий шток, 6 – пружина, 7 – натяжний механізм

У порожнині штока 5 розміщено пружину 6, яку використовують для створення жорсткого зворотного зв'язку в механізмі слідкувальної системи приводу. Пружина з'єднана зі штоком за допомогою натяжного механізму 7, який забезпечує плавне регулювання натягу пружини і сполучений шарнірно з жорстким центром вимірювальної мембрани 2. Другим боком жорсткий центр мембрани 2 сполучається з відсічним золотником 1.

Робота пневмоприводу полягає в тому, що сигнал p_k від регулятора (0,02...0,1 МПа) надходить у камеру Б вимірювальної мембрани і деформує її, зміщуючи жорсткий центр ліворуч. При цьому переміщується й золотниковий пристрій 1, відкриваючи канал «а» чи «б». Стиснене повітря з камери А тиском 0,6 МПа через вказані канали надходить у ліву або праву порожнину поршня і переміщує його, змінюючи натяг пружини зворотного зв'язку 6, пов'язаної з мембраною 2. Мембрана, деформуючись, переміщує золотник 1 і відсікає камеру А від вікон а або б. При цьому шток 5 виконавчого механізму зупиняється.

Приклади виконання мембранних та поршневих ВМ показані на рис. 2.7 та рис. 2.8 відповідно.



Рисунок 2.7 – Приклади мембранних виконавчих механізмів



Рисунок 2.8 – Приклади поршневих виконавчих механізмів

Гідравлічні ВМ використовуються переважно для побудови систем автоматизації парових турбін. Гідравлічні виконавчі механізми поршневого типу розвивають великі переставні зусилля при високій швидкості переміщення виконавчої частини механізму. Для зв'язку керуючої та виконавчої частин вводиться електрогідравлічний перетворювач. Також знайшли застосування комбіновані електропневматичні системи.

Приклади гідравлічних виконавчих пристроїв показані на рис. 2.9.

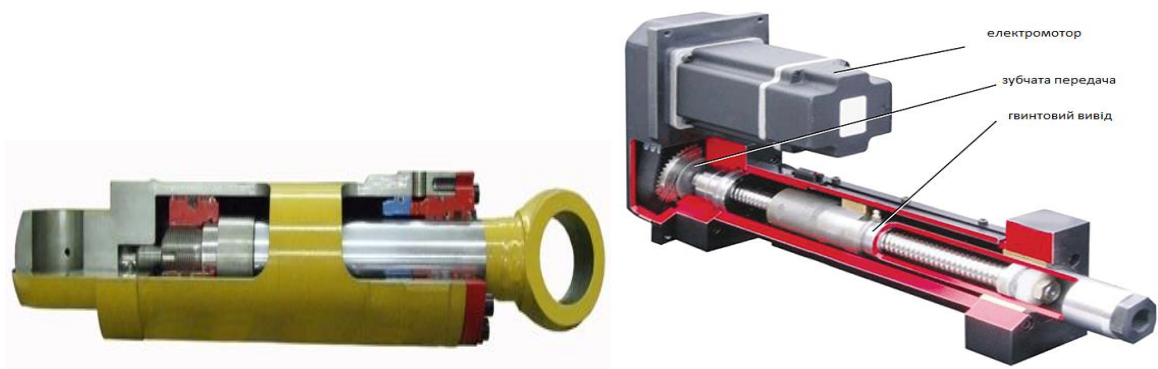


Рисунок 2.9 – Приклади гідравлічних виконавчих пристроїв

Розглянемо класифікацію, будову і принцип роботи регулюючих органів.
Регулюючий орган – це ланка, що розміщується після виконавчого

пристрою, і яка призначена для зміни витрати речовини шляхом зміни пропускної спроможності.

Залежно від умовної пропускної спроможності РО діляться на такі групи:

РО великих витрат – регулюючі заслінки з умовною пропускною спроможністю від 40 до 25 000 м³/год (умовні діаметри від 50 до 100 мм);

РО середніх витрат – регулюючі клапани з умовною пропускною спроможністю від 2 до 500 м³/год (умовні діаметри від 10 до 300 мм);

РО малих витрат – регулюючі клапани з умовною пропускною спроможністю від 0,1 до 4,0 м³/год (умовні діаметри від 6 до 25 мм);

РО мікровитрат – регулюючі клапани з умовною пропускною спроможністю менше 0,1 м³/год і умовним діаметром менше 10 мм.

За конструктивними характеристиками РО ділять на профільовані (клапани) і непрофільовані (заслінки). За періодичністю включення в роботу РО бувають постійної дії (живильні клапани) і періодичної (клапани БРОУ).

За видом керування РО діляться на регульовані (клапани із змінними геометричними розмірами прохідного перетину) і нерегульовані (дросельні пристрої).

За числом ступенів дроселювання дросельно-регулюючі органи виконуються у вигляді одно- або багатосхідчастих конструкцій.

За кількістю опірних поверхонь (так званих сідел) розрізняють одно- і двосідельні РО. Двосідельні конструкції називають двопотоковими або з розділенням потоків.

За формою корпусу РО розділяються на кутові і прохідні. У кутовій арматурі потік змінює свій напрям зазвичай на 90°. Потік середовища рухається в основному уздовж осі патрубків або з деяким викривленням. При цьому арматура виконується як з прямим розташуванням штока, так і з нахиленим.

За конструкцією затвора РО можна розділити на чотири групи:

1. РО, в яких переміщення елементів затвора відбувається паралельно напрямку потоку середовища. Це клапани золотникового, голкового, багатосхідчастого й інших типів.
2. РО з обертанням елементів затвора. Це поворотні клапани, заслінки, крани.
3. РО із затвором, елементи яких переміщуються перпендикулярно напрямку потоку, наприклад клапани шиберного типу.
4. РО, в затворі яких відбувається стиснення прохідного каналу, наприклад діафрагмові клапани.

У якості рухомих елементів затвора застосовуються шибери і плунжери (золотники). Конструктивні особливості РО і ефективність їх роботи багато в чому пов'язані з напрямом потоку середовища. Конструкції РО можуть допускати строго визначений або будь-який напрям потоку. При описі типу арматури слід вказати напрям підведення середовища. Конструкції РО можуть бути завантаженими чи ні, що залежить від величини переставного зусилля, яке необхідне для установки плунжера в певне положення.

Розглянемо конструкцію і особливості РО, які найчастіше використовуються у хімічній промисловості.

Заслінкові РО (рис. 2.10) мають найбільшу умовну пропускну спроможність і широко застосовуються у системах керування. У них відсутні застійні зони, в яких можуть накопичуватися механічні частинки і бруд.

У разі використання заслінкових пристроїв на діаметри умовного проходу 500 мм і більше через наявність великих незрівноважених обертальних моментів на валу заслінок необхідно застосовувати приводи великої потужності.

Найчастіше використовують заслінкові РО з діаметром умовного проходу 50...1000 мм і призначених для тиску 0,64...2,5 МПа та перепаду тиску 0,01...1,6 МПа.



Рисунок 2.10 – Приклади заслінкових регулюючих органів

Клапани РО – найбільш поширений вид дросельних пристроїв. Ці РО відрізняються за видом і кількістю опірних поверхонь (одно- і двосідельні), за конструкцією затворів (тарілчасті, пробкові, поршневі) і корпусів. Порівняння конструкцій дросельно-регулюючої арматури показує, що арматура клапанного типу має переваги перед іншими типами арматури. Клапан одного і того ж типорозміру при відповідній профілізації плунжера (золотника) може мати різні витратні характеристики, що створює зручності при виборі клапана для конкретних умов робіт.

Найбільш розповсюдженим видом РО клапанного типу є **двосідельні РО** (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Приклади двосідельних регулюючих органів

Двосідельні РО мають вищу якість регулювання і менше необхідне переставне зусилля приводу порівняно з односідельними за рахунок розвантаження затвора. Умовна пропускна спроможність двосідельних регулюючих органів в 1,6 разів вище, ніж у односідельних за однакових умовних проходах.

Проте двосідельним РО властивий цілий ряд недоліків, основними з яких є: негерметичність, великі габарити і маса, висока вартість і металоємність, незадовільні кавітаційні й шумові характеристики, наявність застійних зон, високі експлуатаційні витрати. Ці недоліки дали поштовх до створення нових конструкцій, які частково компенсують зазначені недоліки.

Односідельні регулюючі органи (рис. 2.12) почали застосовуватися раніше двосідельних. Вони більш технологічні, ніж двосідельні, менш металовмісні, дозволяють досягти кращої герметичності. Відсутність застійних зон в односідельних РО дозволяє застосовувати їх для регулювання в'язких середовищ. Покращені кавітаційні й шумові характеристики дозволяють використовувати односідельні РО при порівняно великих перепадах тиску.



Рисунок 2.12 – Приклади односідельних регулюючих органів

Висока ремонтпридатність дає значну економію при експлуатації. Основним недоліком, що обмежує застосування традиційних конструкцій односідельних РО, є нерозвантаженість затвора, що викликає необхідність застосування порівняно потужних виконавчих механізмів.

Останнім часом з'явилися ряд конструкцій односідельних РО, позбавлених цього недоліку при збереженні всіх вказаних вище переваг. Розвантаження затвора проводиться, як правило, шляхом розміщення його в спеціальну обойму (так звану клітку), яка одночасно є і направляючою затвора. Такий регулюючий орган називається клітинним. У деяких конструкціях клітинних РО затвором є звичайний поршень, а в обоймі виконані профільовані вікна для отримання певної пропускної характеристики; у інших конструкціях профільовані вікна знаходяться на затворі, а в обоймі виконані циліндрові або прямокутні отвори. Є конструкції розвантажених односідельних РО з отвором в затворі, що дозволяє зрівняти тиск над і під затвором. Односідельні РО можуть бути і замочно-регулюючими. В цьому випадку герметичність досягається за допомогою м'якої прокладки.

Односідельні РО застосовують у тих випадках, коли неможливе застосування двосідельних РО: у разі потреби в забезпеченні герметичності

закриття проходу, за малих розмірів проходів (до 15 мм), а також за великих проходів, якщо середовище має велику в'язкість чи містить тверді частинки.

Діафрагмові РО (рис. 2.13) застосовують для регулювання витрат агресивних рідин і газів. Особливість діафрагмових РО полягає у застосуванні як ущільнення та рухомого дросельного елемента гнучкої мембрани з гуми, поліетилену чи фторпласту. Внутрішню поверхню пристрою футерують кислотостійкими матеріалами, такими як емаль, гума, вініпласт, фторпласт тощо. Переваги діафрагмових РО – застосування дешевих антикорозійних матеріалів і відсутність сальникової конструкції.

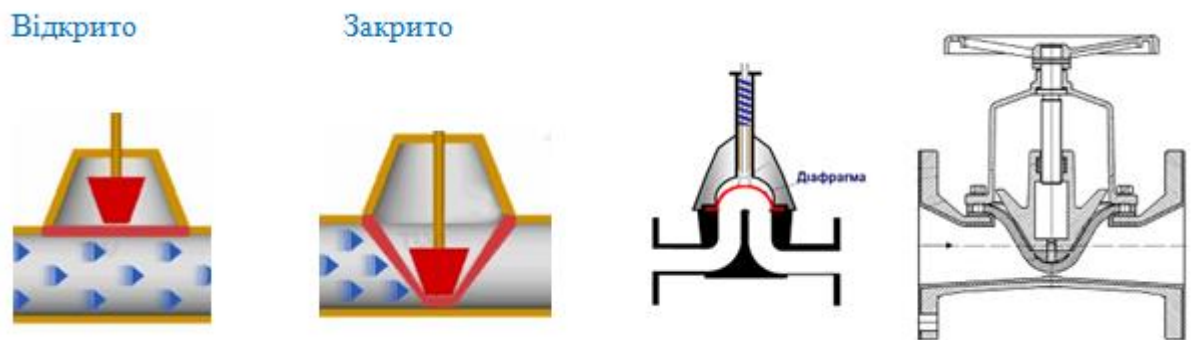


Рисунок 2.13 – Приклади діафрагмових регулюючих органів

Шлангові РО (рис. 2.14). Робоче середовище проходить через еластичний патрубок (шланг), який, передавлюється валиками, іноді за допомогою тиску повітря (наприклад, клапан Pinch), що рухаються в протилежних напрямках.

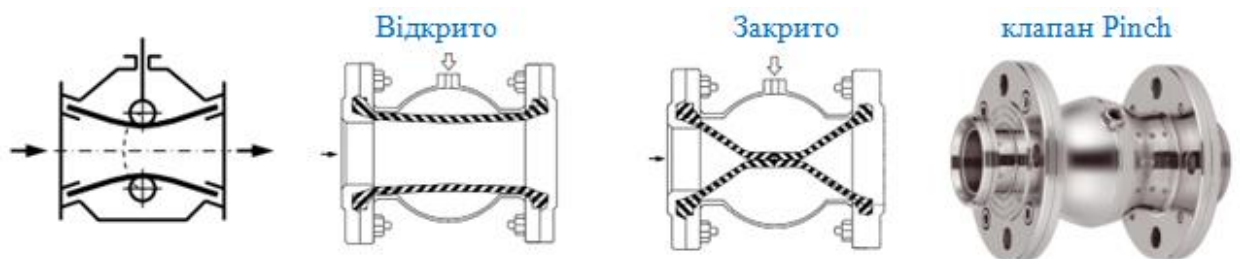


Рисунок 2.14 – Будова шлангових регулюючих органів

Це змінює площу прохідного перерізу, а отже, і витрату робочого середовища. Шлангові заслінки можуть працювати в будь-якому середовищі, якщо остання не руйнує матеріал шлангу. Еластичні патрубки виготовляються з гуми (бензо-, масло-, хімічно стійкої).

У конструкції шлангових РО передбачено можливість зміни зношених шлангів на нові. Шлангові клапани широко застосовують не тільки для рідини, а й для абразивних розчинів, шламів, мінеральних добрив, пастоподібних мас тощо.

Основна перевага шлангових заслінок – повна герметизація робочого середовища від зовнішнього, головний недолік – недовгий термін служби еластичного патрубка. Інші переваги шлангової заслінки: виключається застій продукту, оскільки конструкція прямоточна з малим гідравлічним опором; у закритому положенні еластичний патрубок надійно перекриває прохід, відсікаючи подачу середовища у відповідний трубопровід.

Недоліки шлангової заслінки: невисока температура регульованого середовища – до 80 °С; невеликий робочий тиск – до 10 кгс/см²; для забезпечення затиску еластичного патрубка необхідне значне зусилля переміщення.

Кулькові клапани (рис. 2.15) мають у середині корпусу кульку з висвердленим в ній отвором. Коли клапан відкритий, рідке середовище тече через цей отвір. Клапан закривається поворотом ручки на 90°, при цьому відповідно повертається і кулька.

Отвір клапана закривається, оскільки висвердлений отвір в кульці в цьому випадку знаходиться до нього під прямим кутом. Трубопровід перекривається.



Рисунок 2.15 – Приклади виконання кульових регулюючих органів

Розглянемо ще один вид РО, які широко використовуються у хімічній промисловості – триходові РО (рис 2.16). Вони призначені для змішування двох потоків в один або для розділення одного потоку середовища на два. Триходові регулюючі органи знаходять застосування у низці технологічних процесів: змішування потоків при регулюванні температури теплоносія, підготовка промивальних розчинів і тому подібне.



Рисунок 2.16 – Триходові регулюючих органів

Застосування триходових регулюючих клапанів як змішуючих, так і розділяючих, приводить до значного ефекту у зв'язку із зменшенням кількості приводів, позиціонерів, ручних дублерів, замочної апаратури і підвищення надійності. Вказані переваги пояснюються тим, що один триходовий клапан замінює в схемі регулювання два дво- або одностадійних РО.

Для відпрацьовування перепаду тиску при постійній витраті води використовують дросельні пристрої (рис. 2.17).

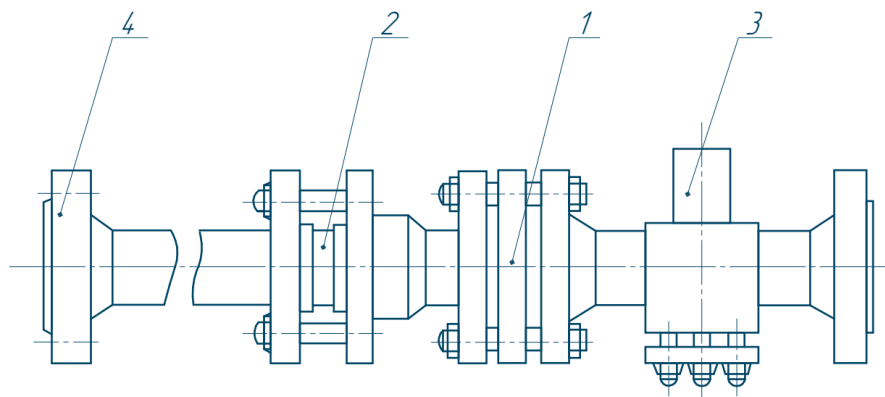


Рисунок 2.17 – Дросельний регулюючий орган: 1 – дросель, 2 – компенсатор, 3 – трійник, 4 – фланець

У багатоступінчатих пристроях всі ступені дроселювання, як правило, виконуються однаковими зважаючи на незначну зміну густини середовища. Перепад тиску, що спрацьовує в одному ступені істотно залежить від форми виконання дросельного елемента.

Розглянемо приклади використання РО. У системі газопостачання використовують запобіжні замочні, запобіжні скидні і регулюючі клапани. Запобіжний замочний клапан – пристрій, який припиняє подачу газу споживачам при виході контрольованого тиску за встановлену верхню або нижню межу і відкривається тільки вручну. Надходження газу припиняється при посадці клапана на сідло у вентильному корпусі, який через проміжний шток сполучений з важелем. Запобіжний скидний клапан – пристрій, призначений для підтримки тиску газу (теплоносія) в мережі на заданому рівні шляхом видалення в атмосферу деякого об'єму газу (теплоносія) з системи. Запобіжні скидні клапани бувають пружинними, мембранними і рідинними. Пружинні клапани застосовуються двох видів – малопідйомні і

повнопідйомні. У перших відкриття затвора відбувається поступово, тому їх називають клапанами пропорційної дії. Другий при певному підвищенні тиску в системі відкривається повністю ривком. Малопідйомні пропорційні клапани використовують в системах з практично нестискуваними рідинами, де навіть дуже невелике скидання веде до різкого зниження тиску.

Великі підприємства, електростанції і подібні їм об'єкти з безперервним цілодобовим споживанням теплоносія використовують регулюючі клапани – одно- і двосідельні. Ці клапани придатні також для регулювання витрати води і пари з параметрами від середніх до надкритичних.

У системах кондиціонування повітря, як правило, використовують повітряні клапани з поворотними стрілками. Ці клапани розділяють за призначенням на прохідні, змішувальні і розподільні; за характером дії – на регулюючі і двопозиційні (замочні); за конструкцією – на паралельно-стулкові і непаралельно-стулкові. Паралельно-стулкові – це приймальні клапани з паралельними стулками, які призначені для відключення каналів забору зовнішнього повітря після виключення кондиціонера. Для запобігання замерзання стулки обладнують електричним обігрівом, який включається перед пуском кондиціонера. Прокідні клапани встановлюють на змішувальних камерах у місцях приєднання до них повітроводів рециркуляції або безпосередньо у повітроводах системи. Осі стулки зв'язані загальною тягою, що приєднується до приводу – ручного, пневматичного або електричного. Пропорційне регулювання витрати, температури і вологості повітря повітряним клапаном пов'язано з його характеристикою, яка в загальному випадку може бути довільною (лінійною, нелінійною).

З метою більш поглибленого вивчення теоретичних основ даної лабораторної роботи рекомендується використати конспект лекцій з навчальної дисципліни та список рекомендованої літератури для даного навчального посібника.

2.2. Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки (рис. 2.18) включено мембранний виконавчий механізм, поршневий слідкуючий привод та електричний виконавчий механізм.

Пневматичні прилади 4, 7 живлять тиском 0,14 МПа стислого повітря через редуктор 2 з манометром. Командний сигнал на виконавчі механізми 4 і 7 задається редукторами панелі дистанційного керування 3 і 6 в інтервалі 0,02...0,16 МПа.

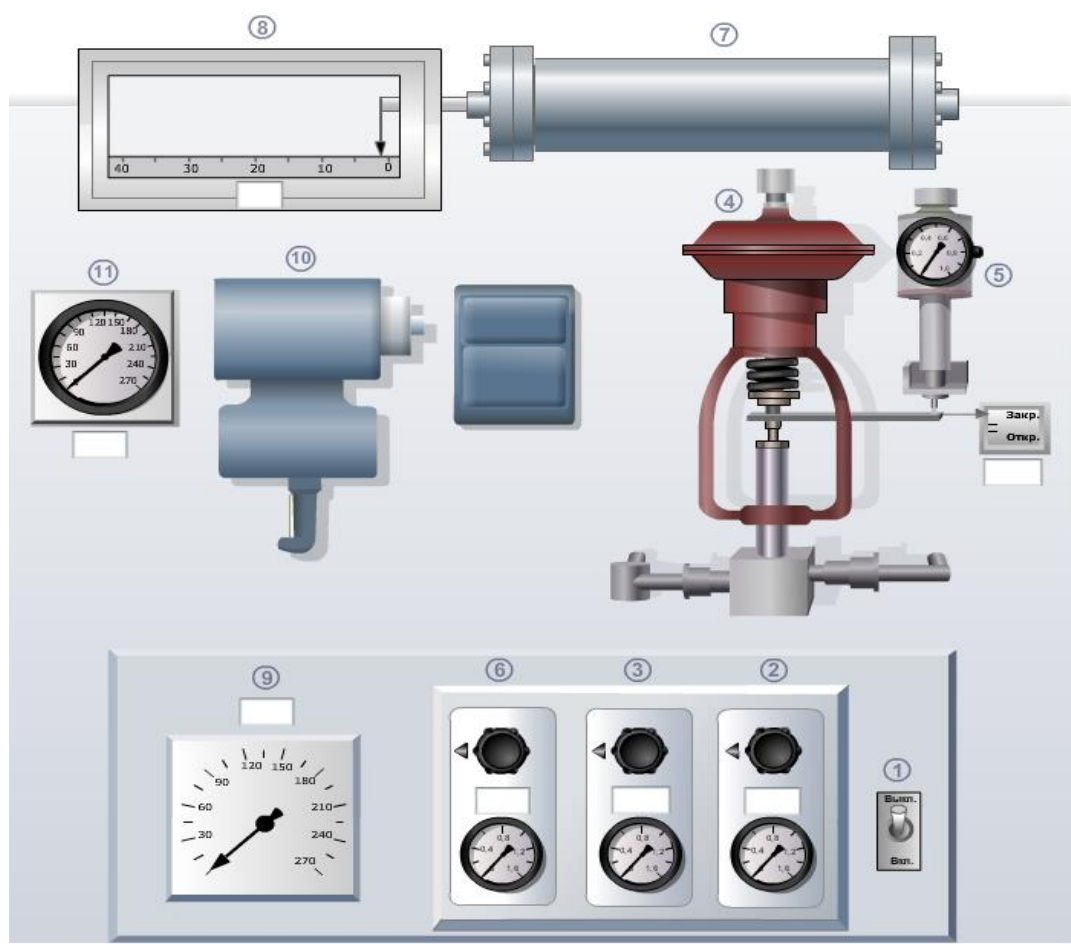


Рисунок 2.18 – Схема лабораторної установки: 1 – тумблер живлення, 2, 3, 6 – редуктор, 4 – мембранний виконавчий механізм, 5, 8 – пристрій візуалізації переміщення штоку, 7 - поршневий слідкуючий привод, 9 – задатчик кута повороту для електричного виконавчого механізму, 10 – електричний виконавчий механізм, 11 – шкала електричного виконавчого механізму

Електричне живлення стенду здійснюється за допомогою тумблера 1.

2.3. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні лабораторної роботи «Виконавчі механізми і регулюючі органи» наведені у [Додатку А](#).

2.4. Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
2. Подати електричне живлення на стенд тумблером 1 (клацнувши мишею на кульці перемикача).
3. Повертаючи ручку редуктора 2  за годинниковою стрілкою встановити живлення стисненого повітря на рівні 0,14МПа (1,4 кгс/см²).
4. За допомогою редуктора 3 панелі дистанційного керування тиску послідовно задати 6-8 значень тиску в інтервалі 0,02 - 0,16МПа. Задані значення відображаються на шкалі манометра та дублюються у цифровому вигляді у відповідному вікні. Відслідкувати переміщення штоку поршневого слідкуючого приводу 7 на шкалі 8. Кожну пару значень занести в лабораторний журнал скориставшись вкладкою **«Таблиця значень приладів»**. Виконати вимірювання при зростанні значень тиску (прямий хід), а також при зменшенні значень тиску за тих самих значень, що у прямому ході (зворотний хід).
5. За допомогою редуктора 6 панелі дистанційного керування тиску послідовно задати 6-8 значень тиску в інтервалі 0,02...0,16 МПа. Відслідкувати переміщення штоку мембранного виконавчого механізму 4 на шкалі 5. Кожну пару значень занести в лабораторний журнал скориставшись вкладкою **«Таблиця значень приладів»**.

Виконати вимірювання при зростанні значень тиску (прямий хід), а також при зменшенні значень тиску (зворотний хід).

6. За допомогою задатчика кута повороту 9 для електричного виконавчого механізму 10 послідовно задати 6-8 значень в інтервалі 0 - 270. Відслідкувати переміщення стрілки електричного виконавчого механізму на шкалі 11. Кожну пару значень занести в лабораторний журнал скориставшись вкладкою «Таблиця значень приладів». Виконати вимірювання при зростанні значень кута повороту (прямий хід), а також при зменшенні значень кута повороту (зворотний хід).

2.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

Використовуючи значення, які занесені до «Таблиці значень приладів», побудувати за допомогою MS Excel статичні характеристики розглянутих виконавчих механізмів (прямий та зворотний хід): $L_1 = f(P_1)$, $L_2 = f(P_2)$, $\varphi_1 = f(\varphi_2)$.

Таблиця 2.1 – Результати експерименту

Показання манометру 6, P_1 кгс/см ²	Переміщення штоку МІМ L_1 , мм	Показання манометру 3, P_2 кгс/см ²	Переміщення штоку ПСП L_2 , см	Вхідний кут повороту φ_1 , град	Вихідний кут повороту φ_2 , град
Прямий хід					
Зворотний хід					

Приклад результатів у «Таблиці значень приладів»:

Поршневий привід		Мембранний привід		Електричний виконуючий механізм	
Длина(L)	Р _{упр}	Длина(L)	Р _{упр}	Кут повороту(Вихід), град.	Кут повороту(задатчика), град.
0	0.00	0	0.00	0	2
1	0.07	0.015	0.03	13	33
3	0.12	0.105	0.17	22	57
5	0.20	0.157	0.25	35	88
7	0.31	0.218	0.35	47	119
9	0.38	0.293	0.47	58	146
11	0.44	0.360	0.58	69	174
13	0.53	0.428	0.69		
Запам'ятати значення		Запам'ятати значення		Запам'ятати значення	
Очистити таблицю		Стерти всі значення		Стерти всі значення	

Рисунок 2.19 – Результати вимірювань у Таблиці значень приладів

Приклад оформлення таблиці результатів:

Таблиця 2.2 – Приклад оформлення таблиці результатів

Показання манометру 6, Р ₁ кгс/см	Переміщення штоку МІМ L ₁ ,мм	Показання манометру 3, Р ₂ кгс/см	Переміщення штоку ПСП L ₂ ,см	Вхідний кут повороту φ ₁ , град	Вихідний кут повороту φ ₂ , град
Прямий хід					
0,13	0,075	0,13	3,00	13,00	5,00
0,15	0,090	0,15	3,00	26,00	10,00
0,17	0,105	0,17	4,00	39,00	15,00
0,19	0,112	0,19	4,00	52,00	20,00
0,21	0,127	0,21	5,00	65,00	25,00
0,23	0,142	0,23	5,00	78,00	31,00
0,25	0,157	0,25	6,00	91,00	36,00
Зворотний хід					
0,25	0,157	0,25	6,00	91,00	36,00
0,23	0,142	0,23	5,00	78,00	31,00
0,21	0,127	0,21	5,00	65,00	26,00
0,19	0,112	0,19	4,00	52,00	20,00
0,17	0,105	0,17	4,00	39,00	15,00
0,15	0,090	0,15	3,00	26,00	10,00
0,13	0,075	0,13	3,00	13,00	5,00

Приклади оформлення статичних характеристик:

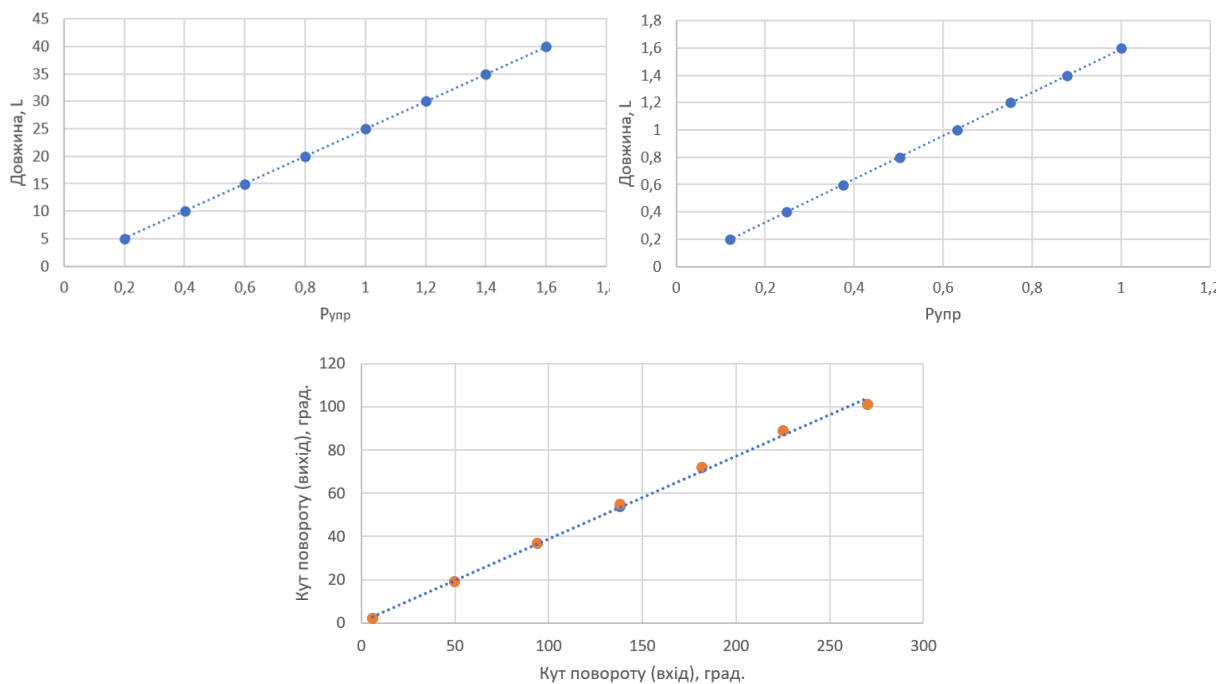


Рисунок 2.20 – Приклади оформлення статичних характеристик

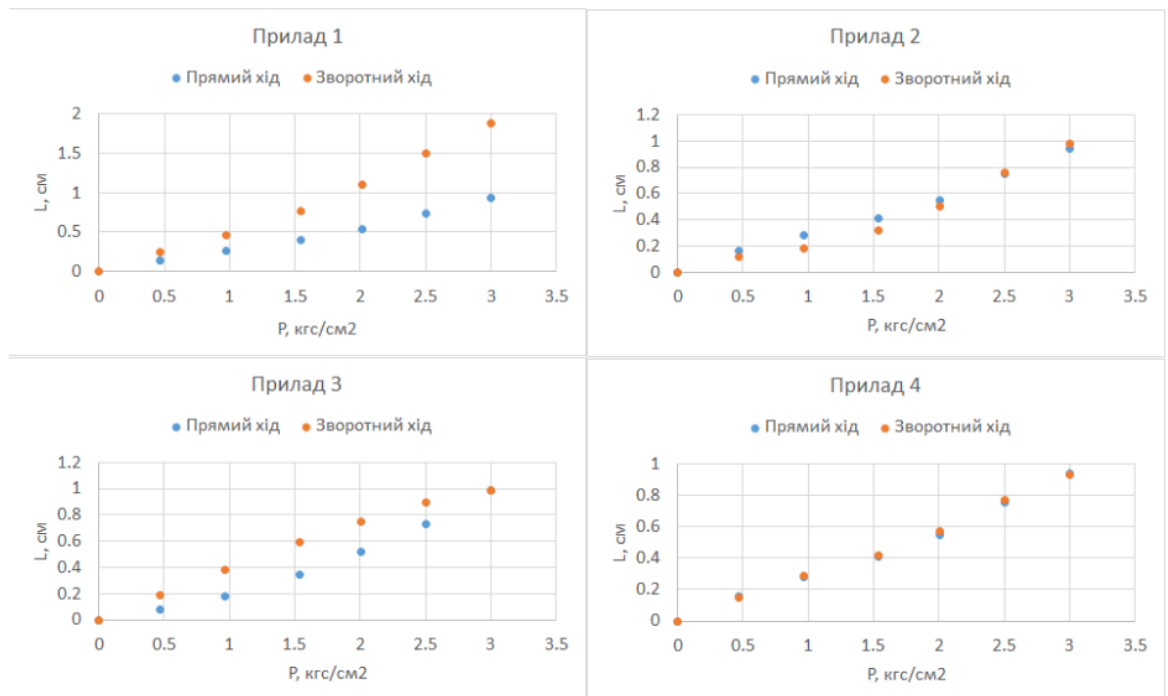
У звіт про виконану роботу слід включити:

- тему та мету роботи;
- короткі теоретичні відомості;
- опис та схеми виконавчих механізмів, використаних у лабораторній роботі;
- опис лабораторної установки та методику проведення вимірювань;
- таблиці отриманих результатів;
- статичні характеристики виконавчих механізмів;
- аналіз отриманих результатів та основні висновки.

2.6. Контрольні запитання та завдання до самоперевірки

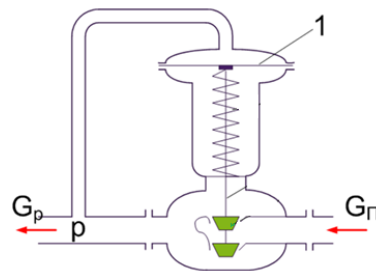
1. Місце та мета використання виконавчих механізмів і регулюючих органів у структурі систем автоматизації технологічних процесів.

2. Поняття статичної характеристики елемента системи автоматизації.
3. Порядок отримання статичної характеристики експериментальним шляхом.
4. Принцип дії та будова електричного виконавчого механізму.
5. Принцип дії та будова мембранного виконавчого механізму.
6. Принцип дії та будова поршневого слідкуючого приводу.
7. Основні типи регулюючих органів, які використовують у структурі систем автоматизації технологічних процесів.
8. У яких випадках застосовують позиціонери разом з виконавчими механізмами?
9. Які переваги у заслінкових регулюючих органів?
10. Принцип дії та будова заслінкових, одно- та двосидільних, кульових та діафрагмових регулюючих органів.
11. На рисунку зображено статичні характеристики чотирьох виконавчих механізмів:

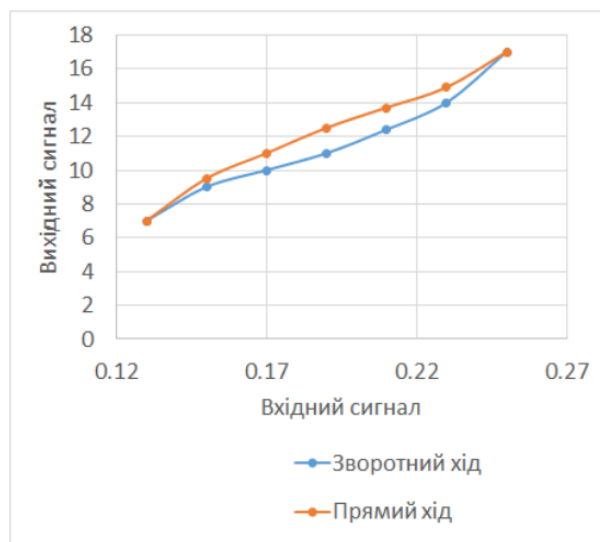


Які з цих ВМ можуть бути рекомендовані для побудови системи керування? Відповідь обґрунтуйте.

12. Поясніть, у якому положенні знаходитиметься мембрана 1 за відсутності тиску:



13. Охарактеризуйте статичну характеристику поршневого слідкуючого приводу:



Лабораторна робота № 3

Релейне регулювання

Мета та основні завдання роботи: Дослідити роботу релейного регулятора та отримати криві перехідних процесів в системі регулювання з двопозиційним регулятором при зміні навантаження на об'єкт.

3.1. Основні теоретичні відомості

Регулятор – це пристрій, що реалізує мету керування. На вхід регулятора надходить сигнал неузгодження, а на виході формується регулюючий вплив (в залежності від закону регулювання, що покладений в основу роботи регулятора). Регулюючий вплив надходить на ВМ, для здійснення регулюючого впливу (регулюючої дії) на об'єкт регулювання.

Пристрої, за допомогою яких в системах регулювання забезпечується автоматична підтримка технологічних величин навколо заданого значення, називаються автоматичними регуляторами.

Велика різноманітність технологічних процесів вимагає великої кількості різновидів автоматичних регуляторів, які класифікують за різними ознаками.

За призначенням розрізняють регулятори температури, регулятори тиску, регулятори витрати, регулятори рівня тощо

За **видом енергії**, що споживає регулятор, їх поділяють на:

- пневматичні;
- електричні;
- гідравлічні;
- комбіновані.

За **впливом чутливого елемента (ПВП)** на регулюючий орган (РО) – регулятори прямої та непрямої дії.

Регулятори прямої дії, які не використовують додаткових джерел енергії для регулювання. В регуляторах прямої дії перестановка РО здійснюється за рахунок енергії чутливого елемента.

Розглянемо приклад роботи регулятора прямої дії. Поплавковий регулятор при збільшенні рівня зменшує подачу води і потім перекриває подачу (рис. 3.1), при цьому енергії поплавка вистачає для здійснення регулювання.

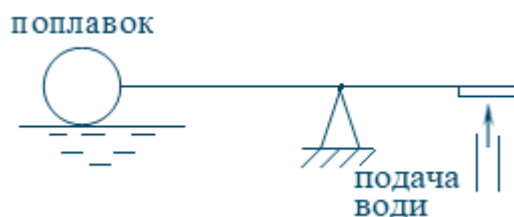


Рисунок 3.1 – Приклад роботи регулятора прямої дії

В **регуляторах непрямої дії** для перестановки РО застосовується допоміжні пристрої, що діють від енергії стороннього джерела живлення (їх називають виконавчі механізми або сервомотори).

Як приклад регулятора непрямої дії розглянемо систему регулювання рівня води в резервуарі (рис. 3.2).

На рис. 3.2 (а) поплавок 1 жорстко зв'язаний з засувкою, за допомогою якої змінюється витрата рідини, яка поступає по трубі 1 в резервуар. Навантаженням системи (збуренням) є витрата Q_2 , що витікає по трубі 2 з резервуару.

Розглянемо випадок, коли регульованою величиною є рівень H . Збільшимо витрату Q_2 . При цьому рівновага в системі порушується та рівень H починає зменшуватись. Поплавок починає опускатись вниз, відкриваючи

прохід для рідини в трубі 1. Таким чином, витрата Q_1 починає збільшуватись, що призводить до зростання рівня H .

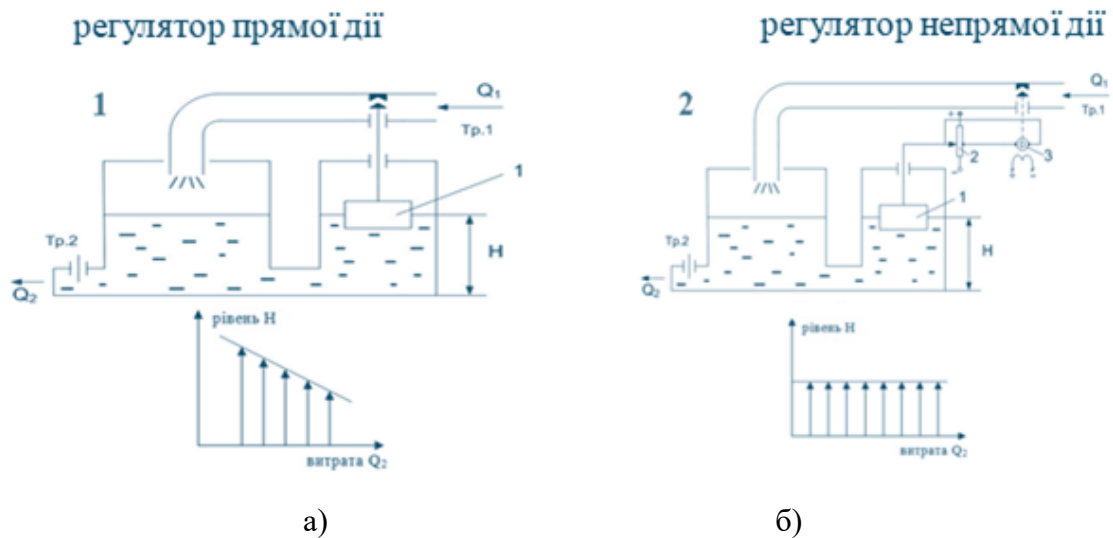


Рисунок 3.2 – Приклади роботи регуляторів прямої дії (а) та непрямої дії (б)

Рівновага в системі наступить знову, коли витрати на вході і виході знову будуть рівні $Q_{1н}=Q_{2н}$. (але вони будуть відрізнятися від попередніх). Чим більше навантаження Q_2 , тим більше буде відкрита засувка і тим нижче буде знаходитися поплавков в стані рівноваги.

Таким чином, зі зростанням навантаження Q_2 рівень H зменшується; це статичне регулювання.

Для отримання постійного значення рівня необхідно прибрати жорстку залежність в регуляторі між положенням регулюючого органу (засувка) та значенням величин, що регулюється (рівень). З цією метою в ланцюг регулювання вводять ланцюг виконавчого механізму (рис. 3.2, б).

Поплавок в цій схемі переміщує повзунок реостату за допомогою якого двигун кожен раз, як повзунок зміститься вниз або вгору від середнього положення, починає обертатися та переміщує засувку (регулюючий орган) до тих пір, поки не відновиться заданий рівень.

Оскільки напруга початку руху двигуна відрізняється від нуля, то виникає похибка, що лежить всередині зони нечутливості, яка показана на рисунку заштрихованою областю (рис. 3.3).

В схемі для переміщення регулюючого органу використовується сторонній механізм (двигун), то система є системою непрямого регулювання. Це астатичне регулювання.

Зауважимо, що при постійних незначних коливаннях регульованої величини, виконавчі пристрої теж постійно вмикаються і вимикаються, що призводить до зношення обладнання, зайвих витрат електроенергії і нестабільної роботи системи в цілому. Для уникнення постійних перемикань у регуляторах встановлюють певний діапазон відхилень (наприклад, $\pm 1\%$ від заданого значення), в межах якого регулятор не реагує на відхилення; цей діапазон називають **зоною нечутливості**.



Рисунок 3.3 – Зона нечутливості для системи регулювання рівня води в резервуарі

За **характером використовуваних для керування сигналів** розрізняють системи:

- безперервної;
- дискретні (релейні, імпульсні, цифрові).

За **характером математичних співвідношень**:

- лінійні, для яких є справедливим принцип суперпозиції;

– нелінійні.

Принцип суперпозиції полягає у наступному: якщо на вхід об'єкту подається кілька вхідних дій, то реакція об'єкту на суму вхідних дій дорівнює сумі реакцій об'єкта на кожен дію окремо.

Математичний апарат для лінійних систем розроблений повністю, а при роботі з нелінійними системами математичний апарат не дозволяє вирішувати деякі складні завдання.

Система регулювання неперервної дії складається тільки з елементів, в яких сигнал на виході плавно і неперервно змінюється від сигналу на вході. Таким чином неперервні системи контролюють значення регульованої величини у часі неперервно та їх вихід є неперервною функцією від входу.

Закони неперервного регулювання наведені у [Додатку Д](#).

Релейні регулятори (позиційні регулятори) також контролюють значення регульованої величини у часі неперервно, але їх вихід змінюється дискретно (стрибкоподібно) у ті моменти часу, коли неперервний вхід проходить через граничне значення.

Релейні регулятори – це досить поширений вид промислових регуляторів. Вони прості за схемою та конструкцією, економічні, надійні. Вони також застосовуються в системах контролю, сигналізації, блокування і захисту.

Релейні характеристики бувають наступних видів (рис. 3.4):

1. Ідеального двопозиційного реле (рис. 3.4, а).
2. Ідеального трипозиційного реле (рис. 3.4, б).
3. Релейна характеристика із зоною нечутливості – рис. 3.4, в.
4. Релейна характеристика двопозиційного реле із зоною неоднозначності (рис. 3.4, г).
5. Релейна характеристика двопозиційного реле із зонами нечутливості та неоднозначності (рис. 3.4, д).

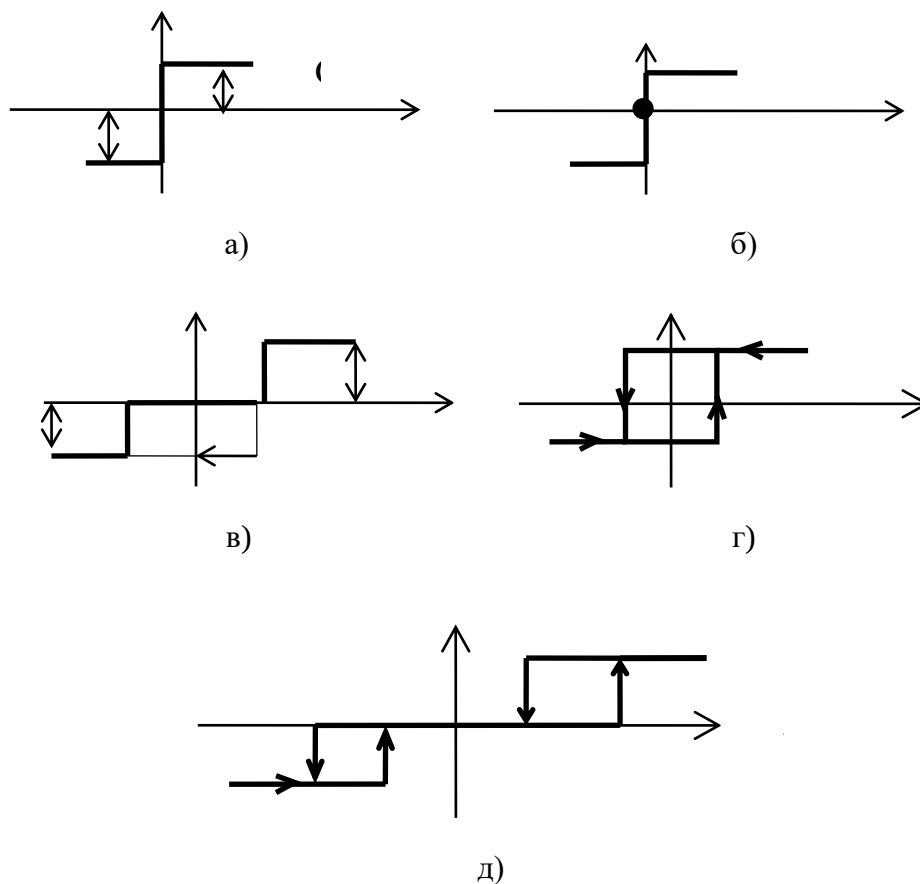


Рисунок 3.4 – Види релейних характеристик: а – ідеальне двопозиційне реле, б – ідеальне трипозиційне реле, в – трипозиційне реле, г – двопозиційне реле із зоною неоднозначності, д - двопозиційне реле із зонами нечутливості та неоднозначності

Найчастіше застосовуються дво- і трипозиційні релейні регулятори. У двопозиційних регуляторів, залежно від знаку відхилення керованої величини, регулюючий орган або повністю відкритий (при цьому витрати речовини або енергії максимальні), або повністю закритий (витрати дорівнюють нулю).

У трипозиційних регуляторах, окрім двох крайніх, регулюючий орган може бути встановлений ще в одному (середньому) положенні, що сприяє більш плавній зміні керованої величини і скороченню числа спрацьовувань регулюючого органу в одиницю часу. Більш плавне регулювання можуть

забезпечити багатопозиційні регулятори, які здатні встановлювати виконавчий механізм в декількох проміжних положеннях. Двопозиційне регулювання в більшості випадків здійснюється електричними регуляторами, вбудованими у вторинні прилади (наприклад, потенціометри, мости, мілівольтметри).

Умовно закон регулювання двопозиційного регулятора може бути записаний у вигляді:

$$x_p = \begin{cases} x_p^{\min} & \text{при } y_T < u_3 \\ x_p^{\max} & \text{при } y_T \geq u_3 \end{cases}$$

Регулятор надає максимально можливу дію на об'єкт, повністю відкриваючи притік (або стік) енергії (або речовини) в процесі або повністю закриваючи її (рис. 3.5). При практичній реалізації часто приймають $x_p^{\min} = 0$, що відповідає вимкненому регулятору.

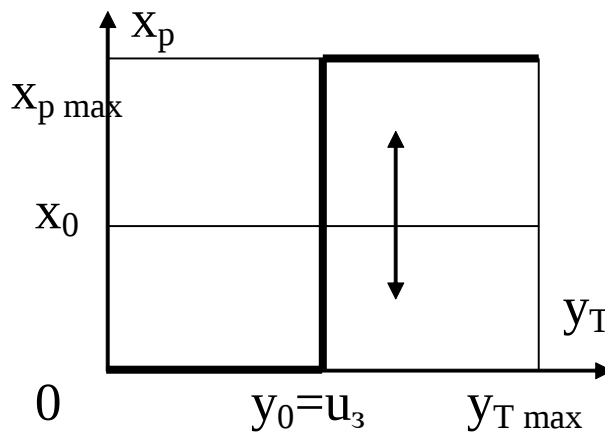


Рисунок 3.5 – Ілюстрація до роботи двопозиційного регулятора

Розглянемо детальніше роботу двопозиційного регулятора. Якщо хід регулюючого органу позначити за 100%, то регулятор стрибком переводить регулюючий орган з положення x_{min} в положення x_{max} , і навпаки (рис. 3.6).

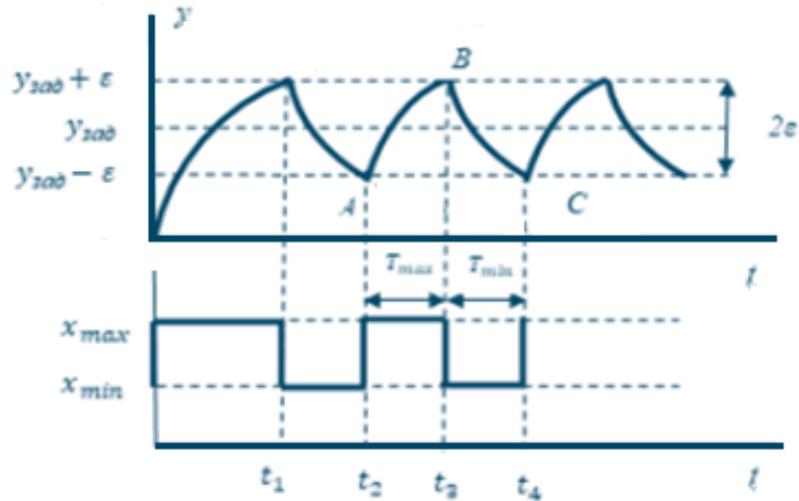


Рисунок 3.6 – Ілюстрація до роботи двопозиційного регулятора

Однак внаслідок наявності у об'єкта інерційних властивостей регульована величина зростає і спадає плавно, а не стрибком. У зв'язку з цим регульована величина при використанні такого регулятора робить коливання відносно заданого значення $y_{зад}$ з якоюсь амплітудою A і періодом T . За наявності зони нечутливості у регулятора регульована величина продовжує зростати протягом ще деякого часу і лише потім починає зменшуватися, як показано на рис. 3.7.

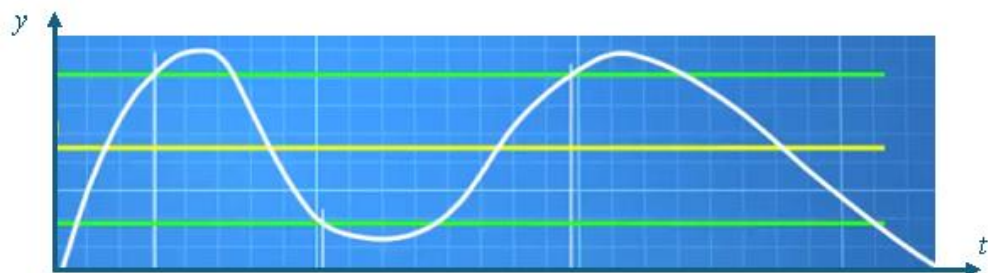


Рисунок 3.7 – Зміна регульованої величини в часі з урахуванням зони нечутливості регулятора й інерційності об'єкта регулювання

Таким чином, процес регулювання в системі з двопозиційним регулятором має коливальний незгасаючий характер. На рис. 3.8 показано роботу двопозиційного регулятора із зоною нечутливості на прикладі регулювання температури об'єкту.

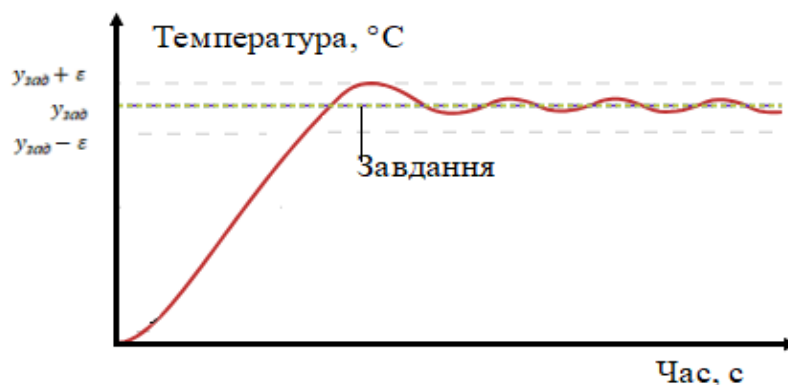


Рисунок 3.8 – Ілюстрація до роботи двопозиційного регулятора температури із зоною нечутливості

Коливальний перехідний процес є значним недоліком двопозиційних регуляторів, а також причиною того, що такий спосіб регулювання застосовується на процесах, де допустимі значні коливання регульованого параметра. Наприклад, в установках кондиціонування, холодильниках тощо.

Позиційні регулюючі пристрої також вбудовують у вторинні прилади (наприклад, у реєструючі потенціометри і рівноважні мости) для надання їм функцій автоматичного регулювання за релейним законом. Такий регулятор складається з вимірювальної частини, керуючого і задаючого пристроїв, релейного блоку і виконавчого механізму. Спрощена схема двопозиційного регулятора приведена на рис. 3.9. Вимірювальною частиною приладу є звичайний потенціометр або рівноважний міст (на схемі не показаний).

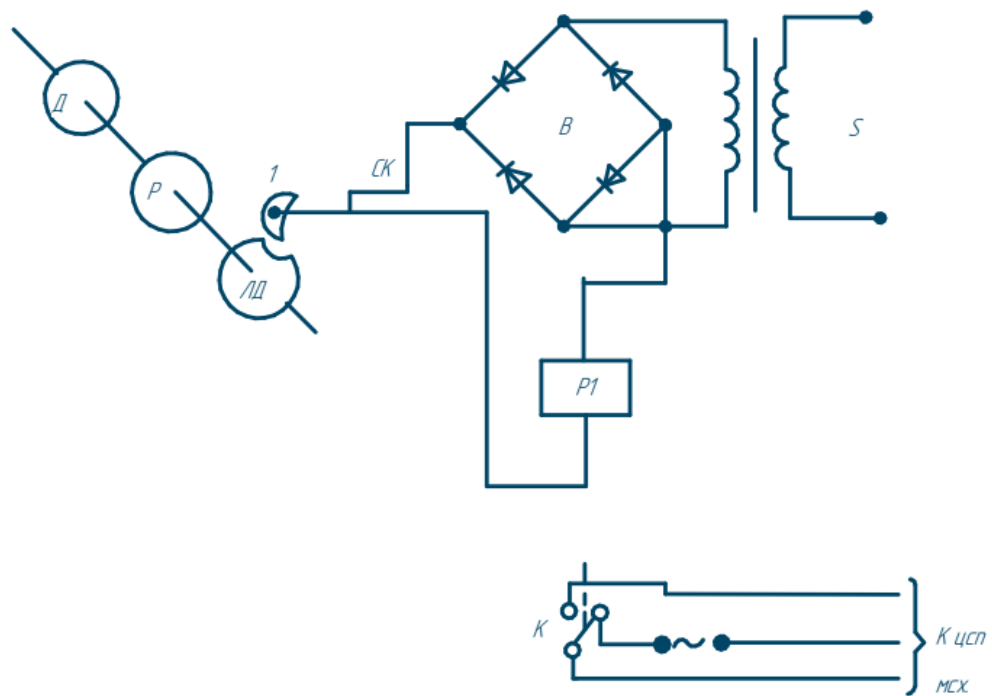


Рисунок 3.9 – Будова двопозиційного регулятора: Д – реверсивний двигун, Р – редуктор, Р₁ - електромагнітне реле, ПД – профільований диск, СК – контакт, В – випрямляч, К – перемикач

На вихідному валу редуктора, що приводиться в дію реверсивним двигуном, закріплений профільований диск, на якому є паз. Диск здійснює дію вимірювальної частини приладу на керуючий пристрій. По профільованому диску ковзає шарнірно-хитаючийся елемент 1 з контактом СК, що розташований на поворотній планці, і виконує функції керуючого пристрою. Поворотом планки вручну можна змінювати положення шарнірно-коливального елемента, відносно пазу диску, змінюючи тим самим задане значення регульованої величини. Задане значення показується стрілкою, що розташована перед шкалою приладу.

Знаходячись зліва від паза, шарнірно-коливальний елемент утримує контакт СК у замкненому стані. Знаходячись у пазі справа, шарнірно-коливальний елемент залишає контакт розімкненим.

Контакт СК впливає на котушку електромагнітного реле, яке живиться постійним струмом від випрямляча і забезпечено перемикачем для управління виконавчим механізмом. Робота регулятора полягає в наступному: якщо регульована величина нижче заданої, то шарнірно-коливальний елемент знаходиться зліва від паза диска, контакт СК – замкнений. Котушка електромагнітного реле збуджена, перемикач подає сигнал виконавчому механізму на збільшення регульованої величини. При збільшенні останньої профільований диск повертається проти годинникової стрілки. Під час переходу регульованої величини через задане значення шарнірно-коливальний елемент, потрапляючи в паз, розмикає контакт СК, а сам займає положення праворуч від паза. При цьому котушка реле знеструмлюється, її сердечник відпускає поворотний якір і перемикач замикає контакти на пониження регульованої величини.

Розглянемо роботу трипозиційного контактного регулятора, схема якого приведена на рис. 3.10. Схема відрізняється від двопозиційного контактного регулятора наявністю двох профільованих дисків ПД₁ і ПД₂ з двома шарнірно-коливальними елементами 1 і 2 і двома контактами СК₁ і СК₂. Релейний блок складається з трьох електромагнітних реле Р₁, Р₂ і Р₃ з трьома нормально розімкненими контактами К₁, К₂ і К₃. Крім того, реле Р₁ має нормально замкнутий контакт *а*, а реле Р₃ — контакт *в*. Задане значення регульованої величини встановлюється поворотом двох планок. Одна планка встановлює нижнє значення регульованої величини, при якому виконавчий механізм ВМ спрацьовує на підвищення регульованої величини.

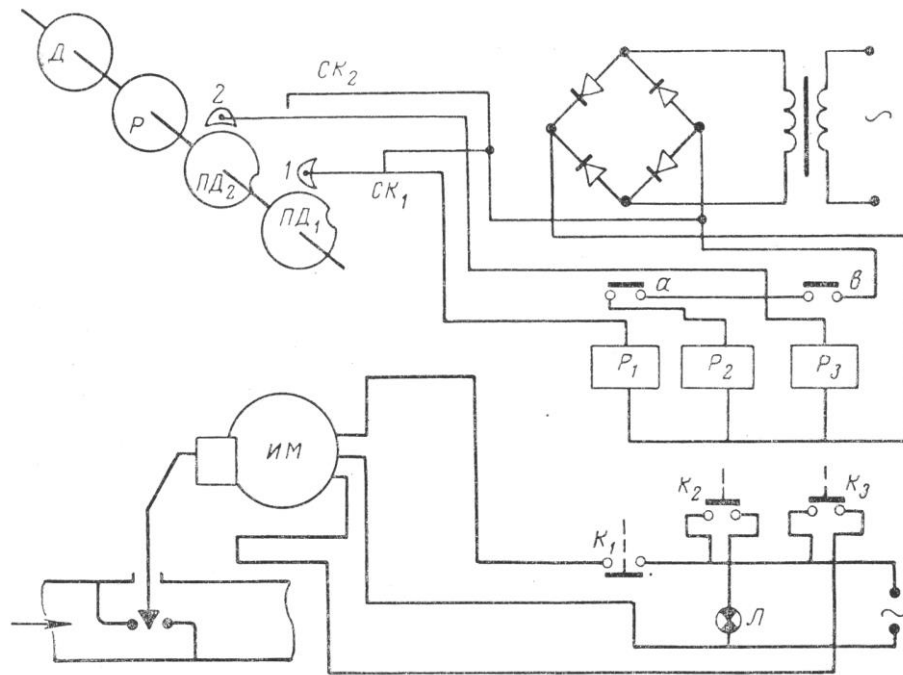


Рисунок 3.10 – Будова двопозиційного регулятора: Д – реверсивний двигун, P_1 , P_2 , P_3 – електромагнітні реле, ПД₁, ПД₂ – профільовані диски, СК₁, СК₂ – контакти, В – випрямляч, К₁, К₂, К₃ – перемикачі, ВМ – виконавчий механізм

Друга планка встановлює верхнє значення, при якому виконавчий механізм спрацьовує на пониження. Планки переміщують шарнірно-коливальні елементи, відносно профільованих дисків і мають стрілки на шкалі приладу. У діапазоні між встановленими значеннями на привід виконавчого механізму керуючий сигнал не поступає, а горить лампа Л, що сигналізує про нормальне значення регульованої величини.

Регулятор працює таким чином. При значенні регульованої величини нижче заданого профільовані диски і шарнірно-коливаючі елементи займають положення, показане на рис. 3.6. Контакт СК₂ розімкнений, а контакт СК₁ замкнений. При цьому котушка реле P_1 збуджена, і контакт К₁ замкнений. Привід виконавчого механізму спрацьовує на збільшення регульованої величини. Контакт α розімкнений, а котушка реле P_2 знеструмлена.

При зростанні регульованої величини і обертанні профільних дисків проти годинникової стрілки настає момент, коли в паз диска ПД₁ потрапляє шарнірно-коливаючий елемент 1 і контакт СК₁ розмикається. Котушка реле Р₁ знеструмлюється. Контакт К₁ розмикається, а контакт а замикається. Котушка реле Р₂ збуджується, замикається контакт К₂, і сигнальна лампа Л починає горіти.

При подальшому зростанні регульованої величини контакт СК₁ залишається розімкненим, а в паз профільного диска ПД₂ потрапляє шарнірно-коливальний елемент 2 і контакт СК₂ замикається. Збуджується котушка реле Р₃, замикається контакт К₃, і привід виконавчого механізму спрацьовує на зменшення регульованої величини. Одночасно із замиканням контакту К₂ розмикається контакт в, який знеструмлює котушку реле Р₂, і сигнальна лампа Л гасне.

Ще одним прикладом застосування релейного регулювання є релейні слідкуючі системи. На рис. 3.11 показана схема релейної слідкуючої системи з двигуном постійного струму.

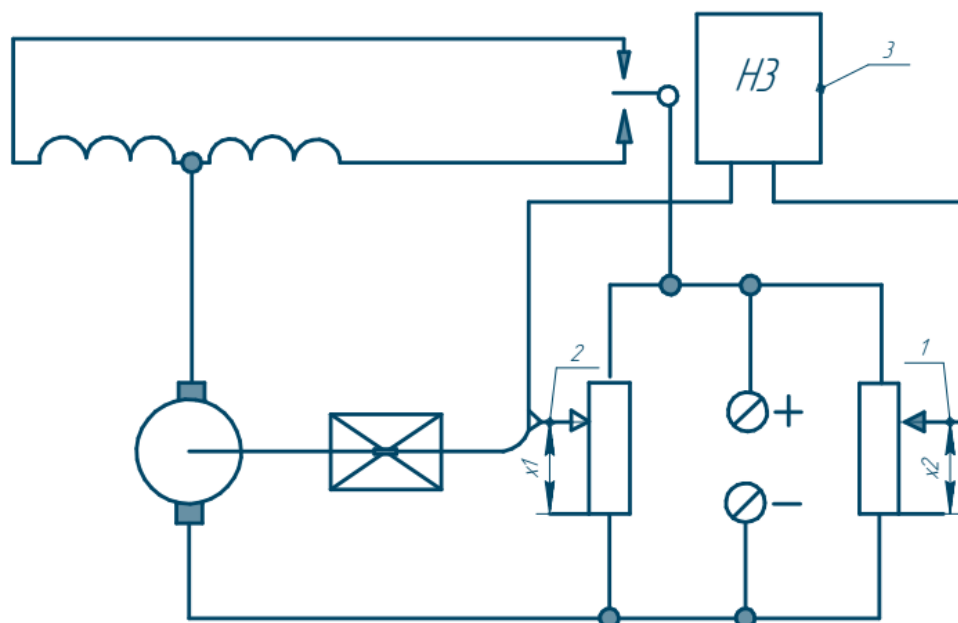


Рисунок 3.11 – Будова релейної слідкуючої системи: 1, 2 – реостати,

3 – поляризоване реле

Задання положення здійснюється движком реостату 1. Двигун слідкуючої системи повинен перемістити движок реостату 2 в аналогічне положення. Неузгодження положень движків визначається поляризованим реле 3, яке своїми контактами включає двигун в ту або іншу сторону залежно від знаку неузгодження.

Імпульсні пристрої – це пристрої, які працюють не безперервно, а в дискретному переривчастому режимі, коли короткочасна дія сигналу чергується з паузою (рис. 3.12).

Імпульсні системи регулювання мають у своєму складі імпульсний регулятор, вихід якого приймає скінчені значення тільки в деякі проміжки часу, а між цими проміжками значення на виході регулятора дорівнює нулю або константі. Наприклад, процесор комп'ютера.

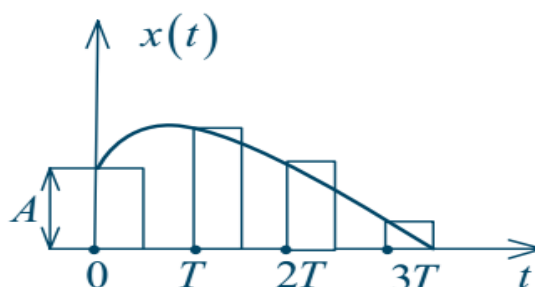


Рисунок 3.12 – Ілюстрація до роботи імпульсних систем регулювання

У проміжках часу між моментами включення можна використати регулятор, що в даний момент часу незадіяний, на іншому об'єкті.

З метою більш поглибленого вивчення теоретичних основ даної лабораторної роботи рекомендується використати конспект лекцій з навчальної дисципліни та список рекомендованої літератури для даного навчального посібника.

3.2. Опис лабораторної установки

Лабораторна робота складається з 2 частин, кожна з яких виконується а окремому стенді.

Лабораторна установка 1 включає лабораторну піч зі спіральним нагрівачем. У печі повинна підтримуватися температура в межах від t_1 до t_2 . Для виконання цього завдання використовується релейний регулятор. З метою дослідження різних режимів нагріву і охолодження печі використовується обдув стислим повітрям, яке визначає навантаження печі.

Принципова схема лабораторної установки 1 зображена на рис. 3.13. Напруга на нагрівальну спіраль теплового об'єкту подається через лабораторний трансформатор і контролюється приладом 4.

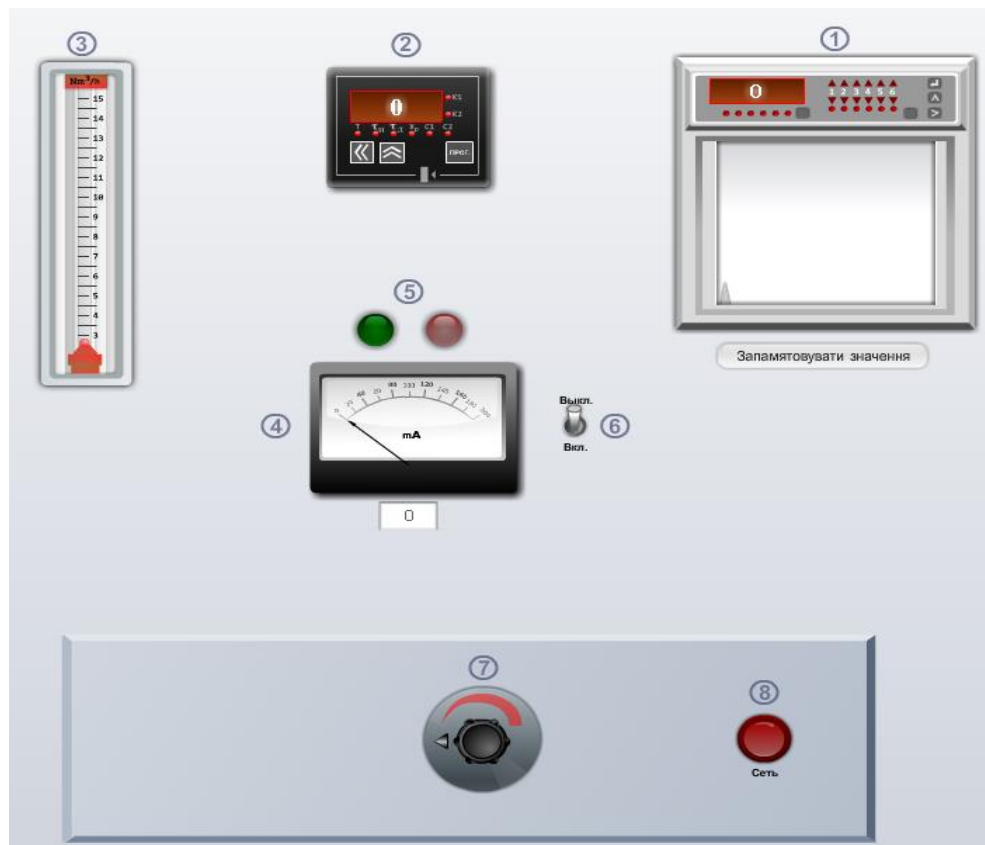


Рисунок 3.13 – Схема лабораторної установки 1: 1, 2 – прилади контролю температури, 3 – ротаметр, 4 – прилад контролю напруги, 5 - сигнальні лампи ,6 - , 7 – редуктор, 8 – кнопка включення живлення

Навантаження на об'єкт змінюється витратою стислого повітря за допомогою редуктора 7. Витрата повітря контролюється ротаметром 3. Вихідною величиною є температура об'єкту, яка контролюється термопарою. ЕРС термопари реєструється приладами 1 (показуючий і реєструючий) і 2 (показуючий). У прилад 1 вбудовано релейний регулятор, який вмикає або вимикає напругу на нагрівальну спіраль теплового об'єкту.

На панель стенду також виведені кнопка включення живлення 8, яка відображає включення стенду в електричну мережу, і сигнальні лампочки 5, які сигналізують про нагрів (червоний) або охолодження (зелений) печі.

Схема лабораторної установки 2 зображена на рис. 3.14. Установка складається з теплового об'єкту – печі 1 і релейного регулятора 2. Регулятор налаштований на підтримку заданої температури в печі; він вмикає або вимикає напругу на нагрівальний елемент теплового об'єкту. Світлодіод 3 відображає стан регулятора (увімкнений/ вимкнений).



Рисунок 3.14 – Схема лабораторної установки 2: 1 – піч, 2 – релейний регулятор, 3 – світлодіод, 4 – перемикач

На задній панелі регулятора 2 розташований перемикач 4, який вмикає/вимикає установку.

3.3. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні лабораторної роботи «Релейне регулювання» наведені у [Додатку А](#).

3.4. Послідовність виконання роботи

Частина 1

1. Ознайомитися з лабораторною установкою 1.
2. Подати електричне живлення на стенд кнопкою 8 (клацнувши мишею по ній). Червоне світло сигналізує про увімкнення установки.
3. Повертаючи ручку редуктора 7  за годинниковою стрілкою, встановити обдув печі стисненим повітрям на заданому рівні за показанням ротаметру.
4. Натиснути кнопку  під приладом 1.
5. Увімкнути піч, клацнувши мишею на кульці перемикача 6 та натиснути кнопку .
6. Проконтролювати за приладами 1 і 2 нагрів/ охолодження печі.
7. Зняти криву регулювання нагріву/ охолодження:

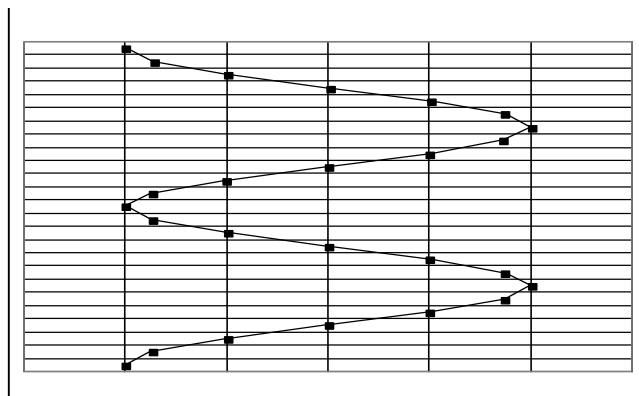


Рисунок 3.15 – Приклад кривих регулювання нагріву та охолодження

8. Зупинити запис, натиснувши кнопку

Зупинити запис

9. Вимкнути піч, клацнувши мишею на кульці перемикача 6.

t	T
2	97
3	96
4	94

10. Скопіювати зміну температури в часі у вікні під приладом 1 в MS Excel.

11. Натиснути кнопку

Очистити

12. Задати 2-3 інших режими обдуву печі і зняти криві регулювання нагріву/ охолодження у цих режимах (п.п. 3 – 11).

Результати експерименту занести до таблиці за наведеним зразком:

Таблиця 3.1 – Результати експерименту

Режим 1 (показання за ротаметром)			
Температура печі, T, °C			
Час, t, сек.			
Режим 2 (показання за ротаметром)			
Температура печі, T, °C			
Час, t, сек.			
Режим ... (показання за ротаметром)			

Частина 2

1. Ознайомитися з лабораторною установкою 2.
2. Підключити установку до джерела живлення і увімкнути її кнопкою 4. Увімкнення індикатора 3 сигналізує про початок нагріву.
3. Зняти криву регулювання нагріву/ охолодження, записуючи значення температури кожні 15 сек.:

Температура печі, $T, ^\circ\text{C}$				
Час, t , сек.	0	15	30	...

4. Одночасно із записом температури в часі записувати час увімкнення/вимкнення регулятора під час нагріву/ охолодження.
5. Вимкнути установку, встановивши перемикач 4 у положення «вимкнено». Від'єднати установку від джерела живлення.

3.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

Використовуючи значення, отримані при виконанні частин 1 та 2, побудувати за допомогою MS Excel криві регулювання $T = f(t)$ – зміну температури технологічного об'єкту керування в часі, де T – температура печі, $^\circ\text{C}$, t – час, сек.

Приклад оформлення кривої регулювання для частини 1:

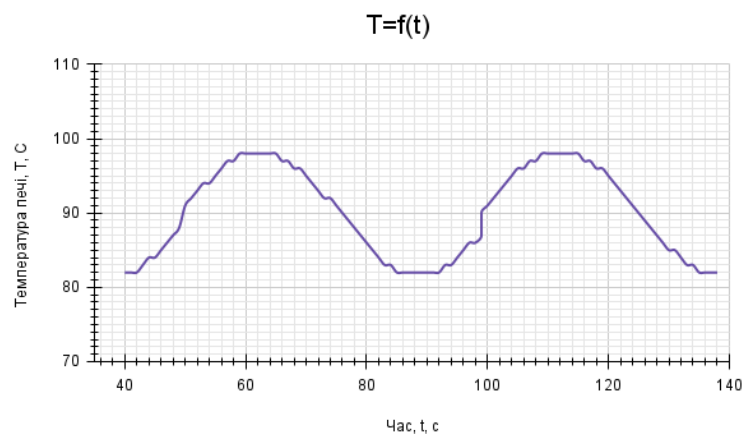


Рисунок 3.16 – Приклад оформлення кривої регулювання до частини 1

Приклад оформлення кривої регулювання для частини 2:

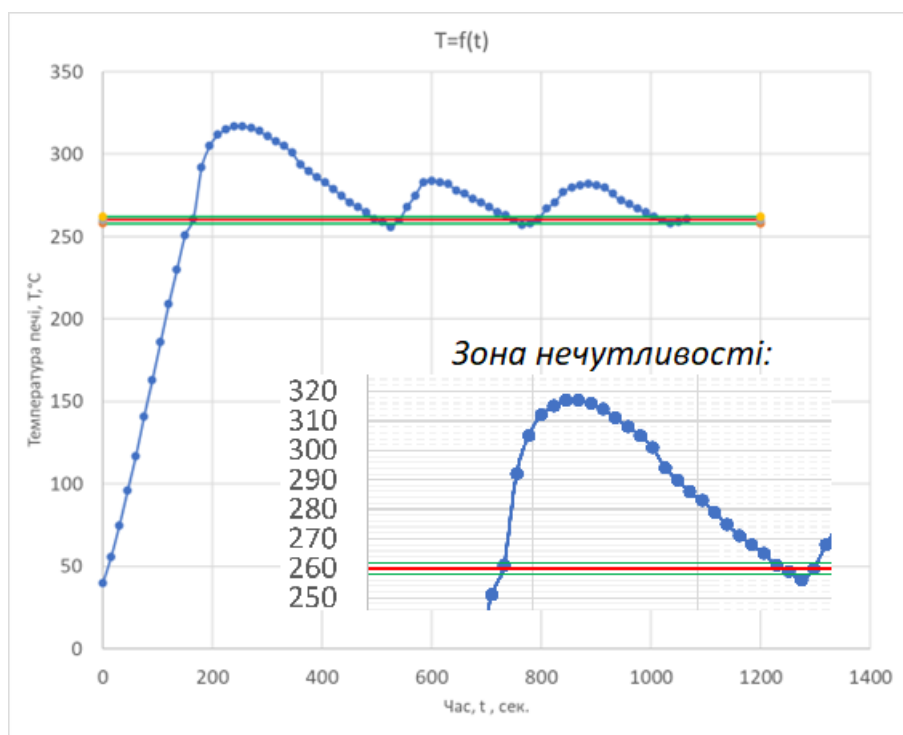


Рисунок 3.17 – Приклад оформлення кривої регулювання до частини 2

Для установки 1 додатково побудувати криву регулювання для заданого режиму обдуву та порівняти отримані результати. Приклад оформлення:

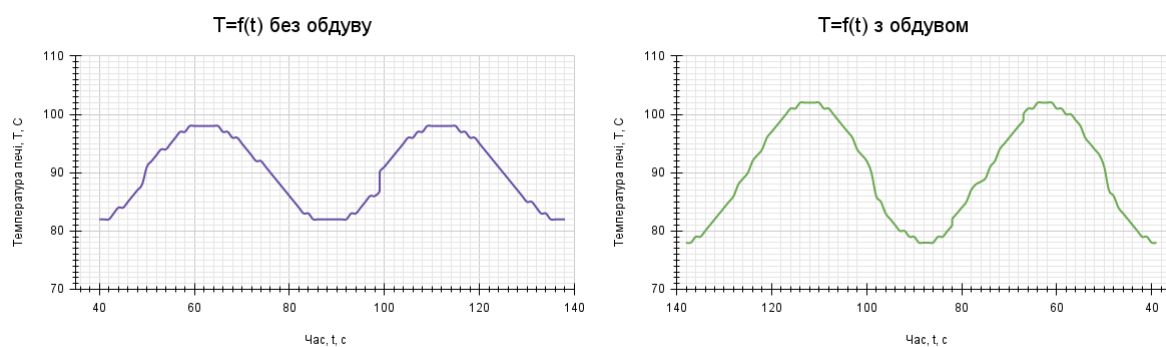


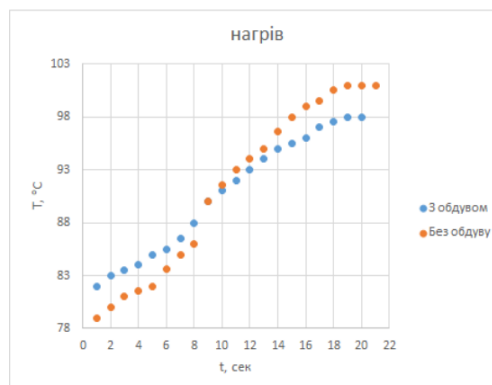
Рисунок 3.18 – Приклад оформлення кривої регулювання до частини 1 (з обдувом)

У звіт про виконану роботу слід включити:

- тему та мету роботи;
- короткі теоретичні відомості;
- опис та принцип роботи релейного регулятора;
- опис лабораторної установки та методики проведення вимірювань;
- таблицю отриманих результатів;
- криві регулювання; визначити зону нечутливості регулятора;
- аналіз отриманих результатів та основні висновки; у висновку пояснити, чому відрізняються криві регулювання при зміні навантаження на піч.

3.6. Контрольні запитання та завдання до самоперевірки

1. Типи регуляторів, які застосовуються у системах автоматизації технологічних процесів.
2. Поняття релейного регулювання.
3. Види релейних характеристик.
4. Принцип дії та будова двопозиційного регулятора.
5. Принцип дії та будова трипозиційного контактного регулятора.
6. Принцип дії та будова релейної слідкуючої системи.
7. Якість двопозиційного регулювання.
8. За наведеним графіком кривих нагріву з обдувом та без обдуву поясніть, як впливає обдув на швидкість нагріву:



9. Яке значення прийме вихідна величина регулятора X_p , якщо поточне значення регульованої величини менше заданого ($Y_p < Y_z$)?
10. До якої температури може нагріватись і охолоджуватись тепловий об'єкт, який досліджується у Частині 1?
11. До якої температури може нагріватись тепловий об'єкт, який досліджується у Частині 2?
12. За наведеною таблицею значень нагріву з обдувом розрахуйте середнє значення швидкості нагріву, град/сек:

t, сек	T, °C
0	79
2	80
4	81.6
6	83.6
8	86
10	92
12	94
14	97
16	99
18	100.5
20	101

13. Поясніть, як впливає зона нечутливості на перехідний процес?
14. Поясніть, чому регульована величина продовжує зростати протягом ще деякого часу після вимкнення регулятора?

Лабораторна робота № 4

Аналогово-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі сигналів

Мета та основні завдання роботи: Дослідити роботу аналогово-цифрових (АЦП) та цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів і отримати метрологічні характеристики цього обладнання. Порівняти результати вимірювань при застосуванні цифрової та аналогової техніки при вимірюванні технологічних параметрів.

4.1. Основні теоретичні відомості

АЦП та ЦАП широко застосовуються у цифрових системах керування (рис. 4.1). Такі системи використовують цифрові технології та програмне забезпечення для обробки аналогових сигналів, що надходять з технологічних об'єктів, та перетворення їх у дискретні сигнали та оптимізації процесу керування.

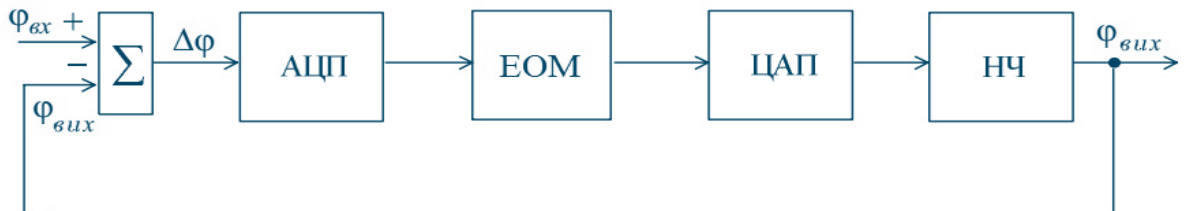


Рисунок 4.1 – Цифрова система керування: АЦП - аналого-цифровий перетворювач, ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач, НЧ – неперервна частина, ЕОМ - електронна обчислювальна машина

Цифро-аналогові перетворювачі. ЦАП призначені для перетворення інформації з цифрової форми в аналоговий сигнал шляхом сумування значень струму (напруг). ЦАП широко застосовуються в пристроях автоматики для зв'язку цифрових комп'ютерних систем з аналоговими елементами і системами.

Принцип роботи ЦАП полягає в підсумовуванні аналогових сигналів, пропорційних вагам розрядів вхідного цифрового коду, з коефіцієнтами, рівними нулю або одиниці залежно від значення відповідного розряду коду.

На ЦАП надходять цифрові сигнали у вигляді двійкового коду (наприклад, $Q_4Q_3Q_2Q_1$). ЦАП перетворює цифровий двійковий код $Q_4Q_3Q_2Q_1$ в аналогову величину, зазвичай напругу $U_{вих}$. Кожен розряд двійкового коду має певну вагу і-го розряду удвічі більше, чим вага (і-1)-го. Роботу ЦАП можна описати наступною формулою:

$$U_{вих} = e(Q_1 \cdot 1 + Q_2 \cdot 2 + Q_3 \cdot 4 + Q_4 \cdot 8) \quad (4.1)$$

де e - напруга, відповідна вазі молодшого розряду, Q_i - значення і -го розряду двійкового коду (0 або 1).

Наприклад, числу 1001 відповідає

$$U_{вих} = e(1 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 8) = 9e, \quad (4.2)$$

а числу 1100

$$U_{вих} = e(0 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 1 \cdot 4 + 1 \cdot 8) = 12e. \quad (4.3)$$

На рис. 4.2 представлена спрощена схема цифро-аналогового перетворювача.

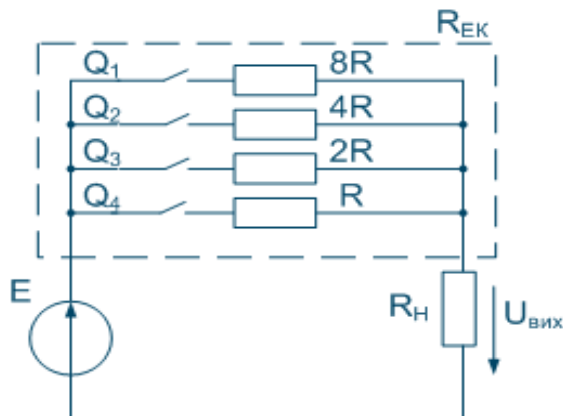


Рисунок 4.2 - Схема цифро-аналогового перетворювача

У схемі і – й ключ замкнутий при $Q_i=1$, а при $Q_i=0$ – розімкнений.

Еквівалентний опір обведеного пунктиром двополюсника R_{EK} і опір навантаження R_H утворюють дільник напруги. Тоді

$$U_{вих} = \frac{ER_H}{R_{EK} + R_H} \quad (4.4)$$

Регістри підібрані таким чином, що $R \gg R_H$, тоді

$$U_{вих} = \frac{ER_H}{R_{EK} + R_H} \quad (4.6)$$

Провідність двополюсника $1 / R_{EK}$ дорівнює сумі провідності гілок (при $Q_i=1$ і – гілка включена, при $Q_i=0$ – відключена):

$$\frac{1}{R_{EK}} = \frac{Q_1}{8R} + \frac{Q_2}{4R} + \frac{Q_3}{2R} + \frac{Q_4}{R} \quad (4.7)$$

Підставивши (4.6) в (4.5), отримуємо вираз, ідентичний (4.1)

$$U_{вих} = \frac{8ER_H}{R} (Q_1 \cdot 1 + Q_2 \cdot 2 + Q_3 \cdot 4 + Q_4 \cdot 8) \quad (4.8)$$

Очевидно, що $e = \frac{8ER_H}{R}$. Вибором e можна встановити необхідний масштаб аналогової величини.

Аналогово-цифрові перетворювачі. У інформаційних керуючих системах частина (або вся) інформація від датчиків у більшості випадків представлена в аналоговій формі. Для її введення в цифрові комп'ютерні системи і цифрові керуючі пристрої широко застосовуються аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП). В більшості випадків АЦП виконують перетворення вхідної напруги або струму в двійковий цифровий код.

Існують різні типи АЦП. Зупинимось на тих типах, які набули в даний час найбільшого поширення.

АЦП послідовного наближення (АЦП ПН). Структурна схема АЦП ПН приведена на рис. 4.3. Схема працює таким чином. Вхідний аналоговий сигнал $U_{\text{вх}}$ перед початком перетворення запам'ятовується схемою вибірки – зберігання (ВЗ), оскільки в процесі перетворення необхідна зміна аналогового сигналу. Далі по команді “Пуск” за допомогою сдвигового регістру послідовно в часі кожен тригер T_i , починаючи із старшого розряду, переводить в положення 1 відповідний розряд ЦАП. Напруга U_1 (або струм) з виходу ЦАП порівнюється з вхідним аналоговим сигналом за допомогою компаратора¹ (КП). Якщо $U_0 > U_1$, на виході компаратора зберігається низький рівень і в тригері зберігається одиниця. При $U_0 < U_1$ спрацьовує компаратор і переводить тригер в положення 0. Після закінчення циклу на виходах тригерів встановлюється двійковий код, відповідний (при ідеальних елементах) U_0 з точністю до половини молодшого розряду.

Похибка АЦП ПН визначається неточністю ЦАП, зоною нечутливості і зсувом нуля КП, а також похибкою схеми ВЗ.

Оскільки в такій схемі помилка в будь-якому розряді надалі не корегується, необхідно, щоб час на “зважування” кожного розряду був достатній для загасання перехідного процесу до рівня, відповідного половині молодшого розряду, і щоб при розбалансі $U_1 - U_0$ на це значення КП встиг спрацювати.

¹ **Компаратор** (англ. *comparator*) – це елемент порівняння, який широко використовується в системах контролю та автоматичного керування.

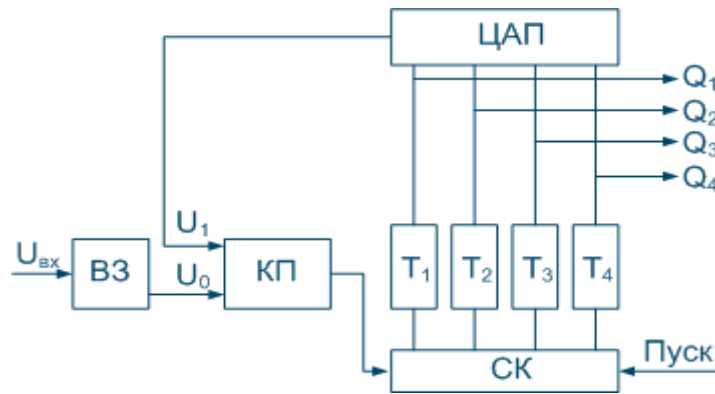


Рисунок 4.3 – Схема АЦП послідовного наближення

Загальний час перетворення

$$t_{\text{ПР}} = t_{\text{ВЗ}} + n(t_{\text{З}} + t_{\text{В}} + t_{\text{Ц}}) + t_{\text{СК}}, \quad (4.9)$$

де $t_{\text{ВЗ}}$ – час, необхідний для фіксації $U_{\text{ВЗ}}$ схемою ВЗ; n – число розрядів; $t_{\text{З}}$ – час затримки, що вноситься компаратором; $t_{\text{В}}$ – час встановлення U_1 на вході ЦАП; $t_{\text{Ц}}$ – час затримки цифрових елементів в схемі управління і спрацьовування тригера; $t_{\text{СК}}$ – час, необхідний для скидання ЦАП в початковий стан з урахуванням часу, необхідного для синхронізації з початком такту.

Найбільшу частку до $t_{\text{ПР}}$ зазвичай вносить $t_{\text{В}}$, найбільша величина якого може бути оцінена таким чином:

$$t_{\text{В}} = (1 + n)T_{\text{Е}} \ln 2, \quad (4.10)$$

де $T_{\text{Е}}$ – еквівалентна постійна часу на вході ЦАП.

При 12-розрядному АЦП і використанні швидкодіючого ЦАП з $t_B=100$ нс, а час перетворення $t_{ПР}$ буде становити близько 1,5 мкс. В більшості випадків $t_{ПР}$ такого перетворювача знаходиться у межах 10 – 100 мкс.

АЦП паралельного типу (АЦП ПТ). Істотне зменшення $t_{ПР}$ вдається отримати в АЦП паралельного типу. Його структурна схема наведена на рис. 4.4. Тут вхідна аналогова величина U_0 з виходу схеми ВЗ порівнюється за допомогою $2n+1 - 1$ компараторів з $2(2n-1)$ еталонними рівнями, які оснащені дільниками, що містять резистори рівного опору. При цьому спрацьовують m молодших компараторів, які створюють на виходах схем нормальний одиничний код. Потім він за допомогою спеціального дешифратора (ДШ) перетвориться в двійковий вихідний сигнал.

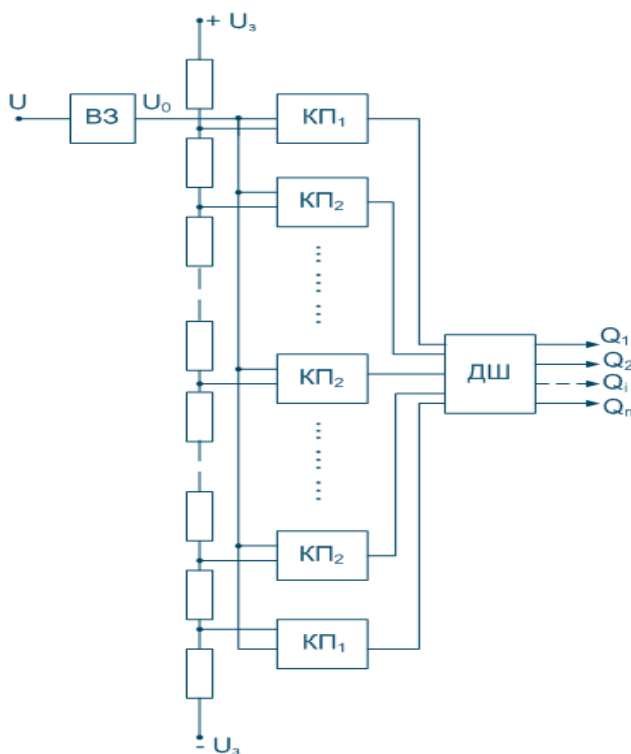


Рисунок 4.4 – Схема АЦП паралельного типу

Похибка АЦП ПТ визначається неточністю і нестабільністю еталонної напруги, резистивного дільника і похибками компараторів. Значну роль

можуть грати вхідні струми компараторів, коли дільник недостатньо низькоомний.

Час перетворення у АЦП ПТ складається з наступних складових:

$$t_{ПР} = t_{ВЗ} + t_3 + a \cdot t_{ЛС} \quad (4.11)$$

де $t_{ЛС}$ – час затримки логічних схем; a – число послідовно включених логічних схем.

При використанні компараторів із стробіюванням АЦП ПТ може бути без схеми ВЗ. При цьому він забезпечує більшу швидкодію в порівнянні з будь-якими іншими АЦП.

З метою більш поглибленого вивчення теоретичних основ даної лабораторної роботи рекомендується використати конспект лекцій з навчальної дисципліни та список рекомендованої літератури для даного навчального посібника.

4.2. Опис лабораторної установки

Схему лабораторної установки показано на рис. 4.5.

Пневматичні прилади 5-7 живлять стислим повітрям із тиском 0,14 МПа (1,4 кгс/см²) через редуктор панелі дистанційного керування 9, де контролюють тиск за манометром. Блок обдуву печі 5 вмикається перемикачем 6 (необхідно клацнути мишею на кульці перемикача); інтенсивність обдуву регулюється редуктором 7 (min, mid, max).

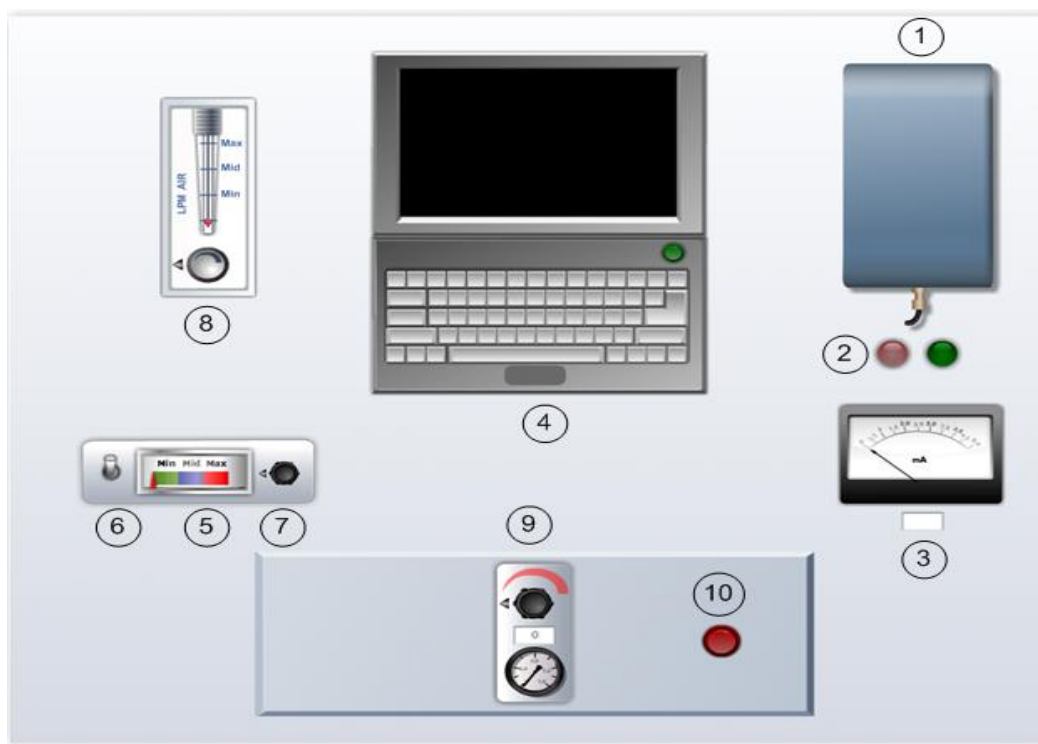


Рисунок 4.5 – Схема лабораторної установки: 1 – піч з омичним підігрівачем, 2, 3 – блоки індикації, 4 – комп'ютер, 5-7 – блок обдуву печі, 6 – тумблер увімкнення нагріву печі, 8 – ротаметр, 9 – панель дистанційного керування, 10 – кнопка увімкнення живлення на стенд

У кожному режимі обдуву рекомендовано вибрати одну з трьох витрат стислого повітря (min, mid, max) за допомогою редуктора керування на ротаметрі 8. Зміни температури відображають міліамперметр 3 (аналоговий прилад) та комп'ютер 4 (цифровий прилад). Візуальний блок індикації 2 дозволяє спостерігати за режимом роботи печі. Увімкнення сигнальної лампи зеленого кольору сигналізує про нагрівання печі, а увімкнення лампи червоного кольору – про охолодження печі.

4.3. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи

Заходи безпеки, яких треба дотримуватись при виконанні лабораторної роботи «Аналогово-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі сигналів» наведені у [Додатку А](#).

4.4. Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
2. Подати електричне живлення на стенд за допомогою кнопки 10 (червоний колір кнопки вказує, що живлення подано).
3. Повертаючи ручку редуктора блока живлення 9  за годинниковою стрілкою, встановити тиск стисненого повітря на рівні 0,14МПа (1,4 кгс/см²).
4. Увімкнути комп'ютер 4 за допомогою кнопки, яка знаходиться у правому верхньому куті клавіатури.
5. Встановити подачу стисненого повітря на охолодження печі за допомогою редуктора керування  на ротаметрі 8 (min, mid, max)¹.
6. Встановити рівень нагріву печі (min, mid, max)¹.
7. Увімкнути нагрів печі тумблером 6.
8. Одразу після увімкнення нагріву запустити програму перетворення сигналу температури в печі за допомогою кнопки «Пуск» на моніторі комп'ютера 4. Результати автоматично заносяться до бази даних, перегляд якої можна здійснити за допомогою кнопки «Показати всі значення».
9. Дослідити процес нагріву печі.
10. Вимкнути нагрів печі тумблером 6 та записати результати вимірювань при охолодженні печі.

¹ За вказівкою викладача

4.5. Обробка та аналіз результатів. Оформлення звіту

Використовуючи значення, занесені до бази даних, перегляд якої здійснюється шляхом натискання на кнопку «Показати всі значення», побудувати за допомогою MS Excel перехідні характеристики нагріву та охолодження печі.

Приклад оформлення результатів:



Рисунок 4.6 – Приклад оформлення результатів

У звіт про виконану роботу слід включити:

- тему та мету роботи;
- короткі теоретичні відомості;
- опис та схеми АЦП/ЦАП;
- опис лабораторної установки та методики проведення вимірювань;
- таблиці отриманих результатів;
- перехідні характеристики нагріву та охолодження печі;
- аналіз отриманих результатів та основні висновки.

4.6. Контрольні запитання та завдання до самоперевірки

1. Місце та мета використання аналогово-цифрових та цифро аналогових перетворювачів сигналів у структурі систем автоматизації технологічних процесів.
2. Порядок отримання перехідної характеристики експериментальним шляхом.
3. Принцип дії та будова цифро аналогового перетворювача.
4. Принцип дії та будова АЦП послідовного наближення.
5. Принцип дії та будова АЦП паралельного типу.
6. Який сигнал подається на вхід цифрового регулятора?
7. Джерела виникнення похибок цифроаналогових перетворювача.
8. Джерела виникнення похибок в аналогово-цифрових перетворювачах послідовного та паралельного типів.
9. Який режим обдуву печі встановлено, згідно з рисунком:



10. За наведеними даними розрахуйте середнє значення швидкості охолодження в мА/сек:

t, сек	750	810	870	930	990	1050	1110	1170	1230
U, мА	3.99	3.97	3.95	3.89	3.78	3.56	3.13	2.26	0.52

11. За наведеними даними розрахуйте середнє значення швидкості нагріву в мА/сек:

t, сек	0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
U, мА	0	1.70	2.68	3.24	3.56	3.75	3.86	3.92	3.95	3.97	3.98

12. Користуючись формулою (4.1), розрахуйте напругу $U_{вих}$, яка встановиться на виході з ЦАП, якщо цифровий код на вході:
а) **1101**, б) **0010**, в) **1111**.

Список рекомендованої літератури

1. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічний об'єкти керування та схеми автоматизації: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтег. технології/ М. В. Лукінюк. - К.: НТУУ «КПІ», 2008. - 236 с.
2. Лукінюк М. В. Технологічні вимірювання та прилади : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Лукінюк ; М-во освіти і науки України, НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 18,6 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2007. – 433 с. : іл. ISBN 978-966-622-247-6. – Доступ у електронному архіві КПІ : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/66269>.
3. Промислові засоби автоматизації. Ч.1. Вимірювальні пристрої: навчальний посібник/ А.К.Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.; Х.: НТУ"ХПІ", 2001. - 470с.
4. Промислові засоби автоматизації. Ч.2. Регулюючі і виконавчі пристрої: навчальний посібник/ А.К.Бабіченко, В.І. Тошинський, В.С. Михайлов та ін.; Х.: НТУ"ХПІ", 2001. - 658с.
5. Муратов В. Г. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади : Навч. посіб. – К. : Освіта України, 2012. – 352 с.
6. Клименко О. П. Контроль і управління технологічними процесами : навч. посіб. / О. П. Клименко, І. Г. Каюн, А. Р. Шейкус ; ДВНЗ "Укр. держ. хіміко–технологічний ун-т". – Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2019. – 180 с.
7. Ощипок І. М. Автоматизація виробничих процесів : навч. посіб. / І. М. Ощипок, І. Ф. Ланиця ; Центральна спілка споживчих товариств України, ЛТЕУ. – Львів, 2020. –224 с.
8. Лукінюк М. В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсів «Технологічні вимірювання і прилади», «Автоматизація

- виробничих процесів», «Контроль та керування хіміко-технологічними процесами»: у 2 ч. [Текст]/ М.В. Лукінюк, П.М. Сташквич, В.О. Самсонов. – К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2003. – Ч. 1. - 92 с.
9. Метрологія. Технологічні вимірювання та прилади. Ч. 2: Метрологічні характеристики приладів для вимірювання тиску та рівня : практикум / С. Г. Бондаренко, О. В. Сангінова ; НТУУ «КПІ». – Київ : НТУУ «КПІ», 2011.
10. Технологічні вимірювання і прилади. Вимірювання температури : навч. посіб. / уклад.: С. Г. Бондаренко, Д. М. Складанний. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 83 с.
11. Технологічні вимірювання і прилади. Вимірювання рівня та витрат : навч. посіб. / уклад.: С. Г. Бондаренко, Д. М. Складанний, А. О. Абрамова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 117 с.
12. Керування хіміко-технологічними процесами. навч. посібник / Р.Б. Медведєв. – К.:ІСДО, 1994. – 160 с.
13. Папушин Ю.Л. Основи автоматизації гірничого виробництва/. Ю.Л. Папушин, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2007. – 168 с.
14. Лукінюк М. В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У 2 кн. Кн. 2. Керування хіміко-технологічними процесами: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом навчання: «Хімічна технологія та інженерія». – Київ : НТУУ «КПІ», 2012. – 336 с. ISBN 978-966-622-531-6. – Доступ у електронному архіві КПІ : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19086>.
15. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 544 с.

- 16.Схема автоматизації технологічного процесу хімічного виробництва
методичні вказівки по виконанню контрольної роботи курсу “Технічні
засоби автоматизації – 1” кредитного модуля: «Електричні елементи
систем автоматизації» до напрямку підготовки “Автоматизація та
комп’ютерно-інтегровані технології ” / уклад. В.М. Ковалевський. – К.:
НТУУ «КПІ», 2012. – 87 с.
- 17.Технічні засоби автоматизації: навчальний посібник/ Ніколаєнко А.М.;
Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2013 – 322 с.
- 18.Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б.
Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навч. пос. –
Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.

Додаток А

Заходи безпеки під час виконання лабораторних робіт

Цикл лабораторних робіт з дисципліни «Контроль та керування хіміко-технологічними процесами» виконуються в навчальних лабораторіях кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології хіміко-технологічного факультету, де розміщені персональні комп'ютери. Обладнання живиться електричним струмом напругою 220 В. Тому при виконанні лабораторних робіт слід дотримуватися заходів безпеки наступних інструкцій.

ІНСТРУКЦІЯ

з техніки безпеки при навчанні студентів на ПЕОМ в навчальних лабораторіях кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології хіміко-технологічного факультету

1. Знання і суворе дотримання цих правил є обов'язковим для всіх осіб, допущених до роботи на ПЕОМ. Доведення їх до кожного зі студентів підтверджується особистим підписом кожного з них у контрольному аркуші з техніки безпеки. Особи, які не одержали такого інструктажу та не поставили підпис у контрольному аркуші з техніки безпеки, до роботи на ПЕОМ не допускаються.
2. Всі роботи в навчальних лабораторіях кафедри проводяться лише з дозволу викладача або співробітника кафедри.
3. Під час проведення занять в навчальній лабораторії не повинні знаходитися сторонні особи, в тому числі студенти інших груп. Студенти не повинні самовільно залишати навчальну лабораторію під час занять.
4. При роботі на ПЕОМ треба пам'ятати, що в них використовується напруга, небезпечна для життя.

5. Всі особи, працюючі в навчальних лабораторіях кафедри повинні бути ознайомлені з правилами надання першої медичної допомоги при ураженні електричним струмом.
6. Перед вмиканням ПЕОМ кожен з працюючих повинен отримати дозвіл викладача або співробітника кафедри.
7. У випадках виникнення короткого замикання, горіння, диму, вогню в апаратурі, пристрій необхідно негайно вимкнути з мережі та доповісти викладачеві або співробітникам кафедри. Самостійні дії по усуненню пошкодження забороняються.
8. У випадку виходу з ладу обладнання або програмного забезпечення, що зумовлені іншими причинами, доповісти викладачеві або співробітникам кафедри. Вимикати апаратуру при цьому не дозволяється. Самостійні дії по усуненню пошкодження забороняються.
9. Працюючі в навчальних лабораторіях кафедри несуть майнову та адміністративну відповідальність за збереження та використання обладнання, наданого для їх праці.
10. Категорично забороняється:
 - самостійно вмикати та вимикати тумблери на щитку електроживлення;
 - несанкціоновано вмикати електрообладнання;
 - приносити та вмикати своє обладнання та пристрої, встановлювати власне програмне забезпечення;
 - залишати без нагляду увімкнені пристрої та лабораторію;
 - пересувати обладнання та комплектуючі;
 - підключати та відключати інформаційні кабелі та кабелі живлення;
 - використовувати власні носії інформації без дозволу викладачів або співробітників кафедри;

– знаходитись в навчальній лабораторії у верхньому одязі.

11. Після закінчення занять обладнання не вимикається. Робоче місце має бути прибрано працюючим та перевірене викладачем чи співробітником кафедри.

ІНСТРУКЦІЯ

про міри пожежної безпеки у лабораторіях, навчальних та робочих приміщеннях кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології хіміко-технологічного факультету

1. Всі студенти повинні знати та ретельно виконувати «Загальні правила пожежної безпеки в КПІ ім. Ігоря Сікорського».
2. Завідуючий кафедрою та завідуючий лабораторією відповідають за забезпечення пожежної безпеки всіх приміщень кафедри та за справність протипожежного обладнання та сигналізації.
3. Все електричне обладнання, яке знаходиться в лабораторіях та приміщеннях кафедри, повинно мати заземлення.
4. В усіх приміщеннях повинно дотримуватись чистоти, не займати приміщення непотрібними меблями, обладнанням та матеріалами.
5. Всі двері основних та додаткових виходів утримувати у стані швидкого відкривання.
6. Зберігання та використання горючих та легкоспалахуючих рідин у приміщеннях кафедри забороняється.
7. Ремонт електричного обладнання проводити у строгій відповідності з правилами пожежної безпеки.
8. Всі електрозахисти повинні знаходитися у закритому положенні, не займаними сторонніми предметами.

9. Коридори, проходи, тамбури, евакуаційні виходи та підходи до першочергових засобів пожежогасіння, а також комунікаційні ніші повинні бути постійно вільними, чистими та нічим не зайнятими.
10. Відповідальні особи перед закриттям приміщень повинні ретельно оглянути їх, забезпечити прибирання виробничих відходів, перевірити якість перекриття води, газу, відключити напругу електромережі, перевірити стан пожежної сигналізації та засобів пожежогасіння.
11. Від усіх приміщень мати два комплекти ключів. Один комплект здавати черговому, а інший – зберігати в певному місці, яке відомо обслуговуючому персоналу.

Студенти повинні знати та ретельно виконувати «Загальні правила техніки безпеки в КПІ ім. Ігоря Сікорського», про що вони ставлять свій підпис у відповідному контрольному аркуші з техніки безпеки перед початком проведення циклу лабораторних робіт. Студенти, які не пройшли інструктаж і не поставили підпис у контрольному аркуші, до роботи не допускаються.

Додаток Б

Градувальні таблиці стандартних термопар

Таблиця Б.1. Градувальна характеристика мідь-копелевої термопари для
діапазону температур $-200 \div +100^{\circ}\text{C}$

Температура рабочого кінця, $^{\circ}\text{C}$	Термоелектрорушійна сила, мВ										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-200	-6,154										
-190	-5,975	-5,994	-6,012	-6,031	-6,049	-6,067	-6,084	-6,102	-6,120	-6,137	-6,154
-180	-5,781	-5,801	-5,821	-5,841	-5,861	-5,880	-5,900	-5,919	-5,938	-5,957	-5,975
-170	-5,573	-5,594	-5,616	-5,637	-5,658	-5,679	-5,700	-5,720	-5,741	-5,761	-5,781
-160	-5,349	-5,372	-5,395	-5,418	-5,440	-5,463	-5,485	-5,507	-5,529	-5,551	-5,573
-150	-5,111	-5,136	-5,160	-5,184	-5,208	-5,232	-5,256	-5,279	-5,303	-5,326	-5,349
-140	-4,859	-4,885	-4,911	-4,936	-4,962	-4,987	-5,012	-5,037	-5,062	-5,087	-5,111
-130	-4,593	-4,621	-4,648	-4,675	-4,701	-4,728	-4,755	-4,781	-4,807	-4,833	-4,859
-120	-4,314	-4,342	-4,371	-4,399	-4,427	-4,455	-4,483	-4,511	-4,539	-4,566	-4,593
-110	-4,021	-4,051	-4,081	-4,110	-4,140	-4,169	-4,198	-4,227	-4,256	-4,285	-4,314
-100	-3,715	-3,747	-3,778	-3,809	-3,839	-3,870	-3,900	-3,931	-3,961	-3,991	-4,021
-90	-3,397	-3,429	-3,462	-3,494	-3,526	-3,558	-3,590	-3,621	-3,653	-3,684	-3,715
-80	-3,066	-3,100	-3,133	-3,166	-3,200	-3,233	-3,266	-3,299	-3,332	-3,364	-3,397
-70	-2,723	-2,757	-2,792	-2,827	-2,861	-2,896	-2,930	-2,964	-2,998	-3,032	-3,066
-60	-2,367	-2,403	-2,439	-2,475	-2,511	-2,546	-2,582	-2,617	-2,652	-2,688	-2,723
-50	-2,000	-2,038	-2,075	-2,112	-2,149	-2,185	-2,222	-2,259	-2,295	-2,331	-2,367
-40	-1,622	-1,660	-1,699	-1,737	-1,775	-1,813	-1,850	-1,888	-1,926	-1,963	-2,000
-30	-1,233	-1,272	-1,311	-1,351	-1,390	-1,429	-1,468	-1,506	-1,545	-1,584	-1,622
-20	-0,832	-0,873	-0,913	-0,954	-0,994	-1,034	-1,074	-1,114	-1,153	-1,193	-1,233
-10	-0,421	-0,463	-0,504	-0,546	-0,587	-0,628	-0,669	-0,710	-0,751	-0,792	-0,832
-0	0,000	-0,043	-0,085	-0,127	-0,170	-0,212	-0,254	-0,296	-0,338	-0,380	-0,421
+0	0,000	0,043	0,085	0,128	0,171	0,214	0,258	0,301	0,344	0,388	0,431
10	0,431	0,475	0,519	0,563	0,607	0,651	0,695	0,739	0,784	0,828	0,873
20	0,873	0,917	0,962	1,007	1,052	1,097	1,142	1,187	1,232	1,278	1,323
30	1,323	1,369	1,415	1,460	1,506	1,552	1,598	1,644	1,691	1,737	1,783
40	1,783	1,830	1,876	1,923	1,970	2,017	2,064	2,111	2,158	2,205	2,252
50	2,252	2,300	2,347	2,395	2,442	2,490	2,538	2,586	2,634	2,682	2,730
60	2,730	2,778	2,826	2,875	2,923	2,972	3,021	3,069	3,118	3,167	3,216
70	3,216	3,265	3,314	3,363	3,413	3,462	3,512	3,561	3,611	3,661	3,710
80	3,710	3,760	3,810	3,860	3,910	3,960	4,011	4,061	4,111	4,162	4,213
90	4,213	4,263	4,314	4,365	4,416	4,467	4,518	4,569	4,620	4,671	4,722
100	4,722										

Таблиця Б.2. Градувальна характеристика мідь-міднонікелевої термопари, тип Т, у діапазоні температур -200÷+400°С

Температура рабочого кінця, °С	Темроелектрорушійна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	-5,603									
-190	-5,439	-5,456	-5,472	-5,489	-5,505	-5,522	-5,538	-5,554	-5,571	-5,587
-180	-5,261	-5,279	-5,297	-5,315	-5,333	-5,351	-5,369	-5,386	-5,404	-5,421
-170	-5,069	-5,089	-5,108	-5,128	-5,147	-5,167	-5,186	-5,205	-5,223	-5,242
-160	-4,865	-4,886	-4,907	-4,927	-4,948	-4,969	-4,989	-5,009	-5,029	-5,049
-150	-4,648	-4,670	-4,692	-4,714	-4,736	-4,758	-4,779	-4,801	-4,822	-4,844
-140	-4,419	-4,442	-4,465	-4,489	-4,512	-4,535	-4,558	-4,580	-4,603	-4,625
-130	-4,177	-4,201	-4,226	-4,250	-4,275	-4,299	-4,323	-4,347	-4,371	-4,395
-120	-3,923	-3,949	-3,974	-4,000	-4,025	-4,051	-4,076	-4,101	-4,127	-4,152
-110	-3,656	-3,683	-3,710	-3,737	-3,764	-3,791	-3,817	-3,844	-3,870	-3,897
-100	-3,378	-3,406	-3,434	-3,463	-3,491	-3,519	-3,546	-3,574	-3,601	-3,629
-90	-3,089	-3,118	-3,147	-3,177	-3,206	-3,235	-3,264	-3,292	-3,321	-3,349
-80	-2,788	-2,818	-2,848	-2,879	-2,909	-2,939	-2,969	-2,999	-3,029	-3,059
-70	-2,475	-2,507	-2,538	-2,570	-2,601	-2,633	-2,664	-2,695	-2,726	-2,757
-60	-2,152	-2,185	-1,217	-2,250	-2,282	-2,315	-2,347	-2,379	-2,411	-2,443
-50	-1,819	-1,853	-1,886	-1,920	-1,953	-1,987	-2,020	-2,053	-2,086	-2,119
-40	-1,475	-1,510	-1,544	-1,579	-1,613	-1,648	-1,682	-1,716	-1,751	-1,785
-30	-1,121	-1,157	-1,192	-1,228	-1,263	-1,299	-1,334	-1,369	-1,405	-1,440
-20	-0,757	-0,794	-0,830	-0,867	-0,903	-0,940	-0,976	-1,012	-1,049	-1,085
-10	-0,383	-0,421	-0,458	-0,496	-0,533	-0,571	-0,608	-0,645	-0,683	-0,720
0	0,000	-0,039	-0,077	-0,116	-0,154	-0,193	-0,231	-0,269	-0,307	-0,345
0	0,000	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,313	0,352
10	0,391	0,431	0,470	0,510	0,549	0,589	0,629	0,669	0,709	0,749
20	0,789	0,830	0,870	0,911	0,951	0,992	1,033	1,074	1,114	1,155
30	1,196	1,237	1,279	1,320	1,362	1,403	1,445	1,486	1,528	1,569
40	1,611	1,653	1,695	1,738	1,780	1,822	1,865	1,907	1,950	1,992
50	2,035	2,078	2,121	2,164	2,207	2,250	2,293	2,337	2,380	2,424
60	2,467	2,511	2,555	2,599	2,643	2,687	2,731	2,775	2,820	2,864
70	2,908	2,953	2,997	3,042	3,086	3,131	3,176	3,221	3,267	3,312
80	3,357	3,402	3,448	3,493	3,539	3,584	3,630	3,676	3,721	3,767
90	3,813	3,859	3,905	3,952	3,998	4,044	4,091	4,137	4,184	4,230
100	4,277	4,324	4,371	4,418	4,465	4,512	4,559	4,607	4,654	4,702
110	4,749	4,797	4,844	4,892	4,939	4,987	5,035	5,083	5,131	5,179
120	5,227	5,275	5,324	5,372	5,421	5,469	5,518	5,566	5,615	5,663
130	5,712	5,761	5,810	5,859	5,908	5,957	6,006	6,056	6,105	6,155
140	6,204	6,254	6,303	6,353	6,402	6,452	6,502	6,552	6,602	6,652
150	6,702	6,752	6,803	6,853	6,904	6,954	7,005	7,055	7,106	7,156
160	7,207	7,258	7,309	7,360	7,411	7,462	7,513	7,564	7,616	7,667
170	7,718	7,769	7,821	7,872	7,924	7,975	8,027	8,079	8,131	8,183
180	8,235	8,287	8,339	8,391	8,443	8,495	8,547	8,600	8,652	8,705
190	8,757	8,810	8,863	8,915	8,968	9,021	9,074	9,127	9,180	9,233
200	9,286	9,339	9,393	9,447	9,500	9,553	9,607	9,660	9,714	9,767

Продовження таблиці Б.2

Температура рабочого кінця, °С	Темроелектрорушійна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
210	9,821	9,875	9,929	9,982	10,036	10,090	10,144	10,198	10,252	10,306
220	10,360	10,414	10,469	10,523	10,578	10,632	10,687	10,741	10,796	10,850
230	10,905	10,960	11,015	11,070	11,125	11,180	11,235	11,290	11,346	11,401
240	11,456	11,511	11,567	11,622	11,678	11,733	11,789	11,844	11,900	11,955
250	12,011	12,067	12,123	12,179	12,235	12,291	12,347	12,403	12,460	12,516
260	12,572	12,628	12,685	12,741	12,798	12,854	12,911	12,967	13,024	13,080
270	13,137	13,194	13,251	13,307	13,364	13,421	13,478	13,535	13,593	13,650
280	13,707	13,764	13,821	13,879	13,936	13,993	14,051	14,108	14,166	14,223
290	14,281	14,339	14,397	14,454	14,512	14,570	14,628	14,686	14,744	14,802
300	14,860	14,918	14,976	15,035	15,093	15,151	15,209	15,268	15,326	15,385
310	15,443	15,502	15,560	15,619	15,677	15,736	15,795	15,854	15,912	15,971
320	16,030	16,089	16,148	16,207	16,266	16,325	16,384	16,443	16,503	16,562
330	16,621	16,681	16,740	16,800	16,859	16,919	16,979	17,038	17,098	17,157
340	17,217	17,277	17,337	17,396	17,456	17,516	17,576	17,636	17,696	17,756
350	17,816	17,876	17,937	17,997	18,058	17,118	18,178	18,239	18,299	18,360
360	18,420	18,481	18,541	18,602	18,662	18,723	18,784	18,845	18,905	18,996
370	19,027	19,088	19,149	19,210	19,271	19,332	19,393	19,454	19,516	19,577
380	19,638	19,699	19,761	19,822	19,884	19,945	20,006	20,068	20,129	20,191
390	20,252	20,314	20,375	20,437	20,498	20,560	20,622	20,684	20,745	20,807
400	20,869									

Таблиця Б.3. Градувальна характеристика мідь-міднонікельової термопари, тип J, в діапазоні температур -200÷+900°C

Температура робочого кінця, °C	Темроелектрорушійна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	-7,890									
-190	-7,659	-7,683	-7,707	-7,730	-7,754	-7,778	-7,801	-7,823	-7,845	-7,868
-180	-7,402	-7,428	-7,454	-7,481	-7,507	-7,533	-7,558	-7,583	-7,609	-7,634
-170	-7,122	-7,151	-7,179	-7,208	-7,236	-7,265	-7,292	-7,320	-7,347	-7,375
-160	-6,821	-6,852	-6,882	-6,913	-6,943	-6,974	-7,004	-7,033	-7,063	-7,092
-150	-6,499	-6,532	-6,565	-6,597	-6,630	-6,663	-6,695	-6,726	-6,758	-6,789
-140	-6,159	-6,193	-6,228	-6,262	-6,297	-6,331	-6,365	-6,398	-6,432	-6,465
-130	-5,801	-5,837	-5,873	-5,910	-5,946	-5,982	-6,017	-6,053	-6,088	-6,124
-120	-5,426	-6,464	-5,502	-5,539	-5,577	-5,615	-5,652	-5,689	-5,723	-5,764
-110	-5,036	-5,075	-5,115	-5,154	-5,194	-5,233	-5,272	-5,310	-5,349	-5,387
-100	-4,632	-4,673	-4,714	-4,754	-4,795	-4,836	-4,876	-4,916	-4,956	-4,996
-90	-4,215	-4,257	-4,299	-4,341	-4,383	-4,425	-4,466	-4,508	-4,549	-4,591
-80	-3,758	-3,828	-3,871	-3,915	-3,958	-4,001	-4,044	-4,087	-4,129	-4,172
-70	-3,344	-3,388	-3,433	-3,477	-3,522	-3,566	-3,610	-3,654	-3,697	-3,741
-60	-2,892	-2,938	-2,983	-3,029	-3,074	-3,120	-3,165	-3,210	-3,254	-3,299
-50	-2,431	-2,477	-2,524	-2,570	-2,617	-2,663	-2,709	-2,755	-2,800	-2,846
-40	-1,960	-2,007	-2,055	-1,102	-2,150	-2,197	-2,244	-2,291	-2,337	-2,384
-30	-1,481	-1,529	-1,577	-1,626	-1,674	-1,722	-1,770	-1,817	-1,865	-1,912
-20	-0,995	-1,044	-1,093	-1,141	-1,190	-1,239	-1,287	-1,336	-1,384	-1,433
-10	-0,501	-0,550	-0,600	-0,649	-0,699	-0,748	-0,797	-0,847	-0,896	-0,946
0	0,000	-0,050	-0,100	-0,151	-0,201	-0,251	-0,301	-0,351	-0,401	-0,451
0	0,000	0,051	0,101	0,052	0,202	0,253	0,304	0,355	0,405	0,456
10	0,507	0,558	0,609	0,660	0,711	0,762	0,813	0,865	0,916	0,968
20	1,019	1,071	1,122	1,174	1,225	1,277	1,329	1,381	1,432	1,484
30	1,536	1,588	1,640	1,693	1,745	1,797	1,849	1,901	1,954	2,006
40	2,058	2,111	2,163	2,216	2,268	2,321	2,374	2,427	2,479	2,532
50	2,585	2,638	2,691	2,743	2,796	2,849	2,902	2,955	3,009	3,062
60	3,115	3,168	3,221	3,275	3,328	3,381	3,435	3,488	3,542	3,595
70	3,649	3,703	3,756	3,810	3,863	3,917	3,971	4,025	4,078	4,132
80	4,186	4,240	4,294	4,347	4,401	4,455	4,509	4,563	4,617	4,671
90	4,725	4,779	4,833	4,888	4,942	4,996	5,050	5,105	5,159	5,214
100	5,268	5,322	5,377	5,431	5,486	5,540	5,594	5,649	5,703	5,758
110	5,812	5,867	5,921	5,976	6,030	6,085	6,140	6,195	6,249	6,304
120	6,359	6,414	6,469	6,523	6,578	6,633	6,688	6,743	6,797	6,852
130	6,907	6,962	7,017	7,072	7,127	7,182	7,237	7,292	7,347	7,402
140	7,457	7,512	7,567	7,622	7,677	7,732	7,787	7,842	7,898	7,953
150	8,008	8,063	8,118	8,174	8,229	8,284	8,339	8,394	8,450	8,505
160	8,560	8,615	8,671	8,726	8,782	8,837	8,892	8,947	9,003	9,058
170	9,113	9,168	9,224	9,279	9,335	9,390	9,445	9,501	9,556	9,612
180	9,667	9,722	9,778	9,833	9,889	9,944	10,000	10,055	10,110	10,166
190	10,222	10,277	10,333	10,388	10,444	10,499	10,555	10,610	10,666	10,721
200	10,777	10,832	10,888	10,943	10,998	11,054	11,110	11,165	11,221	11,276
210	11,332	11,387	11,443	11,498	11,554	11,609	11,665	11,720	11,776	11,831

Продовження таблиці Б.3

Температура робочого кінця, °C	Темроелектроушійна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
220	11,887	11,942	11,998	12,054	12,109	12,165	12,220	12,276	12,331	12,387
230	12,442	12,498	12,553	12,609	12,664	12,720	12,776	12,831	12,887	12,942
240	12,998	13,053	13,109	13,164	13,220	13,275	13,331	13,386	13,442	13,497
250	13,553	13,608	13,664	13,719	13,775	13,830	13,886	13,941	13,997	14,052
260	14,108	14,163	14,219	14,274	14,330	14,385	14,441	14,496	14,552	14,607
270	14,663	14,718	14,774	14,829	14,885	14,940	14,995	15,051	15,106	15,162
280	15,217	15,272	15,328	15,383	15,439	15,494	15,549	15,605	15,660	15,716
290	15,771	15,826	15,882	15,937	15,993	16,048	16,103	16,159	16,214	16,270
300	16,325	16,380	16,436	16,491	16,547	16,602	16,657	16,713	16,768	16,824
310	16,879	16,934	16,989	17,045	17,100	17,155	17,210	17,266	17,321	17,377
320	17,432	17,487	17,542	17,598	17,653	17,708	17,763	17,818	17,874	17,929
330	17,984	18,039	18,094	18,150	18,205	18,260	18,315	18,371	18,426	18,482
340	18,537	18,592	18,647	18,703	18,758	18,813	18,868	18,923	18,979	19,034
350	19,089	19,144	19,199	19,254	19,309	19,364	19,419	19,474	19,530	19,585
360	19,64	19,695	19,75	19,806	19,861	19,916	19,971	20,026	20,082	20,137
370	20,192	20,247	20,302	20,358	20,413	20,468	20,523	20,578	20,634	20,688
380	20,743	20,798	20,853	20,909	20,964	21,019	21,074	21,129	21,185	21,241
390	21,295	21,35	21,405	21,461	21,516	21,571	21,626	21,681	21,737	21,793
400	21,846	21,901	21,956	22,012	22,067	22,122	22,177	22,232	22,288	22,344
410	22,397	22,452	22,507	22,563	22,618	22,673	22,728	22,783	22,839	22,895
420	22,949	23,004	23,059	23,115	23,17	23,225	23,28	23,335	23,391	23,447
430	23,501	23,556	23,611	23,667	23,722	23,777	23,832	23,887	23,943	23,999
440	24,054	24,109	24,164	24,22	24,275	24,33	24,385	24,44	24,496	24,552
450	24,607	24,662	24,717	24,773	24,828	24,883	24,938	24,993	25,049	25,105
460	25,161	25,216	25,271	25,327	25,382	25,437	25,492	25,547	25,603	25,659
470	25,716	25,772	25,827	25,883	25,938	25,993	26,048	26,103	26,159	26,215
480	26,272	26,328	26,383	26,439	26,494	26,549	26,604	26,659	26,715	26,771
490	26,829	26,885	26,94	26,996	27,051	27,106	27,161	27,216	27,272	27,328
500	27,388	27,444	27,499	27,555	27,61	27,665	27,72	27,775	27,831	27,887
510	27,949	28,005	28,06	28,116	28,171	28,226	28,281	28,336	28,392	28,448
520	28,511	28,567	28,622	28,678	28,733	28,788	28,843	28,898	28,954	29,01
530	29,075	29,132	29,187	29,243	29,298	29,353	29,408	29,463	29,519	29,575
540	29,642	29,699	29,754	29,81	29,865	29,92	29,975	30,03	30,086	30,142
550	30,21	30,267	30,322	30,378	30,433	30,488	30,543	30,598	30,654	30,71
560	30,782	30,839	30,894	30,95	31,005	31,06	31,115	31,17	31,226	31,282
570	31,356	31,414	31,469	31,525	31,58	31,635	31,69	31,745	31,801	31,857
580	31,933	31,991	32,046	32,102	32,157	32,212	32,267	32,322	32,378	32,434
590	32,513	32,571	32,626	32,682	32,737	32,792	32,847	32,902	32,958	33,014
600	33,906	33,155	33,21	33,266	33,321	33,376	33,431	33,486	33,542	33,598
610	33,683	33,742	33,797	33,853	33,908	33,963	34,018	34,073	34,129	34,185
620	34,273	34,332	34,387	34,443	34,498	34,553	34,608	34,663	34,719	34,775
630	34,867	34,927	34,982	35,038	35,093	35,148	35,203	35,258	35,314	35,37
640	35,464	35,524	35,579	35,635	35,69	35,745	35,8	35,855	35,911	35,967
650	36,066	36,126	36,181	36,237	36,292	36,347	36,402	36,457	36,513	36,569

Продовження таблиці Б.3

Температура робочого кінця, °C	Темроелектрорушійна сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
660	36,671	36,732	36,787	36,843	36,898	36,953	37,008	37,063	37,119	37,175
670	37,28	37,341	37,396	37,452	37,507	37,562	37,617	37,672	37,728	37,784
680	37,893	37,955	38,01	38,066	38,121	38,176	38,231	38,286	38,342	38,398
690	38,51	38,572	38,627	38,683	38,738	38,793	38,848	38,903	38,959	39,015
700	39,13	39,192	39,247	39,303	39,358	39,413	39,468	39,523	39,579	39,635
710	39,754	39,817	39,872	39,928	39,983	40,038	40,093	40,148	40,204	40,26
720	40,382	40,445	40,5	40,556	40,611	40,666	40,721	40,776	40,832	40,888
730	41,013	41,076	41,131	41,187	41,242	41,297	41,352	41,407	41,463	41,519
740	41,647	41,711	41,766	41,822	41,877	41,932	41,987	42,042	42,098	42,154
750	42,283	42,347	42,402	42,458	42,513	42,568	42,623	42,678	42,734	42,79
760	42,922	42,956	43,011	43,067	43,122	43,177	43,232	43,287	43,343	43,399
770	43,563	43,627	43,682	43,738	43,793	43,848	43,903	43,958	44,014	44,07
780	44,207	44,271	44,326	44,382	44,437	44,492	44,547	44,602	44,658	44,714
790	44,852	44,917	44,972	45,028	45,083	45,138	45,193	45,248	45,304	45,36
800	45,498	45,563	45,618	45,674	45,729	45,784	45,839	45,894	45,95	46,006
810	46,144	46,209	46,264	46,32	46,375	46,43	46,485	46,54	46,596	46,652
820	46,789	46,854	46,909	46,965	47,02	47,075	47,13	47,185	47,241	47,297
830	47,434	47,498	47,553	47,609	47,664	47,719	47,774	47,829	47,885	47,941
840	48,076	48,14	48,195	48,251	48,306	48,361	48,416	48,471	48,527	48,583
850	48,716	48,78	48,835	48,891	48,946	49,001	49,056	49,111	49,167	49,223
860	49,354	49,419	49,474	49,53	49,585	49,64	49,695	49,75	49,806	49,862
870	49,989	50,052	50,107	50,163	50,218	50,273	50,328	50,383	50,439	50,495
880	50,621	50,684	50,739	50,795	50,85	50,905	50,96	51,015	51,071	51,127
890	51,249	51,312	51,374	51,437	51,499	51,562	51,625	51,687	51,75	51,812
900	51,875									

Таблиця Б.4. Градувальна характеристика хромель-копелевої термопари, тип L, в діапазоні температур $-50 \div +800^{\circ}\text{C}$

Температура робочого кінця, $^{\circ}\text{C}$	Темроелектрорушійна сила, мВ										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-200	-9,488										
-190	-9,203	-9,233	-9,262	-9,291	-9,320	-9,349	-9,377	-9,405	-9,433	-9,461	-9,488
-180	-8,894	-8,926	-8,958	-8,989	-9,021	-9,052	-9,082	-9,113	-9,143	-9,173	-9,203
-170	-8,562	-8,596	-8,630	-8,664	-8,698	-8,731	-8,764	-8,797	-8,830	-8,862	-8,894
-160	-8,207	-8,244	-8,280	-8,316	-8,352	-8,388	-8,423	-8,458	-8,493	-8,528	-8,562
-150	-7,831	-7,869	-7,908	-7,946	-7,984	-8,022	-8,059	-8,097	-8,134	-8,171	-8,207
-140	-7,433	-7,473	-7,514	-7,554	-7,594	-7,634	-7,674	-7,713	-7,753	-7,792	-7,831
-130	-7,014	-7,057	-7,099	-7,142	-7,184	-7,226	-7,268	-7,309	-7,350	-7,392	-7,433
-120	-6,575	-6,620	-6,665	-6,709	-6,753	-6,797	-6,841	-6,884	-6,928	-6,971	-7,014
-110	-6,118	-6,164	-6,211	-6,257	-6,303	-6,349	-6,394	-6,440	-6,485	-6,530	-6,575
-100	-5,641	-5,690	-5,738	-5,786	-5,834	-5,882	-5,929	-5,977	-6,024	-6,071	-6,118
-90	-5,147	-5,197	-5,247	-5,297	-5,347	-5,396	-5,446	-5,495	-5,544	-5,593	-5,641
-80	-4,636	-4,688	-4,739	-4,791	-4,842	-4,893	-4,944	-4,995	-5,046	-5,097	-5,147
-70	-4,108	-4,161	-4,215	-4,268	-4,321	-4,374	-4,426	-4,479	-4,531	-4,584	-4,636
-60	-3,564	-3,619	-3,674	-3,729	-3,783	-3,838	-3,892	-3,946	-4,000	-4,054	-4,108
-50	-3,005	-3,061	-3,118	-3,174	-3,230	-3,286	-3,342	-3,398	-3,453	-3,509	-3,564
-40	-2,431	-2,489	-2,547	-2,605	-2,662	-2,720	-2,777	-2,834	-2,891	-2,948	-3,005
-30	-1,843	-1,902	-1,962	-2,021	-2,080	-2,139	-2,197	-2,256	-2,314	-2,373	-2,431
-20	-1,242	-1,302	-1,363	-1,423	-1,484	-1,544	-1,604	-1,664	-1,724	-1,783	-1,843
-10	-0,627	-0,689	-0,751	-0,813	-0,874	-0,936	-0,997	-1,059	-1,120	-1,181	-1,242
-0	0,000	-0,063	-0,126	-0,189	-0,252	-0,315	-0,378	-0,440	-0,503	-0,565	-0,627
+0	0,000	0,063	0,127	0,190	0,254	0,318	0,382	0,446	0,510	0,575	0,639
10	0,639	0,704	0,768	0,833	0,898	0,963	1,028	1,093	1,159	1,224	1,290
20	1,290	1,355	1,421	1,487	1,553	1,619	1,685	1,752	1,818	1,885	1,951
30	1,951	2,018	2,085	2,152	2,219	2,286	2,354	2,421	2,488	2,556	2,624
40	2,624	2,692	2,759	2,828	2,896	2,964	3,032	3,101	3,169	3,238	3,306
50	3,306	3,375	3,444	3,513	3,582	3,652	3,721	3,790	3,860	3,929	3,999
60	3,999	4,069	4,139	4,209	4,279	4,349	4,419	4,490	4,560	4,631	4,701
70	4,701	4,772	4,843	4,914	4,985	5,056	5,127	5,198	5,270	5,341	5,413
80	5,413	5,484	5,556	5,628	5,700	5,772	5,844	5,916	5,988	6,060	6,133
90	6,133	6,205	6,278	6,351	6,423	6,496	6,569	6,642	6,715	6,788	6,862
100	6,862	6,935	7,008	7,082	7,155	7,229	7,303	7,377	7,451	7,525	7,599
110	7,599	7,673	7,747	7,821	7,896	7,970	8,045	8,119	8,194	8,269	8,344
120	8,344	8,419	8,494	8,569	8,644	8,719	8,794	8,870	8,945	9,021	9,096
130	9,096	9,172	9,248	9,324	9,400	9,476	9,552	9,628	9,704	9,780	9,857
140	9,857	9,933	10,010	10,086	10,163	10,239	10,316	10,393	10,470	10,547	10,624

Темроелектрорушійна сила, мВ											
Температура робочого кінця, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
150	10,624	10,701	10,778	10,856	10,933	11,010	11,088	11,165	11,243	11,321	11,398
160	11,398	11,476	11,554	11,632	11,710	11,788	11,866	11,944	12,023	12,101	12,179
170	12,179	12,258	12,336	12,415	12,494	12,572	12,651	12,730	12,809	12,888	12,967
180	12,967	13,046	13,125	13,204	13,284	13,363	13,442	13,522	13,601	13,681	13,761
190	13,761	13,840	13,920	14,000	14,080	14,160	14,240	14,320	14,400	14,480	14,560
200	14,560	14,641	14,721	14,802	14,882	14,963	15,043	15,124	15,204	15,285	15,366
210	15,366	15,447	15,528	15,609	15,690	15,771	15,852	15,933	16,015	16,096	16,177
220	16,177	16,259	16,340	16,422	16,503	16,585	16,667	16,748	16,830	16,912	16,994
230	16,994	17,076	17,158	17,240	17,322	17,404	17,486	17,569	17,651	17,733	17,816
240	17,816	17,898	17,981	18,063	18,146	18,228	18,311	18,394	18,477	18,559	18,642
250	18,642	18,725	18,808	18,891	18,974	19,057	19,141	19,224	19,307	19,390	19,474
260	19,474	19,557	19,641	19,724	19,808	19,891	19,975	20,059	20,142	20,226	20,310
270	20,310	20,394	20,478	20,561	20,645	20,729	20,813	20,898	20,982	21,066	21,150
280	21,150	21,234	21,319	21,403	21,487	21,572	21,656	21,741	21,825	21,910	21,995
290	21,995	22,079	22,164	22,249	22,333	22,418	22,503	22,588	22,673	22,758	22,843
300	22,843	22,928	23,013	23,098	23,183	23,268	23,354	23,439	23,524	23,609	23,695
310	23,695	23,780	23,866	23,951	24,037	24,122	24,208	24,293	24,379	24,465	24,550
320	24,550	24,636	24,722	24,807	24,893	24,979	25,065	25,151	25,237	25,323	25,409
330	25,409	25,495	25,581	25,667	25,753	25,839	25,926	26,012	26,098	26,184	26,271
340	26,271	26,357	26,443	26,530	26,616	26,702	26,789	26,875	26,962	27,048	27,135
350	27,135	27,222	27,308	27,395	27,482	27,568	27,655	27,742	27,828	27,915	28,002
360	28,002	28,089	28,176	28,263	28,350	28,437	28,523	28,610	28,697	28,784	28,872
370	28,872	28,959	29,046	29,133	29,220	29,307	29,394	29,481	29,569	29,656	29,743
380	29,743	29,830	29,918	30,005	30,092	30,180	30,267	30,354	30,442	30,529	30,617
390	30,617	30,704	30,792	30,879	30,967	31,054	31,142	31,229	31,317	31,404	31,492
400	31,492	31,580	31,667	31,755	31,843	31,930	32,018	32,106	32,193	32,281	32,369
410	32,369	32,457	32,544	32,632	32,720	32,808	32,896	32,983	33,071	33,159	33,247
420	33,247	33,335	33,423	33,511	33,599	33,686	33,774	33,862	33,950	34,038	34,126
430	34,126	34,214	34,302	34,390	34,478	34,566	34,654	34,742	34,830	34,918	35,007
440	35,007	35,095	35,183	35,271	35,359	35,447	35,535	35,623	35,711	35,799	35,888
450	35,888	35,976	36,064	36,152	36,240	36,328	36,417	36,505	36,593	36,681	36,769
460	36,769	36,857	36,946	37,034	37,122	37,210	37,299	37,387	37,475	37,563	37,651
470	37,651	37,740	37,828	37,916	38,004	38,093	38,181	38,269	38,357	38,446	38,534
480	38,534	38,622	38,710	38,799	38,887	38,975	39,063	39,152	39,240	39,328	39,417
490	39,417	39,505	39,593	39,681	39,770	39,858	39,946	40,034	40,123	40,211	40,299
500	40,299	40,387	40,476	40,564	40,652	40,740	40,829	40,917	41,005	41,093	41,182
510	41,182	41,270	41,358	41,446	41,535	41,623	41,711	41,799	41,888	41,976	42,064

Темроелектрорушійна сила, мВ											
Температура робочого кінця, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
520	42,064	42,152	42,241	42,329	42,417	42,505	42,593	42,682	42,770	42,858	42,946
530	42,946	43,034	43,123	43,211	43,299	43,387	43,475	43,564	43,652	43,740	43,828
540	43,828	43,916	44,004	44,092	44,181	44,269	44,357	44,445	44,533	44,621	44,709
550	44,709	44,798	44,886	44,974	45,062	45,150	45,238	45,326	45,414	45,502	45,590
560	45,590	45,678	45,766	45,854	45,942	46,031	46,119	46,207	46,295	46,383	46,471
570	46,471	46,559	46,647	46,735	46,823	46,911	46,999	47,087	47,175	47,262	47,350
580	47,350	47,438	47,526	47,614	47,702	47,790	47,878	47,966	48,054	48,142	48,230
590	48,230	48,318	48,405	48,493	48,581	48,669	48,757	48,845	48,933	49,020	49,108
600	49,108	49,196	49,284	49,372	49,460	49,547	49,635	49,723	49,811	49,898	49,986
610	49,986	50,074	50,162	50,250	50,337	50,425	50,513	50,600	50,688	50,776	50,864
620	50,864	50,951	51,039	51,127	51,214	51,302	51,390	51,477	51,565	51,653	51,740
630	51,740	51,828	51,916	52,003	52,091	52,179	52,266	52,354	52,441	52,529	52,617
640	52,617	52,704	52,792	52,879	52,967	53,054	53,142	53,229	53,317	53,405	53,492
650	53,492	53,580	53,667	53,755	53,842	53,930	54,017	54,104	54,192	54,279	54,367
660	54,367	54,454	54,542	54,629	54,717	54,804	54,891	54,979	55,066	55,154	55,241
670	55,241	55,328	55,416	55,503	55,590	55,678	55,765	55,852	55,940	56,027	56,114
680	56,114	56,202	56,289	56,376	56,464	56,551	56,638	56,725	56,813	56,900	56,987
690	56,987	57,074	57,161	57,249	57,336	57,423	57,510	57,597	57,684	57,772	57,859
700	57,859	57,946	58,033	58,120	58,207	58,294	58,381	58,468	58,555	58,642	58,729
710	58,729	58,816	58,903	58,990	59,077	59,164	59,251	59,338	59,425	59,512	59,599
720	59,599	59,686	59,772	59,859	59,946	60,033	60,120	60,206	60,293	60,380	60,467
730	60,467	60,553	60,640	60,727	60,813	60,900	60,987	61,073	61,160	61,246	61,333
740	61,333	61,419	61,506	61,592	61,679	61,765	61,851	61,938	62,024	62,110	62,197
750	62,197	62,283	62,369	62,456	62,542	62,628	62,714	62,800	62,886	62,972	63,058
760	63,058	63,144	63,230	63,316	63,402	63,488	63,574	63,659	63,745	63,831	63,917
770	63,917	64,002	64,088	64,173	64,259	64,344	64,430	64,515	64,601	64,686	64,771
780	64,771	64,856	64,942	65,027	65,112	65,197	65,282	65,367	65,452	65,537	65,621
790	65,621	65,706	65,791	65,875	65,960	66,044	66,129	66,213	66,298	66,382	66,466
800	66,466										

Додаток В
Індивідуальні завдання до лабораторної роботи № 1

Варіант	Початкове значення температури	Крок
1	15	5
2	14	5
3	13	5
4	12	5
5	11	5
6	10	5
7	9	7
8	8	7
9	7	7
10	6	7
11	5	7
12	4	7
13	15	7
14	14	7
15	13	7
16	12	7
17	11	7
18	10	7
19	9	10
20	8	10

Додаток Г

Індивідуальні завдання до лабораторної роботи № 2

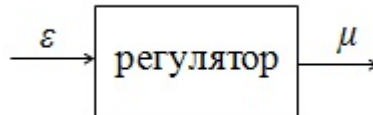
Варіант	Початкове значення для ВМ		
	поршневого	мембранного	електричного
1	0.24	0.05	21
2	0.23	0.06	20
3	0.22	0.07	19
4	0.21	0.08	18
5	0.2	0.09	17
6	0.19	0.10	16
7	0.18	0.11	15
8	0.17	0.12	14
9	0.16	0.13	13
10	0.15	0.14	12
11	0.14	0.15	11
12	0.13	0.16	10
13	0.12	0.17	9
14	0.11	0.18	8
15	0.1	0.19	7
16	0.09	0.20	6
17	0.08	0.21	5
18	0.07	0.22	4
19	0.06	0.23	3
20	0.05	0.24	2

Додаток Д

Закони неперервного регулювання

Законом регулювання називається вид залежності регулюючого впливу від сигналу неузгодженості на вході регулятора (помилки, відхилення).

$$\varepsilon = y_{\text{пот}} - y_{\text{зад}}$$



Зазвичай виділяють три основних закони неперервного регулювання:

1. Пропорційний (П - закон).
2. Інтегральний (І - закон).
3. Диференціальний (Д - закон).

1. Пропорційний (П - закон)

Якщо регулюючий вплив пропорційний сигналу похибки, то говорить, що регулятор пропорційний (П - регулятор):

$$\mu = k \varepsilon,$$

де k – коефіцієнт підсилення регулятора.

П – регулятор швидкий, простий але здійснює регулювання з похибкою.

2. Інтегральний (І – закон)

Якщо регулюючий вплив пропорційний інтегралу від сигналу похибки, то такий регулятор називається інтегральним (І-регулятор) :

$$\mu = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon dt = k \int_0^t \varepsilon dt,$$

де T_i – постійна часу регулятора (час ізодрому).

І – регулятор повільний, але здійснює регулювання з без похибки.

3. Диференціальний (Д - закон)

Якщо регулюючий вплив пропорційний похідній від сигналу похибки, то такий регулятор називають диференціальним (Д - регулятор):

$$\mu = T_{\text{пр}} \varepsilon' = T_{\text{пр}} \frac{d\varepsilon}{dt},$$

де $T_{\text{пр}}$ – постійна часу регулятора (час передування).

Д – регулятор найшвидший, але здійснює регулювання з похибкою (регулятор самостійно не застосовується, бо на будь який вхідний постійний сигнал має нульовий вихід).

Бажання об'єднати переваги і компенсувати недоліки законів призвело до застосування регуляторів, що реалізують **комбіновані закони** регулювання.

Комбіновані закони регулювання

ПІ-регулятор (пропорційно-інтегральний регулятор)

Якщо регулюючий вплив пропорційний відхиленню регульованої величини від заданого значення та інтегралу від цього відхилення, тоді отримуємо ПІ-регулятор.

$$\mu = k(\varepsilon + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon dt)$$

де k , T_i – відповідно коефіцієнт підсилення та постійна часу (час ізодрому).

Введення в І-закон пропорційної складової дозволяє збільшити швидкість регулювання. При цьому регулювання буде здійснюватися без похибки.

ПД - регулятор (пропорційно-диференціальний регулятор)

Якщо регулюючий вплив пропорційний відхиленню регульованої величини від заданого значення і швидкості цього відхилення (похідній від відхилення), то отримаємо ПД - регулятор (пропорційний регулятор з передуванням).

$$\mu = k(\varepsilon + T_{пр} \varepsilon')$$

де k , $T_{пр}$ – відповідно коефіцієнт підсилення та постійна часу (час передування) регулятора.

Введення похідної в пропорційний закон регулювання не позбавляє його основного недоліку - регулювання з похибкою.

ПД - регулятор застосовується дуже рідко.

ПІД-регулятор (пропорційно інтегральний – диференціальний - регулятор)

Якщо ж регулюючий вплив пропорційний відхиленню регульованої величин від заданого значення, інтегралу і швидкості цього відхилення, то отримаємо ПІД-регулятор (пропорційно – інтегральний - диференціальний).

$$\mu = k(\varepsilon + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon dt + T_{пр} \varepsilon')$$

де k – коефіцієнт підсилення, T_i – час ізодрому, $T_{пр}$ – час передування.

Це найбільш складний комбінований закон регулювання. Зміною коефіцієнтів з цього закону можна одержувати інші закони регулювання.

У практиці регулювання технологічних процесів найбільшого поширення набули П-, ПІ- та ПІД- регулятори.

Часто випускають прилади з вбудованими П - або ПІД - регулятором.

Додаток Є

Індивідуальні завдання до лабораторної роботи № 3

Варіант	Режим обдуву печі	
	режим 1	режим 2
1	min	min
2	mid	mid
3	max	max
4	min	min
5	mid	mid
6	max	max
7	min	min
8	mid	mid
9	max	min
10	min	mid
11	mid	max
12	max	min
13	min	mid
14	mid	max
15	max	min
16	min	mid
17	mid	max
18	max	min
19	min	mid
20	mid	max

Додаток Ж

Індивідуальні завдання до лабораторної роботи № 4

Варіант	Рівень нагріву печі	Режим обдуву печі
1	min	min
2	min	mid
3	min	max
4	mid	min
5	mid	mid
6	mid	max
7	max	min
8	max	mid
9	max	max
10	min	max
11	mid	min
12	max	mid
13	min	mid
14	mid	max
15	max	min
16	min	mid
17	mid	max
18	max	min
19	min	mid
20	mid	max