

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

**О. В. Разживін,
О. В. Суботін**

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Навчальний посібник

Затверджено
на засіданні вченої ради
Протокол № 8 від 27.04.2017

Краматорськ
ЦТРІ «Друкарський дім»
2017

Рецензенти:

І. А. Чуб, д-р техн. наук, проф., нач. каф. ППНП Національного університету цивільного захисту України;

О. І. Семененко, канд. техн. наук, доц. каф. електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту;

О. Ю. Приходько, канд. техн. наук, доцент, заст. зав. каф. технології машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХП»;

П. І. Сагайда, канд. техн. наук, доц. каф. комп'ютерних інформаційних технологій Донбаської державної машинобудівної академії.

Видання здійснено за підтримки міжнародного проекту «Розробка курсів із вбудованих систем з використанням інноваційних віртуальних підходів для інтеграції науки, освіти та промисловості в Україні, Грузії та Вірменії DesIRE» (544091-TEMPUS-1-2013-1-BE-TEMPUS-JPCR) за програмою TEMPUS Європейської комісії.

Поданий матеріал відображає думку авторів. Європейська комісія не несе відповідальності за використання інформації, що міститься в навчальному посібнику.

Разживін, О. В.

Р 17 Технічні засоби для проектування систем автоматизації : навчальний посібник / О. В. Разживін, О. В. Суботін. – Краматорськ : ЦТРІ «Друкарський дім», 2017. – 129 с.

ISBN 978-617-7415-25-0.

Викладено методики вирішення найбільш важливих завдань проектування автоматизованих систем керування: аналізування об'єкта керування, розрахунок основних параметрів системи і її конфігурації, проектування, технічні засоби автоматизації, а також рекомендації щодо створення документації з проекту.

УДК 681.5:621.77

© О. В. Разживін, О. В. Суботін, 2017

ISBN 978-617-7415-25-0

© ДДМА, 2017

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ Й ПОСТАВЛЕННЯ ЗАВДАНЬ ПРОЕКТУВАННЯ.....	5
2 РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	8
2.1 Завдання, вирішувані при проектуванні автоматизованих систем керування	8
2.2 Розроблення функціональної схеми автоматизації та умовні позначки елементів.....	10
2.3 Розрахунок і методика вибору виконавчих механізмів.....	15
2.3.1 Розрахунок і вибір механізмів електричних однооберткових.....	15
2.3.2 Розрахунок і вибір приводного електродвигуна горизонтального стрічкового конвеєра	16
2.3.3 Розрахунок і вибір електродвигуна похилого стрічкового конвеєра з прямим приводом	24
2.3.4 Розрахунок електропривода механізму піднімання підвіски гака мостового крана	30
2.3.5 Розрахунок і вибір гальмівного пристрою.....	50
2.3.6 Методика вибору й розрахунку електропривода повітрорудки	52
2.4 Методика вибору засобів контролю технологічних параметрів.....	53
2.4.1 Загальні відомості про датчики.....	53
2.4.2 Методи ідентифікації типових ланок моделей датчиків за часовими і частотними характеристиками	62
2.4.3 Контроль і вимірювання температури.....	72
2.4.4 Датчики вимірювання тиску.....	73
2.4.5 Вимірювання витрати. Витратоміри.....	85
2.4.6 Засоби контролю швидкості й переміщення	96
2.4.7 Вимірювання ваги. Дозування	102
3 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ.....	105
3.1 Розроблення структурної електричної схеми АСК.....	105
3.2 Вибір технічних засобів автоматизації на базі програмованих логічних контролерів.....	107
3.3 Конфігурація та параметрування апаратури центральних станцій у середовищі STEP 7	108
3.4 Проектування електричних схем підключення технічних засобів автоматизації до сигнальних модулів станції Simatic S7-300.....	116
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	128

ВСТУП

Визначальна роль у вирішенні завдань забезпечення ефективності виробництва, надійності й безпеки експлуатації технологічного обладнання належить автоматизованим системам керування технологічними процесами (АСК ТП).

Питання розроблення АСК ТП, вибору засобів вимірювань і автоматики тісно пов'язані зі специфікою технологічних процесів і повинні бути вирішені на стадії проектування відповідних технологічних установок, тобто інженер, який бере участь у проектуванні технологічної установки, повинен мати відповідні знання.

Посібник розроблено з метою покращення вмінь і навичок системного сприйняття завдання проектування, розкриття взаємозв'язку між концепцією керування й конструкторською концепцією в рамках конкретного завдання автоматизації виробництва.

Предметом проектування є один із варіантів:

1) автоматизована система керування обладнанням на технологічному рівні, що працює в режимі реального часу;

2) автоматизована виконавча система виробництва MES-рівня, що забезпечує оперативне оброблення інформації в режимі машинного часу.

Структура посібника дає можливість навчитися повністю розкривати суть вирішення задачі, поставленої в індивідуальному порядку на розроблення проекту.

Як методологічний напрям повинен бути прийнятий системний підхід, який дозволяє розкрити цілісність процесу в умовах різноманіття типів зв'язків, а також об'єднати цифрові й аналогові канали, механічні й електронні засоби автоматизації, програмні й апаратні засоби.

Відповідно до цього необхідно виконати таке:

1. На основі системного аналізу технологічного процесу визначити нові вимоги до системи автоматизації, що забезпечують підвищення ефективності процесів і бажану тривалість життєвого циклу системи.

2. На основі огляду літературних відомостей розробити функціональну схему автоматизації та структуру системи, конфігурувати її апаратну комплектацію.

3. Здійснити вибір технічних засобів автоматизації, необхідних для функціонування автоматизованої системи керування.

4. Для системи керування обладнанням розробити принципові схеми з'єднань апаратних компонентів системи.

5. Створити документацію проекту відповідно до вимог стандартів.

На всіх етапах проектування необхідно використовувати в якості інструментів проектування спеціальні програмні засоби, що забезпечують сучасні вимоги до якості проекту й скорочення часу на його розроблення.

Документація та кресленики повинні бути оформлені відповідно до ГОСТ 2.105-85 «Загальні вимоги до текстових документів», а також ДСТУ 3008-2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення». Розрахунково-пояснювальна записка повинна містити титульний аркуш, завдання, реферат, зміст, основну частину, перелік посилань і додатки.

1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ Й ПОСТАВЛЕННЯ ЗАВДАНЬ ПРОЕКТУВАННЯ

Перелік рекомендованих питань, що розглядаються в першому розділі, наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Перелік рекомендованих питань

Зміст першого розділу	
Система керування обладнанням технологічного рівня	1.1 Аналіз існуючого технологічного процесу і його недоліків 1.2 Аналіз сучасних підходів і технологічних рішень 1.3 Аналіз вимог до нової системи керування та розроблення завдань проектування
Автоматизована виконавча система виробництва (інформаційна система)	1.1 Аналіз предметної області (існуючого процесу організації й керування виробництвом) 1.2 Аналіз сучасних підходів до створення інформаційних систем 1.3 Аналіз вимог до нової інформаційної системи й розроблення завдань проектування

Починаючи проектування автоматизованої системи, необхідно поставити **цілі проектування** [1].

Цілі проектування зазвичай знаходяться в площині економічних показників, які, у свою чергу, визначаються однією з двох складових економічної ефективності: прямим або непрямим ефектом.

Для систем автоматичного керування обладнанням показниками ефективності є, головним чином, трудові та вартісні витрати, що пов'язані з прямим ефектом. На величину цих витрат впливають такі виробничі показники:

1. *Точність контролю, обліку й підтримання технологічних параметрів продукції.* Автоматизовані системи керування дозволяють зменшити трудові й вартісні витрати, збільшивши при цьому прибуток. Так, наприклад, якщо на прокатному стані підтримувати товщину смуги в межах нижнього поля допусків, можна істотно знизити витрату металу. Економічно вигідним є підвищення точності при створенні систем вимірювання й обліку споживання енергетичних ресурсів, оскільки це сприяє зменшенню збитків. Завдання підвищення точності повинні вирішуватися шляхом ретельного аналізу всіх похибок і подальшого розроблення комплексних заходів.

2. *Витрата енергетичних ресурсів (електроенергія, газ, вода тощо), сировини й матеріалів на технологічні потреби.* Автоматизовані системи керування дозволяють застосувати найбільш ефективні алгоритми керування, що оптимізують споживання енергетичних ресурсів, а також витрата сировини й матеріалів.

3. *Продуктивність процесу.* Це показник, який визначається як величина, зворотна сумі втрат часу на здійснення робочих рухів і виконання допоміжних операцій. Тому для підвищення продуктивності необхідно ретельно проаналізувати втрати часу і виключити або зменшити причини цих втрат.

4. *Коефіцієнт технічного використання.* Характеризує частку часу перебування обладнання в працездатному стані щодо деякого часу експлуатації, наприклад одного року. Він характеризує прості устаткування, пов'язані з його обслуговуванням і ремонтом. Системи автоматичного керування дозволяють підвищити надійність роботи обладнання й скоротити втрати часу на відновлення працездатності, що сприяє збільшенню дійсного фонду часу роботи обладнання, а також зменшенню матеріальних витрат, пов'язаних з обслуговуванням і ремонтом. Ефективними засобами підвищення надійності є:

- вибір елементів з найменшою вірогідністю відмови;
- проектування засобів захисту від аварій;
- розроблення розвиненої системи діагностики.

Для автоматизованої виконавчої системи виробництва (MES-системи) економічна ефективність визначається непрямим ефектом, інтегральним показником якого є рентабельність. Рентабельність відображає ступінь ефективності використання матеріальних, трудових і грошових ресурсів виробництва. MES-системи покращують фінансові показники підприємства шляхом підвищення видатності основних фондів, зменшення відсотка браку продукції, прискорення обороту грошових коштів, забезпечення своєчасності поставок, розширення мережі клієнтів.

Передпроектний аналіз. Проектування системи автоматизації повинне базуватися на результатах системного аналізу технологічного процесу або предметної області програмного додатка. При виконанні цієї роботи потрібно визначити мету, об'єкт, предмет і зміст аналізу.

Метою аналізу технологічного процесу (предметної області) є визначення вимог до автоматизованої системи керування, а також знаходження способів досягнення бажаного результату при мінімальних витратах.

Предметом аналізу повинен бути об'єкт автоматизації (технологічний процес, предметна область виконуваних робіт) і засоби автоматизації (апаратура керування, програми, канали передавання тощо).

Зміст аналізу – це перелік питань або завдань, які повинні бути вирішені. При аналізі технологічного процесу потрібно встановити недоліки існуючих засобів керування, а також визначити можливі способи їх усунення з урахуванням сучасних досягнень науково-технічного прогресу. При аналізованні предметної області необхідно визначити недоліки в орга-

нізації виконуваних робіт, процеси, не охоплені оперативним контролем, а також створити специфікацію функцій інформаційної системи.

Особливо уважно слід вивчити вимоги до технологічного процесу й особливості керування процесом.

Вимоги до технологічного процесу можна знайти в технічній документації: технічних умовах, галузевих нормативних документах і стандартах, в описах технологічних процесів, креслениках, керівних матеріалах тощо. Для врахування особливостей керування слід з'ясувати думки фахівців.

При розробленні способів усунення виявлених недоліків можна покладатися тільки на власні знання. Слід врахувати, що в інвестиційному проекті найбільша увага приділяється його життєвому циклу: інвестори завжди вимагають надійного захисту своїх інвестицій на тривалий час (принцип «вкластися й не думати про модернізацію десять–п'ятнадцять років»). Тому розробник проекту повинен застосовувати в проекті перспективні рішення в організації апаратних і програмних засобів системи керування.

Саме цей обов'язок ставить перед будь-яким проектувальником завдання аналізу наукової літератури та інтернет-джерел.

Підсумком виконання першого розділу є:

1. Специфікація вимог до проектованої системи (як повинна бути влаштована система і які функції вона повинна виконувати).

2. Перелік завдань проектування (що потрібно зробити для забезпечення вимог до нової системи керування).

Формулюючи завдання проектування, розробник проекту, по суті, повинен логічно зв'язати висновки аналізу технологічного процесу зі змістом наступних розділів пояснювальної записки.

2 РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1 Завдання, вирішувані при проектуванні автоматизованих систем керування

Завдання проектування, які рекомендовано формулювати, наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Задачі проектування

Завдання проектування залежно від теми	
Розрахунково-конструкторська частина	<ol style="list-style-type: none">1. Розроблення функціональної схеми автоматизації2. Розрахунок основних параметрів системи керування й обладнання3. Контрольовані параметри технологічного процесу і вибір вимірювальних перетворювачів4. Керівні впливи і вибір виконавчих механізмів
Проектування системи керування обладнанням технологічного рівня	<ol style="list-style-type: none">1. Розроблення структурної схеми системи керування2. Вибір модульної системи автоматизації та її компонентів (наприклад, <i>Simatic S7</i>)3. Конфігурування системи керування4. Розроблення принципів електричних схем
Графічна частина	<ol style="list-style-type: none">1. Розроблення функціональної схеми автоматизації2. Розроблення схем електричних зовнішніх підключень технічних засобів автоматизації до модулів введення / виведення інформації

При проектуванні системи керування обладнанням необхідно спочатку визначити час робочого циклу, а також параметри засобів введення й виведення інформації, що забезпечують необхідну точність і динаміку процесу керування.

Після цих розрахунків можна почати вибирати апаратуру керування, вимірювальних перетворювачів і виконавчих засобів, а також розробляти структурну схему. Для підтвердження правильності конструювальних рішень і отримання інформації для побудови принципів електричних схем необхідно виконати конфігурацію системи. Конфігурація дозволяє отримати також адресацію за всіма сигнальними модулями.

Якість регулювання оцінюється шляхом моделювання всього каналу керування: регулятори, перетворювач енергії, двигун, а також канали зворотного зв'язку. Параметрами оцінювання є стійкість процесу, швидкодія і точність системи керування.

Якщо результат моделювання позитивний, виконується розроблення схем підключень каналів введення-виведення (за однією схемою каналу введення і каналу виведення). Розробляється також схема з'єднань засобів керування з виконавчими пристроями.

На завершення розробляється функціональна схема автоматизації та схеми електричних зовнішніх підключень технічних засобів автоматизації до модулів станції центрального програмованого логічного контролера для одного із завдань керування.

Процес проектування починається з визначення основних параметрів майбутньої системи. Очевидно, що склад параметрів систем керування обладнанням і виконавчих систем виробництва (систем оброблення інформації) істотно різняться. У таблиці 2.2 наведено приблизні переліки завдань, які необхідно вирішити на цьому етапі проектування. Рекомендації про порядок вирішення цих завдань при розробленні різних систем наводяться нижче.

Таблиця 2.2 – Приблизні переліки завдань

Зміст другого розділу проекту	
Система керування обладнанням технологічного рівня	Визначення тривалості робочого циклу системи Розрахунки точності й швидкодії вимірювально-перетворювальних каналів Розрахунок динамічних параметрів виконавчих пристроїв

Рекомендації щодо виконання другого розділу проекту системи керування технологічним обладнанням.

При розробленні проекту слід враховувати дві найбільш важливі властивості ієрархічної системи:

1. Властивість пріоритетів: в ієрархічній системі команди верхнього рівня обов'язкові для виконання нижчим рівнем.

2. Властивість взаємозалежності: функціональні можливості й характеристики нижчого рівня повинні бути порівнянні із завданнями й командами вищого рівня.

Урахування цих властивостей вимагає зосередити увагу, у першу чергу, на нижньому рівні, тому що саме тут формуються динамічні характеристики системи і її точність.

2.2 Розроблення функціональної схеми автоматизації та умовні позначки елементів

На функціональних схемах технологічне обладнання повинне бути показане спрощено, однак давати чітке уявлення про принцип роботи і взаємодії. Технологічні апарати, трубопроводи, датчики, прилади та інші засоби автоматизації показуються умовними зображеннями відповідно до ДСТУ, повинні мати відповідні написи й позначки [1; 2].

Напрямки матеріальних та інформаційних потоків показуються стрілками.

Стандартами встановлено два способи побудови умовних позначок: спрощений і розгорнутий. Для спрощеного способу досить застосування основних умовних позначок:

 – первинний вимірювальний прилад, встановлений за місцем;

 – прилад, який встановлюється на щиті;

 – регулівний орган.

Позначення літерами вимірювальних приладів наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Літерні позначки вимірювальних приладів

Позначки	Вимірювальна величина	Функція інформації	Позначки	Вимірювальна величина	Функція інформації
A	–	Сигналізація	M	Вологість	–
B	–	–	N	–	–
C	–	Регулювання	O	–	–
D	Густина	–	P	Тиск	–
E	Електрична величина	–	Q	Якість, склад, концентрація	Інтегрування
F	Витрата	Співвідношення	R	Радіо-активність	Реєстрація
G	Розмір	–	S	Швидкість, частота	Сигналізація
H	Ручний вплив	Верхня межа	T	Температура	–
I	–	Показання	U	Декілька величин	–
J	Автоматичне. перемикання	–	V	В'язкість	–
K	Час	–	W	Маса	–
L	Рівень	Нижня межа	X	(Резерв)	–

Різновиди приладів позначаються комбінацією літер, наприклад:



– прилад для вимірювання тиску, реєструвальний, встановлений на щиті;



– прилад з індикацією для вимірювання розміру, встановлений за місцем.

При використанні умовних позначень необхідно дотримуватися таких правил:

- сигналізація граничних значень конкретизується додаванням літери Н (верхнє значення) або L (нижнє значення);
- для позначення не передбачених стандартами величин можуть бути використані резервні літери;
- допускається розтягнення окружності або нанесення додаткових позначок поряд;
- літеру E можна застосовувати для позначення первинних перетворювачів, датчиків;
- літеру T – для позначення дистанційного передавання інформації;
- літеру K – для позначення перемикачів;
- літеру Y – для позначення перетворювачів сигналів і обчислювальних пристроїв;
- якщо умовне позначення не розкриває суті приладу, допускається наводити додаткову інформацію, наприклад: «кодовий», «імпульсний» тощо;
- скомпоновані панелі, блоки, пульти тощо позначаються прямокутником з відповідним написом або обмежуються тонкою суцільною лінією;
- лінію зв'язку не допускається проводити через умовні позначення, але допускається перетин зображень технологічного обладнання.

Усім приладам і засобам автоматизації присвоюються позиційні позначення, що зберігаються в усіх матеріалах проекту. Позиційне позначення утворюється з двох частин: номери групи з арабськими цифрами й номери приладу в цій групі, наприклад 1–3.

Приклад побудови функціональної схеми автоматизації (ФСА) наведено на рисунках 2.1 і 2.2.

Опис ФСА АСК подавання ГВС до пальників зварювальної зони методичної печі. На цьому об'єкті автоматизації газоповітряна суміш складається з газової суміші природного газу та підігрітого в рекуператорах атмосферного повітря. До пальників газова суміш подається в співвідношенні 1:1, а газоповітряна – 1:10.

Обсяг, що подається на горіння суміші, залежить від температури слябів у зварений зоні. Контроль температури у зварений зоні проводиться в контурі E і здійснюється термopарами T1 / E1 і TE / E2. За показниками термopар змінюється величина витрати газоповітряної суміші, що подається до пальників. При регулюванні газоповітряної суміші, яка подається на горіння, застосовано дросельний спосіб регулювання витрати.

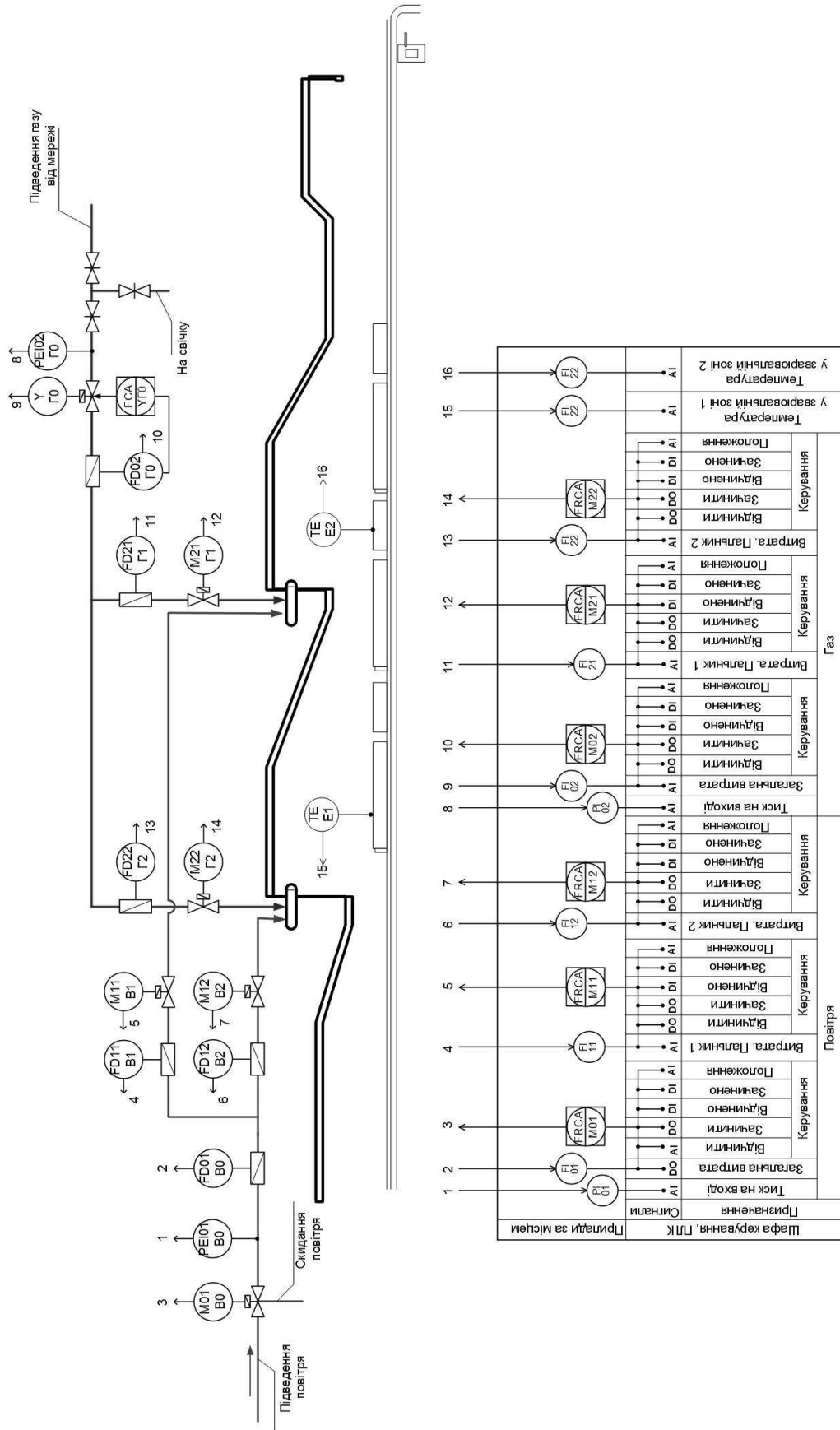
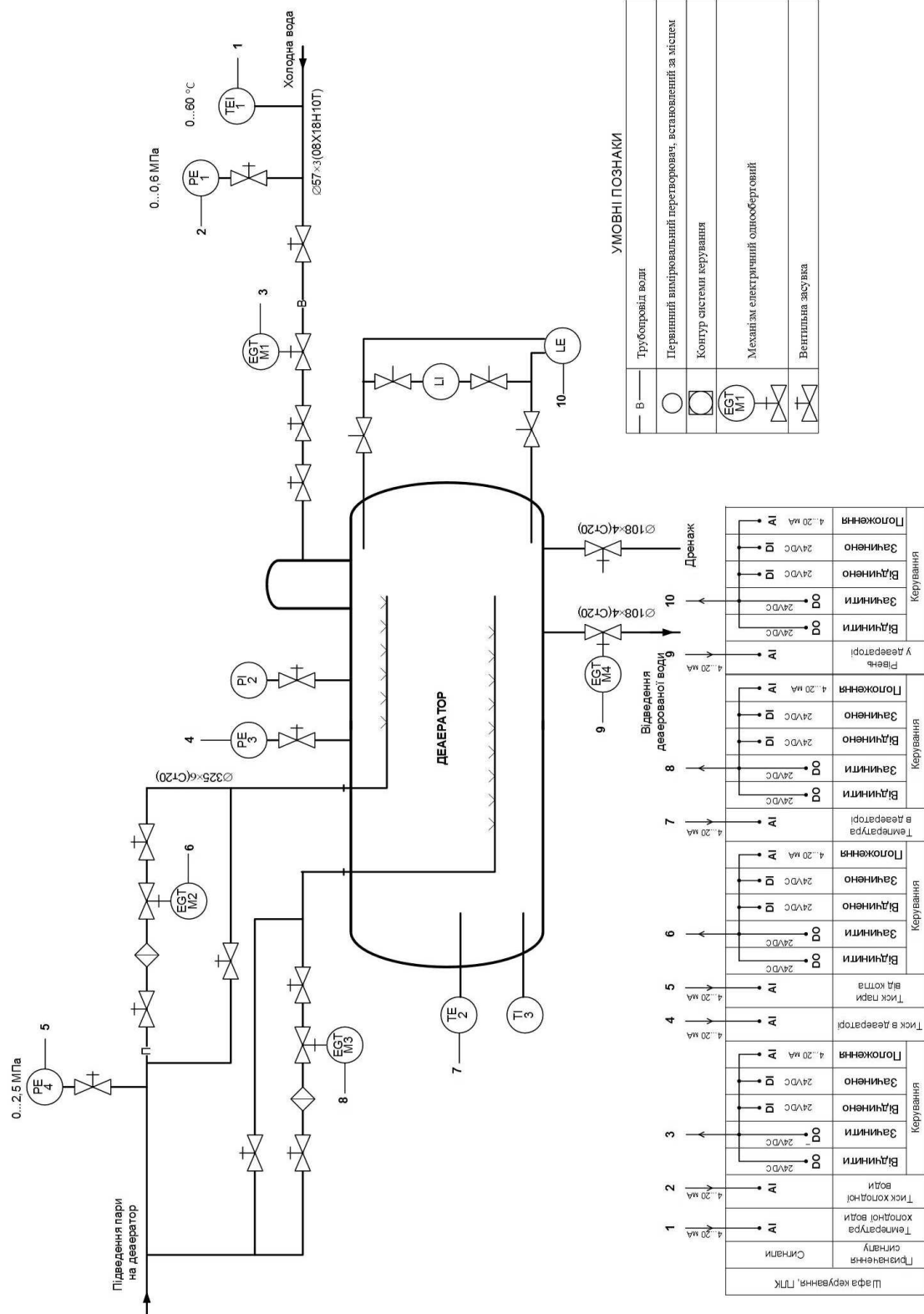


Рисунок 2.1 – Функціональна схема автоматизації АСК подавання ГВС до пальників зварювальної зони методичної печі



УМОВНІ ПОЗНАКИ

— В —	Трубопровід води
○	Первинний вимірвальний перетворювач, встановлений за місцем
□	Контур системи керування
EGT M1	Механізм електричний охолодженний
LE	Вентильна засувка

Рисунок 2.2 – Приклад ФСА деаераторного пристрою

Систему подавання повітря організовано в контурі В0. Подавання повітря на горіння здійснюється від індивідуального вентилятора. Керування вентилятором відбувається з місцевого щита керування вентилятором. На щиті керування розташована світлосигнальна апаратура, яка спрахує при увімкненні вентилятора. Щит керування вентилятором розташовується на стіні поруч з вентилятором.

Для забезпечення стійкої роботи вентилятора на мінімальному навантаженні передбачене автоматичне скидання повітря в атмосферу за допомогою регулювального клапана М01 / В0. Загальна витрата повітря, що подається на горіння, контролюється витратоміром FD01 / В0, а тиск – датчиком РЕ01 / В0. Залежно від показання витратоміра FD01 / В0 відбувається регулювання величини витрати шляхом зміни положення шиберної заслінки. Заслінці надається рух механізмом електричним однообертним М01 / В0. Далі повітря подається на горіння через металевий рекуператор, який встановлено в системі димовидалення. У рекуператорі відбувається нагрівання повітря до 350...400 °С.

Регулювання витрати повітропостачання, що подається безпосередньо до пальників, відбувається за показаннями витратомірів FD11 / В1 і FD12 / В2 для контурів В1 і В2, відповідно, до зони печі шляхом зміни положення шиберних заслінок. Шиберним заслінкам надається рух такими МЕО:

- контур В1 М11 / В1;
- контур В2 М12 / В2.

Регулювання витрати природного газу здійснюється за індивідуальними контурами, залежно від вибору, теплового навантаження печі або тиску внутрішньопічного простору.

Подавання природного газу відбувається по контуру Г0 від цехової ГРС (газорозподільна станція) середнього тиску (6,35 кПа) в обсязі не більше ніж 3 500 м³/год. Загальна витрата природного газу контролюється витратоміром FD02 / Г0, а тиск – датчиком РЕ02 / Г0. Регулювання загального подавання газу здійснюється за показаннями витратоміра шляхом зміни кутового положення центральної заслінки FCA Y / Г0.

Далі природний газ під тиском 1,785 кПа подається до пальників зварної зони. Об'ємна витрата, що підводиться до пальників газу, різна за зварними зонами. Регулювання витрати на пальники здійснюється за показаннями витратомірів FD21 / Г1 і FD22 / Г2 для контурів залежно від зони печі шляхом зміни положення шиберних заслінок. Шиберним заслінкам надається рух такими МЕО:

- контур пальника Г1 М21 / Г1;
- контур пальника Г2 М22 / Г2.

2.3 Розрахунок і методика вибору виконавчих механізмів

2.3.1 Розрахунок і вибір механізмів електричних однообертових

Регулювання тиску і витрати на подавання рідин або газів здійснюється шляхом керування становищем шибєрних заслінок. Для керування положеннями шибєрних заслінок найбільше застосування знайшли регульовані механізми електричні однообертові (МЕО) [3].

Вибір МЕО здійснюється на основі методики розрахунку, наведеної нижче. При виборі моделі виконавчого механізму потрібно врахувати величину моменту, необхідного для повороту заслінки. Для заслінок величину моменту, необхідну для їх обертання, визначаємо за формулою [4]

$$M = \kappa \cdot (M_p + M_m), \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.1)$$

де M_p – реактивний момент, Н·м;

M_m – момент тертя опору, Н·м;

κ – коефіцієнт, що враховує зтяжку заслінок і забруднення з'єднань: $\kappa = 2 \dots 3$.

Момент на валу повинен дорівнювати або бути більше від моменту, необхідного для обертання шибєрної заслінки.

Реактивний момент, обумовлений прагненням потоку закрити заслінку, визначається за формулою

$$M_p = 0,07 P \cdot D_y^3, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.2)$$

де $F = P S$ – сила опору на заслінці, Н·м;

P – перепад тиску на заслінці, Па;

D_y – діаметр шибєрної заслінки, м;

S – площа перетину труби, м².

Момент сил тертя визначається за формулою

$$M_m = 0,785 \cdot D_y^2 \cdot P_{\text{поч}} \cdot r_{\text{ш}} \cdot \lambda, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.3)$$

де $r_{\text{ш}}$ – радіус шийки вала заслінки, м;

$\lambda = 0,05$ – коефіцієнт тертя опору.

Приклад. Розрахунок і вибір МЕО

Для заслінок величину моменту, необхідну для їх обертання, визначаємо за формулою (2.1). Момент на валу повинен дорівнювати або бути більшим за момент, необхідний для обертання шибєрної заслінки.

Дані для розрахунку: $P = 43\,000$ Па; $S = 0,325$ м², $D_y = 0,083$ м.

Реактивний момент, обумовлений прагненням потоку закрити заслінку, визначається за формулою (2.2):

$$M_{p1} = 0,07 \cdot 43\,000 \cdot 0,083^3 = 103,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Момент сил тертя визначається за формулою (2.3):

$$M_{mI} = 0,785 \cdot 0,083^2 \cdot 43\,000 \cdot 0,03 \cdot 0,05 = 5,35 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Величина моменту, необхідного для обертання заслінки, обчислюється за (2.1):

$$M_I = 2 \cdot (10,33 + 5,35) = 217,4 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Для пересування шиберної заслінки вибираємо механізм типу МЕО. На підставі проведених розрахунків здійснюємо вибір такого виконавчого механізму: МЕО-250 / 63-0.63-92К.

Технічні характеристики МЕО наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики МЕО

Параметр	МЕО-250/63-0.63-92К
Номинальний крутний момент на вихідному валу, Н·м	250
Час повного ходу вихідного вала, с	63
Значення повного ходу вихідного вала	0,63
Споживана потужність, Вт	320
Вага, кг	135
Тип двигуна	АИР56А4

2.3.2 Розрахунок і вибір приводного електродвигуна горизонтального стрічкового конвеєра

Необхідні вихідні дані для розрахунку редукторного електропривода горизонтального конвеєра:

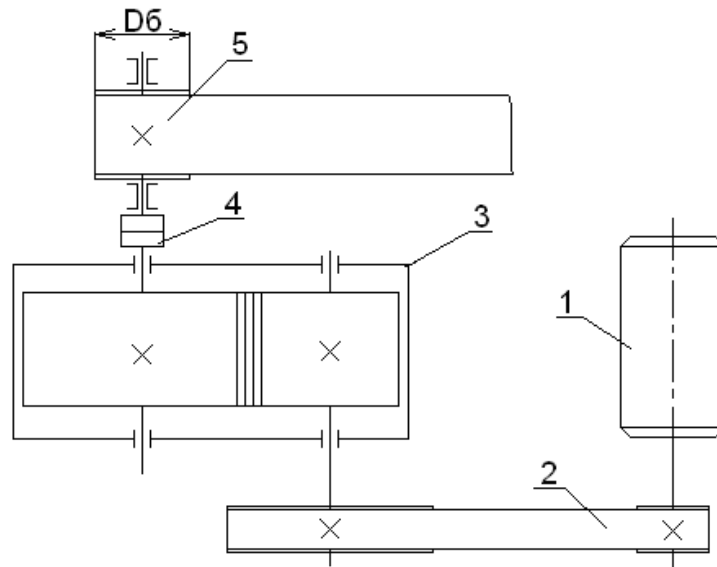
- розрахункове зусилля натягу при переміщенні вантажу F_t , кН;
- розрахункова продуктивність, т/год;
- діаметр барабана конвеєра $D_б$, м;
- довжина конвеєра l , м;
- швидкість стрічки v , м/с;
- частота обертання вала приводного електродвигуна $n_{ном}$, об/хв;
- час напрацювання на відмову L_h , год;
- швидкісна помилка α , %.

Кінематичну схему розрахункового електропривода наведено на рисунку 2.3.

Визначається час переміщення матеріалів конвеєром [5]:

$$t_{p1} = \frac{L}{v}, \text{ с.} \quad (2.4)$$

Приймаємо $t_{p1} = t_{p2}$, час простоїв t_0 , який дорівнює робочому часу.



1 – електродвигун; 2 – плоскоремінна передача;
 3 – редуктор прямозубий; 4 – муфта; 5 – барабан конвеєра
 Рисунок 2.3 – Кінематична схема розрахункового електропривода стрічкового конвеєра

Розраховується тривалість циклу:

$$t_{\text{ц}} = t_{p1} + t_{p2} + 2t_0, \text{ с.} \quad (2.5)$$

Тривалість вмикання механізму в статисти становить $TB=100\%$.

Визначається необхідна потужність на виході:

$$P_{pm} = F_t v, \text{ Вт,} \quad (2.6)$$

де F_t – колове зусилля на барабані, Н;

v – колове швидкість стрічки конвеєра, м/с.

Розраховується загальний коефіцієнт корисної дії привода:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{закр.перед}} \eta_{\text{відкр.перед}} \eta_{\text{муф}} \eta_{\text{підшип.коч}}^2 \eta_{\text{підшип.ковз}}, \quad (2.7)$$

де $\eta_{\text{закр.перед}}$ – коефіцієнт корисної дії закритої передачі;

$\eta_{\text{відкр.перед}}$ – коефіцієнт корисної дії відкритої передачі;

$\eta_{\text{муф}}$ – коефіцієнт корисної дії муфти;

$\eta_{\text{підшип.коч}}$ – коефіцієнт корисної дії підшипників кочення;

$\eta_{\text{підшип.ковз}}$ – коефіцієнт корисної дії підшипників ковзання.

Для побудови динамічної навантажувальної діаграми конвеєра необхідно визначити статичні моменти на валу електродвигуна при переміщенні вантажу і на холостому ходу:

$$M_{cn1} = \frac{(Q_n + Q_l) D 9,8}{2i\eta}, \text{ Н}\cdot\text{м;} \quad (2.8)$$

$$M_{cn2} = \frac{Q_n D^{9,8}}{2u\eta}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.9)$$

де u – передавальне число редуктора;

Статична діаграма буде складатися з таких циклів: час переміщення вантажу t_{p1} , зупинки механізму t_{o1} , вивантаження t_{p2} , зупинка на час розвантаження (t_{o2}).

Далі попередньо вибирається електродвигун за потужністю і швидкістю.

Номінальна частота n_p і кутова швидкість обертання ω_p вала електродвигуна визначається за формулою

$$n_p = 60v \frac{u}{\pi D}, \text{ об/хв}; \quad (2.10)$$

$$\omega_p = \frac{\pi n_p}{30}, \text{ рад/с}. \quad (2.11)$$

Розраховується еквівалентний момент за даними статичної навантажувальної діаграми:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 M_{cni}^2 t_{ni}}{\sum_{i=1}^2 (t_{pi} + t_{oi})}}, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.12)$$

Остаточно потужність приводного електродвигуна визначається за формулою

$$P_p = M_e \omega_p, \text{ Вт}. \quad (2.13)$$

Виходячи з умов $n_n > n_p$ і $P_n > P_{розр}$, вибирається приводний електродвигун.

Після вибору електродвигуна його перевіркою розраховують на підставі динамічної навантажувальної діаграми. Для побудови цієї діаграми необхідно визначити час пуску й гальмування, а також моменти, що діють у динамічні проміжки.

Визначається динамічний пусковий момент за формулою

$$M_n = \frac{M_1 + M_2}{2}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.14)$$

де M_1, M_2 – максимальний і мінімальний пускові моменти, відповідно:

$$M_1 = \psi_1 M_{cn1}; \quad (2.15)$$

$$M_2 = \psi_2 M_{cn1}. \quad (2.16)$$

де ψ – кратність пускових моментів: $\psi_1 = 1,6 \dots 2$; $\psi_2 = 1,2 \dots 1,4$.

Розраховується час переміщення вантажу. Для цього необхідно визначити:

1. Сумарний зведений момент інерції при пуску:

$$J_{n1} = K_j(J + J_m) + \frac{1,4 \cdot 91 Q_H v}{n_n^2 \eta}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.17)$$

2. Сумарний зведений момент інерції при гальмуванні:

$$J_{z1} = K_j(J + J_m) + \frac{91 \cdot 1,4 Q_H v}{n_n^2} \eta, \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.18)$$

Час пуску привода для кожної операції визначиться так:

$$t_{п1} = \frac{J_{n1} \omega_H}{M_n - M_{cn1}}, \text{ с}; \quad (2.19)$$

$$t_{п2} = \frac{J_{n2} \omega_H}{M_n + M_{cn2}}, \text{ с}. \quad (2.20)$$

Для визначення часу електричного гальмування механізму розраховуються гальмівні моменти:

$$M_{z1} = K_z M_{cn1}, \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.21)$$

$$M_{z2} = K_z M_{cn2}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.22)$$

де $K_z = 2$ – коефіцієнт запасу гальмування.

Обчислити час гальмування [5]:

$$t_{z1} = \frac{J_{z1} \omega_H}{M_{z1} + M_{cn1}}, \text{ с}; \quad (2.23)$$

$$t_{z2} = \frac{J_{z2} \omega_H}{M_{z2} - M_{cn2}}, \text{ с}. \quad (2.24)$$

За результатами розрахунків будується динамічна навантажувальна діаграма.

За результатами динамічного аналізу функціонування електроприводу конвеєра розраховується еквівалентний момент для режиму S6. Коефіцієнти, що враховують погіршення умов охолодження двигуна при пусках і гальмуваннях $\beta_n = \beta_z = 0,5$:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 M_{ni}^2 t_{ni} + \sum_{i=1}^2 M_{cni}^2 t_{ni} + \sum_{i=1}^2 M_{pi}^2 t_{ni}}{\beta_n \sum_{i=1}^4 t_{ni} + \beta_m \sum_{i=1}^4 t_{mi} + \sum_{i=1}^4 t_{pi}}}, \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.25)$$

Еквівалентна потужність визначається за формулою

$$P_e = M_e \omega_n, \text{ Вт.} \quad (2.26)$$

Виконується перевірка вибраного електродвигуна щодо перегріву:

$$P_p < P_e. \quad (2.27)$$

Приклад розрахунку редукторного електропривода горизонтального стрічкового конвеєра на підставі розрахункової схеми електропривода, наведеної на рисунку 2.3.

Вихідні дані для розрахунку:

- розрахункове зусилля натягу при переміщенні вантажу $F_t = 50 \text{ кН}$;
- розрахункова продуктивність – 300 т/год;
- діаметр барабана конвеєра $D_b = 0,25 \text{ м}$;
- довжина конвеєра $l = 500 \text{ м}$;
- швидкість стрічки $v = 1,2 \text{ м/с}$;
- частота обертання вала приводного електродвигуна $n_{ном} = 950 \text{ об/хв}$;
- час напрацювання на відмову $L_h = 12 \text{ 000 год}$;
- швидкісна помилка $\alpha = 3 \%$;
- передавальне число пасової передачі $u = 16,62$.

Час переміщення матеріалів конвеєром (2.4)

$$t_{p1} = \frac{500}{1,3} \approx 385 \text{ с.}$$

Приймаємо $t_{p1} = t_{p2}$, а час простоїв t_0 дорівнює робочому часу.

Тривалість циклу (2.5)

$$t_{ц} = 2 \cdot 385 + 2 \cdot 385 = 1540 \text{ с.}$$

Тривалість вмикання механізму в статистиці становить $TB = 100 \%$.

Необхідна потужність на виході (2.6)

$$P_{pm} = 50 \cdot 10^3 \cdot 1,3 = 65 \text{ 000 Вт.}$$

Загальний коефіцієнт корисної дії привода (2.7)

$$\eta_{заг} = 0,95 \cdot 0,97 \cdot 0,993^2 \cdot 0,985 \cdot 0,98 = 0,877.$$

Статичні моменти на валу електродвигуна при переміщенні вантажу визначаються відповідно до формул (2.8) і (2.9):

$$M_{cn1} = \frac{(27 \text{ 000} + 3 \text{ 000}) \cdot 9,8 \cdot 0,25}{2 \cdot 16,62 \cdot 0,877} = 840,61 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{cn2} = \frac{3 \text{ 000} \cdot 9,8 \cdot 0,25}{2 \cdot 16,62 \cdot 0,877} = 84 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Статичну діаграму подано на рисунку 2.4.

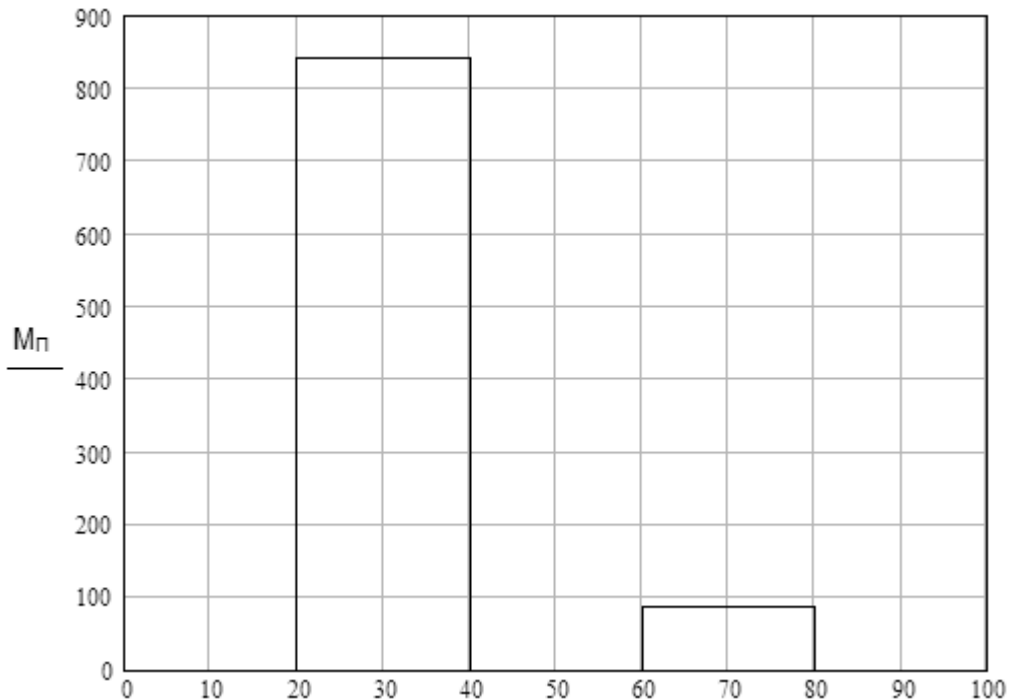


Рисунок 2.4 – Статична навантажувальна діаграма стрічкового конвеєра

Здійснимо попередній вибір електродвигуна за потужністю й швидкістю.

Номінальну частоту й кутову швидкість обертання двигуна визначимо за формулами (2.10) і (2.11):

$$n_p = 60 \cdot 1,3 \frac{16,62}{3,14 \cdot 0,25} = 1621 \text{ хв}^{-1};$$

$$\omega_p = \frac{3,14 \cdot 1621}{30} = 169,7 \text{ с}^{-1}.$$

Визначимо за формулою (2.12) еквівалентний момент за даними статичної навантажувальної діаграми:

$$M_e = \sqrt{\frac{840,61^2 \cdot 385 + 84^2 \cdot 385}{4 \cdot 385}} = 422,4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Потужність електродвигуна визначається за формулою (2.13):

$$P_p = 422,4 \cdot 169,7 \cdot 10^3 = 72 \text{ кВт}.$$

Виходячи з умов $n_n > n_p$ і $P_n > P_{розр}$, вибираємо асинхронний електродвигун серії 4А7133-6АА90-ZL1R + L13. Він має такі параметри [6; 7]:

- номінальна потужність $P_n = 72$ кВт;
- номінальна частота обертання поля статора $n_1 = 1\,500 \text{ хв}^{-1}$;

- номінальна частота обертання ротора $n_2 = 1480 \text{ хв}^{-1}$;
- номінальний момент на валу електродвигуна $M_n = 645 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- напруга мережі живлення $U_n = 380 \text{ В}$;
- перевантажувальна здатність $\lambda = 2,2$;
- момент інерції вала електродвигуна $J = 1,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- номінальний струм ротора $I_2 = 103,3 \text{ А}$;
- ККД $\eta = 0,86$.

Побудова динамічної навантажувальної діаграми електропривода
Максимальний і мінімальний пускові моменти, відповідно, розраховуються за формулами (2.15) і (2.16):

$$M_1 = 1,7 \cdot 840,61 = 1428,53 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_2 = 1,3 \cdot 840,61 = 1092,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Визначимо динамічний пусковий момент за формулою (2.14):

$$M_n = \frac{1428,53 + 1092,8}{2} = 1260,66 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Визначимо час переміщення вантажу. Для цього розрахуємо:

- сумарний зведений момент інерції при пуску за формулою (2.17):

$$J_{n1} = 1,25 (1,5 + 10,3) + \frac{91 \cdot 1,4 \cdot 3000 \cdot 0,5}{1480^2 \cdot 0,877} = 15,74 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

- сумарний зведений момент інерції при гальмуванні пуску за формулою (2.18):

$$J_{z1} = 1,25 (1,5 + 10,4) + \frac{91 \cdot 1,4 \cdot 3000 \cdot 0,5}{1480^2} \cdot 0,877 = 14,95 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Приймаємо робочу кутову швидкість такою, що дорівнює номінальній кутовій швидкості вибраного електродвигуна.

Час пуску привода для кожної операції визначиться за формулами (2.19) і (2.20):

$$t_{n1} = \frac{33,4 \cdot 155}{784 - 522,7} = 19,8 \text{ с}; \quad t_{n2} = \frac{32,12 \cdot 155}{784 + 149,3} = 5,3 \text{ с}.$$

Для визначення часу електричного гальмування механізму знайдемо гальмівні моменти за формулами (2.21) і (2.22):

$$M_{z1} = 2 \cdot 522,7 = 1045,3 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{z2} = 2 \cdot 149,3 = 298,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розрахуємо час гальмування за формулами (2.23) і (2.24):

$$t_{21} = \frac{33,4 \cdot 155}{784 + 522,7} = 3,3 \text{ с};$$

$$t_{22} = \frac{32 \cdot 155}{784 - 149,3} = 33,2 \text{ с}.$$

За результатами розрахунків будемо динамічну навантажувальну діаграму, наведену на рисунку 2.5.

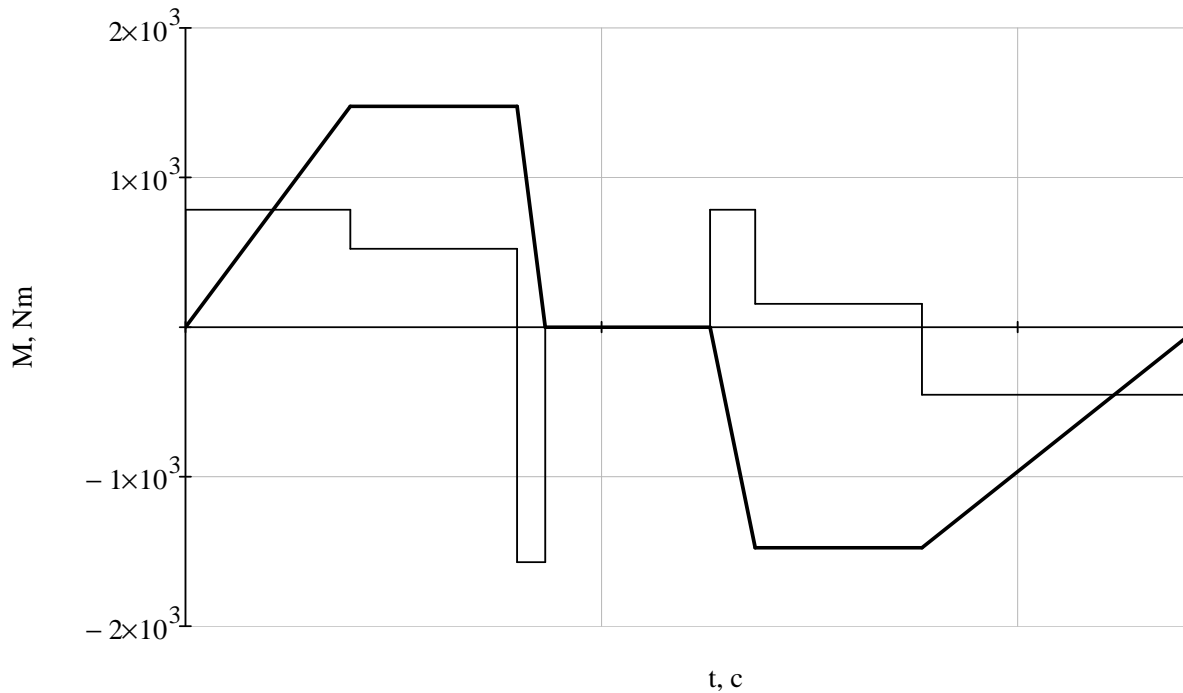


Рисунок 2.5 – Поєднана динамічна навантажувальна діаграма

Розрахунковий еквівалентний момент для режиму S6 за формулою (2.25) становитиме: $M_e = 427,9$. Коефіцієнти, що враховують погіршення умов охолодження двигуна при пусках і гальмуваннях $\beta_n = \beta_z = 0,5$.

Еквівалентна потужність за формулою (2.26) становитиме:

$$P_e = M_e \omega_n = 429,6 \cdot 155 \cdot 10^3 = 66,6 \text{ кВт}.$$

Перевірка вибраного електродвигуна щодо перегріву здійснюється за залежністю (2.27):

$$66,6 \text{ кВт} < 72 \text{ кВт}.$$

Оскільки розрахункова еквівалентна потужність менша від номінальної потужності приводного електродвигуна, то вибір здійснено вірно.

2.3.3 Розрахунок і вибір електродвигуна похилого стрічкового конвеєра з прямим приводом

Вихідні дані для розрахунку:

- максимальна швидкість подавання v_{max} , м/с;
- мінімальна швидкість подавання v_{min} , м/с;
- діапазон регулювання швидкості D ;
- довжина конвеєра L , м;
- ширина стрічки b , м;
- питома вага стрічки m'_G , кг/м;
- вага роликів m_R , кг;
- максимальне навантаження m'_L , кг/м;
- діаметр барабанів D , мм;
- середній кут піднімання конвеєра α .

Розраховується основна сила опору F_h верхньої і нижньої гілок конвеєра. Основна сила визначається відразу для обох гілок. Припущення: лінійна залежність між силою опору й переміщуваним вантажем [5]:

$$F_h = Lfg \left(\frac{m_R}{L} + (2m'_G + m'_L) \right) \cos \alpha, \quad (2.28)$$

де F_h – основна сила опору верхньої і нижньої гілок конвеєра, Н;

f – коефіцієнт тертя: $f = 0,02$;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

m_R – загальна вага роликів, кг;

m'_G – вага стрічки, кг/м;

m'_L – максимальне навантаження, кг/м;

α – середній кут піднімання конвеєра.

Розраховуємо вторинні сили опору конвеєра:

- силу інерції вантажу і силу тертя між вантажем і стрічкою в місці завантаження;

- силу тертя між вантажем і бічними напрямними;

- силу тертя між стрічкою й скребком.

Визначається сила опору підніманню переміщуваного вантажу конвеєром:

$$F_{s1} = Lfgm'_L \sin \alpha, \text{ Н.} \quad (2.29)$$

Розраховуються вторинні сили опору:

$$F_n = (c - 1)F_h, \text{ Н.} \quad (2.30)$$

Сумарні сили опору при переміщенні вантажу

$$F = F_h + F_s + F_n, \text{ Н.} \quad (2.31)$$

Обчислюється статична потужність приводного електродвигуна для конвеєра без урахування ККД редуктора й варіатора:

$$P = \frac{F v}{\eta}, \text{ Вт.} \quad (2.32)$$

Виходячи з умов $n_n > n_p$ і $P_n > P_{розр}$, вибирається приводний електродвигун.

Визначається момент інерції прямолінійно рухомих компонентів вантажу й стрічки [5]:

$$J_x = 91,2 m \left[\frac{v}{n_n} \right]^2 \cos \alpha, \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (2.33)$$

Розраховується момент інерції обертових компонентів конвеєра (роликів):

$$J_{xR} = \frac{1}{2} m_R [r_A^2 + r^2], \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (2.34)$$

Обчислюється частота обертання роликів конвеєра:

$$n_R = \frac{v 60}{2\pi r_A}, \text{ об/хв.} \quad (2.35)$$

Визначається величина зовнішнього моменту інерції до ротора двигуна:

$$J_{xz} = J_{xR} \left[\frac{n_R}{n_n} \right]^2, \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (2.36)$$

За проведеними вище розрахунками визначають загальний момент інерції конвеєра:

$$J = J_x + J_{xz} + J_{xr}, \text{ кг}\cdot\text{м}^2. \quad (2.37)$$

Розраховується номінальний момент приводного електродвигуна конвеєра.

Номінальний і максимальний моменти електродвигуна конвеєра:

$$M_n = \frac{9\,550 P_n}{n_n}, \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (2.38)$$

$$M_{\max} = 2,8 M_n, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.39)$$

Визначається розрахунковий час розгону й пуску конвеєрів:

$$t_a = \frac{\left(J_\partial + \frac{J}{\eta_m} \right) n_n}{9,55 \left(M_{\max} - \frac{M_n}{\eta_\partial} \right)}, \text{ с.} \quad (2.40)$$

Розраховується значення прискорення при розгоні конвеєра:

$$a = \frac{v}{t_a}. \quad (2.41)$$

За результатами розрахунку будується динамічна навантажувальна діаграма електропривода стрічкового конвеєра.

На останньому етапі розрахунку виконується перевірочний розрахунок вибраного електродвигуна.

Розраховується еквівалентний момент електродвигуна:

$$M_e = \sqrt{\frac{M_n^2 t_a + M_c^2 t_p + M_n^2 t_m}{t_a + t_p + t_0 + t_m}}, \text{ Н.} \quad (2.42)$$

Визначається величина еквівалентної потужності:

$$P_e = \frac{M_e n_n}{9\,550}, \text{ кВт.} \quad (2.43)$$

За результатами розрахунків перевіряється правильність вибору приводного електродвигуна на підставі дотримання нерівності

$$P_e < P_n. \quad (2.44)$$

Приклад розрахунку й вибору електродвигуна похилого стрічкового конвеєра з прямим приводом

Початкові дані. Стрічковий конвеєр для завантаження в залізничні вагони переміщує 500 тонн сортового вугілля за годину. Максимальна швидкість подавання становить 2 м/с. Необхідне регулювання швидкості у відношенні 1:4 до мінімального 0,5 м/с. Довжина конвеєра дорівнює 1 000 м. Стрічка шириною 1,2 м має питому вагу 42 кг/м. Вага роликів становить 1 200 кг. Діаметр барабанів $D = 450$ мм.

Основна сила опору F_h верхньої і нижньої гілок конвеєра визначається за формулою (2.28) відразу для обох гілок. Припущення: лінійна залежність між силою опору й переміщуваним вантажем:

$$F_h = 1\,000 \cdot 0,02 \cdot 9,81 \left(\frac{1200}{250} + (2 \cdot 42 + 415) \right) \cos 15^\circ = 94\,798,6 \text{ Н.}$$

Розрахуємо вторинні сили опору конвеєра:

- силу інерції вантажу й силу тертя між вантажем і стрічкою в місці завантаження;

- силу тертя між вантажем і бічними напрямними;

- силу тертя між стрічкою й скребком.

Сила опору підніманню переміщуваного вантажу конвеєром розраховується за формулою (2.29):

$$F_s = 1\,000 \cdot 0,02 \cdot 9,81 \cdot 415 \cdot \sin 15^\circ = 21\,063,4 \text{ Н}.$$

Визначаємо вторинні сили опору за формулою (2.30):

$$F_n = (1,3 - 1) \cdot 23\,870 = 28\,439,6 \text{ Н}.$$

Сумарні сили опору при переміщенні вантажу знаходимо за формулою (2.31):

$$F = 94\,798,6 + 21\,063,4 + 28\,439,6 = 144\,301,6 \text{ Н}.$$

Розрахуємо статичну потужність приводного електродвигуна для конвеєра без урахування ККД редуктора й варіатора за формулою (2.32):

$$P = \frac{144\,301,6 \cdot 2}{0,9} = 320\,670,1 \text{ Вт}.$$

За результатами попереднього розрахунку вибираємо асинхронні електродвигуни. Для конвеєра приймаємо два асинхронні електродвигуни серії 1LG4316-4AA з технічними характеристиками, наведеними в таблиці 2.5 [6; 7].

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики приводних електродвигунів

Параметр	Значення параметра двигуна 1LG4316-4AA
Номінальна потужність, кВт	160
Номінальна сила струму, А	280
Номінальна частота обертання, хв ⁻¹	1 486
Кількість пар полюсів	4
Максимальна частота обертання, хв ⁻¹	4 200
Момент інерції, кг·м ²	2,88
Момент номінальний, Н·м	1 028
Кратність перевантажувального моменту	2,8
Номінальна напруга, В	380

Визначимо момент інерції прямолінійно рухомих компонентів вантажу й стрічки за формулою (2.33):

$$J_{x2} = 91,2 \left(\frac{1\,200}{1\,000} + (2 \cdot 42 + 415) \right) \left(\frac{1 \cdot 2}{1\,402} \right) \cos 15^\circ = 0,089 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Визначимо момент інерції обертових компонентів конвеєра (роликів) за формулою (2.34):

$$J_{xR} = 0,5 \cdot 1\,200 (0,108^2 + 0,05^2) = 8,498 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Розрахуємо частоту обертання роликів конвеєра за формулою (2.35):

$$n_R = \frac{2 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,108} = 177 \text{ хв}^{-1}.$$

Визначимо зведений зовнішній момент інерції до ротора двигуна за формулою (2.36):

$$J_{xz} = 0,5 \left(\frac{177}{1\,402} \right) = 0,135 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Загальний момент інерції конвеєра визначається за формулою (2.37):

$$J = 0,089 + 0,135 + 8,498 = 8,67 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Розрахуємо номінальні моменти приводних електродвигунів конвеєрів. Номінальний і максимальний моменти електродвигуна конвеєра визначаються за формулами (2.38) і (2.39), відповідно:

$$M_H = \frac{9550 \cdot 160}{1482} = 1031 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\max} = 2,8 \cdot 1031 = 2886,9 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Розрахунковий час розгону й пуску конвеєрів згідно з формулою (2.40) визначається так:

$$t_a = \frac{\left(2,88 + \frac{8,67}{0,76} \right) 1\,482}{9,55 \left(2\,886,9 - \frac{1\,031}{2} \right)} = 127,7 \text{ с}.$$

Прискорення при розгоні конвеєра знаходимо за формулою (2.41):

$$a = \frac{2}{127,7} = 0,016 \text{ м/с}^2.$$

За результатами розрахунку побудуємо динамічну навантажувальну діаграму електропривода стрічкового конвеєра (рис. 2.6).

Проведемо перевірочний розрахунок вибраного електродвигуна. Розрахуємо еквівалентний момент електродвигуна за формулою (2.42):

$$M_e = \sqrt{\frac{2\,886,9^2 \cdot 127,7 + 1\,031^2 \cdot 500 + 2\,886,9^2 \cdot 127,7}{127,7 + 500 + 50 + 127,7}} = 1817,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

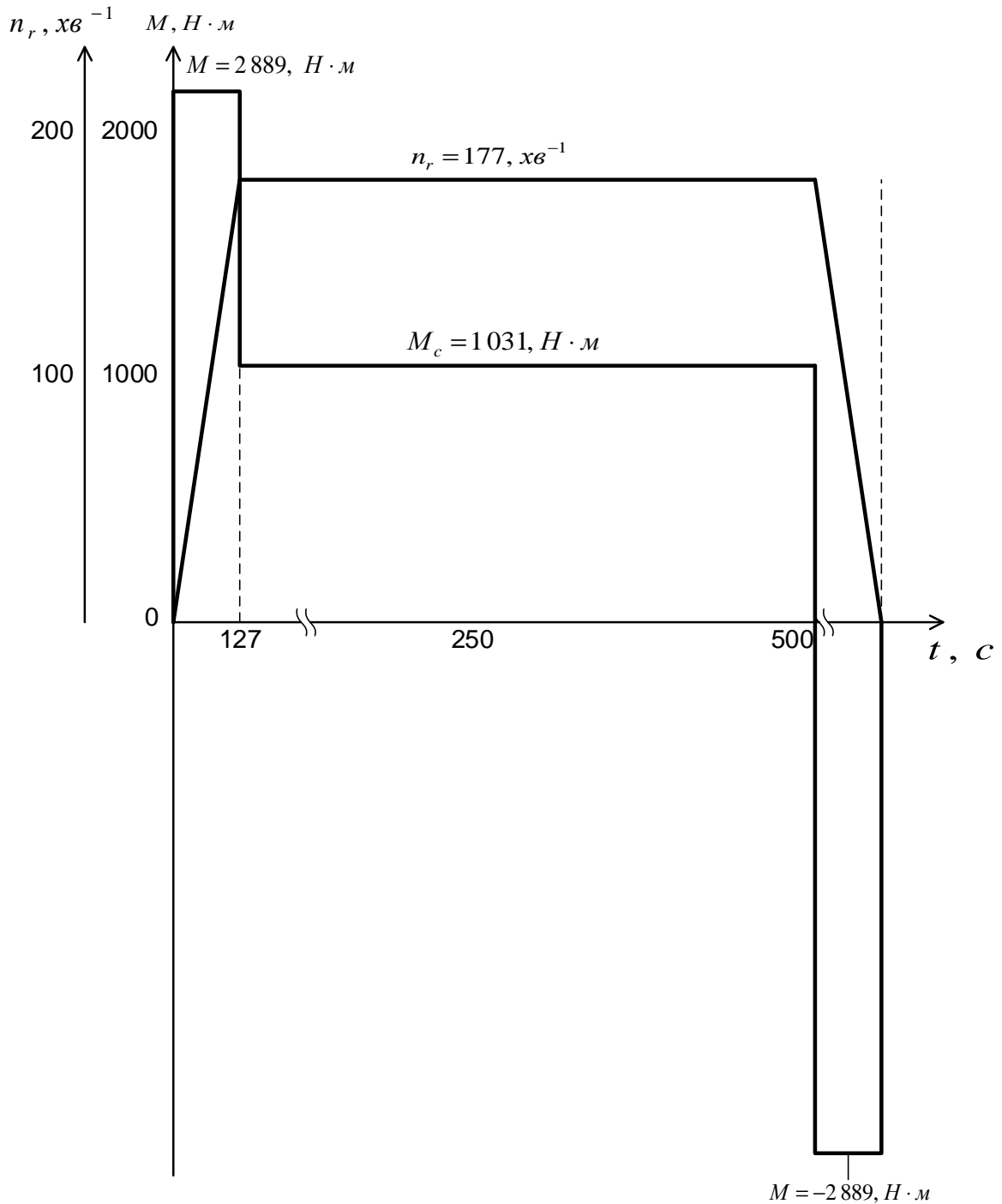


Рисунок 2.6 – Динамічна навантажувальна діаграма електропривода стрічкового конвеєра

Еквівалентна потужність розраховується за формулою (2.43):

$$P_e = \frac{1817,3 \cdot 1482}{9550} = 282 < 320 \text{ кВт.}$$

Вибір приводних електродвигунів стрічкового конвеєра проведений вірно, тому що за результатами розрахунку еквівалентна потужність менша від значення сумарної номінальної потужності приводних електродвигунів.

2.3.4 Розрахунок електропривода механізму піднімання підвіски гака мостового крана

Стандартизована для попередньо прийнятого важкого режиму (5М) навантажувальна діаграма роботи механізму піднімання включає такі операції (рис. 2.7):

- піднімання вантажу вагою Q_n на висоту H за час t_{p1} ;
 - зупинка механізму на час $t_{01} = t_{p1}$ переміщення вантажу по цеху;
 - спускання вантажу вагою Q_n з висоти H за час $t_{p2} = t_{p1}$;
 - зупинка механізму на час $t_{02} = t_{p1}$ розвантаження;
 - піднімання підвіски гака вагою $Q_0 = 0,2Q_n$ за час $t_{p3} = t_{p1}$;
 - зупинка механізму піднімання на час $t_{03} = t_{p1}$ переміщення вантажу до місця завантаження;
 - спускання підвіски гака вагою $Q_0 = 0,2Q_n$ за час $t_{p4} = t_{p1}$;
 - зупинка механізму на час $t_0 = t_{p1}$ завантаження.
- Далі послідовність операцій, наведена вище, повторюється.

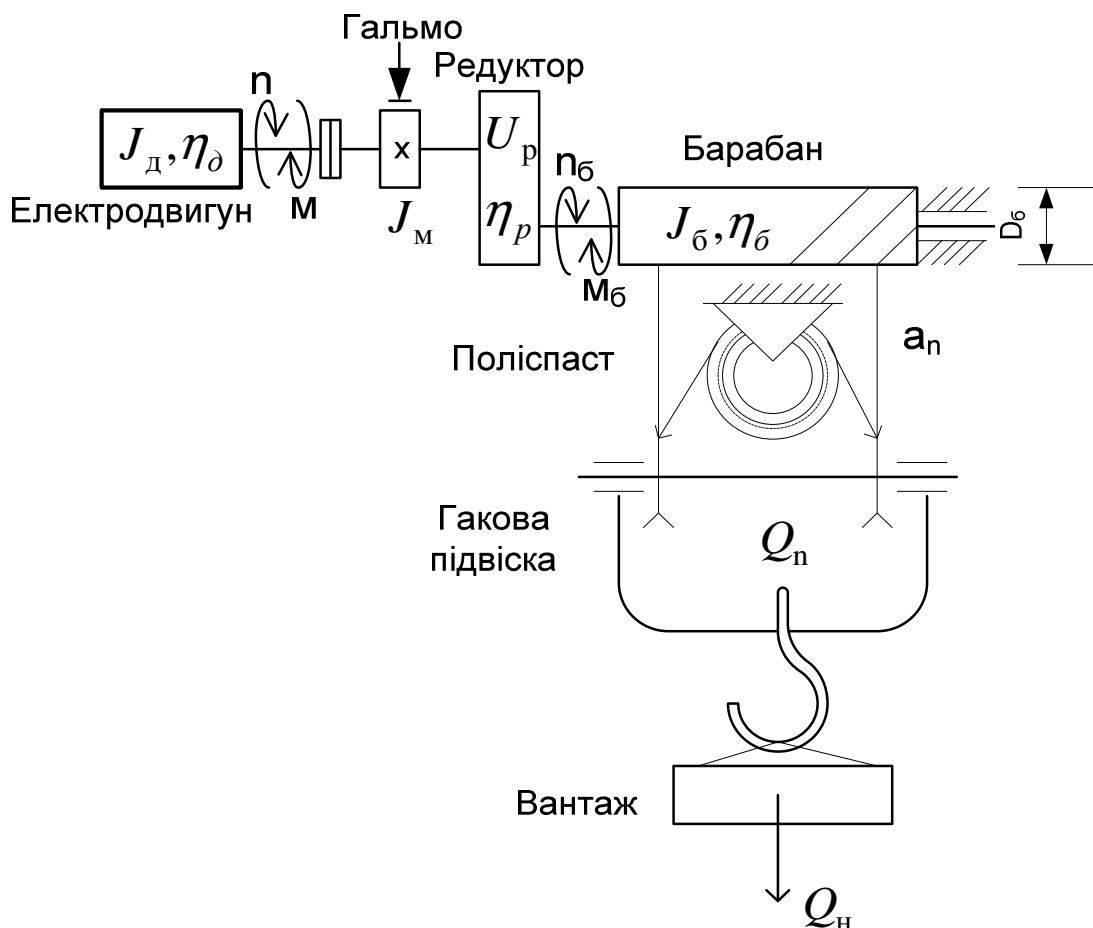


Рисунок 2.7 – Кінематична схема механізму піднімання мостового крана

Для спрощення швидкість піднімання й спускання приймається незмінною (електродвигун має досить жорстку характеристику), тому час піднімання й спускання в статистиці визначається так:

$$t_{p_1} = t_{p_2} = \dots = t_{p_j} = \frac{H}{v_n}, \text{ с.} \quad (2.45)$$

Час t_0 зупинки механізму піднімання дорівнює часу піднімання:

$$t_0 = t_p. \quad (2.46)$$

Тривалість циклу

$$t_u = \sum t_{p_j} + \sum t_{0_j} = t_{p_1} + t_{p_2} + t_{p_3} + t_{p_4} + 4t_0, \text{ с.} \quad (2.47)$$

Тривалість вмикання механізму в статистиці, тобто без урахування динамічних режимів [5],

$$TB = \frac{\sum t_{p_j}}{t_u} 100 \%. \quad (2.48)$$

Статичний момент на валу електродвигуна при підніманні вантажів, різних за масою, визначається за формулою

$$M_{cj}^{\Pi} = \frac{9,8 K_3 Q_n D_{\sigma}}{2i_m \eta_m k_n}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.49)$$

де K_3 – коефіцієнт завантаження:

$$K_3 = \frac{Q}{Q_n};$$

i_m – загальне передавальне число механізму;

$j = 1, 3, 5, 7, \dots, 15$.

Статичний момент на валу двигуна при спусканні різних за масою вантажів

$$M_{cj}^C = \frac{K_3 Q_n D_{\sigma} 9,8 \eta_m}{2i_m}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.50)$$

де $j = 2, 4, 6, 8, \dots, 16$.

Статична навантажувальна діаграма, розрахована за вихідними даними й формулами (2.45), (2.46), (2.49), (2.50), будується у відповідному масштабі. Загальний вигляд статичної навантажувальної діаграми наведено на рисунку 2.8 [5].

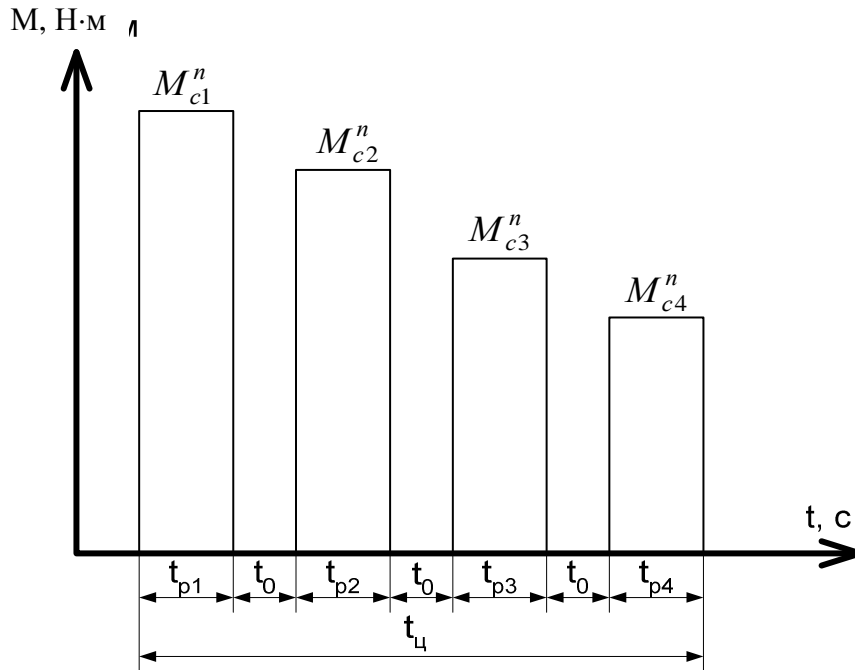


Рисунок 2.8 – Статична навантажувальна діаграма механізму піднімання мостового крана

Потужність електродвигуна з найближчою стандартною тривалістю вмикання TB_{cm} вибирається з умови піднімання номінального вантажу за розрахунками потужності:

$$P_{розр} = \frac{9,8Q_n v_n 10^3}{\eta_m}, \text{ Вт}, \quad (2.51)$$

де Q_n – номінальна вантажопідйомність, т;

v_n – швидкість піднімання, м/с;

η_m – ККД механізму, $\eta_m = \eta_p \eta_b \eta_n$;

η_p – ККД редуктора;

η_b – ККД барабана;

η_n – ККД поліспасти.

Якщо розрахункова TB за формулою (4.4) відрізняється від стандартних, а $t_{\Sigma} < 10$ хв, то розрахункова потужність зводиться до стандартної TB_{cm} :

$$P'_{розр} = P_{розр} \sqrt{\frac{TB}{TB_{cm}}}, \text{ Вт}. \quad (2.52)$$

Умова попереднього вибору двигуна за потужністю, що відповідає TB_{cm} :

$$P_n \geq P'_{розр}. \quad (2.53)$$

Якщо $t_y < 10$ хв, то вибирається двигун зі стандартною $TB = 100$ % за умови $P_{н (100\%)} \geq P'_{розр}$.

Тут попередньо перевіряється двигун за перевантажувальною здатністю:

$$M_{\max} \geq M_{c \max}, \quad (2.54)$$

де M_{\max} – максимальний момент вибраного двигуна, Н·м;

$M_{c \max}$ – максимальний статичний момент зі статичної навантажувальної діаграми, Н·м.

Номінальна частота обертання вала двигуна вибирається з умови

$$n_n \geq n_p = \frac{60v_{н.м}}{\pi D_6}, \text{ об/хв.} \quad (2.55)$$

При побудові динамічної навантажувальної діаграми враховуються динамічні моменти M_d на валу двигуна під час t_{II} пуску та t_T гальмування.

При багатоступінчастому запуску електродвигуна динамічний момент

$$M_d = M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \text{ Н·м} \quad (2.56)$$

змінюється від максимального M_1 до мінімального M_2 за складним законом [3]. Тому в інженерних розрахунках динамічний момент при пуску приймають таким, що дорівнює середньому:

$$M_n = \frac{M_1 + M_2}{2}, \text{ Н·м,} \quad (2.57)$$

де $M_1 = \psi_1 M_n$ – максимальний пусковий момент, Н·м;

ψ_1 – кратність максимального пускового моменту;

M_n – номінальний (максимальний) статичний момент навантаження, Н·м;

$M_2 = \psi_2 M_n$ – мінімальний пусковий момент (момент перемикання), Н·м;

ψ_2 – кратність мінімального пускового моменту: $\psi_2 = 1.1 \dots 1.4$.

Кратність ψ_1 максимального пускового моменту приймається залежно від режимів роботи (табл. 2.6) [7; 13].

Таблиця 2.6 – Значення кратності пускового моменту

Режим роботи	(Л) 1М, 2М	(С) 3М, 4М	(Т) 5М	(ВТ) 6М	(Н) Е5
ψ_1	1,25	1,6	2,0	2,5	3,2

Час t_n пуску приводу при підніманні й спусканні вантажу

$$t_{nj} = J_{\Sigma} \frac{\omega_p}{M_{nj} \mp M_{cj}}, \quad (2.58)$$

де J_{Σ} – сумарний момент інерції рухомих і обертових мас, зведений до вала двигуна, при підніманні або спусканні вантажу, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;

ω_p – кутова швидкість обертання вала двигуна, рад/с ;

M_{cj} – статичний момент на валу двигуна при підніманні або спусканні вантажу: $M_{cj} = M_{cj}^{\Pi}$ (2.49) або $M_{cj} = M_{cj}^C$ (2.50).

Знак «мінус» відповідає пуску при підніманні вантажу, знак «плюс» – спусканні вантажу.

Сумарний зведений момент інерції при пуску

$$J_{\Sigma} = K_J (J_d + J_M) + \frac{Q_{\bar{\sigma}} D_{\bar{\sigma}}^2}{4u_p^2 \eta_M} + \frac{91m v_H^2}{n_p^2 \eta_M}, \quad \text{кг}\cdot\text{м}^2, \quad (2.59)$$

де K_J – коефіцієнт, що враховує моменти інерції мас деталей, які обертаються повільніше, ніж вал двигуна (шестерень редуктора, з'єднувальних муфт, валів тощо): $K_J = 1, 2 \dots 1, 3$ [7; 8];

m – вага поступально рухомих вантажів (вага вантажу), кг ;

n_p – робоча частота обертання вала двигуна, об/хв :

$$n_p = \frac{60v_H i_M k_n}{\pi D_{\bar{\sigma}}}; \quad (2.60)$$

J_d – момент інерції ротора двигуна, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$:

$$J_d = \frac{G_M D_{\bar{\sigma}}^2}{4},$$

тут $G_M D_{\bar{\sigma}}^2$ – маховий момент ротора двигуна за паспортними даними, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;

J_M – момент інерції муфти з гальмівним шківом, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$:

$$J_M = \frac{G_M D_M^2}{4},$$

тут $G_M D_M^2$ – маховий момент інерції муфти з гальмівним шківом, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Кутова швидкість обертання вала двигуна:

$$\omega_p = \omega_H = \frac{\pi n_H}{30}, \quad (2.61)$$

де ω_n – номінальна кутова швидкість вала двигуна, с^{-1} ;
 n_n – номінальна частота обертання вала двигуна, об/хв.
 Час електричного гальмування механізму піднімання

$$t_{Гj} = J_{Г\Sigma} \frac{\omega_p}{M_{Tj} \mp M_{Cj}}, \text{ с}, \quad (2.62)$$

де $J_{Г\Sigma}$ – сумарний зведений до вала двигуна момент інерції при гальмуванні, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Знак «плюс» у формулі (2.61) відповідає гальмуванню при підніманні вантажу, «мінус» – при спусканні.

$$J_{Г\Sigma} = K_J (J_d + J_M) + \frac{Q_6 \cdot D_6^2}{4u_p^2} \eta_m + \frac{91m\omega_n^2}{n_p^2} \eta_m. \quad (2.63)$$

Гальмівний момент

$$M_{Гj} = K_G M_H, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.64)$$

де K_G – коефіцієнт запасу гальмування, який приймається залежно від режиму роботи (табл. 2.7) [5; 6; 7].

Таблиця 2.7 – Значення коефіцієнта K_G

Режим роботи	(Л) 1М, 2М	(С) 3М, 4М	(Т) 5М	(ВТ) 6М
K_G	1,5	1,75	2,0	2,5

Розрахована за формулами (2.57)–(2.64), вихідними даними статичної діаграми (рис. 2.8) будується динамічна діаграма, приблизний вигляд якої (суміщеної з діаграмою швидкостей) наведено на рисунку 2.9. На цій діаграмі для зручності масштаб часу в порівнянні з рисунком 2.8 збільшено удвічі. З діаграми на рисунку 2.9 виходить, що час роботи електропривода при кожному ввімкненні збільшується на час $t_{Pj} + t_{Гj}$, а час t_0 вимкнення на цю величину зменшується.

Уточнене значення тривалості вмикання

$$TB_V = \frac{\sum (t_{Pj} + t_{Пj} + t_{Гj})}{t_{ц}} 100 \%. \quad (2.65)$$

Кількість циклів за годину

$$N = \frac{3600}{t_{ц}}. \quad (2.66)$$

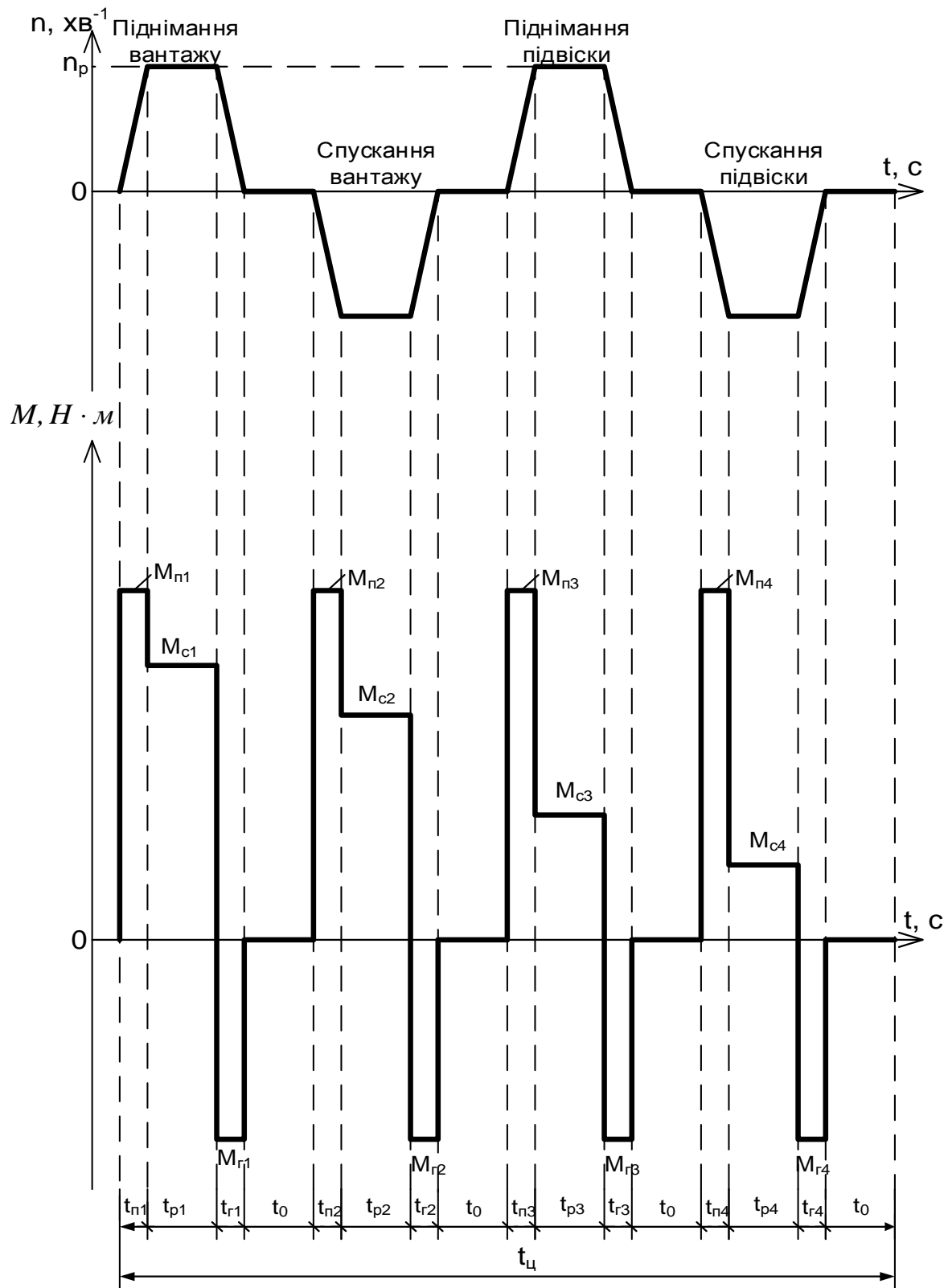


Рисунок 2.9 – Динамічна навантажувальна діаграма електродвигуна механізму піднімання мостового крана, поєднана з діаграмою швидкостей

З урахуванням формул (2.65) і (2.66) уточнюється режим роботи.

Перевірочний розрахунок електродвигуна за потужністю зводиться до розрахунку його нагрівання. Для кожного типу електродвигуна існує

допустима температура нагрівання, що залежить від класу ізоляції його обмоток і інших струмовідних частин [2]. Однак точний тепловий розрахунок електричних машин, що працюють у нестационарних режимах за змінних умов охолодження, надзвичайно складний. Тому в інженерній практиці використовуються більш прості методи розрахунку, наприклад метод еквівалентного (середньоквадратичного) струму (моменту), метод еквівалентної потужності тощо [3; 4; 6; 8]. За наявності динамічної навантажувальної діаграми та незначної зміни швидкості обертання вала двигуна в статичних режимах зручніше використовувати метод еквівалентного моменту.

За даними динамічної навантажувальної діаграми визначається еквівалентний момент за цикл роботи:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum M_{\Pi j}^2 \cdot t_{\Pi j} + \sum M_{Oj}^2 \cdot t_{pj} + \sum M_{\Gamma j}^2 \cdot t_{\Gamma j}}{\beta_{\Pi} \sum t_{nj} + \sum t_{pj} + \beta_{\Gamma} \sum t_{\Gamma j}}}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.67)$$

де M_{Π} – середній пусковий момент, Н·м;

M_{Oj} – момент опору на валу двигуна при j -му ввімкненні, Н·м;

M_{Γ} – гальмівний момент, Н·м;

$t_{\Pi j}$ – час пуску при j -му ввімкненні, с;

t_{pj} – час роботи при j -му ввімкненні, с;

$t_{\Gamma j}$ – час гальмування при j -му ввімкненні, с;

β_{Π} , β_{Γ} – коефіцієнти, що враховують погіршення умов охолодження двигуна при пусках і гальмуваннях: $\beta_{\Pi} = \beta_{\Gamma} \approx 0,5$.

Еквівалентна потужність, що відповідає M_e і розрахунковій TB ,

$$P_e = \frac{M_e n_n}{9550}, \text{ кВт}. \quad (2.68)$$

Вибраний двигун не буде нагріватися вище за допустиму температуру, якщо

$$P_n \geq P_e \sqrt{\frac{TB_y}{TB_{cm}}}. \quad (2.69)$$

Вибраний за потужністю двигун перевіряється щодо перевантажувальної здатності з урахуванням максимально можливих динамічних моментів. Умова перевірки щодо перевантажувальної здатності:

$$K_V M_{\max} \geq M_{c \max} + M_d, \quad (2.70)$$

де K_V – коефіцієнт, що враховує зниження напруги мережі живлення, при зниженні напруги U на 10 % від U_n (номінальної): для двигунів по-

стійного струму (ДПС) $K_V = 0,9$; для асинхронних двигунів (АД)

$$K_V = \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 = 0,81;$$

M_{\max} – максимально допустимий момент (критичний) за умов комутації ДПС і стійкості АД визначається за довідниковими даними, Н·м;

$M_{c\max}$ – максимальний статичний момент опору на валу двигуна, Н·м;

M_d – динамічний момент, Н·м:

$$M_d = \frac{J_{\Sigma} a_{bp}}{9,55},$$

тут a_{bp} – кутове прискорення обертання, хв^{-2} :

$$a_{bp} = \frac{n_p}{v_i} a,$$

тут a – допустиме лінійне прискорення, м/с^2 .

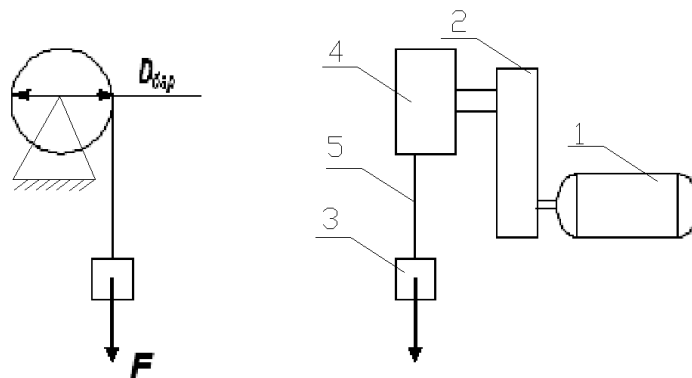
Умова успішного запуску двигуна при підніманні найбільшого вантажу:

$$K_V M_{\max} > M_1 \geq M_{c\max} + M_d. \quad (2.71)$$

Залежно від варіанта приймається двигун постійного струму (ДПС) незалежного збудження або асинхронний двигун (АД) з фазним ротором. Паспортні дані остаточно вибраного двигуна з урахуванням ступеня захисту конструкції зводяться в таблицю.

Приклад вибору електродвигуна допоміжного піднімання за потужністю

Проведемо попередній розрахунок з метою побудови статичної навантажувальної діаграми електропривода. Розрахункову схему наведено на рисунку 2.10, вихідні дані – у таблиці 2.8.



1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – вантажозахоплювальний пристрій;
4 – барабан; 5 – канат;

Рисунок 2.10 – Сили, що діють на кран

Таблиця 2.8 – Вихідні дані для розрахунку електропривода мостового крана КМ50

Параметр	Значення
Вантажопідйомність гака	50 т
Швидкість піднімання гака	0,15 м/с
Швидкість пересування крана	75 м/хв
Швидкість пересування візка	30 м/хв
Висота піднімання головного гака	9 м
Вага гака допоміжного піднімання	0,8 т
Діаметр барабана лебідки гака	560 мм
Вага візка	20 т
Довжина переміщення моста	60 м
Довжина переміщення візка	10 м
ККД головного піднімання під навантаженням	0,84
ККД головного піднімання при холостому ході	0,42
ККД моста	0,82
ККД візка	0,79
Довжина приміщення цеху	62 м
Ширина приміщення цеху	15,5 м
Висота приміщення цеху	12 м
Режим роботи крана середній	Г
Тривалість вмикання крана	40 %

Для побудови статичної навантажувальної діаграми необхідно знайти статичні моменти навантаження на електродвигуні, потужності і час на переходах.

Визначимо час піднімання й спускання вантажу (підвіски гака) за формулою (2.45):

$$t_{p1} = \frac{9}{0.15} = 60 \text{ с.}$$

Приймаємо $t_{p1} = t_{p2} = t_{p3} = t_{p4}$, а час простоїв t_0 такий, що дорівнює робочому часу.

Визначимо тривалість циклу за формулою (2.47):

$$t_{ц} = 4 \cdot 60 + 4 \cdot 60 = 480 \text{ с.}$$

Тривалість вмикання механізму в статистиці розраховується за формулою (2.48):

$$TB = \frac{4 \cdot 60}{480} \cdot 100 = 50 \text{ \%}.$$

Приймаємо стандартне значення $TB_{ст} = 60 \text{ \%}$.

Визначимо статичні моменти на валу електродвигуна при підніманні й спусканні вантажів (підвіски гака), відповідно, за формулами (2.49) і (2.50):

$$M_{cn1} = \frac{1,2 \cdot 9,8 \cdot 50\,000 \cdot 0,56}{2 \cdot 51 \cdot 0,8 \cdot 3} = 1\,540,3 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{cn3} = \frac{0,2 \cdot 9,8 \cdot 50\,000 \cdot 0,56}{2 \cdot 51 \cdot 0,8 \cdot 3} = 256,7 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{cn2} = \frac{1,2 \cdot 9,8 \cdot 50\,000 \cdot 0,56 \cdot 0,8}{2 \cdot 51 \cdot 3} = 1\,086,8 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{cn4} = \frac{0,2 \cdot 9,8 \cdot 50\,000 \cdot 0,56 \cdot 0,8}{2 \cdot 51 \cdot 3} = 181,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Таким чином, статична діаграма буде складатися з таких часових ділянок: час піднімання вантажу t_{p1} , зупинення механізму t_{o1} , спускання вантажу t_{p2} , зупинення на час розвантаження t_{o2} , піднімання підвіски гака t_{p3} , зупинення механізму піднімання на час переміщення підвіски гака до місця завантаження t_{o3} , спускання підвіски гака t_{p4} , зупинення механізму на час завантаження t_{o4} . Діаграму наведено на рисунку 2.11.

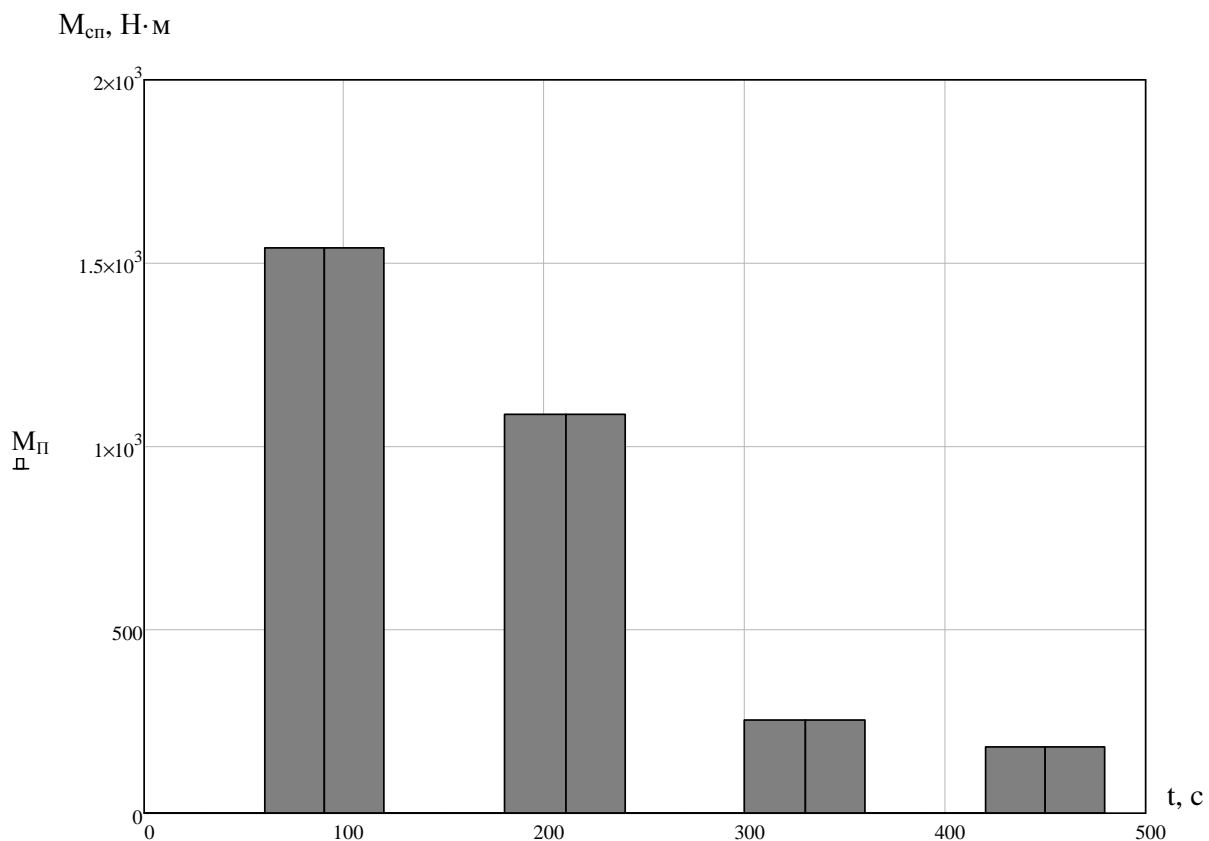


Рисунок 2.11 – Статична навантажувальна діаграма

Попередній вибір електродвигуна за потужністю й швидкістю. Потужність електродвигуна з найближчою стандартною тривалістю вмикання $TB_{ст}$ вибираємо з умови піднімання номінального вантажу за розрахунковою потужністю, яка визначається за формулою (2.51):

$$P_p = \frac{1,2 \cdot 9,8 \cdot 50\,000 \cdot 0,15}{0,84 \cdot 3} = 35\,000 \text{ Вт.}$$

Зведена розрахункова величина потужності до стандартної тривалості вмикання визначається за формулою (2.52):

$$P_{розр} = 35\,000 \sqrt{\frac{50}{60}} = 31\,950,5 \text{ Вт.}$$

Номінальну частоту обертання двигуна визначимо за формулою (2.55):

$$n_p = 60 \cdot 0,15 \frac{51}{3,14 \cdot 0,56} \cdot 2 = 260,9 \text{ хв}^{-1}.$$

Виходячи з умов $n_n > n_p$ і $P_n > P_{розр}$, вибираємо асинхронний електродвигун серії 1LG4288-8AB90-ZA23. Він має такі параметри:

- номінальна потужність $P_n = 55$ кВт;
- синхронна частота обертання поля статора $n_1 = 600$ хв⁻¹;
- номінальна частота обертання ротора $n_2 = 586$ хв⁻¹;
- номінальний момент на валу електродвигуна $M_n = 715$ Н·м;
- напруга мережі живлення $U_n = 380$ В;
- перевантажувальна здатність $\lambda = 2,9$;
- момент інерції вала електродвигуна $J = 1,05$ кг·м²;
- номінальний струм статора $I_1 = 117$ А;
- номінальний струм ротора $I_2 = 109$ А;
- кількість пар полюсів 6;
- ККД $\eta = 0,93$.

Побудова динамічної навантажувальної діаграми електропривода. Визначимо пускові моменти M_1 і M_2 , динамічний пусковий момент M_n за формулою (2.57):

$$\begin{aligned} M_1 &= 1,7 \cdot 1\,540,3 = 3\,080,6 \text{ Н·м;} \\ M_2 &= 1,3 \cdot 1\,540,3 = 2\,310,4 \text{ Н·м;} \\ M_n &= \frac{3\,080,6 + 2\,310,4}{2} = 2\,695,5 \text{ Н·м.} \end{aligned}$$

Визначимо час піднімання й спускання вантажу. Для цього розрахуємо за формулою (2.59):

1. Сумарний зведений момент інерції при пуску:

$$J_{n1} = 1,25 (1,05 + 0,076) + \frac{0,54 \cdot 0,56^2}{4 \cdot 51^2 \cdot 3^2 \cdot 0,84} + \frac{91 \cdot 1,2 \cdot 50\,000 \cdot 0,15}{586^2 \cdot 0,84} = 4,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{n3} = 1,25 (1,05 + 0,076) + \frac{0,54 \cdot 0,56^2}{4 \cdot 51^2 \cdot 3^2 \cdot 0,84} + \frac{91 \cdot 0,2 \cdot 50\,000 \cdot 0,15}{586^2 \cdot 0,84} = 1,89 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

2. Сумарний зведений момент інерції при гальмуванні:

$$J_{22} = 1,25 (1,05 + 0,076) + \frac{0,54 \cdot 0,56^2 \cdot 0,84}{4 \cdot 51^2 \cdot 3^2} + \frac{91 \cdot 1,2 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 0,84}{586^2} = 3,41 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{24} = 1,25 (1,05 + 0,076) + \frac{0,54 \cdot 0,56^2}{4 \cdot 51^2 \cdot 2^2} \cdot 0,84 + \frac{91 \cdot 0,2 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 0,15}{586^2} \cdot 0,84 = 1,74 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Кутова швидкість обертання вала двигуна визначається за формулою (2.61):

$$\omega_p = \omega_n = \frac{3,14 \cdot 586}{30} = 61,4 \text{ с}^{-1}.$$

Час пуску привода для кожної операції розраховується за формулою (2.58):

$$t_{n1} = \frac{4,25 \cdot 61,4}{2\,695,5 - 1\,540,3} = 0,226 \text{ с}; \quad t_{n2} = \frac{1,89 \cdot 61,4}{2\,695,5 + 1\,086,8} = 0,03 \text{ с};$$

$$t_{n3} = \frac{4,25 \cdot 61,4}{2\,695,5 - 256,7} = 0,11 \text{ с}; \quad t_{n4} = \frac{1,89 + 61,4}{2\,695,5 + 1\,811} = 0,04 \text{ с}.$$

Для визначення часу електричного гальмування механізму піднімання знайдемо гальмівні моменти за формулою (2.64):

$$M_{21} = 2 \cdot 1\,540,3 = 3\,080,3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{22} = 2 \cdot 1\,086,8 = 2\,173,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{23} = 2 \cdot 256,7 = 513,4 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{m4} = 2 \cdot 181,1 = 362,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

де $K_m = 2$ – коефіцієнт запасу гальмування.

Час гальмування при підніманні й спусканні вантажу визначається за формулою (2.62):

$$t_{\Gamma 1} = \frac{3,41 \cdot 61,4}{3080,6 + 1540,3} = 0,05 \text{ с};$$

$$t_{\Gamma 2} = \frac{1,74 \cdot 61,4}{2173,6 - 1086,6} = 0,1 \text{ с};$$

$$t_{\Gamma 3} = \frac{3,41 \cdot 61,4}{513,4 + 256,7} = 0,27 \text{ с};$$

$$t_{\Gamma 4} = \frac{1,74 \cdot 61,4}{362,3 - 181,1} = 0,59 \text{ с}.$$

За результатами розрахунків будемо динамічну навантажувальну діаграму, наведену на рисунку 2.12.

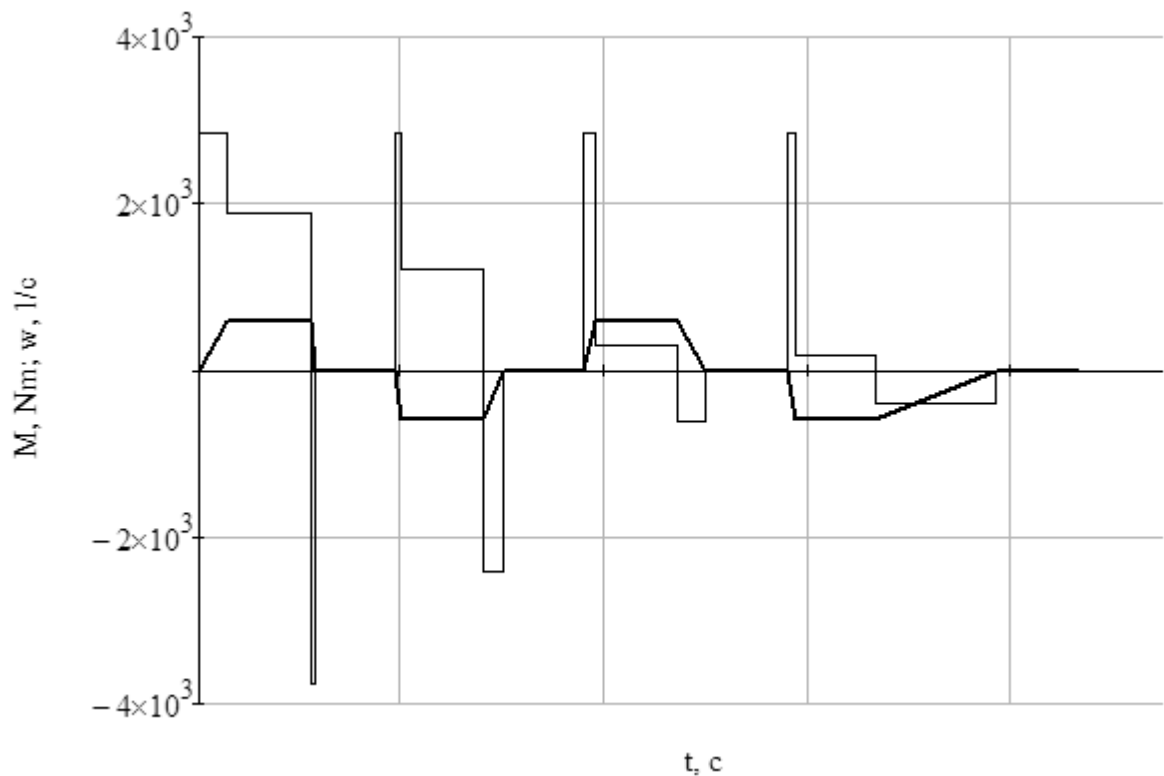


Рисунок 2.12 – Динамічна навантажувальна діаграма

Уточнене значення тривалості вмикання розраховується за формулою (2.65):

$$TB_y = \frac{4 \cdot 60 + 4 \cdot 60 + 0,226 + 0,03 + 0,11 + 0,04 + 0,05 + 0,1 + 0,27 + 0,59}{480} = 50,3 \% .$$

Кількість циклів за годину згідно з формулою (2.66)

$$N = \frac{3600}{480} = 8.$$

Приймаємо кількість циклів за годину такою, що дорівнює 8.

Визначимо за формулою (2.67) еквівалентний момент. Коефіцієнти, що враховують погіршення умов охолодження двигуна при пусках і гальмуваннях, $\beta_n = \beta_c = 0,5$.

$$M_e = \sqrt{\frac{2\,695,5^2 \cdot (0,23 + 0,03 + 0,11 + 0,04) + 3\,080,3^2 \cdot 0,05 + 2\,173,6^2 \cdot 0,1 + 513,4^2 \cdot 0,27 + 369,3^2 \cdot 0,59 + (1\,540^2 + 1\,086,8^2 + 256,7^2 + 181,1^2) \cdot 60}{0,8(0,23 + 0,03 + 0,11 + 0,04 + 0,05 + 0,1 + 0,27 + 0,59) + 4 \cdot 60}} = 962,7 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Визначимо еквівалентну потужність згідно з формулою (2.68):

$$P_e = 962,7 \cdot 61,4 = 59\,080,7 \text{ Вт}.$$

Здійснюємо перевірку вибраного електродвигуна щодо перегрівання за формулою (2.69):

$$P_{розр} = 59\,080,7 \sqrt{\frac{50,3}{60}} = 54\,091 = 51,091 \text{ кВт} < 55 \text{ кВт}.$$

Перевірка електродвигуна показала правильність проведеного розрахунку і вибору приводного електродвигуна допоміжного піднімання.

Приклад вибору приводного електродвигуна переміщення візка допоміжного піднімання мостового крана

Проведемо попередній розрахунок з метою побудови статичної навантажувальної діаграми допоміжного електропривода візка. Для побудови статичної навантажувальної діаграми необхідно знайти статичні моменти на двигуні, потужності й час на переходах.

Визначимо час переміщення візка привода допоміжного піднімання:

$$t_{p1} = \frac{L}{v} = \frac{10}{0,5} = 20 \text{ с}. \quad (2.72)$$

Приймаємо $t_{p1} = t_{p2}$, а час простоїв t_0 такий, що дорівнює робочому часу.

Визначимо тривалість циклу:

$$t_{ц} = t_{p1} + t_{p2} + 2t_0 = 2 \cdot 20 + 2 \cdot 20 = 80 \text{ с}. \quad (2.73)$$

Тривалість вмикання механізму в статиці:

$$TB = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{t_u} 100 \% = \frac{2 \cdot 20}{80} \cdot 100 \% = 50 \%. \quad (2.74)$$

Приймаємо стандартне значення $TB_{cm.} = 60 \%$.

Визначимо статичні моменти на валу електродвигуна при переміщенні візка з вантажем і без вантажу:

$$M_{cn1} = \frac{(1,2 \cdot Q_n + Q_g) \left(\alpha \frac{D}{2} + \beta \right) 9,8}{u\eta} =$$

$$= \frac{9,8 (1,2 \cdot 50\,000 + 20\,000) \cdot \left(0,15 \frac{0,32}{2} + 0,001 \right)}{50 \cdot 0,84} = 455,81 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.75)$$

$$M_{cn2} = \frac{(0,2 \cdot Q_n + Q_g) \left(\alpha \frac{D}{2} + \beta \right) 9,8 \eta}{u\eta} =$$

$$= \frac{9,8 (0,2 \cdot 50\,000 + 20\,000) \cdot \left(0,15 \frac{0,32}{2} + 0,001 \right)}{50 \cdot 0,84} = 170,93 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.76)$$

де D – діаметр колеса візка: $D = 0,32$ м;

β – коефіцієнт, що враховує тертя ребер коліс об рейки: $\beta = 0,001$;

α – коефіцієнт тертя ковзання в цапфах коліс візка: $\alpha = 0,15$.

Діаграму наведено на рисунку 2.13.

Визначимо еквівалентний момент за даними статичної навантажувальної діаграми:

Виконаємо попередній вибір електродвигуна за потужністю й швидкістю. Номінальну частоту обертання двигуна визначимо за формулою

$$n_p = 60v \frac{u}{\pi D} = 60 \cdot 0,5 \frac{50}{3,14 \cdot 0,32} = 596,83 \text{ хв}^{-1}; \quad (2.77)$$

$$\omega_p = \frac{\pi n_p}{30} = \frac{3,14 \cdot 596,83}{30} = 62,5 \text{ с}^{-1}; \quad (2.78)$$

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 M_{cni}^2 t_{ni}}{\sum_{i=1}^2 t_{pi}}} = \sqrt{\frac{455,81^2 \cdot 20 + 170,93^2 \cdot 20}{4 \cdot 20}} = 243,4 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.79)$$

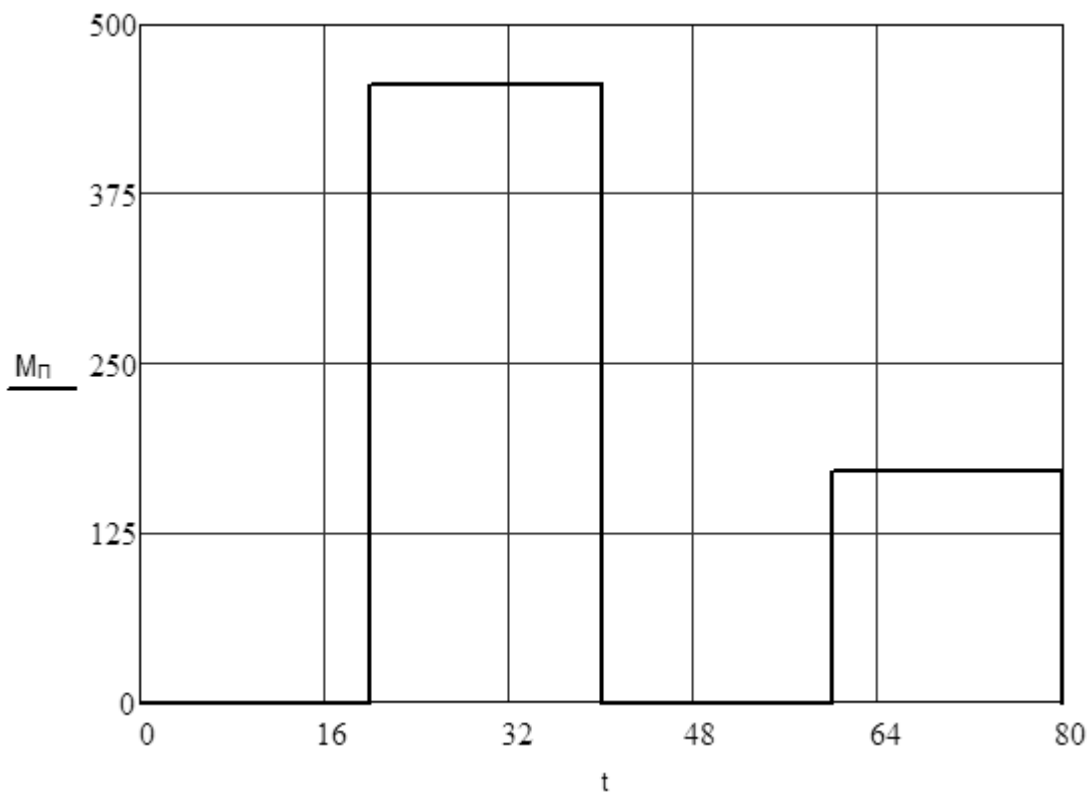


Рисунок 2.13 – Статична навантажувальна діаграма

Потужність електродвигуна з найближчою стандартною тривалістю вмикання TB_{cm} вибираємо з умови піднімання номінального вантажу за розрахунковою потужністю:

$$P_p = M_p \omega_p = 243,4 \cdot 62,5 \approx 15\,212,8 \text{ Вт.} \quad (2.80)$$

Зведемо розрахункову величину потужності до стандартної тривалості вмикання:

$$P_{pct} = P_p \sqrt{\frac{TB}{TB_{cm}}} = 15\,212,8 \sqrt{\frac{50}{60}} = 13\,887,3 \text{ Вт.} \quad (2.81)$$

Виходячи з умов $n_n > n_p$ і $P_n > P_{pct}$ виберемо два асинхронні електродвигуни фірми Siemens серії 1LG4186-4AA90-ZA23 [19]. Двигун цієї серії має такі параметри:

- номінальна потужність $P_n = 22$ кВт;
- номінальна частота обертання поля статора $n_1 = 1\,500 \text{ с}^{-1}$;
- номінальна частота обертання ротора $n_2 = 1\,465 \text{ с}^{-1}$;
- номінальний момент на валу електродвигуна $M_n = 143 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- напруга мережі живлення $U_n = 380 \text{ В}$;
- перевантажувальна здатність $\lambda = 2,2$;
- момент інерції вала електродвигуна $J = 1,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;
- номінальний струм ротора $I_2 = 42,0 \text{ А}$;
- ККД $\eta = 0,899$.

Побудова динамічної навантажувальної діаграми електропривода

Визначимо динамічний пусковий момент за формулою

$$M_n = \frac{M_1 + M_2}{2} = \frac{774,88 + 592,56}{2} = 112,2 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.82)$$

де M_1 і M_2 – максимальний і мінімальний пускові моменти відповідно:

$$M_1 = \psi_1 \cdot M_{cnl} = 1,7 \cdot 455,81 = 774,88 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (2.83)$$

$$M_2 = \psi_2 \cdot M_{cnl} = 1,3 \cdot 455,81 = 592,56 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.84)$$

де ψ – кратність пускових моментів (див. табл. 2.6).

Визначимо час піднімання й спускання вантажу. Для цього розрахуємо:

1. Сумарний зведений момент інерції при пуску:

$$J_{n1} = K_j (J + J_m) + (1,2 \cdot Q_n + Q_g) \left(\frac{0,02 D_k^2}{4 U^2 \eta} + \frac{91 v}{n_n^2 \eta} \right); \quad (2.85)$$

$$J_{n1} = 1,25 (1,5 + 0,075) + (1,2 \cdot 50000 + 2000) \left(\frac{0,02 \cdot 0,8^2}{4 \cdot 50 \cdot 0,86} + \frac{91 \cdot 0,5}{596,83^2 \cdot 0,86} \right) = 6,7 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_{n2} = K_j (J + J_m) + (0,2 \cdot Q_n + Q_g) \left(\frac{0,02 D_k^2}{4 U^2 \eta} + \frac{91 v}{n_n^2 \eta} \right); \quad (2.86)$$

$$J_{n2} = 1,25 (1,5 + 0,075) + (0,2 \cdot 50000 + 2000) \left(\frac{0,02 \cdot 0,8^2}{4 \cdot 50 \cdot 0,86} + \frac{91 \cdot 0,5}{596,83^2 \cdot 0,86} \right) = 3,73 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

2. Сумарний зведений момент інерції при гальмуванні:

$$J_{z1} = K_j (J + J_m) + (1,2 \cdot Q_n + Q_g) \eta \left(\frac{0,02 D_k^2}{4 U^2} + \frac{91 v}{n_n^2} \right); \quad (2.87)$$

$$J_{z1} = 1,25 (1,5 + 0,075) + 0,86 (1,2 \cdot 50000 + 2000) \left(\frac{0,02 \cdot 0,8^2}{4 \cdot 50} + \frac{91 \cdot 0,5}{596,83^2} \right) 0,86 = 5,04 \text{ кг}\cdot\text{м};$$

$$J_{z2} = K_j (J + J_m) + (0,2 \cdot Q_n + Q_g) \eta \left(\frac{0,02 D_k^2}{4 U^2} + \frac{91 v}{n_n^2} \right); \quad (2.88)$$

$$J_{z2} = 1,25 (1,5 + 0,075) + 0,86 (0,2 \cdot 50000 + 2000) \left(\frac{0,02 \cdot 0,8^2}{4 \cdot 50} + \frac{91 \cdot 0,5}{596,83^2} \right) 0,86 = 2,84 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Час пуску привода для кожної операції:

$$t_{n1} = \frac{J_{n1} \omega_H}{M_n - M_{cn1}} = \frac{6,7 \cdot 62,5}{683,7 - 455,8} = 1,84 \text{ с}; \quad (2.89)$$

$$t_{n2} = \frac{J_{n2} \omega_H}{M_n - M_{cn2}} = \frac{3,73 \cdot 62,5}{682,7 - 170,93} = 0,45 \text{ с}. \quad (2.90)$$

Для визначення часу електричного гальмування механізму знайдемо гальмівні моменти:

$$M_{z1} = K_z M_{cn1} = 2 \cdot 455,8 = 911,63 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad (2.91)$$

$$M_{z2} = K_z M_{cn2} = 2 \cdot 170,93 = 341,86 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.92)$$

де $K_z = 2$ – коефіцієнт запасу гальмування.

Час гальмування з вантажем і без вантажу:

$$t_{z1} = \frac{J_{z1} \omega_H}{M_{z1} + M_{cn1}} = \frac{5,04 \cdot 62,5}{911,63 + 455,8} = 0,23 \text{ с}; \quad (2.93)$$

$$t_{z2} = \frac{J_{z2} \omega_H}{M_{z2} + M_{cn2}} = \frac{2,84 \cdot 62,5}{341,86 + 170,93} = 0,35 \text{ с}. \quad (2.94)$$

За результатами розрахунків будемо динамічну навантажувальну діаграму, яку наведено на рисунку 2.14.

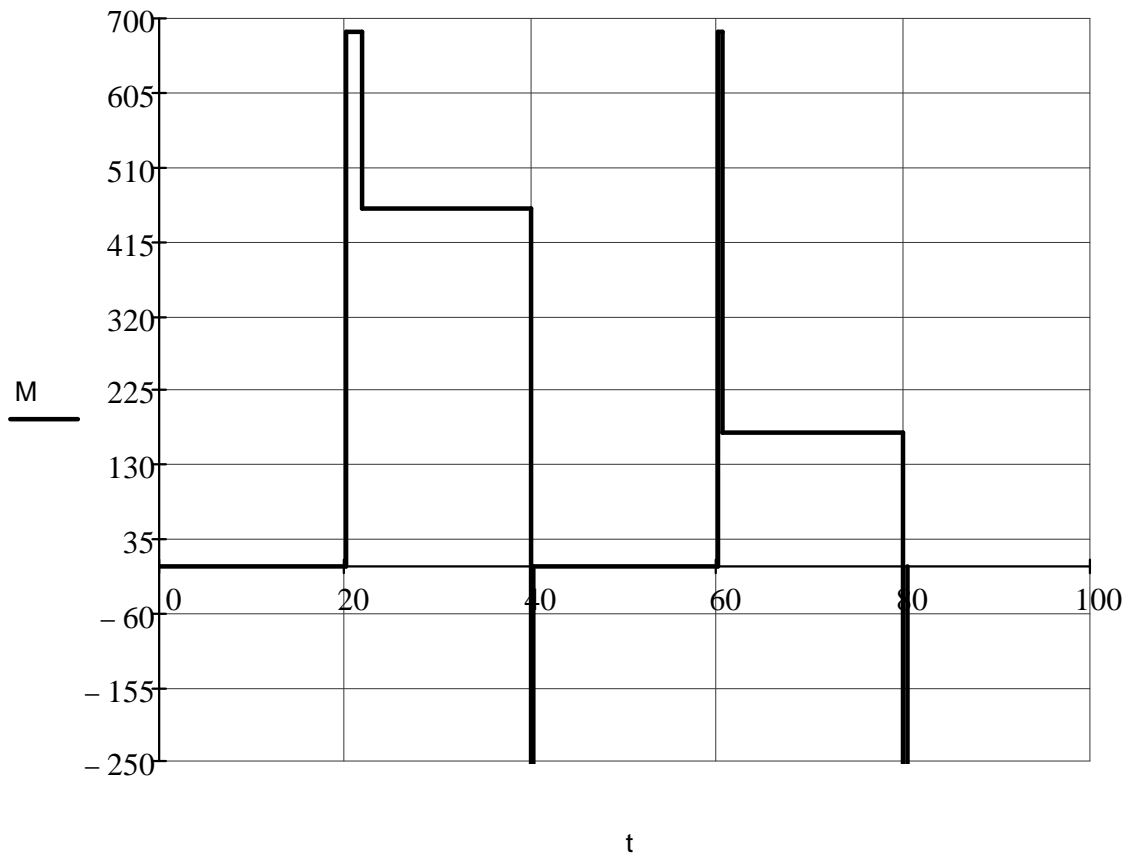


Рисунок 2.14 – Поєднана динамічна навантажувальна діаграма

Визначимо уточнене значення тривалості вмикання:

$$TB_y = \frac{\sum_{i=1}^2 t_{pi} + \sum_{i=1}^2 t_{zi} + \sum_{i=1}^2 t_{ni}}{t_y}; \quad (2.95)$$

$$TB_y = \frac{2 \cdot 20 + 0,23 + 0,3 + 1,84 + 0,45}{4 \cdot 20 + 0,23 + 0,3 + 1,84 + 0,45} = 51,7 \%$$

Розрахуємо кількість циклів за годину:

$$N = \frac{3\,600}{t_y} = \frac{3\,600}{82,87} \approx 44 \text{ цикли/год.} \quad (2.96)$$

Визначимо еквівалентний момент за даними динамічної навантажувальної діаграми. Коефіцієнти, що враховують погіршення умов охолодження двигуна при пусках і гальмуваннях, $\beta_n = \beta_e = 0,5$:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 M_{ni}^2 t_{ni} + \sum_{i=1}^2 M_{cni}^2 t_{ni} + \sum_{i=1}^2 M_{ni}^2 t_{ni}}{\beta_n \sum_{i=1}^2 t_{ni} + \beta_e \sum_{i=1}^2 t_{zi} + \sum_{i=1}^2 t_{pi}}}. \quad (2.97)$$

$$M_e = \sqrt{\frac{683,7^2(1,84 + 0,45) + (455,8^2 + 170,93^2) \cdot 20 + 911,63^2 \cdot 0,23 + 341,86^2 \cdot 0,35}{0,8(1,84 + 0,45) + 2 \cdot 20 + 0,8(0,23 + 0,35)}} = 378 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Визначимо еквівалентну потужність:

$$P_e = M_e \omega_p = 378 \cdot 62,5 = 15\,212 \text{ Вт.} \quad (2.98)$$

Здійснюємо перевірку вибраного електродвигуна щодо перегріву:

$$P_{розр} = P_e \sqrt{\frac{TB}{TB_{ст}}} = 15\,212 \sqrt{\frac{51,7}{60}} = 14\,124,7 \text{ Вт} < 22 \text{ кВт.} \quad (2.99)$$

Оскільки розрахункове значення потужності менше від номінальної потужності вибраного приводного електродвигуна, то його вибір здійснено правильно.

2.3.5 Розрахунок і вибір гальмівного пристрою

Метою цього розрахунку є визначення гальмівного моменту й вибір типу гальма, а також перевірка щодо допустимої втрати потужності вибраного гальма.

У вантажопіднімальних машинах гальмо є найважливішим елементом, що забезпечує безпеку експлуатації, тому найбільш важливі умови вибору, установлення й функціонування гальм регламентовано чинними правилами безпечної експлуатації кранів. Відповідно до цього кожен піднімальний механізм вантажопіднімальної машини повинен забезпечуватися нормально замкнутим гальмом, розташованим на такій ділянці кінематичної схеми, яка має нерозривний зв'язок під навантаженням з вихідним валом передавального механізму. Піднімальні механізми, які служать для пересування рідкого металу, повинні мати два нормально замкнуті незалежні гальма. При цьому наявність у кінематичному ланцюзі двох гальм обов'язкова для двох рухових механізмів (при аварійному механічному вимкненні одного з двигунів) [8; 11].

Основним параметром гальма є гальмівний момент, що гарантовано ним розвивається. Гальмівний момент визначається зусиллям на вимірному важелі, при якому починається проковзування шківів або дисків гальма. Згідно з правилами Держтехнагляду, кожне зі встановлених на механізмі механічних гальм повинне утримувати вантаж, що становить 125 % від номінального, при його зупиненні тільки за допомогою цього гальма.

Визначається розрахунковий момент гальма:

$$M_{gp} = \frac{94\,000 Q_n v_n \eta_{нагр}}{n_{нг}}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.100)$$

де Q_n – номінальна вантажопідйомність, т;

v_n – номінальна швидкість піднімання, м/с;

$\eta_{нагр}$ – ККД механізму для номінального навантаження;

$n_{нг}$ – номінальна частота обертання гальмівного шківів, що відповідає швидкості v_n , об/хв.

Розраховується гальмівний момент з урахуванням режимів роботи механізму піднімання:

$$M_z = k_{зз} M_{gp}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.101)$$

де $k_{зз}$ – коефіцієнт запасу: $k_{зз} = 1,25$.

За розрахунковим значенням M_z вибирається електромагнітне гальмо, виходячи з умови $M_z \leq M_{zn}$.

Далі визначається допустима потужність втрат на тертя:

$$P_{дон} = 360 \cdot D \cdot (10 \cdot D + 1), \text{ Вт}, \quad (2.102)$$

де D – діаметр гальмівного шківів, м.

Знаходиться значення дійсної потужності втрат при гальмуванні:

$$\Delta P = \frac{0,38GD_{заг}^2 n_n^2 N_z}{2 \cdot 10^6 D^2} \left(\frac{M_z}{M_z + M_{с.мах}} + \frac{M_z}{M_z - M_{с.мах}} \right), \text{ Вт,} \quad (2.103)$$

де $GD_{заг}^2$ – сумарний маховий момент усіх елементів, кг·м²;

N_z – кількість гальмувань за годину;

D – діапазон регулювання, що характеризує, з якою швидкістю відбувається гальмування;

M_z – номінальний момент гальма, Н·м;

$M_{с.мах}$ – найбільший момент статичного навантаження, Н·м.

Проводиться перевірка вибраного гальма на виконання умови вибору за тепловим режимом:

$$P_{дон} \geq \Delta P. \quad (2.104)$$

Приклад розрахунку і вибору електромагнітного гальма

Визначаємо розрахунковий момент гальма за формулою (2.100):

$$M_{zp} = \frac{50 \cdot 0,15 \cdot 0,85 \cdot 94\,000}{586} = 1\,022 \text{ Н·м.}$$

Визначити гальмівний момент з урахуванням режимів роботи механізму піднімання за формулою (2.101):

$$M_z = 1,25 \cdot 1\,022 = 1\,278 \text{ Н·м.}$$

Вибране електромагнітне гальмо змінного струму серії КМТ 4А має такі технічні характеристики:

– діаметр шківів – 400 (0,4) мм (м);

– гальмівний момент – 1 300 Н·м.

Дані електромагніта:

– тягове зусилля – 700 Н;

– вага якоря – 24 кг;

– максимальний хід – 50 мм;

– допустима кількість увімкнень за годину – 300;

– час вмикання – 0,2 с;

– час вимикання – 0,25 с.

Повна потужність, В·А:

– при увімкненні – 38 000;

– в увімкненому стані – 1 900;

– споживана потужність – 400 Вт.

За формулою (2.102) визначаємо допустиму потужність втрат на тертя:

$$P_{дон} = 360 \cdot 0,4 \cdot (10 \cdot 0,4 + 1) = 720 \text{ Вт.}$$

Дійсна потужність втрат при гальмуванні розраховується за формулою (2.103):

$$\Delta P = \frac{0,38 \cdot 5,48^2 \cdot 970^2 \cdot 120}{2 \cdot 10^6 \cdot 3^2} \cdot \left(\frac{1300}{1300 + 649,5} + \frac{1300}{1300 - 649,5} \right) = 186 \text{ Вт.}$$

Перевірити вибране гальмо на виконання умови вибору щодо теплового режиму:

$$P_{\text{дон}} = 720 \text{ Вт} > 186 \text{ Вт} = \Delta P.$$

Умова виконується, тому остаточно вибираємо гальмо КМТ 4А.

2.3.6 Методика вибору й розрахунку електропривода повітродувки

Нагнітання повітря до пневмотранспортної системи здійснюється за допомогою повітродувок з регулюванням тиску на виході.

Вибір приводного електродвигуна повітродувки здійснюється за розрахунковим значенням потужності. Причому значення номінальної потужності вибраного електродвигуна P_n має бути більшим або дорівнювати розрахунковим значенням P_e [9].

Потужність приводного електродвигуна P_e обчислюється за формулою

$$P_e = \frac{K_z Q_{\text{max}} H}{\eta_{\text{вент}} \eta_{\text{пр}}}. \quad (2.105)$$

Приклад вибору й розрахунку електропривода повітродувки

Вибираємо приводний електродвигун повітродувки для пневмотранспортного рукава. Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Вихідні дані для розрахунку електропривода повітродувки

Параметр	Позначки параметра	Значення параметра
Максимальна частота обертання вентилятора, хв^{-1}	n_{max}	950
Максимальна продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{хв}$	Q_{max}	4
Максимальний напір, Па	H	3 000
Момент інерції вала електродвигуна, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	J	0,0252
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	$\eta_{\text{дв}}$	0,89
Кратність перевантажувальної здатності	$\frac{M_{\text{max}}}{M_n}$	2,6

Приймаємо коефіцієнт запасу K_z такий, що дорівнює 1,1, а коефіцієнт корисної дії передачі «електродвигун – вентилятор» – $\eta_{np} = 1$ через те, що вал приводного електродвигуна безпосередньо приєднаний до вентилятора.

Потужність приводного електродвигуна P_e знайдемо за формулою (2.105):

$$P_e = \frac{1,1 \cdot 4 \cdot 3\,000}{0,65 \cdot 1} = 20\,307 \text{ Вт.}$$

Вибираємо за каталогом [8] приводний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором типу RA152S6.

Технічні характеристики електродвигуна наведено в таблиці 2.10 [19].

Таблиця 2.10 – Технічні характеристики асинхронного електродвигуна типу RA152S6

Параметр	Позначення параметра	Значення параметра
Номінальна потужність електродвигуна, <i>кВт</i>	P_n	22
Номінальна частота обертання ротора, <i>хв⁻¹</i>	n_n	950
Номінальна напруга мережі, <i>В</i>	U_n	380 / 220
Номінальна сила струму в роторі, <i>А</i>	I	37

2.4 Методика вибору засобів контролю технологічних параметрів

2.4.1 Загальні відомості про датчики

Датчик – це електричний апарат, призначений для перетворення безперервної змінної вхідної (контрольованої) неелектричної величини на змінну вихідну електричну величину [10].

При побудові датчиків використовуються різні фізичні принципи, які значною мірою визначають області раціонального застосування того чи іншого датчика.

Параметричний датчик змінює будь-які зі своїх параметрів під впливом самої вимірюваної величини й вимагає підключення до будь-якого зовнішнього джерела енергії.

Генераторний датчик сам генерує вихідний сигнал і не вимагає підключення до зовнішнього джерела енергії. Як приклади датчиків такого роду можна назвати різні п'єзоелектричні датчики тиску або тахогенераторні, датчики швидкості обертання.

До параметричних датчиків належать:

- резистивні;
- індуктивні;
- трансформаторні;
- ємнісні.

До генераторних датчиків належать:

- термоелектричні;
- індукційні;
- п'єзоелектричні;
- фотоелектричні.

Стосовно датчиків вживаються такі загальні визначення й терміни.

Функція перетворення вимірювального перетворювача – це залежність вихідної величини даного вимірювального перетворювача від вхідних, що задаються або аналітичним вираженням, або графіком, або таблицею.

Чутливість перетворювача – це іменована величина, що показує, наскільки зміниться вихідна величина при зміні вхідної величини на одну одиницю. Для термопари одиницею чутливості буде мілівольти на 1 градус Кельвіна, для регульованого електродвигуна – оберти за секунду на 1 вольт і т. д.

Основною характеристикою є чутливість [10]:

$$S = \Delta Y / \Delta X, \quad (2.106)$$

де ΔY , ΔX – збільшення вихідної й вхідної величин.

Часто користуються відносною чутливістю [10]:

$$S_0 = \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X / X}, \quad (2.107)$$

де Y і X – повні зміни вихідної й вхідної величин.

Датчики можуть бути лінійними ($S = \text{const}$) і нелінійними ($S = \text{var}$). В останніх чутливість залежить від вхідної величини. Найважливішим параметром датчика є поріг чутливості, що є найменшим значенням вхідної величини, що викликається зміною вихідної величини, яка може бути виміряна.

Роздільна здатність перетворення – це найменша зміна вхідного сигналу, яка може бути виміряна перетворювачем.

Відтворюваність є мірою того, наскільки близькі один до одного результати вимірювань однієї й тієї самої фізичної величини.

Прецизійність є мірою того, наскільки близькі один до одного результати аналогічних вимірювань.

Точність (похибка) вимірювання показує, наскільки показане датчиком значення параметра близьке до його істинного значення. Зазвичай точність задається у відсотках від повної шкали вимірювального приладу й у результаті є деякою абсолютною величиною.

Номінальною характеристикою датчика є залежність вхід-вихід, яка зазначена в паспорті. Експериментально знята залежність вхід-вихід відрізняється від номінальної на похибку.

Розрізняють такі похибки:

- абсолютна $\Delta X = X_{\text{вх.ном}} - X_{\text{д}}$;
- відносна $\gamma_0 = \Delta X / X_{\text{д}}$,

де $X_{\text{вх.ном}}$ – значення вхідної величини датчика, визначене за вихідною величиною й номінальною характеристикою;

X_0 – дійсне значення вхідної величини.

Коефіцієнт передачі або перетворення датчика [10]:

$$K_{\text{ном}} = X_{\text{вх.ном}} / X_{\text{вих}} \cdot \quad (2.108)$$

Розрізняють адитивну похибку, що не залежить від вхідної величини, і мультиплікативну похибку, що залежить від неї. Похибка, а саме її наявність, обумовлена впливом збурювальних факторів навколишнього середовища (перешкод).

Якщо прилад використовується не за призначенням, то виникають помилки застосування.

У більшості випадків при вимірюванні механічних величин навантаження сприймається не самим перетворювачем, а пружним елементом, який під впливом вимірюваної величини деформується. Вхідною величиною в такому випадку може бути сила, крутний момент, тиск газу або рідини та ін. Вихідним сигналом може бути як інформація, що безпосередньо сприймається людиною, так і електричний параметр.

Розрізняють *статичну* й *динамічну* характеристики датчика [10].

Під *статичною характеристикою* датчика розуміють залежність між усталеними значеннями вхідної і вихідної величин.

Під *динамічною характеристикою* датчика розуміють поведінку вихідної величини під час перехідного процесу у відповідь на миттєву (ступеневу) зміну вимірюваної вхідної величини.

Якщо в статичній характеристиці датчика будується залежність тільки між значенням вихідної величини Y у відповідь на зміну вхідної величини X , то в динамічній характеристиці датчика бере участь параметр часу t і така характеристика являє собою залежність виду $Y = Y(t)$.

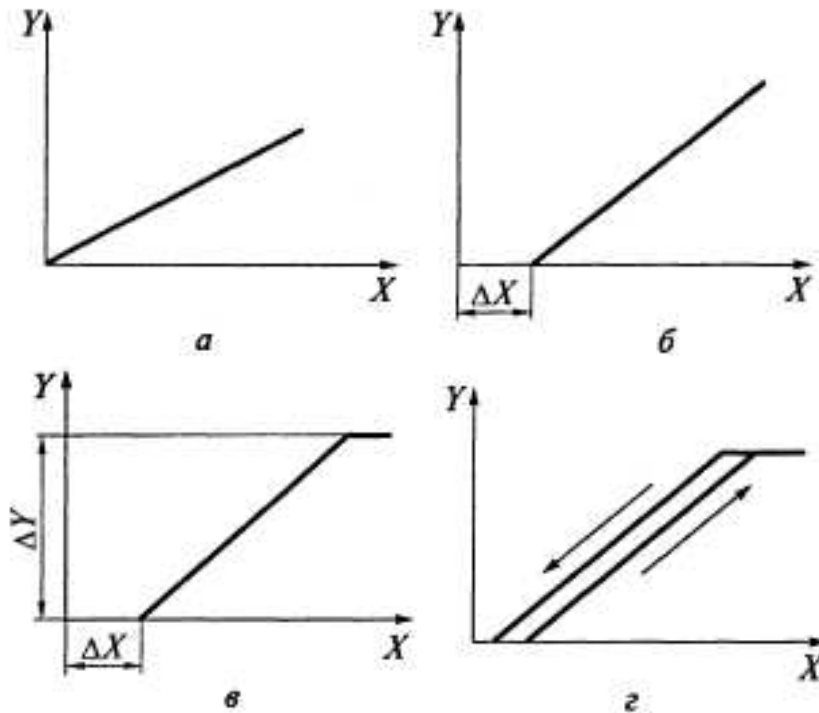
Очевидно, що сталі значення вихідної величини датчика є те значення, яке набуває його вихідна величина після закінчення всіх перехідних процесів, тобто при $t \rightarrow \infty$.

Залежність між усталеними значеннями вхідної і вихідної величин стосовно датчиків називається *тарувальною кривою* або *характеристикою вхід-вихід*.

Різні види статичних характеристик вимірювальних датчиків з пропорційним виходом наведено на рисунку 2.15 [11].

На рисунку 2.15, *а* наведено ідеалізовану статичну характеристику такого датчика. Нульовому значенню вхідної величини в цьому випадку відповідає нульове значення величини на виході.

На рисунку 2.15, *б* наведено ідеалізовану статичну характеристику датчика із зоною нечутливості. У такого датчика зміна вхідної величини до значення ΔX , так званого *порога чутливості*, не веде до появи будь-якого сигналу на виході. Лише після того, як виявиться, що $X > \Delta X$, вихідна величина буде зростати, починаючи від нуля, пропорційно зміні вхідної величини.



*а – ідеалізована статична характеристика;
 б – ідеалізована статична характеристика із зоною нечутливості;
 в – ідеалізована статична характеристика із зоною нечутливості і насиченням; г – ідеалізована статична характеристика із зоною нечутливості, насиченням і гістерезисом*

Рисунок 2.15 – Статичні характеристики датчиків з пропорційним виходом

На рисунку 2.15, в наведено ідеалізовану статичну характеристику датчика із зоною нечутливості й насиченням виходу. У такого датчика після досягнення порогу чутливості вихідна величина зростає пропорційно зростанню вхідної величини, але до деякого граничного значення ΔY , яке називається значенням насичення вихідної величини. Після того як виявиться, що $Y \geq \Delta Y$, подальше зростання вхідної величини X не викликає ніякого зростання Y .

На рисунку 2.15, г наведено ідеалізовану статичну характеристику датчика із зоною нечутливості на вході, насиченням на виході і петлею гістерезису. Гістерезисом називається відмінність між характером відповідності вихідної й вхідної величин при прямому й зворотному ході зміни вхідної величини. Практично це виражається в тому, що значення вихідної величини при зростанні вхідної величини не збігається з її ж значеннями при убуданні вхідної величини, а отже, за наявності гістерезису чутливість датчика при «прямому» і «зворотному» ходах неоднакова. Зауважимо, що значення вихідної величини при зростанні вхідної величини може як «випереджати», так і «відставати» в порівнянні з її ж значеннями при убуданні вхідної величини. У першому випадку говорять про позитивний гістерезис, а в другому – про негативний. Абсолютна величина різниці

в значеннях X при зростанні й убунанні вхідної величини, при яких на виході має місце одне й те саме значення, називається *шириною петлі гістерезису*. Якщо ширина петлі гістерезису настільки велика, що тарувальна крива датчика заходить до області негативних значень вхідної величини, то це означає, що $Y = 0$ при $X < 0$, а при $X = 0$ має місце $Y > 0$. У такому випадку говорять, що цей елемент має «пам'ять», через те що на його виході залишається нульове значення, і після того, як на його вході встановиться нульове значення. Але це буде мати місце лише в тому випадку, якщо перед цим величина на вході здійснила цикл зростання з подальшим спаданням хоча б до нуля. Якщо ж такого циклу на вході не відбувалося, то на виході датчика буде продовжувати зберігатися нульове значення. Іншими словами, спостерігаючи за станом виходу датчика в даний момент, можна зробити висновок про те, що відбувалося на його вході в попередні моменти. Це і є те, що прийнято називати «пам'яттю».

Однак у практиці майже не існує датчиків з ідеалізованою пропорційною (лінійною) залежністю між значеннями вихідної й вхідної величин. Це означає, що приріст вихідної величини у відповідь на одиночне прирощення вхідної величини не є постійним у всьому інтервалі зміни вимірюваної величини. Може скластися така ситуація, коли на початку зміни вхідної величини відбудеться в ній зміна, яка буде приводити до істотних змін вихідної величини, а в кінці зміни вхідної величини відбудеться в ній зміна, яка буде приводити до малих змін вихідної величини. Може мати місце й зворотна картина. У ряді випадків для зручності подальшого аналізу фактична нелінійна статична характеристика датчика в певних межах вимірювання і з певним впливом на показники цього датчика може бути наближено замінена якимось лінійним еквівалентом. У певних умовах така операція є допустимою й тоді вона має назву *лінеаризації*.

У ряді випадків нелінійний характер статичної характеристики датчика не є шкідливим, а може бути ефективно використаний для різних завдань автоматизації. Прикладом такого роду, широко використовуваним в різних пристроях автоматизації, є датчик зі статичною характеристикою *релейного* типу. При зростанні вхідної величини, до того як вона досягне порога спрацьовування, на виході датчика буде спостерігатися нульове значення вихідної величини, а як тільки вхідна величина досягне порога спрацьовування, вихідна величина відразу ж («клацанням») досягне своєї максимальної величини й при подальшому зростанні вхідної величини зростати більше не буде. Прикладом такого роду може служити двопозиційне регулювання температури у звичайному домашньому холодильнику. Як тільки температура всередині холодильника досягне заданої величини, датчик температури (термостат), який має релейну характеристику, увімкне електромотор. При зниженні температури електромотор вимикається, і температура всередині холодильника перестає знижуватися.

Раніше розглядалися статичні характеристики таких датчиків, у яких вхідна величина, зростаючи й зменшуючись, залишалася, тим не менш, більшою за нуль. Як правило, це фактично й має місце при змінах парамет-

рів технологічних процесів виробництва деталей машинобудування. Наприклад, це є характерним при вимірюванні переміщень робочих органів верстатів, тиску в гідросистемах або температури в гартівних печах. Однак у ряді випадків, наприклад при вимірюванні фактичних відхилень розміру деталі від номіналу, можливе відхилення вимірюваної величини як в позитивний, так і в негативний бік. Вихідна величина при цьому може надаватися пропорційною модулю зміни вхідної величини (або ж залежить від нього нелінійно) як без гістерезису, так і з гістерезисом.

Зазвичай для порівняння за рівних умов динамічних характеристик різних датчиків вважають, що на їхні входи надходять впливи одного й того самого виду, а саме ступінчасті. Це означає миттєвий «стрибок» вхідної величини. Практично це відповідає, наприклад, увімкненню напруги на електродвигун або приміщенню термопари до гартівної печі і т. п.

Двигун буде набирати оберти не миттєво, а відповідно до динамічних властивостей приводу, до якого він увімкнений. Показання термопари також почнуть відображати температуру в печі не миттєво, а тільки після розігріву спаю цієї термопари і т. д.

Для динамічних характеристик датчиків характерні три випадки [11; 12]:

1. *Чисте запізнювання* в датчику, коли його вихідна величина просто повторює (у певному масштабі) вхідну величину, запізнюючись стосовно неї на постійну величину.

2. *Аперіодичний характер* перехідного процесу, коли вихідна величина поступово наближається до нового сталого значення монотонно (монотонно спадаючи або ж монотонно зростаючи).

3. *Коливальний характер* перехідного процесу, коли вихідна величина поступово наближається до нового сталого значення, здійснюючи за час перехідного процесу одне або кілька коливань, перевищуючи на час нове значення вихідної величини, а потім повертаючись до нього.

Динамічні процеси в датчиках характеризуються *показниками якості перехідного процесу*.

До них належать:

- час завершення перехідного процесу;
- величина перевищення впродовж перехідного процесу вихідного параметра над його новим сталим значенням;
- кількість коливань вихідної величини за час завершення перехідного процесу.

Використовується також *інтегральний показник якості перехідного процесу*, який зазвичай являє собою підінтегральну площу кривої перехідного процесу.

Для датчиків виробничих параметрів важливими характеристиками є також діапазон вимірювань, що являє собою різницю між допустимими максимальним і мінімальним усталеними значеннями вимірюваної величини, а також смуга пропускання, що являє собою різницю між максимальною й мінімальною частотами зміни вхідної величини, для роботи з якими призначений цей датчик.

Що стосується похибок вимірювань виробничих параметрів, що неминуче виникають у будь-яких практичних системах автоматизації, то їх прийнято класифікувати так:

- систематичні;
- інтегральні;
- випадкові;
- похибки застосування.

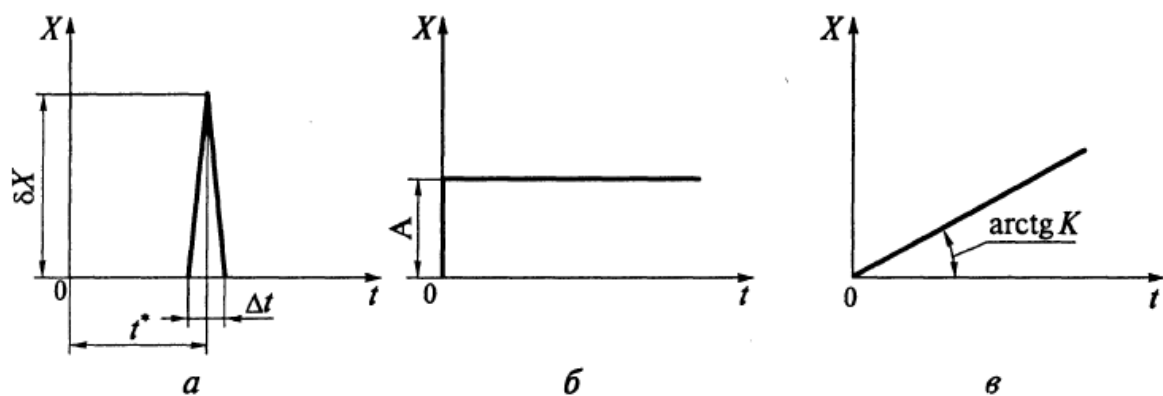
Для отримання статичних і динамічних характеристик датчиків параметрів на входи цих датчиків подають типові впливи й спостерігають, як випробовуваний датчик реагує на подаваний вплив.

До таких типових вхідних впливів належать:

- ударний, або миттєвий;
- поетапний;
- лінійний;
- гармонічний.

Ударний (вхідний) вплив у разі, коли вимірюваним параметром є та чи інша сила, може бути інтерпретовано як удар. Ударна дія, що називається також δ -функцією, являє собою «піковий» вплив, який при \lim має нескінченно велику (яка прагне до ∞) ординату при нескінченно малій (прагне до 0) ширині Δt (тривалості цього впливу). Графік такого типового вхідного впливу, що подається на датчик у момент часу t^* , наведено на рисунку 2.16, а.

Ступеневий вхідний вплив – це миттєва зміна вхідного параметра на кінцеву величину. Записується він зазвичай у вигляді $X = A$ [11]. Це трактується таким чином, що при $t < 0$ має місце $X = 0$, а при $t \geq 0$ має місце $X = A$. Ступеневий вплив, при якому величина стрибка на вході датчика дорівнює 100 % усієї вимірюваної величини, називається *одиначним впливом*. Графік для протидії таким спробам показаний на рисунку 2.16, б.



а – ударний; б – ступеневий; в – лінійний
 Рисунок 2.16 – Графіки вхідних впливів

Прикладом ступеневого впливу може служити замикання або розмикання ланцюга постійного струму, додавання або скидання навантаження за допомогою механізму зчеплення або керованої муфти тощо. Поетапний

вплив є настільки поширеним і важливим у виробничій практиці, що вихідна реакція на вплив такого роду виділяється серед інших динамічних характеристик і має назву *часової характеристики*.

Графік ступеневого вхідного впливу, наведений на рисунку 2.16, б, є ідеалізованим, оскільки він передбачає «миттєве» (тобто за проміжок часу, який дорівнює 0) наростання вхідної величини від 0 до A . Насправді таке «миттєве» наростання вхідної величини неможливе і станеться за проміжок часу $\Delta t \neq 0$. На цьому проміжку часу вхідну величину можна вважати наростальною за лінійним законом, що також є ідеалізацією, а в загальному випадку таке наростання вхідної величини датчика реально має відбуватися за тим або іншим нелінійним законом.

Лінійний вхідний вплив на датчик має на увазі зміну в часі вхідної величини за лінійним (пропорційним) законом. У цьому разі $X = Kt$, де K – константа. Такий вид типового впливу широко застосовується при випробуваннях слідкувальних систем, а саме таких систем, коли вихідний параметр системи повинен відтворювати в тому чи іншому масштабі деяку задану величину, характер змін якої заздалегідь не визначений. Прикладом такого роду є пневмогидравлічна система посилення потужності для рульового керування автомобілів. Графік лінійного вхідного впливу зображений на рисунку 2.16, в.

Гармонічний вхідний вплив – це такий вплив, при якому вхідна величина змінюється за гармонічним законом, тобто за законом синуса або косинуса. Такий вплив застосовується тоді, коли проводиться випробування виробу або його компонента за допомогою *частотних методів*. Прикладом такого роду є дослідження підвіски автомобіля на вібростенді. Сутність таких випробувань полягає в тому, що досліджувану підвіску «трясуть» зі змінними частотою й амплітудою і дивляться, що при цьому відбувається. Метою дослідження виробу або його компонентів частотними методами є отримання їхніх частотних характеристик.

Частотними характеристиками називаються залежності, що зв'язують у сталому режимі вхідні й вихідні величини лінійної системи, коли величини, що подаються на її вхід, змінюються в часі за гармонічним законом. Звернемо увагу на те, що сталий режим зовсім не означає нерухомість. Це означає лише те, що після закінчення часу перехідного періоду в системі встановиться рух з незмінними параметрами.

Зокрема, якщо на вхід такого компонента системи подається гармонічний вплив виду

$$X(t) = a \sin \omega t \quad (2.109)$$

з частотою ω та амплітудою a , то через деякий час, необхідний для завершення перехідного процесу, на виході цього компонента також встановляться синусоїдальні коливання з тією самою частотою, але відмінні за амплітудою й зсунуті відносно синусоїдального сигналу на вході цього компонента по фазі, що записується співвідношенням

$$Y(t) = A \sin (\omega t + \varphi). \quad (2.110)$$

На комплексній площині вхідна $X(t)$ і вихідна $Y(t)$ величини для кожного моменту часу t зображуються векторами a і A , проведеними з початку координат під кутами ωt і $(\omega t + \varphi)$. Дійсні частини гармонічних вхідних і вихідних величин, поданих у комплексній формі, дорівнюють відповідно $a \cos \omega t$ і $A \cos (\omega t + \varphi)$, а уявні частини – $a \sin \omega t$ і $A \sin (\omega t + \varphi)$.

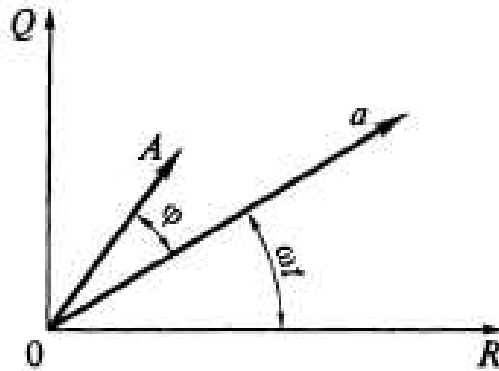


Рисунок 2.17 – Зображення гармонічного впливу на комплексній площині

Графічне зображення гармонічного впливу подане на рисунку 2.17. Вертикальна вісь координат відповідає уявним частинам вхідних і вихідних величин, а горизонтальна вісь – їх дійсним частинам.

Позначивши $Y(t) / X(t) = W(j\omega)$, отримаємо:

$$W(j\omega) = [Ae^{j(\omega t + \varphi)}] / (ae^{j\omega t}) = (A/a) e^{j\varphi}. \quad (2.111)$$

Відношення $W(j\omega)$ називається *комплексним передавальним коефіцієнтом*.

На комплексній площині цей коефіцієнт графічно зображується у вигляді точки. При зміні частоти впливу ω від 0 до ∞ змінюються і значення модуля вихідної величини (довжина відрізка від початку координат до даної точки) і зрушення її фази φ відносно вхідного впливу. Кінець відрізка, що знаходиться в цій точці, буде при цьому описувати деяку криву, характерну для цього датчика, яка називається *годографом*.

Цей годограф називається *амплітудно-фазовою характеристикою* (АФХ) цього датчика.

Залежність модуля комплексного передавального коефіцієнта W від частоти називається *амплітудно-частотною характеристикою* (АЧХ) цього датчика.

Залежність зсуву фази від частоти називають *фазово-частотною характеристикою* (ФЧХ) цього датчика.

Для побудови промислових датчиків виробничої інформації використовуються різні фізичні ефекти. Основні типи промислових датчиків класифікуються з точки зору використовуваних у них фізичних явищ.

2.4.2 Методи ідентифікації типових ланок моделей датчиків за часовими й частотними характеристиками

Будемо розглядати датчик з одним входом і одним виходом із властивостями стаціонарності, лінійності, зосередженості параметрів. На вхід подається ступеневий вплив, і на виході знімається вихідна характеристика (крива розгону). Необхідно вирішити зворотну задачу: за відомою кривою розгону визначити коефіцієнти рівняння передавальної функції датчика.

Для подання рівнянь у безрозмірній формі виконується математичне оброблення кривої розгону. Перераховується ордината кривої розгону (операція тарування) за формулою

$$y(t_i) = [\bar{y}(t_i) - \bar{y}(0)] / [\bar{y}(\infty) - \bar{y}(0)], \quad (2.112)$$

де $\bar{y}(t)$ – екстремальні значення вихідної величини.

При описі динамічних властивостей статичних датчиків обмежуються одним із таких диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) &= R_0 x(t); & T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) &= R_0 x(t - \tau); \\ T_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) &= R_0 x(t - \tau); \\ T_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) &= R_0 \left[T \frac{dx(t)}{dt} + x(t - \tau) \right]; \\ T_3 \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + T_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) &= R_0 \left[T \frac{dx(t - \tau)}{dt} + x(t - \tau) \right], \end{aligned} \quad (2.113)$$

де T_1, T_2, T_3 – коефіцієнти лівої частини диференціального рівняння;
 T – коефіцієнт при першій похідній у правій частині диференціального рівняння;

R_0 – коефіцієнт посилення об'єкта.

У рівнянні 3-го порядку можуть бути $T_3, T_2, \tau = 0$, тоді отримуємо окремі випадки рівнянь 1-го і 2-го порядків, і без запізнювання.

Для опису динамічних властивостей астатичних датчиків (об'єктів) використовуються диференціальні рівняння, що не містять член $y(t)$ і статичного коефіцієнта посилення k_0 , тобто мають вигляд

$$T_1 \frac{dy(t)}{dt} = x(t - \tau). \quad (2.114)$$

Величина запізнювання τ може бути визначена графічно таким чином, зображенням на рисунку 2.18.

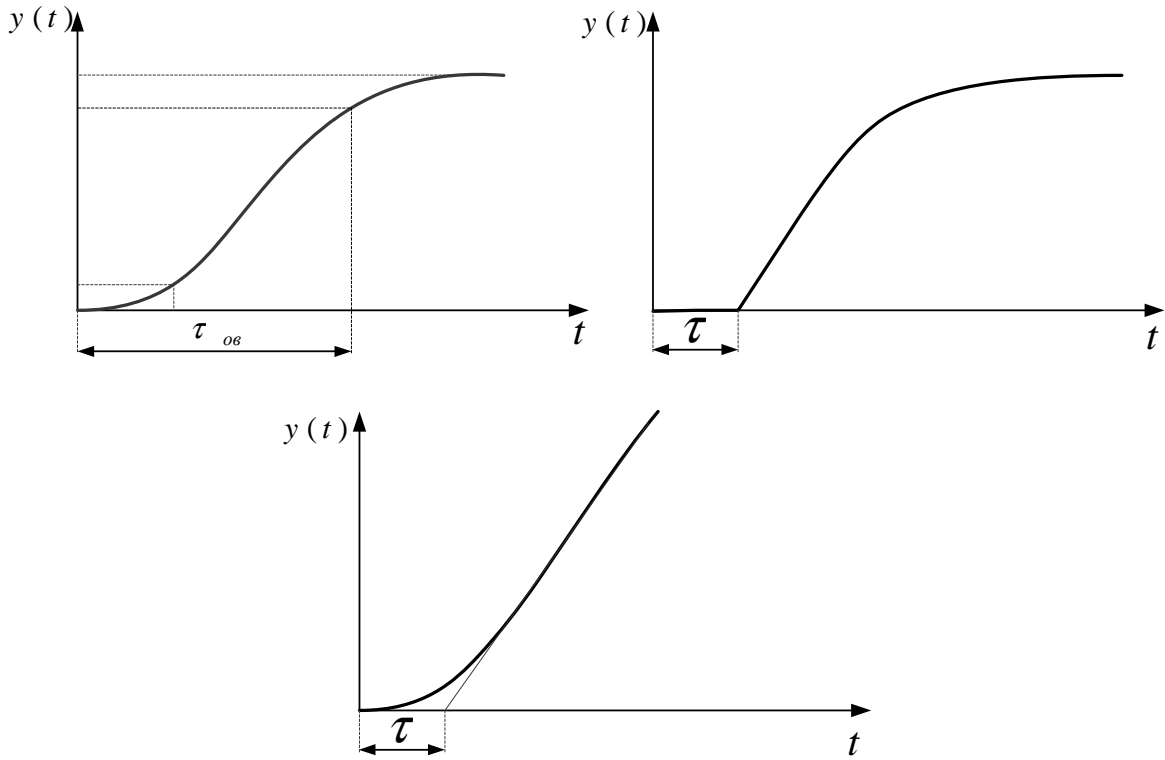


Рисунок 2.18 – Графічний метод визначення величини запізнювання τ

Ідентифікація параметрів датчиків, описуваних аперіодичною ланкою 1-го порядку за часовими характеристиками

У багатьох випадках, коли потрібно знайти аналітичні вирази для передавальних функцій ідентифікованих об'єктів за записами перехідних процесів, можна використовувати досить прості графічні методи.

Для об'єкта аперіодичної ланки 1-го порядку математична модель описується диференціальним рівнянням

$$T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k_0 x(t), \quad (2.115)$$

де k_0 – коефіцієнт посилення, який визначається таким чином:

$$k_0 = \frac{\Delta h(t)}{\Delta x(t)} = \frac{h(\infty) - h(0)}{\Delta x(t)};$$

$$k_0 = [\bar{y}(\infty) - \bar{y}(0)] / [\bar{x}(\infty) - \bar{x}(0)]. \quad (2.116)$$

Передавальна функція аперіодичної ланки 1-го порядку має вигляд

$$W(p) = \frac{k_0}{Tp + 1}, \quad (2.117)$$

де T – постійна часу, с.

Перехідна функція цієї ланки описується виразом

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} = k(1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (2.118)$$

Імпульсна перехідна функція аперіодичної ланки 1-го порядку

$$\omega(t) = \frac{dh(t)}{dt}. \quad (2.119)$$

Методику ідентифікації параметрів аперіодичної ланки 1-го порядку наведено на рисунку 2.19. На цьому рисунку зображено перехідний процес (рис. 2.19, а) і імпульсна перехідна функція реакції (рис. 2.19, б) аперіодичної ланки 1-го порядку на одиночний вплив.

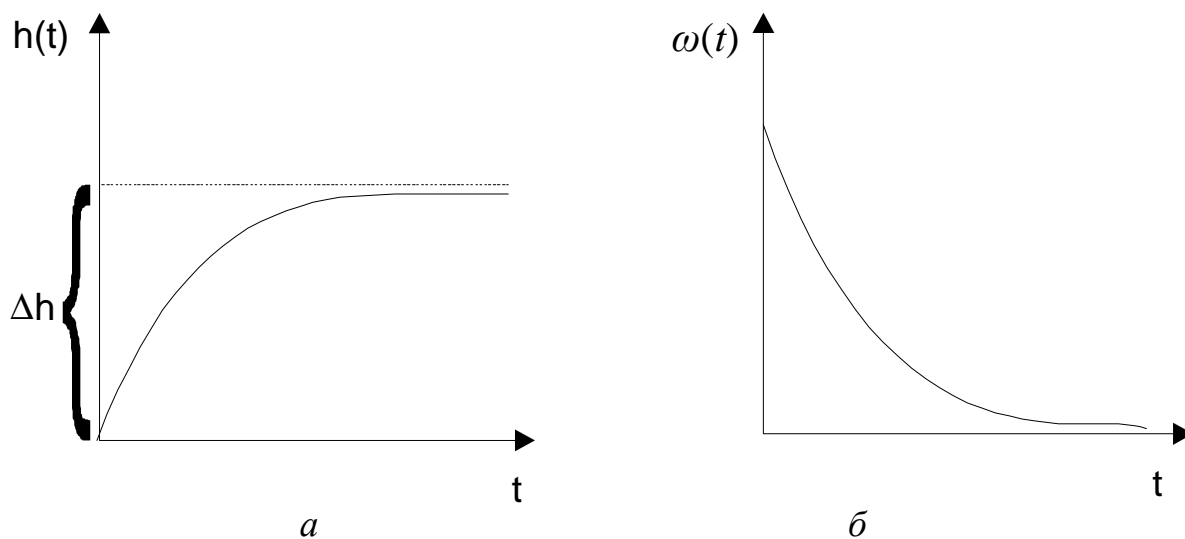


Рисунок 2.19 – Методика ідентифікації параметрів аперіодичної ланки 1-го порядку

Для об'єкта, математична модель якого є ланкою першого порядку (2.117), перехідна функція описується виразом (2.118), звідки виходить, що при $t = T$

$$h(t) = k(1 - 0,37) = 0,63k. \quad (2.120)$$

З формули (2.120) випливає, що постійна часу досліджуваного об'єкта T у цьому випадку дорівнює проміжку часу, за який перехідна функція досягає 63 % від своєї усталеної величини, тобто $h(t) = 0,63 h_{\infty}$.

Постійну часу T можна визначити й іншим способом, використовуючи дотичну до перехідної функції на початковій ділянці (при $t = 0$). Дійсно, нахил $h(t)$ при $t = 0$ дорівнює

$$\frac{dh(t)}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{k}{T} e^{-t/T} \Big|_{t=0} = \frac{k}{T}. \quad (2.121)$$

Рівняння дотичної можна записати в такий спосіб:

$$\Psi(t) = \frac{\Delta k}{T} t. \quad (2.122)$$

Звідки випливає, що при $t = T$ дотична $\Psi(t)$ досягає величини k , тобто перетин дотичної з рівнем встановленої величини сигналу (рис. 2.20) відбувається при $t = T$.

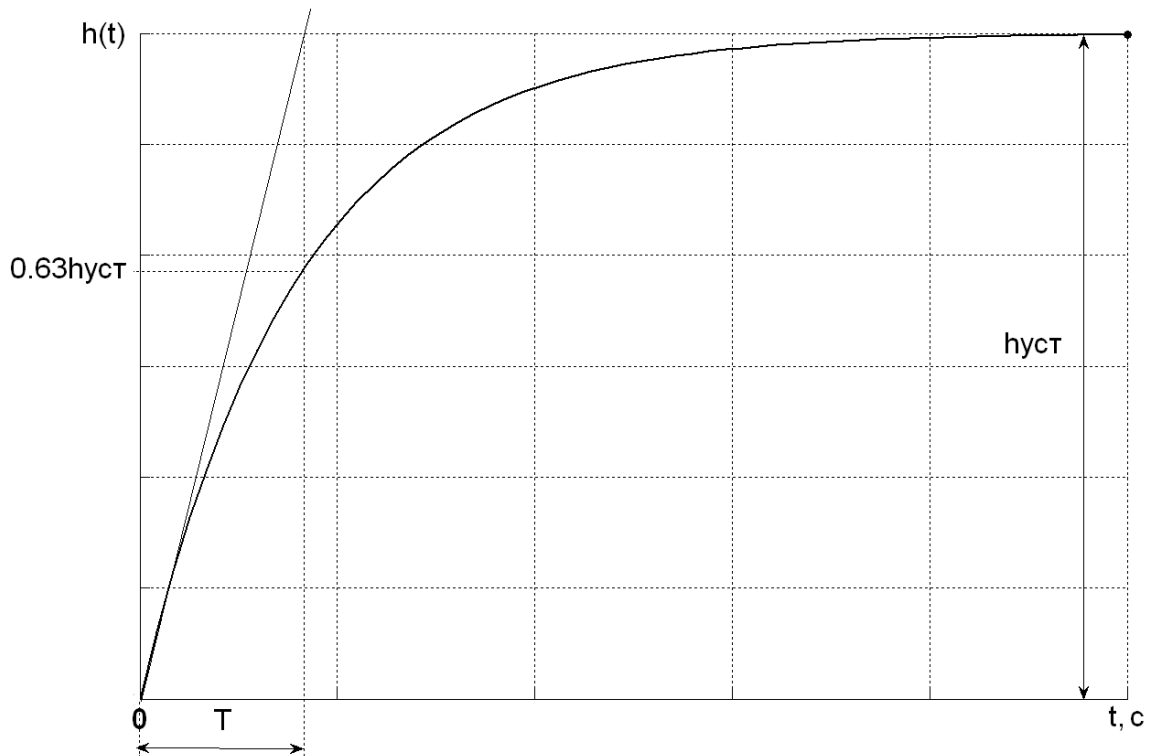


Рисунок 2.20 – Визначення постійної часу за перехідною характеристикою

Коефіцієнт передачі визначається співвідношенням між сталим значенням вхідного сигналу й амплітудою керівного вхідного сигналу (див. рис. 2.21):

$$k = \frac{\Delta h(t)}{\Delta x(t)} = \frac{h(\infty) - h(0)}{\Delta x(t)}. \quad (2.123)$$

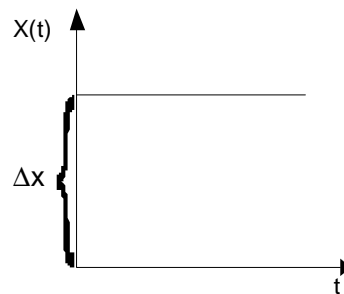


Рисунок 2.21 – Амплітуда керівного впливу у формі одиночного стрибка $1(t)\Delta x$

Приклад. Ідентифікувати за графіком перехідної характеристики, наведеної на рисунку 2.22, передавальну функцію, коефіцієнт посилення й постійні часу. У якості керівного впливу прийнятий «одиначний стрибок» $1(t)$ з коефіцієнтом посилення $k = 5$.

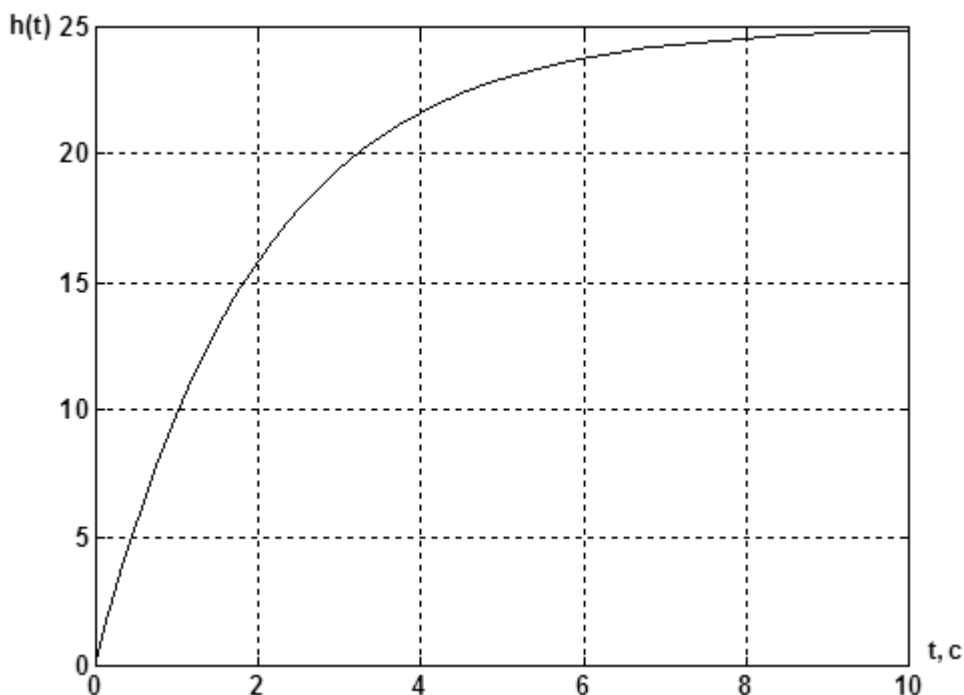


Рисунок 2.22 – Графік перехідної характеристики ідентифікованого об'єкта

Розв'язання. Перехідний процес має експонентну форму і, як наслідок, може бути описаний функцією передачі аперіодичної ланки 1-го порядку. У якості керівного впливу прийнятий «одиначний стрибок» $x_{упр} = I(t)$ з коефіцієнтом посилення $k = 5$.

Ідентифікуємо постійну часу.

Спосіб 1. Постійну часу T можна визначити, використовуючи дотичну до перехідної функції на початковій ділянці (при $t = 0$). На рисунку 2.23 видно, що постійна часу становить $T = 2$ с.

Спосіб 2. Проаналізуємо графік перехідного процесу:

- час перехідного процесу $t_{mn} = 10$ с;
- усталене значення $h(10) = h_{уст} = 25$ с.

Використовуючи вирази (2.91), визначимо проміжок часу, протягом якого перехідна функція досягає 63 % від своєї усталеної величини:

$$h(t) = 0,63 k = 0,63 \times 25 = 15,75.$$

З графіка перехідного процесу (див. рис. 2.23) при $h(t) = 15,75$ визначити постійну часу, яка становить 2 с.

Розрахуємо коефіцієнт передачі як співвідношення між сталим значенням вхідного сигналу й амплітудою керівного вхідного сигналу за виразом (2.123):

$$K = \frac{h_{уст}}{x_{кер}} = \frac{25}{5} = 5.$$

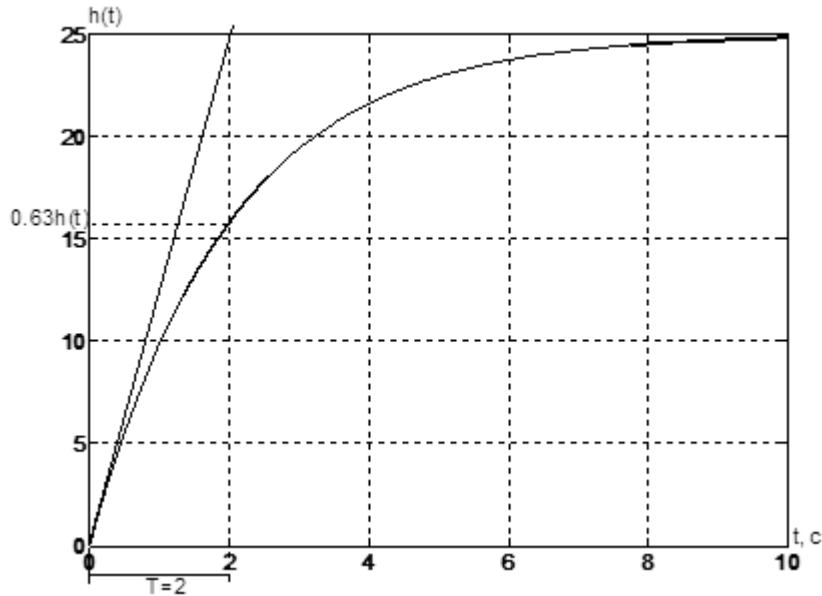


Рисунок 2.23 – Визначення постійної часу за перехідною характеристикою

Відповідь: шукана передавальна функція має вигляд

$$W(p) = \frac{5}{2p + 1}.$$

Якщо перехідна функція запізнюється, тобто дорівнює 0 протягом проміжку часу τ після додавання ступеневого впливу, як показано на рисунку 2.24, то система має суто часове запізнювання, для якого перетворення Лапласа $e^{-p\tau}$.

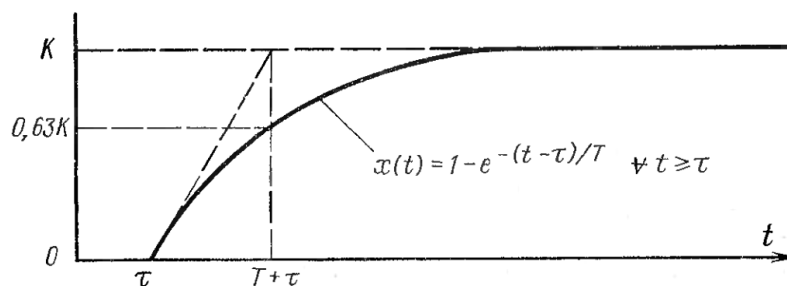


Рисунок 2.24 – Перехідна характеристика системи з суто часовим запізненням

Отже, якщо перехідна функція системи має вигляд

$$x(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \leq \tau; \\ K(1 - e^{-(t-\tau)/T}), & \text{при } t > \tau, \end{cases} \quad (2.124)$$

то передавальна функція системи має вигляд

$$W(p) = \frac{k_0 e^{-\tau p}}{Tp + 1}. \quad (2.125)$$

За аналогією до розглянутого методу ідентифікації з використанням перехідної функції передавальну функцію $W(p)$ можна визначити за допомогою перетворення Фур'є імпульсну перехідну функцію $\omega(t)$:

$$\omega(t) = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (2.126)$$

Графік імпульсної перехідної функції наведено на рисунку 2.25.

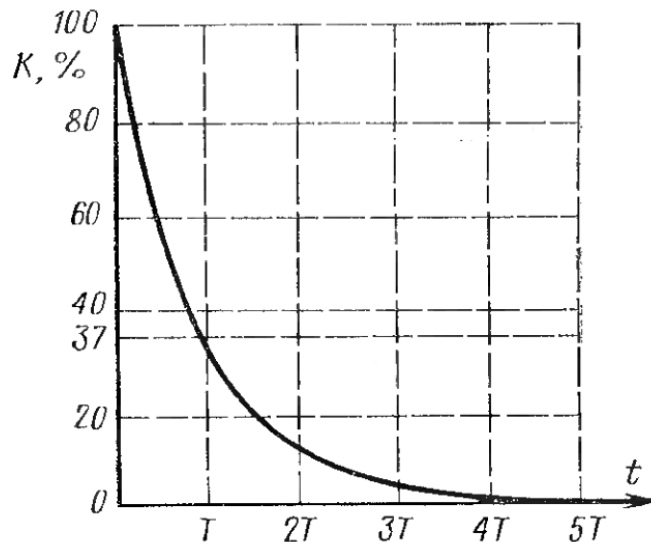


Рисунок 2.25 – Імпульсна перехідна функція ідентифікованого об'єкта

Таким чином, T і K визначаються за графіком: у початковій точці $0,37 \frac{K}{T} = \left(\frac{K}{T}\right) e^{-\frac{0}{T}} = \left(\frac{K}{T}\right) e^{-1}$ дорівнює T , тобто $\omega(T) \approx 0,37 K$. Постійну часу T можна отримати також, проводячи дотичну з початку графіка $\omega(t)$ до її перетину з віссю часу, згідно з рівнянням (2.126):

$$\begin{aligned} \frac{d\omega(0)}{dt} &= -\left(\frac{K}{T^2}\right); \\ \frac{K}{T} - \frac{K}{T^2}t &= 0 \text{ при } t = T. \end{aligned} \quad (2.127)$$

На практиці вхідний сигнал у системі є деяким наближенням до імпульсу, і $\omega(t)$ ніколи не починається з величини $\frac{K}{T}$. У цьому разі T і K можна визначити, як показано на рисунку 2.26, де максимальний нахил кривої в межах $t = 0$ екстраполюється в напрямку до $t = 0$ так, щоб була досягнута величина $\frac{K}{T}$ [12].

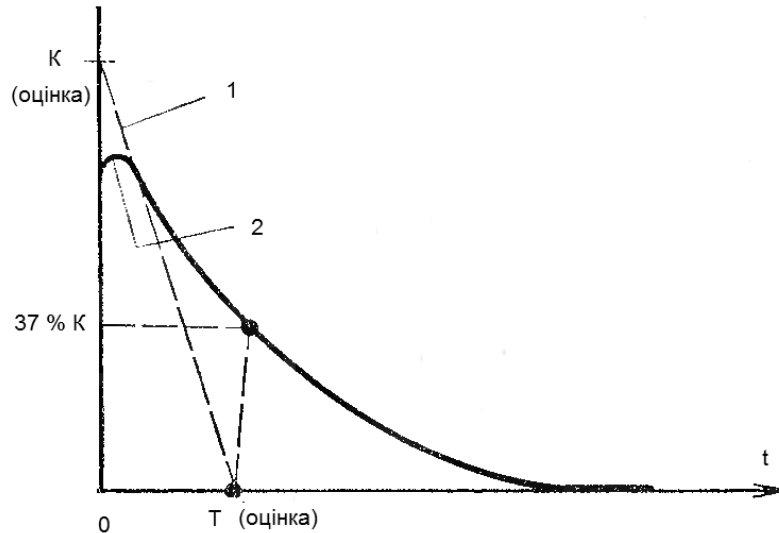


Рисунок 2.26 – Практичний спосіб ідентифікації системи 1-го порядку за імпульсною перехідною функцією

Ідентифікація моделей у вигляді аперіодичних ланок 2-го порядку

Передавальна функція аперіодичної ланки 2-го порядку описується передавальною функцією

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}, \quad (2.128)$$

де T – постійна часу;

ξ – коефіцієнт демпфування.

За умови, що корені характеристичного рівняння чисельника визначаються як:

$$\begin{aligned} a_0 p^2 + a_1 p + 1 &= 0; \\ \lambda_1 \lambda_2 &= \alpha \pm j\beta; \\ \beta &= 0; \\ \lambda_1 \lambda_2 &= -\alpha_1, -\alpha_2, \end{aligned}$$

передавальна функція набуде вигляду

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}. \quad (2.129)$$

Перехідна функція аперіодичної ланки 2-го порядку описується виразом

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} = k \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (2.130)$$

Перехідну характеристику аперіодичної ланки 2-го порядку наведено на рисунку 2.27.

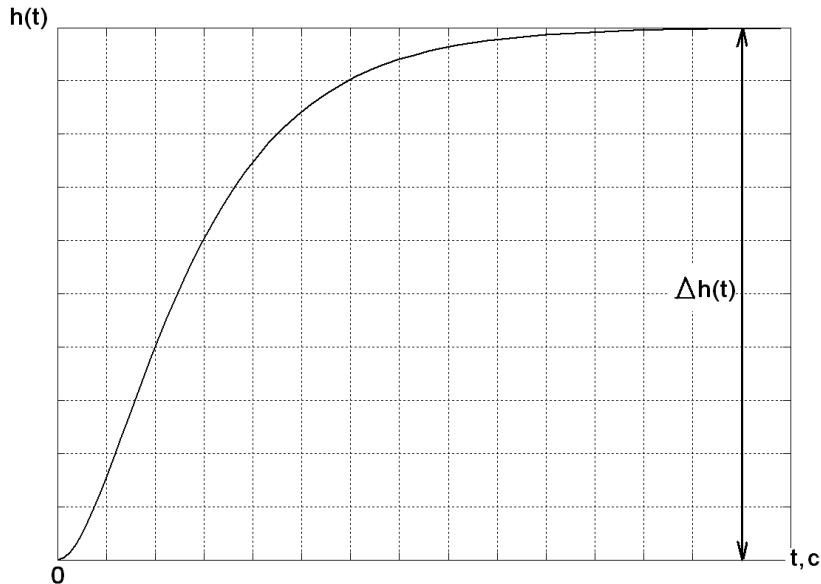


Рисунок 2.27 – *Перехідна характеристика аперіодичної ланки 2-го порядку*

Методику ідентифікації параметрів аперіодичної ланки 2-го порядку за графіком перехідного процесу розглянемо на прикладі.

Приклад. Ідентифікувати за графіком перехідної характеристики, яка наведена на рисунку 2.28, передавальну функцію, коефіцієнт посилення й постійні часу. Керівним впливом є «одиначний стрибок»: $1(t) \cdot k$ з коефіцієнтом посилення $k = 1$.

Розв'язання. Вважаємо, що процес є аперіодичним 1-го порядку. Для цього початкову ділянку апроксимуємо прямою, як вказано на рисунку 2.29.

Отримуємо криву, наближену до залежності 1-го порядку. Вважаємо точку A початком координат. Взявши 0,63 щодо t , A , визначаємо H_1 :

$$H_1 = 0,63h(t) - A = 0,63 \cdot 10 - 0,8 = 5,5.$$

З графіка перехідного процесу при $H_1 = 5,5$ постійна часу становить $T_1 = 2,7$ с.

Для визначення T_2 будемо дзеркальну криву й визначаємо H_2 на початковій ділянці кривої за вже відомою методикою:

$$H_2 = 0,63h(t) = 0,63 \cdot 10 = 6,3.$$

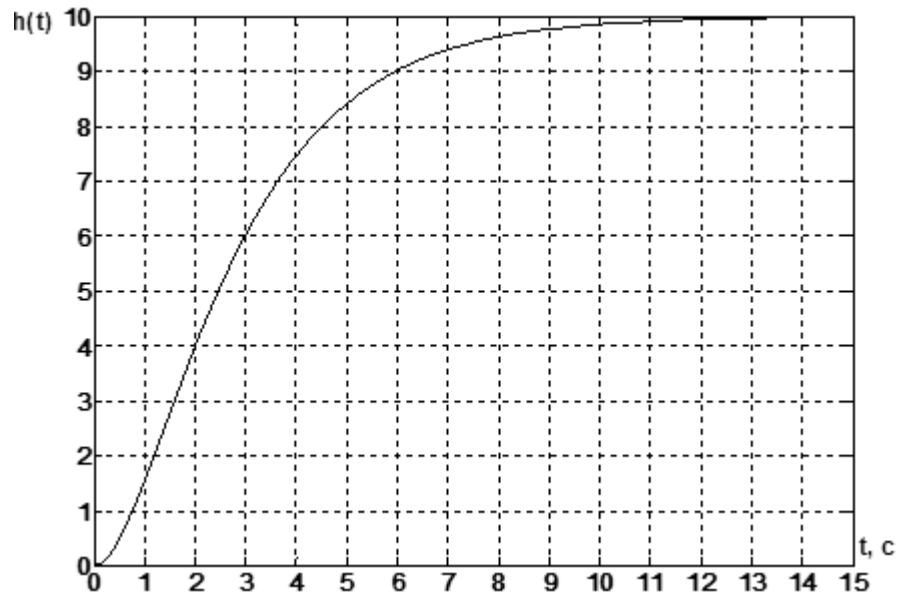


Рисунок 2.28 – Графік перехідної характеристики

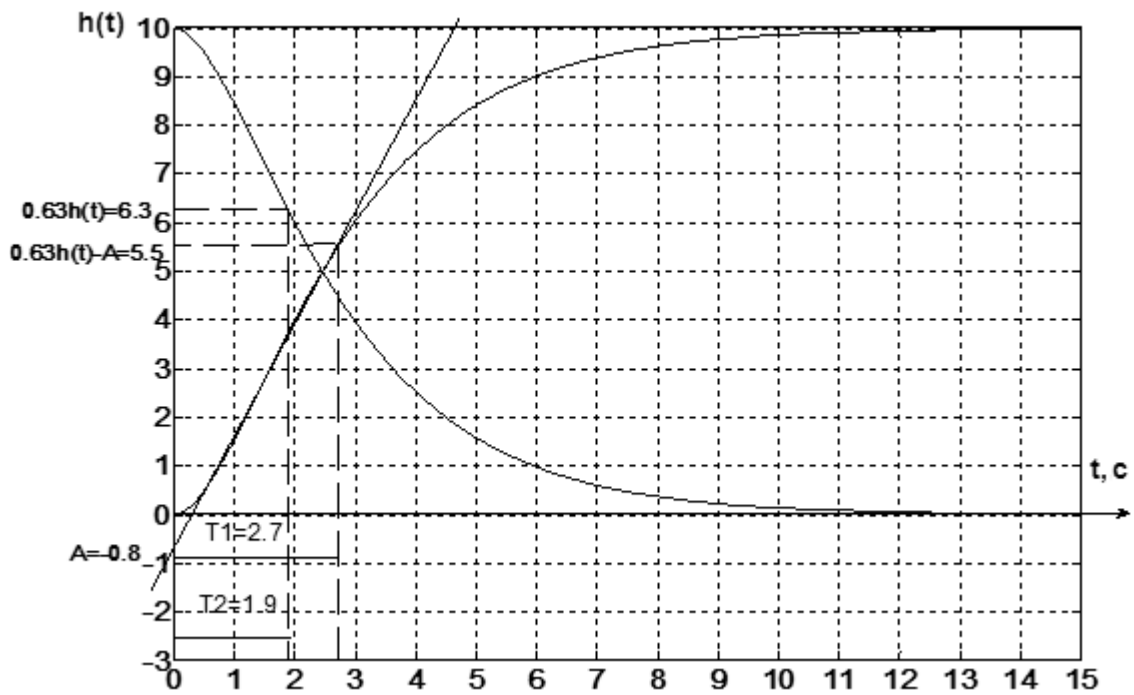


Рисунок 2.29 – Ідентифікація постійних часу за перехідною характеристикою

З дзеркальної характеристики перехідного процесу при $H_2 = 6,3$ постійна часу T_2 становить 1,9 с.

Визначимо коефіцієнт передачі:

$$K = \frac{h_{уст}}{x_{кер}} = \frac{10}{1} = 10.$$

Відповідь: передавальна функція запишеться так:

$$W(p) = \frac{10}{(2,7p+1)(1,9p+1)} = \frac{10}{5,13p^2 + 4,6p + 1}$$

2.4.3 Контроль і вимірювання температури

Вибір датчика температури в основному визначається діапазоном зміни вимірюваної температури й умовами експлуатації. Для вимірювання температури використовуються термопари, терморезистори, напівпровідникові датчики (термістори) і пірометри. Робочі діапазони температур цих датчиків наведено в таблиці 2.11 [12; 13].

Таблиця 2.11 – Робочі діапазони датчиків температури

Тип датчика	Діапазон температур, °С
Скляні стрижневі	-20...+600
Біметалеві	0...+500
З наповнювачем	-50...+300
Напівпровідникові	-100...+100
Резисторні	-100...+300
Пірометричні	+100...+5 000
Термопари	-250...+2 000

У якості датчиків температури часто застосовуються термопари, оскільки вони мають широкий діапазон температур і високу надійність. При вимірюванні температури з використанням термопари послідовно з вимірювальним спаєм включають компенсційні спаї, що дозволяють отримати струм певного напрямку й максимальну ЕРС вимірювального спаю. Залежно від робочого діапазону температур і середовища, у якому знаходиться датчик, застосовують різні пари металів. Для роботи в широкому діапазоні температур передавальні характеристики датчиків, як правило, недостатньо лінійні, так що для їх лінеаризації потрібно застосовувати спеціальні схеми.

Технічні характеристики різних типів термоелектричних перетворювачів (термопар) відповідно до ГОСТ 3044 наведено в таблиці 2.12 [14].

Найкраще в порівнянні з термопарами роздільність і повторюваність характеристик досягаються на термометрах опору – приладах, що використовують ефект зміни електричного опору провідників при вимірюванні температури. У промисловості часто застосовуються платиново-родієві термопари, що мають високу точність і механічну й електричну стабільність.

Термістори – інший тип термометрів опору – отримують спіканням сумішей металевих сплавів, при цьому утворюється кераміка з великим негативним температурним коефіцієнтом.

Таблиця 2.12 – Технічні характеристики різних типів термоелектричних перетворювачів (термопар) відповідно до ГОСТ 3044

Термопара		Матеріал термоелектрода		Діапазон температур, °С	
Тип	НСХ	позитивного	негативного	вимірюваних	робочих
ТХК Тип L	ХК (L)	Сплав хромель НХ9,5 (90,5 % Ni + + 9,5 % Cr)	Сплав копель МНМц 43-0,5 (56 % Cu + + 44 % Ni)	-200...800	-200...600
ТХА Тип К	ХА (K)	Сплав хромель НХ9,5 (90,5 % Ni + + 9,5 % Cr)	Сплав алюмель НМц АК 2-2-1 (94,5 % Ni + + 5,5 % Al, Si, Mn, Co)	-200...1 300	-200...1 000
ТПП Тип S	ПП (S)	Сплав платино- родій ПР-10 (90 % Pt + + 10 % Rh)	Платина (Pt)	0...1 600	0...1 300
ТЖК Тип J	ЖК (J)	Залізо (Fe)	Сплав конста- нтан (55 % Cu +45 % Ni, Mn, Fe)	-200...900	-200...700
ТПР Тип В	ПР (B)	Сплав платино- родій ПР-30 (70 % Pt + + 30 % Rh)	Сплав платино- родій ПР-6 (94 % Pt + + 4 % Rh)	300...1 800	300...1 600

Термістори в порівнянні з терморезисторами мають у десять разів більшу чутливість. Однак слід зазначити їхню більш високу нелінійність у порівнянні з терморезисторами.

У тих випадках, коли можливе тільки візуальне спостереження досліджуваного температурного процесу, для вимірювання вдаються до пірометра. Діапазон вимірюваних температур у цьому разі обмежується спектральною чутливістю використовуваного датчика.

Виходячи із зазначеного вище, слід проводити глибокий аналіз технологічного процесу з метою аналізу можливого способу контролю теплового процесу в об'єкті керування.

2.4.4 Датчики вимірювання тиску

Розглянемо особливості вимірювання тиску. Вимірювання тиску є однією з основних діагностичних функцій у будь-якій галузі промисловості. Пристрої для вимірювання тиску встановлюються усюди, і існує незліченне розмаїття їх варіантів.

Тиск має певні параметри, які впливають на способи його вимірювання:

- зазвичай вимірюється в одиницях сили на одиницю площі;
- існує як в статичних, так і рухомих рідинах;
- тиск рідини завжди вимірюється у відношенні до будь-якого іншого тиску.

Існують три типи вимірюваного тиску:

- 1) абсолютний – атмосферний тиск плюс надлишковий тиск;
- 2) надмірний (відносний) – абсолютний тиск мінус атмосферний тиск;
- 3) диференціальний – різниця тисків між двома точками.

Отже, типи вимірювань тиску можна поділити на три категорії:

- абсолютний тиск вимірюється у відношенні до абсолютного вакууму, не беручи до уваги вплив атмосферного тиску. Таке вимірювання в основному використовується при проведенні досліджень або проектування, але існують деякі умови, коли знання абсолютного значення тиску необхідне для підтримання технологічного процесу. Оскільки непрактично створювати повний вакуум усередині корпусу сенсора, датчики зазвичай перетворюють значення виміряного тиску, використовуючи фіксований поправковий коефіцієнт. У більш складних пристроях використовується вимірний барометричний тиск;

- диференціальний тиск – це тиск в одній частині судини у відношенні до іншої. Цей показник є різницею між двома значеннями й не враховує абсолютні тиски;

- тиск, що вимірюється датчиком, є аналогом диференціального тиску й вимірюється у відношенні до атмосферного тиску, що є найбільш поширеним методом.

Приклад. Резервуар стисненого повітря оснащений датчиками абсолютного й відносного (надмірного) тиску (рис. 2.30). При стисканні повітря до 100 psig абсолютний тиск виявляється таким, що дорівнює 114,7 psia. Якщо такий резервуар помістити у вакуум, то обидва датчики покажуть ідентичні значення, оскільки відлік показань виконується щодо абсолютного вакууму.



Рисунок 2.30 – Різниця при вимірюванні абсолютного й відносного тиску

Існують дві відомі одиниці вимірювання тиску: psi і бар. У США використовується psi. Бар є загальноприйнятою. Бар часто замінюється на паскаль і кілопаскаль, оскільки такі одиниці більш зручні. Існує багато інших одиниць вимірювання, але вони використовуються у вузькоспеціалізованих сферах. Обидві одиниці (psi і бар) мають суфікс «а» і «g», позначаючи абсолютний або відносний тиск. Якщо суфікса немає, то передбачається відносний тиск.

Вимірювання диференціального тиску не визначає його абсолютного або відносного значення. Цей показник описує різницю або перепад тисків. Якщо диференціальний тиск між двома резервуарами становить 5 бар, то в резервуарах тиск може становити 1 і 6 бар або 3 і 8 бар. Не існує способу визначення тиску щодо атмосферного без додаткового датчика. У вимірах диференціального тиску часто використовується суфікс «d».

Датчик диференціального тиску має два входи для порівняння показань тиску у двох резервуарах, але він не може показувати тиск у відношенні до атмосферного з кожного з боків одночасно (рис. 2.31).

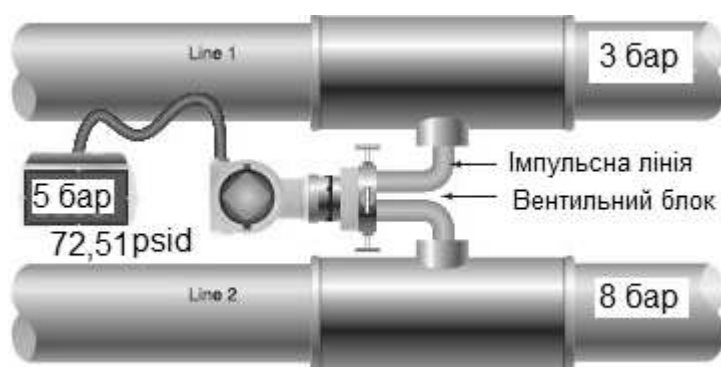


Рисунок 2.31 – Схема підключення диференціального датчика тиску

Точність настроювання діапазону й безпека. На електронних приладах для вимірювання тиску і механічних манометрах точність вимірювань вказується ідентичним способом: у вигляді похибки, яка дорівнює процентному співвідношенню від діапазону вимірювань.

Наприклад, манометр гарної якості з діапазоном 0...500 psi може мати похибку $\pm 0,5\%$ шкали. Це означає, що він має смугу похибки 5 psi ($\pm 2,5$ psi) у будь-якій точці на шкалі.

Електронні перетворювачі й датчики мають аналогічне визначення похибки. Оскільки діапазон вимірювань пов'язаний з похибкою, дуже важливо вибрати пристрій із діапазоном, максимально близьким до фактичного робочого значення з урахуванням стрибків тиску. Іншими словами, якщо у вашому процесі робочий тиск становить 75 psi, то краще використовувати манометр 0...100 psi, а не 0...500 psi, навіть якщо вони мають ідентичні номінальні значення похибки. Неправильний вибір діапазону вимірювань є найбільш поширеною помилкою при підборі датчика.

Деякі датчики мають власне електронне регулювання діапазону вимірювань.

Наприклад, пристрій, призначений для вимірювання тиску від 0 до 500 psi, можна відрегулювати електронним способом на показання 0...300. Це допоможе розширити відповідну область показань датчика від 4 до 20 мА, але фактично не підвищить точність. Співвідношення переналагодження діапазону в більшості випадків буде таким самим, що й при повній шкалі від 0 до 500.

Вибір приладу для вимірювання тиску. Після того, як були визначені вимоги до вимірювання тиску в конкретному випадку, можна вибрати відповідний пристрій вимірювання на підставі інших експлуатаційних параметрів, крім діапазону й похибки.

Матеріал. У приладі слід звернути увагу на матеріали компонентів, що контактують із середовищем. Існує широкий діапазон матеріалів, які дозволено використовувати в агресивних рідинах або газах. Є також широкий вибір корпусів датчика, оскільки корозійна атмосфера на об'єкті може впливати й на зовнішню частину приладу. Екзотичні матеріали мають досить високу вартість, тому при виборі слід це враховувати.

Внутрішня конфігурація. Більшість сенсорів мають внутрішні порожнини, які заповнюються технологічною рідиною при роботі. Якщо рідина неагресивна і невеликі протікання не пошкодять пристрій, то її наявність допускається. Проте у деяких критичних системах це заборонено. Сенсори оснащуються промивальними мембранами й мають ущільнення на внутрішньому боці, щоб запобігти просочуванню рідини й забезпечити мінімальне порушення потоку процесу. Ізолювальна мембрана також наявна в якості допоміжного приладдя.

Корпус. Вимоги до безпеки установки очищення стічних вод істотно відрізняються від вимог на нафтопереробних комплексах. Багато додаткових параметрів датчиків повинні задовольняти вимогам експлуатації, наприклад, у вибухонебезпечних або іскробезпечних зовнішніх умовах. Більш того, більшість компаній встановили чіткі межі щодо способів й місць використання приладів. З іншого боку, якщо не стоїть питання про роботу у вибухонебезпечному середовищі, то підвищується кількість можливих варіантів датчиків. Також розміри датчика безпосередньо залежать від кількості допоміжного електронного обладнання, необхідного для зв'язку з іншими пристроями. Простий перетворювач з вихідним сигналом 4...20 мА може бути дуже компактним, тоді як інтелектуальний датчик з підключенням по шині fieldbus вимагає більше місця, оскільки він вмикає додаткову електричну схему.

Монтажне підключення. Вимірювальні прилади зазвичай мають нарізний вхід для труби від 1/8 до 1/2 дюйма NPT або BSPT. Проте існують додаткові варіанти підключення для більш спеціалізованих пристроїв, включаючи гігієнічні з'єднання з трьома зажимами «Tri-clamp» та інші фланцеві з'єднання. Пристрої для вимірювання диференціального тиску часто використовують вентильні блоки для спрощення підключення.

Зв'язок. Більшість перетворювачів передають дані у форматі аналогових сигналів 4...20 мА. Якщо для будь-якого пристрою використовується саме цей метод, то для забезпечення надійного передавання може знадобитися додаткова система узгодження сигналів. Датчики можуть підключатися до шини fieldbus, працювати за безпроводним зв'язком або HART-протоколом.

Технологія роботи датчиків. Існує близько 10 технологій і способів для перетворення величини тиску на масштабний електронний сигнал, але жоден з них не є універсальним. Виробники датчиків намагаються використовувати одну або дві технології, враховуючи поєднання експлуатаційних параметрів і промислової придатності, що дозволяє оптимізувати експлуатаційні характеристики й мінімізувати недоліки пристроїв. У технічній документації на продукцію часто навіть не згадуються використовувані технології виготовлення датчика.

Встановлення, розширення, техобслуговування. Правильність встановлення може мати таку саму важливість, що й вибір коректного пристрою. Датчики для вимірювання тиску зазвичай монтуються з клапаном-відсікачем, особливо в безперервних процесах. Таким чином, датчики можна калібрувати, ремонтувати або замінювати, не перериваючи процес. У ситуаціях, коли робочий режим є періодичним, це не настільки критично, і пристрій можна встановлювати безпосередньо в потік. Ділянка труби або трубопроводу, що веде до сенсора, називається імпульсною лінією й допомагає в тих випадках, коли немає достатнього простору для доступу до корпусу датчика. Проте імпульсні лінії (рис. 2.32) слід використовувати обережно.



Рисунок 2.32 – Схема монтажу датчика з пробовідбірним краном, відсічним вентилем, установленим на короткій імпульсній лінії

Допоміжне приладдя може спростити монтаж або захистити пристрій. Існує кілька прикладів:

- імпульсна лінія повинна мати мінімальні розміри;

- якщо в якості технологічного середовища використовується рідина, слід стравити повітря;
- якщо потрібно, щоб виведення даних здійснювалося в більш зручному місці, слід подовжити кабель, а не імпульсну лінію;
- у теплих середовищах, особливо за наявності пари, слід переконаватися, що імпульсна лінія може виступати в якості сифона.

Запірний і стравлювальний вентилялі монтуються на імпульсній лінії й дозволяють стравити тиск із сенсора, як тільки вимикається з'єднання з процесом вимірювання.

Демпфувальні пристрої призначені для гальмування потоку середовища від процесу до датчика, зазвичай використовуються для гасіння пульсацій і продовження терміну служби пристрою. При правильному використанні показання датчика будуть коректними, при цьому не пошкоджується мембрана сенсора.

Роздільна мембрана монтується перед самим датчиком для передавання тиску без просочування технологічної рідини до сенсора. При використанні мембрани датчик має бути наповнений інертною рідиною, зазвичай силіконовим маслом, для передавання тиску.

Пристрій захисту від надлишкового тиску – підпружинений вентиль, який замикається у разі надлишкового тиску, запобігаючи пошкодженню датчика. Використовується в тих ситуаціях, коли можливі великі стрибки тиску.

Вентильний блок – пристрій, що спрощує комплексне компонування трубопроводу для установлення пристрою вимірювання диференціального тиску, зазвичай включає внутрішні вентилялі для відсікання процесу нагнітання й вирівнювання тиску. Датчики диференціального тиску часто використовують вентильні блоки для спрощення з'єднань. Вентильний блок включає вентилялі для ізолювання будь-якої сторони або вирівнювання внутрішнього тиску за необхідності. Якщо обидва відсічні клапани зачинені, то датчик можна відключити від процесу, не стравлюючи тиск (рис. 2.33).

Інтелектуальна діагностика

Інтелектуальний датчик являє собою пристрій, здатний виконувати безліч функцій, а не тільки передавати один виміряний параметр технологічного процесу.

Деякі інтелектуальні функції пов'язані зі здійсненням контролю над процесом і дублюють дії, які могла б виконувати АСК. Але якщо прилад працює незалежно, то такі функції можуть бути важливими. Нижче наведено кілька прикладів таких функцій:

- вимірювання та реєстрація моменту перевищення порога тиску;
- підрахунок сигналів тривоги й сигналів про помилки;
- аналізування шумів у сигналі датчика, що призводять до збою;
- вимірювання температури навколишнього середовища й технологічної рідини;
- автоматичне коректування значення тиску для компенсації температурних змін;

- автоматичне діагностування внутрішніх електронних функцій і апаратного забезпечення;
- налагодження аварійної сигналізації;
- історія і графік калібрування.



Рисунок 2.33 – Схема монтажу диференціального датчика тиску з вентильним блоком

Датчик може передавати цю інформацію, наприклад, за протоколом HART або fieldbus. Передавання даних може бути постійним при підключенні до великої системи керування або за запитом з портативного пристрою збирання даних.

При виборі пристрою для вимірювання тиску або будь-якого іншого типу вимірювань найкраще спочатку зрозуміти рамки його використання. Інформація про точність, спосіб передавання й діагностування є частиною його технічних характеристик. В іншому випадку при виборі сенсора тиску можна пропустити що-небудь важливе, унаслідок чого в керуванні процесом буде відсутній критичний компонент.

Вибір датчика тиску [15; 16]

При виборі датчика тиску необхідно враховувати такі технологічні параметри:

- де планується встановити датчик тиску (особливості застосування);
- діапазон вимірювань;
- температура процесу;
- тип з'єднання датчика з процесом;
- параметри навколишнього середовища (температура, вологість);
- тип вихідного сигналу датчика тиску;
- необхідна точність вимірювань;

При виборі датчиків тиску необхідно уточнювати такі особливості застосування:

1. Вимоги щодо гігієни: харчова та фармацевтична промисловість висувають високі санітарні вимоги до датчиків тиску як у місці контакту з продуктом, так і зовні (як правило, виконані повністю з неіржавкої сталі).

Наявність сертифікатів: найчастіше для різних застосувань, крім звичайного сертифіката відповідності ГОСТ (або декларації відповідності), потрібні додаткові сертифікати. Наприклад, для систем обліку необхідний сертифікат про затвердження типу засобів вимірювання; для застосування датчиків тиску в харчовій промисловості потрібне рішення СЕС, для застосування на небезпечних виробництвах потрібен дозвіл Укрметдержстандарту тощо.

Вимоги щодо вибухозахисту: на вибухонебезпечних виробництвах (наприклад, у нафтогазовій, хімічній, спиртовій промисловості) використовуються датчики тиску у вибухонебезпечному виконанні. Найбільшого поширення для датчиків отримали 2 види вибухозахисту: іскробезпечні електричної ланки Ex ia і вибухонепроникна оболонка Ex d, вибір якого обумовлюється специфікою застосування.

Тип вимірюваного середовища: якщо вимірюване середовище є в'язким, агресивним, уповільненим або має будь-які інші специфічні властивості (наприклад, наявність частинок бруду), ці особливості також необхідно врахувати. Можливо, для цього пристрою необхідне використання мембранних датчиків тиску (обладнаних розділовою мембраною), які забезпечують захист чутливого елемента датчика від впливу агресивних середовищ.

Наявність зовнішніх впливів: вібрації, електромагнітних полів або інших механічних чи електричних впливів.

Можливість гідроударів у системі: якщо в системі можлива наявність гідроударів, датчик тиску необхідно підібрати з достатнім запасом щодо перевантаження (пікового тиску) або вжити заходів щодо компенсації гідроударів (глушники, спеціальні датчики тощо).

Додаткове обладнання: як правило, при вимірюванні тиску датчики монтуються за допомогою триходових кранів, крім того, при вимірюванні тиску пари датчики тиску рекомендується підключати через спеціальний пристрій – трубку Перкінса, яка забезпечує зменшення температури середовища, що діє на датчик тиску.

При підборі датчиків тиску для застосування в якості гідростатичних датчиків рівня, необхідно враховувати той факт, що значення тиску при одній і тій самій висоті стовпа рідини може змінюватися зі зміною щільності вимірюваного середовища.

2. Діапазон вимірювань

Діапазон вимірювань датчика тиску – діапазон значень тиску, при подаванні якого датчик буде здійснювати вимірювання й лінійне перетворення вимірюваного значення на уніфікований вихідний сигнал.

Діапазон вимірювань визначається нижньою й верхньою межами вимірювань, які відповідають мінімальному й максимальному значенням вимірюваного тиску.

Наприклад, діапазон вимірювань: 0...1 бар, 0...2,5 МПа, 100...100 кПа.

При підборі датчиків тиску необхідно враховувати, що датчики бувають як з фіксованим діапазоном вимірювань, так і з налагодженим діапазоном вимірювань. У датчиків тиску з фіксованим діапазоном вимірювань значення вихідного сигналу жорстко прив'язані до меж вимірювань.

Наприклад, датчик тиску PTE5000 при тиску 0 МПа видаватиме 4 мА на виході, а при тиску 0,6 МПа видаватиме 20 мА, тому що він жорстко налагоджений на діапазон 0...0,6 МПа.

У свою чергу, датчик тиску KLAY 8000-ES [15] має простий і зручний діапазон 0...1...4 бар. Це означає, що при тиску 0 бар датчик буде аналогічно видавати 4 мА, а 20 мА датчик видасть при будь-якому значенні з діапазону 1...4 бар, яке налагоджується користувачем.

3. Температура процесу

Температура вимірюваного середовища – дуже важливий параметр при виборі датчиків тиску. При підборі датчика необхідно, щоб температура процесу не виходила за межі допустимого робочого температурного діапазону.

У харчовій промисловості відбуваються короткочасні (від 20 до 40 хвилин) процеси СІР- і SІР-мийки (санітарного оброблення), при яких температура середовища може досягати 145 °С. Для таких застосувань слід використовувати датчики, стійкі до такого впливу високих температур, наприклад датчики тиску у виконанні SAN: 8000-SAN і 2000-SAN [15].

Показання всіх датчиків тиску, що використовують тензорезистивний принцип перетворення, суттєво залежать від температури вимірюваного середовища, тому що зі зміною температури змінюється й опір резисторів, складових вимірювальної схеми сенсора тиску.

Для датчиків тиску вводиться поняття «температурної помилки», яка являє собою додаткову похибку вимірювань на кожні 10 °С зміни температури вимірюваного середовища щодо базової температури (як правило, 20 °С). Таким чином, температуру процесу необхідно знати для визначення повної похибки вимірювань датчика тиску.

Для зниження впливу температури у вимірювачах тиску використовують різні схеми температурної компенсації.

Щодо використання термокомпенсування всі датчики тиску можна поділити на три групи:

- бюджетні датчики тиску, які не використовують схеми термокомпенсації;
- датчики середнього цінового діапазону, які використовують пасивні схеми термокомпенсації;
- датчики тиску високого рівня для систем, вимогливих до точності вимірювання, які використовують схеми активної температурної компенсації.

Для вимірювання тиску середовищ з постійною температурою понад 100 °С використовуються спеціальні високотемпературні датчики тиску, що дозволяють вимірювати тиск середовищ з температурою аж до 250 °С. Як правило, такі датчики обладнані радіатором охолодження і / або мають

спеціальний конструктив, що дозволяє винести частину датчика з електронікою до зони з допустимою робочою температурою.

4. Тип з'єднання датчика з процесом

Тип з'єднання датчика з процесом – тип механічного підключення датчика тиску до процесу для здійснення вимірювань.

Найбільш популярними з'єднаннями для перетворювачів тиску загальнопромислового виконання є нарізне з'єднання G1 / 2 DIN 16288 і M20x1,5 [16].

При підборі датчика тип з'єднання необхідно уточнювати для забезпечення зручності монтажу в існуючій системі без здійснення додаткових робіт (зварювання, нарізання іншого типу різі тощо).

Найбільш різноманітними за типами використовуваних з'єднань з процесом є харчова, целюлозно-паперова і хімічна промисловості.

Вибір типу з'єднання найбільш актуальний для харчової промисловості, тому що поряд зі зручністю з'єднання, у першу чергу, повинна забезпечуватися відсутність «мертвих зон» для процесу санітарного оброблення. Для датчиків тиску, призначених для роботи в контакт з харчовими продуктами, існують спеціальні сертифікати, що підтверджують їх «санітарно»: Європейський сертифікат EHEDG (European Hygienic Equipment Design Group) і Американський сертифікат 3A Sanitary Standards. В Україні для датчиків, що контактують з харчовими середовищами, необхідна наявність Санітарно епідеміологічного висновку [15; 16].

5. Параметри навколишнього середовища

При підборі перетворювачів тиску слід враховувати такі параметри навколишнього середовища:

- температуру навколишнього середовища;
- вологість навколишнього середовища;
- наявність агресивних середовищ.

Усі параметри навколишнього середовища повинні знаходитись у допустимих межах для вибраного датчика тиску.

У разі наявності в навколишньому середовищі агресивних речовин багато виробників датчиків тиску пропонують спеціальні виконання, стійкі до хімічних впливів.

При роботі в умовах підвищеної вологості при частих перепадах температури датчики тиску багатьох виробників постають перед проблемою корозії сенсора тиску. Основна причина корозії сенсора датчиків тиску – утворення конденсату.

Датчикам надлишкового тиску для вимірювання відносного тиску необхідний зв'язок сенсора з атмосферою. У недорогих датчиків сенсор пов'язаний з атмосферою за рахунок негерметичності корпусу (коннектор IP65); вологе повітря при такій конструкції після потрапляння всередину датчика конденсується при зниженні температури, тим самим поступово викликаючи корозію вимірювального елемента.

6. Тип вихідного сигналу датчика тиску

Найпоширенішим аналоговим вихідним сигналом для датчиків тиску є уніфікований струмовий сигнал 4...20 мА.

Практично завжди 4 мА відповідають нижньому значенню діапазону вимірювань, а 20 мА – верхньому, але іноді зустрічається реверсивний сигнал (як правило, на вакуумних діапазонах). Також у промисловості зустрічаються датчики тиску з іншими типами аналогового вихідного сигналу, наприклад: 0...1 В, 0...10 В, 0...20 мА, 0...5 мА, 0...5 В.

Інтелектуальні датчики тиску, крім основного сигналу 4...20 мА, можуть бути виготовлені у виконанні з підтриманням протоколу HART, який може використовуватися для налагодження або отримання інформації про стан датчика й додаткової інформації.

Крім аналогового вихідного сигналу, інтелектуальні датчики тиску також бувають з цифровим вихідним сигналом. Це датчики з виходом за протоколом Profibus PA, який використовує у своїх пристроях компанія Siemens.

7. Необхідна точність вимірювань

При розрахунку похибки вимірювань датчиків тиску необхідно враховувати, що, крім основної похибки, існує додаткова похибка.

Основна похибка – значення похибки датчика тиску щодо діапазону вимірювань, заявлена заводом виробником для нормальних умов експлуатації. Як правило, під нормальними умовами експлуатації розуміють такі:

- температура навколишнього та робочого середовища 20 °С;
- тиск робочого середовища – у межах діапазону вимірювань датчика;
- нормальний атмосферний тиск;
- відсутність турбулентності потоку або інших явищ у місці встановлення датчика, здатних вплинути на показання.

Додаткова похибка – значення похибки, викликане відхиленням умов експлуатації від нормальних, зважаючи на особливості конкретного застосування. Однією з основних складових додаткової похибки є температурна похибка, яка вказується в технічній документації до датчиків тиску й може бути розрахована для конкретного значення температури робочого середовища.

Також додаткову похибку може викликати турбулентність потоку вимірюваного середовища, зміна щільності середовища при гідростатичному вимірюванні рівня, динамічні навантаження на обладнання під час переміщення в просторі (судна, транспорт тощо) та інші можливі фактори.

При розрахунку похибки вимірювальної системи в цілому потрібно також враховувати клас точності вимірювального приладу – індикатора.

Приклад. Розрахувати повну похибку вимірювань для такої системи:

Дано:

- датчик тиску KLAY-Instruments 8000-SAN-F-M (25), встановлений на трубопроводі з продуктом;

- максимальний тиск продукту – 4 бар, таким чином, датчик налагоджений на діапазон 0...4 бар;

- максимальна температура продукту – 60 °С;
- турбулентність потоку й інші чинники на точність не впливають.

Розв'язання. За паспортними даними знаходимо, що основна похибка датчика 8000-SAN-F- (M25) становить 0,2 %.

Температурна похибка за паспортом дорівнює 0,015 % / °С, таким чином, температурна помилка при 60 °С дорівнює:

$$0,015 \text{ \%}/^{\circ}\text{C} \times (60 \text{ }^{\circ}\text{C} - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 0,6 \text{ \%};$$

$$0,2 + 0,6 + 0,25 = 1,05 \text{ \%} - \text{ повна відносна похибка};$$

$1,05 \text{ \%} \times 4 \text{ бар} = 0,042 \text{ бара}$ – абсолютна похибка вимірювань цієї системи.

Відповідь: 0,042 бара – абсолютна похибка вимірювань цієї системи.

Приклад. Датчик моделі 3051CD4 належить використовувати для вимірювання перепаду тиску в трубопроводі зі статичним тиском 1 200 psi (8,268 МПа). Шкала датчика відкалібрована таким чином: 4 мА відповідає 500 дюймів вод. ст. (124,5 кПа), а 20 мА – 1 500 дюймів вод. ст. (373,6 кПа).

Розв'язання. Для коригування систематичної помилки, викликаної статичним тиском у трубопроводі, спочатку визначаються за формулами скориговані значення верхньої й нижньої точок:

$$LT = LRV + S (LRV) P,$$

де LT – скориговане значення верхньої точки;

LRV – значення нижньої межі діапазону;

S – помилка шкали за паспортними даними;

P – статичний тиск у трубопроводі (тиск втрат на сумарному гідравлічному опорі трубопроводу);

$$HT = URV + S (URV) P,$$

де HT – скориговане значення нижньої точки;

URV – значення верхньої межі діапазону;

S – помилка шкали за паспортними даними.

$$URV = 1\,500 \text{ дюймів вод. ст. (373,6 кПа);}$$

$$LRV = 500 \text{ дюймів вод. ст. (124,5 кПа);}$$

$$P = 1\,200 \text{ psi (8,268 МПа);}$$

$$S = +0,01/1\,000.$$

Розрахунок значення нижньої точки:

$$LT = 500 + (0,01/1\,000)(500)(1\,200);$$

$$LT = 506 \text{ дюймів вод. ст. (126,0 кПа).}$$

Розрахунок значення верхньої точки:

$$HT = 1\,500 + (0,01/1000)(1500)(1200);$$

$$HT = 1\,518 \text{ дюймів вод. ст. (378,1 кПа).}$$

Для завершення повного налагодження моделі 3051 і введення скоригованих значень для налагодження нижньої (*LT*) і верхньої (*HT*) точок.

2.4.5 Вимірювання витрати. Витратоміри

Поняття витрат. Характеристики потоку середовища

Кількість рідини, газу або пари, що проходить за одиницю часу через поперечний переріз трубопроводу, каналу тощо, називається витратою. При цьому кількість середовища, виміряна в об'ємних одиницях, називають об'ємною витратою, а в масових – масовою.

Об'ємна витрата визначається за формулою

$$Q = V S,$$

де Q – об'ємна витрата, м³/с;

V – швидкість потоку, м/с;

S – площа поперечного перерізу потоку, м².

Масова витрата визначається через щільність і об'ємну витрату:

$$Q_m = Q \rho,$$

де Q_m – масова витрата;

ρ – щільність вимірюваного середовища.

Як правило, у якості об'ємних одиниць вимірювання кількості середовища використовують: літр (л), кубічний сантиметр (см³) і кубічний метр (м³); а масових – грам (г), кілограм (кг) і тонну (т).

Найбільш важливими характеристиками потоку, що впливають на характер руху середовища, є:

- швидкість потоку;
- щільність вимірюваного середовища;
- в'язкість вимірюваного середовища.

В'язкістю (динамічною) називають фізичну властивість плинності середовища, що характеризує внутрішнє тертя між її шарами. Одиницею вимірювання в'язкості є пуаз (П), в'язкість малов'язких рідин і газів вимірюють у сотих частках пуаз – сантипуаз (сП).

Поряд з динамічною в'язкістю використовують величину, звану кінематичною в'язкістю:

$$\nu = \mu/\rho,$$

де ν – кінематична в'язкість;

μ – в'язкість.

Одиницею вимірювання кінематичної в'язкості є стокс (Ст), на практиці частіше використовується його сота частина – сантистокс (сСт).

В'язкість рідких середовищ зі збільшенням температури зменшується, причому для різних рідин ця залежність різна. Водночас в'язкість рідких середовищ залежить і від тиску, зазвичай зростаючи при його збільшенні. Однак при тисках, що зустрічаються в більшості випадків (до 20 МПа), ця зміна незначна і, як правило, не враховується. Для газоподібних середовищ залежність в'язкості від тиску й від температури досить істотна: зі збільшенням тиску кінематична в'язкість газів зменшується, а зі збільшенням температури – збільшується.

Швидкість потоку, в'язкість і щільність рідини визначають режим руху рідини в трубопроводі. Дослідження питання про механізм руху середовищ дозволило висновити, що існують два режими руху рідини:

- ламінарний режим руху спостерігається при малих швидкостях, коли окремі шари середовища рухаються паралельно один одному без перемішування частинок;

- турбулентний режим руху спостерігається при великих швидкостях потоку й характеризується інтенсивним перемішуванням частинок.

Критерієм оцінки обох режимів є число Рейнольдса:

$$Re = (V \cdot D \cdot \rho) / \mu = (V \cdot D) / \nu,$$

де Re – число Рейнольдса;

D – внутрішній діаметр трубопроводу.

Ламінарний режим руху спостерігається при $Re \leq 2000$, турбулентний режим руху встановлюється, як правило, при $Re \geq 4000$, хоча це значення, залежно від умов руху потоку, може виявитися великим. Режим руху при $2000 \leq Re < 4000$ називається перехідним, і в цьому діапазоні чисел Re можливі як ламінарний, так і турбулентний рух потоку. На практиці, як правило, при русі рідин, газів і пари в трубопроводах реалізується турбулентний режим руху. Ламінарний же режим присутній при малих швидкостях потоку або русі високов'язких рідин.

Епюра розподілу швидкостей за перерізом трубопроводу при ламінарному плинні має параболічний характер, тобто швидкість потоку в центрі трубопроводу вища, ніж біля його стінок. При турбулентному ж режимі епюра швидкостей має більш згладжений характер. Закон розподілу швидкості за перерізом трубопроводу грає важливу роль при визначенні дійсної витрати середовища. Через те що цей закон у більшості випадків невідомий, використовується таке визначення середньої швидкості потоку: швидкість, з якою повинні рухатися через поперечний переріз потоку всі частинки, щоб витрата середовища дорівнювала витраті, отриманій з дійсними неоднаковими для різних частинок швидкостями.

Залежно від принципу вимірювання усереднення швидкості потоку проводиться або конструктивним шляхом, або впливає з самого принципу вимірювання. «Якість» усереднення швидкості потоку безпосередньо впливає на точність роботи витратоміра.

При проходженні потоку середовища через місцеві опори (коліна, трійники, клапани тощо) порушується розподіл швидкості потоку за пере-

різом трубопроводу (потік дестабілізується). Тому, як правило, після місцевих опорів перед витратоміром необхідно витримати пряму ділянку для стабілізації потоку, в іншому разі похибка вимірювань може збільшитися. Як правило, для сучасних витратомірів пряма ділянка «до» становить близько 5...20 DN. Більш детальні дані про величину прямих ділянок наводяться в технічному описі конкретного приладу.

Класифікація й конструктивні виконання витратомірів [17]

Технічні пристрої, призначені для вимірювання витрати рідин і газів, називають витратомірами. Витратоміри підрозділяються на об'ємні й масові залежно від того, яку витрату (об'ємну або масову) вони вимірюють.

Масові витратоміри відрізняються від об'ємних тим, що безпосередньо вимірюють масову витрату рідини, у той час як визначення масової витрати із застосуванням об'ємних витратомірів відбувається непрямым методом.

Витратоміри класифікуються в першу чергу за принципами вимірювання, тобто за допомогою яких фізичних явищ вимірювальна величина перетворюється на вихідний сигнал первинного перетворювача витратоміра. Найбільш перспективними для застосування в промисловості зараз є:

1. Витратоміри змінного перепаду тиску. Засновані на залежності перепаду тиску, створеного перетворювачем витрати, встановленим в трубопроводі, від витрати вимірюваного середовища. Витратоміри цього типу особливо поширені завдяки таким властивостям: простоті конструкції, можливості вимірювань у широкому діапазоні значень витрати й діаметрів трубопроводів (від 10 до 3 000 мм і більше); можливості застосування для різних за складом і агресивних рідин і газів за температур до 400 °С і тисках до 100 МПа. Недоліки: невеликий діапазон вимірювань через квадратичну залежність між витратою й перепадом тиску (3:1), значні втрати тиску на гідравлічному опорі й пов'язані з цим витрати енергії. Похибка від максимальної витрати становить 1,5...2,5 %.

2. Електромагнітні витратоміри. Перетворюють швидкість електропровідної рідини, яка рухається в магнітному полі в ЕРС. Прилади дозволяють вимірювати витрати різних пульп, сиропів, агресивних і радіоактивних рідин при тисках до 2,5 МПа (іноді до 20 МПа), діаметр трубопроводів, як правило, 2...3 000 мм. Допустимі температури контрольованого середовища визначаються термостійкістю електроізоляційних покриттів і можуть досягати, як правило, 230 °С. Переваги: відсутність втрат тиску, показання приладів не залежать від в'язкості й щільності рідин. Похибка становить 0,5...1,0 % від максимальної вимірюваної величини витрати.

3. Вихрові витратоміри. Принцип дії заснований на залежності частоти відриву вихорів, що виникають при обтіканні потоком вихороутворювача – призми з гострими крайками, встановленої в трубопроводі, від витрати вимірюваного середовища. Діапазон частот утворення вихорів визначається розміром і конфігурацією тіла й діаметром трубопроводів (25...300 мм). Температура середовища – зазвичай від -50 до 400 °С, рідше – від -270 до 450 °С, а тиск – до 4 МПа, іноді – до 6,3 МПа. Діапазон вимі-

рювань для рідин – 12:1, для газів – 40:1. Похибка становить 0,5...1 % від максимальної вимірюваної витрати при числі Рейнольдса $Re > 30\ 000$, при $Re < 10\ 000$ визначення витрати практично неможливе через відсутність вихорів.

4. Ультразвукові витратоміри. Використовують залежність різниці часу проходження ультразвукової хвилі проти напрямку потоку або зсуву частоти відбитої ультразвукової хвилі (ефект Доплера) від швидкості вимірюваного середовища. Ці прилади не викликають втрат тиску, мають високу швидкодію й забезпечують вимірювання будь-яких пульсаційних витрат (частота 5...10 кГц), які містять газові включення рідин (у т. ч. в'язких і агресивних), а також газів і пари. Діаметр трубопроводів – 10...3 000 мм і більше. Температура контрольованого середовища – від -40 до 200 °С (рідше від -250 до 250 °С), тиск до 4 МПа. Діапазон вимірювань – 100:1. Похибка 1,0...2,5 % від максимального вимірюваного витрати;

5. Витратоміри постійного перепаду тиску – ротаметри. Перетворюють швидкісний напір, а відповідно, і витрату вимірюваного середовища, на переміщення тіла обтікання (поплавка). Поплавки залежно від властивостей рідини або газу виготовляють з різних металів або пластмас. Прилади працездатні при температурах від - 80 до 400 °С і тиску до 70 МПа, переважальні для трубопроводів діаметром до 150 мм, мають рівномірні шкали, градуйовані в одиницях об'ємної витрати. Переваги: можливість вимірювань витрати рідини й газів від дуже малих значень (0,002 л/год по воді, 0,03 л/год по повітрю) до високих (150...200 і до 3 000 м³/год); широкий діапазон вимірювань (10:1); малі втрати тиску (до 0,015 МПа). Похибка – 0,5...2,5 % від максимальної витрати;

6. Масові коріолісові витратоміри. Засновані на інерційному впливі на сенсор маси рідини, що рухається одночасно з кутовим прискоренням

Діапазони вимірювань витратомірів наведено на рисунку 2.34 [17].

Конструктивно в загальному випадку витратоміри складаються з первинного перетворювача – вимірювальної частини і вторинного перетворювача – електронного блоку. За конструкцією первинних перетворювачів їх можна поділити на такі види:

1. Повнопроточні. Первинний перетворювач вбудовується безпосередньо в поперечний переріз трубопроводу.

2. Занурювальні. Первинний перетворювач вставляється в трубопровід через отвір. Ці прилади залежно від конструкції можливо монтувати (демонтувати) без зняття тиску в трубопроводі.

3. Із накладними первинними перетворювачами. Монтуються безпосередньо на зовнішній поверхні трубопроводу. З накладними первинними перетворювачами виготовляються тільки ультразвукові витратоміри.

Основним видом з'єднання повнопроточних витратомірів з трубопроводом є фланцеве. При цьому існує два його різновиди:

- традиційне фланцеве з'єднання, коли проточна частина витратоміра має фланці на вході й виході, які болтами або шпильками прикручуються до відповідних фланців трубопроводу (рис. 2.35);

– сендвічеве з'єднання, коли проточна частина витратоміра своїх фланців не має, а затискається між відповідними фланцями трубопроводу за допомогою довгих шпильок (рис. 2.36).

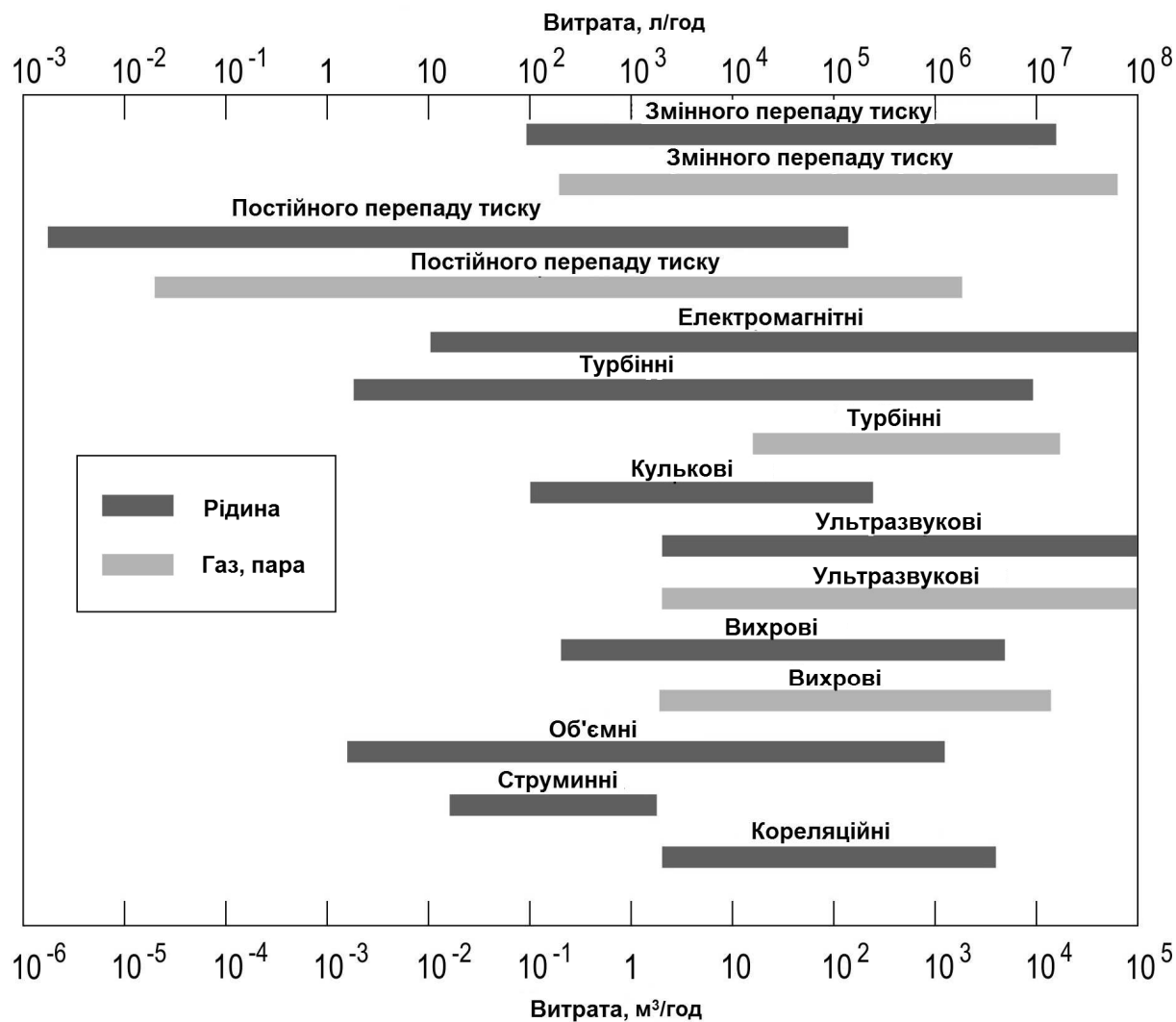


Рисунок 2.34 – Діапазони вимірювань витратомірів

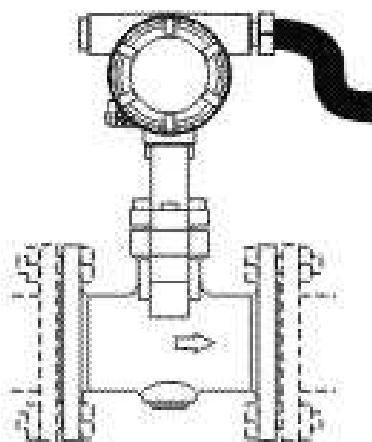


Рисунок 2.35 – Фланцеве з'єднання датчика витрати

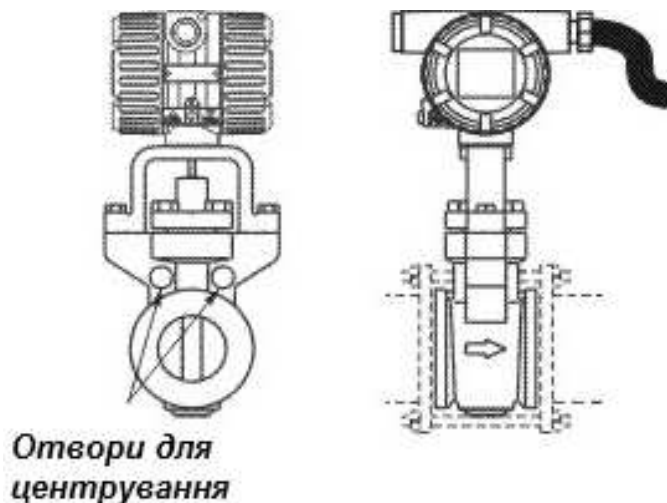


Рисунок 2.36 – Сендвічеве з'єднання датчика витрати

Обидва різновиди фланцевого з'єднання однаково надійні, проте сендвічеве з'єднання вимагає більшої акуратності при виконанні зварювальних робіт і монтажі витратоміра. З іншого боку, вартість витратомірів з сендвічевим з'єднанням зазвичай значно нижча, ніж із фланцевим, через меншу металоємність.

Повнопроточні витратоміри точніше визначають середню швидкість потоку, тому що здійснюють вимірювання за всім перерізом потоку. Відповідно, вони мають більш низьку похибку вимірювань, аж до $\pm 0,2 \dots 0,5$ % вимірюваної величини. Точність вимірювання витрати масовими коріолісовими витратомірами практично не залежить від профілю потоку, що дозволяє домогтися похибки вимірювання масової витрати порядку $\pm 0,1 \dots 0,2$ % вимірюваної величини.

Занурювальні (заглибні) витратоміри здійснюють вимірювання швидкості потоку в одній точці. Середня швидкість потоку визначається в них на підставі існуючих теоретичних і експериментальних залежностей розподілу швидкостей потоку за перерізом трубопроводу. Різні впливи призводять до спотворення профілю потоку, що не може не позначатися на результатах вимірювання цими приладами. На даний момент похибка вимірювань заглибних витратомірів становить близько $\pm 1 \dots 2$ % шкали й істотно залежить від правильності їх установа.

Ультразвукові витратоміри вимірюють швидкість потоку в одній або декількох площинах перерізу потоку залежно від кількості первинних перетворювачів, що визначає їхню похибку вимірювань витрати, загальну $\pm 1 \dots 3$ % від вимірюваної величини. Похибка цих приладів також залежить від правильності й місця установа первинних перетворювачів.

За компонованням витратоміри можуть бути (рис. 2.37) [17]:

- інтегрального виконання: вторинний перетворювач монтується безпосередньо на первинному перетворювачі;

- рознесеного виконання: вторинний перетворювач монтується на деякій відстані від первинного й з'єднується з ним кабелем.



Інтегральне
виконання

Рознесене
виконання

Рисунок 2.37 – Компонування витратомірів

У більшості випадків доцільніше застосовувати витратоміри в інтегральному виконанні. Однак існує низка факторів, за наявності яких використовують витратоміри в рознесеному виконанні:

- висока температура вимірюваного середовища;
- висока температура навколишнього середовища в місці установлення витратоміра;
- висока вібрація трубопроводу;
- можливість затоплення місця установлення витратоміра (для таких випадків первинні перетворювачі, як правило, мають водонепроникне виконання IP68);
- утруднений доступ до місця установлення витратоміра.

На багатьох виробництвах існують вибухонебезпечні зони, у яких через витоки й випаровування горючих речовин містяться або можуть виникати вибухонебезпечні газові середовища. У таких зонах необхідно застосовувати витратоміри у вибухозахищеному виконанні.

Найбільшого поширення набули два види вибухозахисту витратомірів:

- іскробезпечна електрична ланка: при виникненні іскри в електричних ланцюгах приладу її потужності буде недостатньо для займання вибухонебезпечної суміші;
- вибухонепроникна оболонка: електричні ланцюги приладу поміщені в спеціальну особливо міцну оболонку. При цьому не виключається контакт електричних ланцюгів з вибухонебезпечною сумішшю і можливість її займання, але гарантується, що оболонка витримає надлишковий тиск, який виникне внаслідок вибуху, тобто спалах не вийде за межі вибухонепроникної оболонки.

Рекомендації щодо вибору витратоміра. Класифікація задач вимірювання витрати

За функціональним призначенням завдання вимірювання витрати в промисловості умовно можна поділити на дві основні групи:

1) завдання обліку:

- комерційного;
- оперативного (технологічного);

2) завдання контролю й керування технологічними процесами:

- підтримання заданої витрати;
- змішування двох і більше середовищ у певній пропорції;
- процеси дозування/наповнення.

Завдання обліку висувають високі вимоги до похибки вимірювань витрати й стабільності роботи витратоміра, тому що його показання є підставою для розрахункових операцій між постачальником і споживачем. До завдань оперативного обліку відносяться такі: міжцеховий, внутрішньоцеховий облік тощо. Залежно від вимог, що ставляться до цих завдань, можливе використання витратомірів більш простої конструкції з більшою похибкою вимірювань, ніж при комерційному обліку.

Завдання контролю й керування технологічними процесами різноманітні, тому вибір типу витратоміра залежить від ступеня важливості й вимог, що ставляться до цього процесу.

За умовами вимірювання завдання визначення витрати можна класифікувати так:

- вимірювання витрати в повністю заповнених (напірних) трубопроводах;

- вимірювання витрати в повному обсязі заповнених (безнапірних) трубопроводах, відкритих каналах і лотках.

Завдання вимірювання витрати в повністю заповнених трубопроводах є стандартними, і більшість витратомірів призначені саме для даного застосування.

Завдання другої групи є специфічними, тому що вимагають, у першу чергу, визначення рівня рідини. Причому, залежно від типу лотка або каналу, визначення витрати можливе через вимірний рівень на основі теоретично доведених і експериментально підтверджених залежностей витрати рідини від рівня. Однак існують пристрої, у яких поряд з вимірюванням рівня рідини в каналі, лотку або неповністю заповненому трубопроводі необхідне визначення й швидкості потоку.

Вимірювання витрати рідини

Для вимірювання витрати рідини в промислових умовах доцільно застосовувати електромагнітні, ультразвукові, масові коріюлісові витратоміри й ротаметри.

Крім того, у деяких випадках оптимальним рішенням може бути застосування вихрових витратомірів і витратомірів змінного перепаду тиску.

При виборі приладів для вимірювання витрати електропровідних рідин і пульп у першу чергу рекомендується розглянути можливість застосування електромагнітних витратомірів.

Через свої конструктивні особливості, різноманітність матеріалів футерування й електродів ці прилади мають широку сферу застосування й використовуються при вимірюванні витрати таких середовищ:

- загальнотехнічні (вода тощо);
- висококорозійноактивні (кислоти, луги тощо);
- абразивні й адгезійні (забруднення);
- гідросуміші, пасти й суспензії з вмістом волокон або твердої фази понад 10 % (масової витрати).

Висока точність вимірювання ($\pm 0,2...0,5$ % вимірюваної величини), малий час відгуку (до 0,1 с залежно від моделі), відсутність рухомих частин, висока надійність і тривалий термін служби, мінімальне обслуговування – усе це робить повнопроточні електромагнітні витратоміри оптимальним вирішенням завдань вимірювання витрати та обліку кількості електропровідних середовищ у трубопроводах малого й середнього діаметрів.

Занурювальні електромагнітні витратоміри широко застосовуються при вирішенні завдань оперативного контролю й технологічних процесах, де не потрібна висока точність вимірювань, а також при вимірюванні витрати в трубопроводах великих діаметрів ($> DN400$) і швидкості потоку у відкритих каналах і лотках.

Ультразвукові витратоміри в основному застосовуються для вимірювання витрати неелектропровідних середовищ (нафти й продуктів її перероблення, спиртів, розчинників тощо). Повнопроточні витратоміри застосовуються як у вузлах комерційного обліку, так і для керування технологічними процесами. Похибка вимірювання цих приладів, залежно від виконання, становить близько $\pm 0,5$ % вимірюваної величини. Залежно від принципу вимірювання середовище має бути чистим (часо-імпульсні витратоміри) або з вмістом твердих часток і/або нерозподіленого повітря (доплерівські витратоміри). Як приклад середовищ для другого випадку можна вказати гідросуміші, суспензії, бурові розчини тощо.

Витратоміри з накладними датчиками прості в монтажі і, як правило, застосовуються для оперативного обліку у невідповідальних технологічних процесах (похибка порядку $\pm 1...3$ % шкали) або якщо немає змоги установити повнопроточні витратоміри.

Масові коріолісові витратоміри через свій принцип вимірювання можуть вимірювати витрату практично будь-яких середовищ. Ці прилади відрізняються високою точністю вимірювань ($\pm 0,1...0,5$ % вимірюваної величини при визначенні масової витрати) і високою вартістю. Тому коріолісові витратоміри в першу чергу рекомендується застосовувати у вузлах комерційного обліку, процесах дозування/наповнення або відповідальних технологічних процесах, коли необхідно вимірювати масову витрату середовища або контролювати відразу кілька параметрів (масову витрату, щільність і температуру).

Крім того, масові витратоміри можна застосовувати як щільноміри при їх установленні, наприклад, у байпасній лінії. У всіх інших випадках, при більш простих застосуваннях, масові витратоміри можуть виявитися неконкурентоспроможними в порівнянні з об'ємними витратомірами, які можна застосовувати для вирішення цих самих завдань.

Як матеріали вимірювальних трубок у масових витратомірах використовуються, як правило, неіржавка сталь, сплав Hastelloy, тому ці прилади не придатні для вимірювання витрати висококорозійноактивних середовищ. Здатність вимірювати масову витрату безпосередньо дозволяє застосовувати масові витратоміри при вимірюванні витрати двофазних середовищ з можливістю визначення концентрації одного середовища в іншому. Існують і обмеження. Також на точність вимірювання витрати масовими витратомірами суттєво впливає наявність нерозподіленого газу у вимірюваному середовищі.

Ротаметри, як правило, застосовуються для вимірювання малих витрат. Клас точності цих приладів, залежно від виконання, варіюється в межах 1,6...2,5, тому використання цих приладів рекомендується в задачах оперативного обліку й контролю технологічних процесів.

У якості матеріалу вимірювальної трубки використовуються неіржавка сталь і фторопласт PTFE, що дозволяє застосовувати ротаметри для вимірювання витрати корозійноактивних середовищ. Металеві ротаметри також дозволяють вимірювати витрату високотемпературних середовищ. Необхідно відзначити, що вимірювання витрати адгезійних, абразивних середовищ і середовищ з механічними домішками за допомогою ротаметрів неможливе. Крім того, існує обмеження щодо монтажу цього типу витратомірів: їх установлення можливе тільки на вертикальних трубопроводах з напрямком потоку вимірюваного середовища знизу вгору. Сучасні ротаметри, крім індикаторів, можуть оснащуватися мікропроцесорним електронним модулем з вихідним сигналом 4...20 мА, лічильником сумарної кількості й кінцевими перемикачами для роботи в режимі реле потоку.

Незважаючи на те, що вихрові витратоміри розроблялися спеціально для вимірювання витрати газу/пари, їх можна використовувати також для вимірювання витрати рідких середовищ. Однак через їхні конструктивні характеристики найбільш рекомендованими застосуваннями цих приладів у задачах оперативного обліку і контролю технологічних процесів є:

- вимірювання витрати високотемпературних рідин з температурою до +450 °С;
- вимірювання витрати криогенних рідин з температурою до 200 °С;
- при високому (до 25 МПа) технологічному тиску в трубопроводі;
- вимірювання витрати в трубопроводах великого діаметра (заглибні вихрові витратоміри).

Рідина при цьому повинна бути чистою, однофазною, з в'язкістю не більше 7 сантипауз (сП).

Вимірювання витрати газу і пари

На відміну від рідин, які умовно можна вважати практично нестискними середовищами, обсяг газових середовищ істотно залежить від температури й тиску. Тому при обліку кількості газів оперують обсягом і витратою, зведеними або до нормальних умов ($T = 0\text{ °C}$, $P = 101,325\text{ кПа абс.}$), або до стандартних умов ($T = +20\text{ °C}$, $P = 101,325\text{ кПа абс.}$).

Таким чином, для вимірювання кількості газу й пари поряд з об'ємним витратоміром необхідні датчики тиску й температури або щільномір, або масовий витратомір, а також обчислювальний пристрій (коректор або інший вторинний прилад з відповідними математичними функціями). При регулюванні витрати газів у технологічних процесах найчастіше обмежуються вимірюванням однієї лише об'ємної витрати, але для точного регулювання також необхідно визначати витрату за нормальних умов, особливо в разі значних коливань щільності газу.

Найчастіше для вимірювання витрати газу й пари застосовується метод змінного перепаду тиску (ЗПТ), причому в якості первинних перетворювачів витрати традиційно використовуються звужувальні пристрої, у першу чергу – стандартна діафрагма. Основними перевагами витратомірів ЗПД є безпроливне вивірення, невисока вартість, широкий діапазон застосувань і великий досвід експлуатації. Проте цей метод має і досить серйозні недоліки: квадратичну залежність перепаду тиску від витрати, великі втрати тиску на звужувальних пристроях і жорсткі вимоги до прямих ділянок трубопроводу. Через це зараз як в Україні, так і в усьому світі є чітка тенденція щодо заміни витратомірних комплексів з пристроями звуження потоку на витратоміри з іншими принципами вимірювання. Для трубопроводів малих і середніх діаметрів зараз існує широкий вибір різних методів і засобів вимірювання витрати, але для трубопроводів діаметром 300...400 мм і вище альтернатива методу ЗПД практично відсутня. Позбутися недоліків традиційних витратомірів ЗПД з пристроями звуження потоку, зберігши при цьому переваги самого методу, дозволяє використання в якості первинних перетворювачів витрати осереднювальні напірні трубки серії Totbar, а в якості засобів вимірювання перепаду тиску (дифманометрів) – цифрових датчиків різниці тиску серії EJA/EJX. При цьому втрати тиску зменшуються в десятки й сотні разів, прямі ділянки скорочуються в середньому в 1,5...2 рази, динамічний діапазон щодо витрати може досягати 10:1.

Останнім часом більш широке застосування для вимірювання витрати газу й пари знаходять вихрові витратоміри. У порівнянні з витратомірами змінного перепаду тиску вони мають більш широкий динамічний діапазон, менші втрати тиску й прямі ділянки. Найбільш ефективними ці прилади є в задачах обліку, насамперед комерційного, і у відповідальних завданнях регулювання витрати. Використання витратоміра з вбудованим датчиком температури або стандартного витратоміра спільно з датчиками температури й тиску дозволяє визначити масову витрату середовища, що особливо актуально при вимірюванні витрати пари.

Однак ці прилади через особливості свого принципу вимірювання не застосовуються для вимірювання витрати середовищ:

- багатофазних, адгезійних і з твердими включеннями;
- з малими швидкостями потоку.

При малих і середніх швидкостях потоку для вимірювання витрати технічних газів широко застосовуються ротаметри. Ці прилади розраховані

на роботу як з високотемпературними, так і з агресивними середовищами й широко використовуються в різних виконаннях. Однак, як зазначалося вище, ротаметри монтуються тільки на вертикальних трубопроводах з напрямком потоку знизу вгору і не застосовуються при вимірюванні витрати адгезійних середовищ і середовищ з вмістом твердих включень, у тому числі абразивних.

За необхідності безпосереднього вимірювання масової витрати газу також застосовуються масові коріолісові витратоміри. Однак при застосуванні цих приладів вимірювання щільності й, відповідно, розрахунок об'ємної витрати неможливі, тому що щільність газів нижча від мінімального значення діапазону вимірювань щільності цих витратомірів. З урахуванням високої вартості цих приладів їх застосування рекомендується в найбільш відповідальних процесах, де критичним параметром є масова витрата середовища.

Особливості застосування різних типів витратомірів наведено в таблиці 2.13.

2.4.6 Засоби контролю швидкості й переміщення

Розрізняють інкрементальний і абсолютний методи вимірювання. В інкрементальних датчиках після кожного відключення живлення необхідне реферування верстата, тому що положення часто не зберігається в СЧПК і рухи верстата при вимкненні живлення не реєструються (табл. 2.10) [17].

Абсолютні датчики, навпаки, реєструють рухи при вимкненні живлення й видають фактичну позицію при відновленні живлення, не вимагають реферування [18].

На рисунку 2.38 наведено варіанти конструкцій ротаційних (кругових) датчиків і елементи для їх підключення.



Рисунок 2.38 – Датчики контролю кутової швидкості для електроприводів

Таблиця 2.13 – Зведена таблиця застосування різних типів витратомірів

Тип витрати	Пара	Газ		Рідина						Вимірювання витрати в прямому й зворотному напрямках	Пул'єувальні потоки	Високотемпературне середовище	Низькотемпературне середовище	Тиск вимірюваного середовища	
		Чистий	З механічними домішками	Чиста	В'язкість		Корозійноактивна	Високорозійноактивна	З механічними включеннями						
					Високов'язка	Низьков'язка			Волокниста					Абразивна	
Витратомір змінного перепаду тиску	О	О	Δ	О	Δ	О	Δ	Х	Δ	Х	Δ	О	О	Високий тиск / розрядження	Низький тиск / розрядження
Електромагнітні витратоміри	Х	Х	Х	О	О	О	О	О	О	О	Δ	Х	Х	О	О
Вихрові витратоміри	О	О	Δ	О	О	Х	О	Х	Δ	Х	Х	О	О	О	О
Ультразвукові витратоміри	Х	Δ	Δ	О	О	О	Δ	Х	Δ	Х	О	Δ	Δ	О	О
	Х	Х	Х	О	О	О	Δ	О	О	О	О	Δ	Δ	О	О
Рогаметри	О	О	Х	О	Х	О	О	Х	О	Х	Х	Δ	О	О	О
Масові коріолосові витратоміри	О	О	О	О	О	Δ	Х	О	Δ	Х	О	О	О	О	О
Механічні лічильники	Х	О	Х	О	Δ	О	Δ	Х	Δ	Х	Δ	Х	Δ	О	О

О – стандартне застосування;

Δ – застосування можливе залежно від умов вимірювання;

Х – не застосовується.

У двигунах головного руху застосовуються різні типи датчиків:

1. Інкрементальні кругові датчики. До цього типу належать:

– датчики положення й швидкості шпинделя з імпульсними сигналами TTL і HTL (High Voltage);

– датчики кута повороту з аналоговими сигналами \sin/\cos рівня напруги $1 V_{pp}$ (Volt peak to peak: напруга від піку до піку);

– вимірювальна інкрементальна система датчика типу SIMAG H для реєстрації кута повороту порожнистих шпинделів (двигуни 1PH2, 1FE1), що складається з шестерні й зчитувальної голівки (замінює колишню версію SIZAG 2).

2. Датчики абсолютного значення (кодові датчики положення). До цього типу належать:

– датчики з синхронним послідовним інтерфейсом (SSI);

– датчики з кодером за даними (інтерфейс EnDat);

– датчики з інтерфейсом PROFIBUS-DP.

3. Датчики кутового положення типу резольвер (resolver).

Інкрементальні й кодові датчики є енкодером у тому значенні, що вони створюють імпульси, які характеризують рух.

При цьому в інкрементальних датчиках містяться синусний (A) і косинусний (B) канали, а також канал R для референтної мітки початку оберту, порядок чергування імпульсів дозволяє визначити напрямок обертання, підрахунок імпульсів у лічильниках – відстань, а визначення кількості імпульсів за одиницю часу – швидкість. Діаграми сигналів TTL і аналогових сигналів \sin/\cos рівня напруги $1 V_{pp}$ наведено на рисунках 2.39 і 2.40, відповідно.

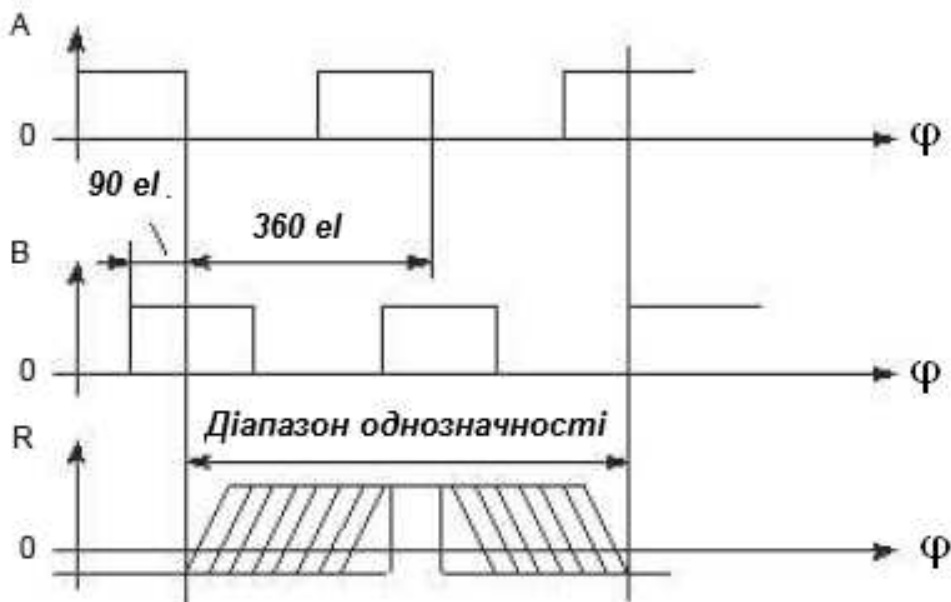


Рисунок 2.39 – Діаграми сигналів TTL інкрементального датчика

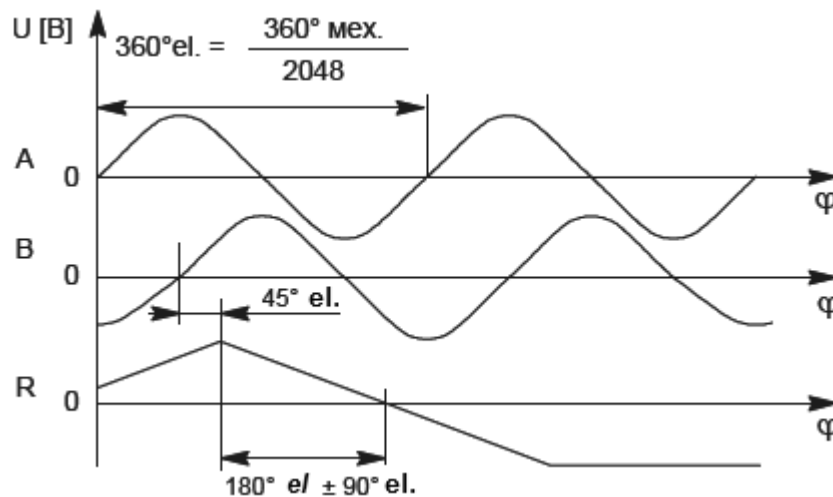


Рисунок 2.40 – Діаграми сигналів \sin/\cos рівня напруги $1 V_{pp}$ інкрементального датчика

У кодових датчиках інформація про стан створюється за допомогою N доріжок, кожна з яких відображає 1 біт інформації (рис. 2.41).

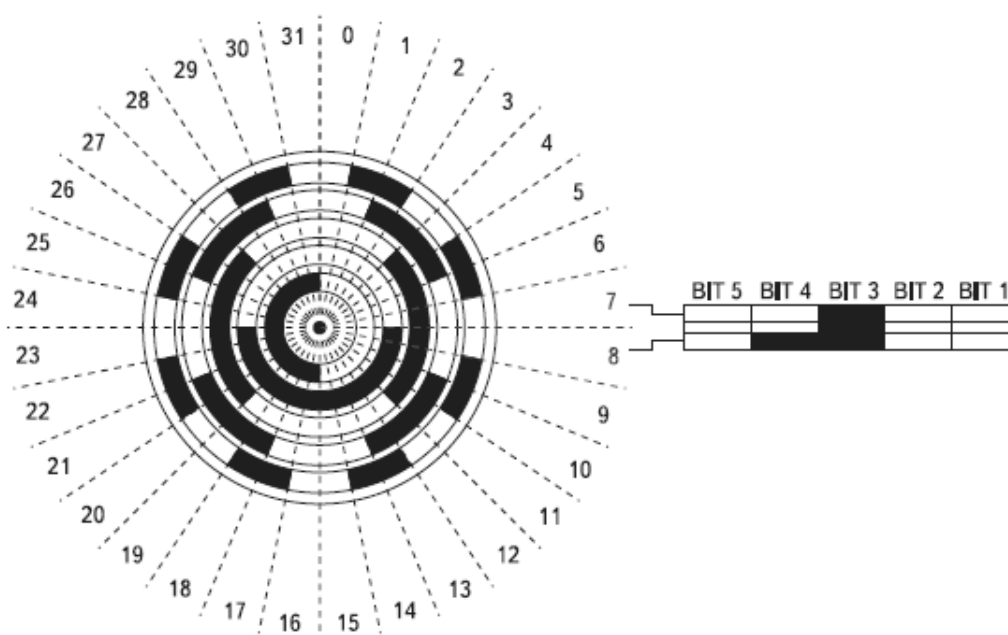


Рисунок 2.41 – Принцип створення коду положення в абсолютному датчику

Дозвіл N залежить від конструкції датчика. Однообертові датчики послідовного інтерфейсу SSI мають роздільність 12 біт (4096 дискрет на оберт), а багатообертові – 24 біта (4096 дискрет \times 4096 обертів). Таку саме роздільність мають датчики з інтерфейсом PROFIBUS-DP. У датчиків з кодером інтерфейсу з даними (EnDat) роздільність на 1 оберт у 2 рази більше – 8192 дискрети, кількість обертів – 4096 [19].

Слід врахувати, що інкрементальні й кодові датчики є оптикоелектричними приладами й живляться напругою постійного струму.

Резольвери на відміну від енкодерів являють собою електричну машину, яка живиться від спеціального джерела синусоїдальної напруги.

Резольвер – це синусно-косинусний обертальний трансформатор (СКОТ) з чотирма обмотками: двома на статорі й двома на роторі (обмотки збудження, квадратурна, синусна і косинусна). Величина повороту вала двигуна визначається за зсувом синусної й косинусної складових напруги.

Резольвер генерує послідовність синусоїдальних і косинусоїдальних хвильових імпульсів аналогової напруги, які визначають абсолютне положення вала в межах одного оберту. Ці аналогові напруги зазвичай перетворюються на цифрові сигнали інтерфейсною платою резольвера.

Резольвери відрізняються від енкодерів не тільки технічним виконанням, а й монтажем. У енкодерів система електронного керування, як правило, вбудована в корпус, що мінімізує роботи з підключення, але обмежує діапазон робочих температур. Навпаки, при створенні системи керування з резольвера джерело живлення резольвера й інтерфейсна плата знаходяться поза зоною робочих температур. Це дозволяє експлуатувати резольвер у середовищі з підвищеною температурою (до 100 °С).

Практично всі сучасні приводи головного руху (змінного й постійного струму) допускають використання енкодерів у лінії зворотного зв'язку, і лише для невеликої частини з них необхідно застосовувати резольвер.

У приводах подавання з прямолінійним рухом робочого органу для реєстрації положення застосовуються головним чином лінійні вимірювальні системи.

На верстатах з ЧПК застосовуються закриті (захищені від забруднень) вимірювальні системи. Закриті датчики лінійних переміщень поставляються у двох виконаннях:

- з великим профілем корпусу (вимірювана довжина до 30 м);
- з дрібним профілем корпусу (вимірювана довжина до 1 240 мм).

У корпусі закріплено склокерамічну шкалу, на якій нанесено тонким шаром хромове покриття (технологія DIADUR), причому точність поділів лежить у межах мікрометрів.

На рисунку 2.42 наведено пристрій датчика лінійних переміщень.

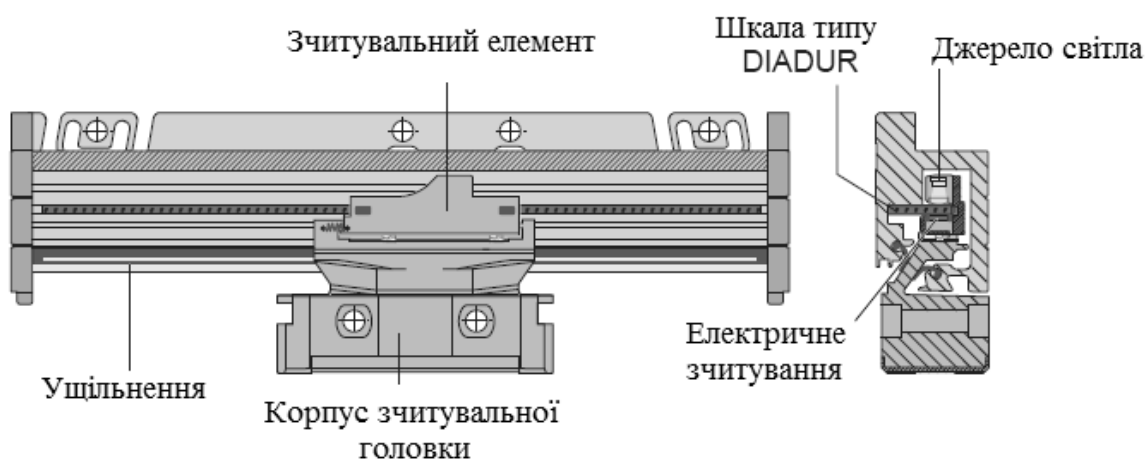


Рисунок 2.42 – Пристрій датчика лінійних переміщень фірми HEIDENHEIN

Приклад. Для контролю кутових швидкостей обертання вала приводних електродвигунів визначимо необхідну роздільну здатність датчика. Розрахунок необхідної роздільної здатності проведемо стосовно найбільш швидкообертального елемента механізму, а саме вала електродвигуна.

Розрахуємо період дискретності:

$$T_0 \leq \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_n}{a_{\text{доп}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{0,6}} = 18 \text{ мс}, \quad (2.131)$$

де ε_n – помилка за швидкістю;

$a_{\text{доп}}$ – допустиме прискорення двигуна.

Датчик визначає швидкість двигуна, яка задається перетворювачем частоти. Час комутації тиристорів становить 3,3 мс. Для стійкості системи період дискретності повинен бути $T_0 = 4$ мс.

Визначимо діапазон регулювання швидкості:

$$D_{\omega} = \frac{\omega_{\text{дв}} \cdot T_0}{d} = \frac{10,6 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{0,001} = 100, \quad (2.132)$$

де d – ціна дискрети. $d = 0,001$,

$\omega_{\text{дв}}$ – кутова швидкість приводного електродвигуна, с^{-1} .

Максимальна роздільна здатність датчика:

$$N_{\text{дш}} \geq \frac{2\pi \cdot D_{\omega}}{T_0 \cdot \omega_{\text{дв}}} = \frac{2\pi \cdot 100}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 10,6} \approx 6200 \frac{\text{дискрет}}{\text{об}}. \quad (2.133)$$

Визначимо кількість розрядів для задавання коду швидкості:

$$n_{\text{ш}} = \log_2 N_{\text{дш}} = \log_2 6200 = 13 \text{ розрядів}. \quad (2.134)$$

Приймаємо абсолютний датчик 6FX2001-5HS12 із синхронним інтерфейсом SSI і необхідною роздільною здатністю 13 розрядів. Застосування абсолютного датчика викликано тим, що він має необхідну роздільну здатність, коли в інкрементальних датчиках найбільша роздільна здатність $5000 \frac{\text{дискрет}}{\text{об}}$. Технічні характеристики абсолютного датчика Siemens 6FX2001-5HS12 [19]:

- робоча напруга – 10...30 В DC;
- швидкість передачі – 100 кГц...1 МГц;
- довжина кабелю при частоті проходження імпульсів 300 кГц – 400 м.

2.4.7 Вимірювання ваги. Дозування

Зважування й дозування є ключовими елементами технологічних процесів. Також для успішної реалізації технології потрібна комплексна система автоматизації. Із системою вимірювання ваги/дозування вбудованої в Simatic. Siemens пропонує комплексне рішення у ваговимірювальних технологіях для відстеження матеріальних потоків і передавання даних на операторські станції для планування необхідної маси матеріалів, документування процесу виробництва й реалізації комплексної автоматизації. Завдяки вбудовуванню ваговимірювальних систем у системи автоматизації всі вимоги можуть бути реалізовані.

Для вирішення завдань вимірювання ваги/дозування з високими вимогами щодо точності й швидкості є функціональний модуль SIWAREX (FM) Simatic S7-300 і може безпосередньо встановлюватися на задню шину Simatic S7-300. Поряд з великими функціями зважування SIWAREX керує дозуванням незалежно від часу циклу системи автоматизації. Такі функції, як грубе/точне дозування, автоматичне додаткове дозування з/без режиму порціонування, а також автоматична оптимізація моменту відсікання потоку сипучої суміші для забезпечення оптимальної точності дозування [19].

Два послідовні інтерфейси (TTY і RS 232) SIWAREX служать для підключення принтера й дистанційного індикатора або PC для параметрування функціонального модуля. У якості альтернативи ці інтерфейси можуть використовуватися також і для послідовного з'єднання (3964R або SIWAREX-протокол) з головним обчислювальним пристроєм (наприклад, PC). Поряд з обома послідовними інтерфейсами на модулі є 4 цифрові виходи, 3 цифрові входи і один аналоговий вихід.

Функції входів і виходів визначаються залежно від цілей використання.

Загальний вигляд SIWAREX M з клемними підключеннями наведено на рисунку 2.43 [19].

Основне завдання SIWAREX M – вимірювання напруги на виході датчика й перетворення цієї величини на значення ваги. Для вимірювання ваги використовуються 2 точки інтерполяції. За необхідності сигнал може бути попередньо оброблений за допомогою цифрового фільтра. Основні сфери застосування SIWAREX M:

- вимірювання ваги на комерційних вагах;
- платформні й автомобільні ваги;
- однокомпонентні ваги;
- багатоконпонентні ваги;
- ваги-дозатори;
- ваги у вибухонебезпечних зонах (з Ex(i) бар'єром);
- вимірювальний перетворювач ваги на інші типи ваг.

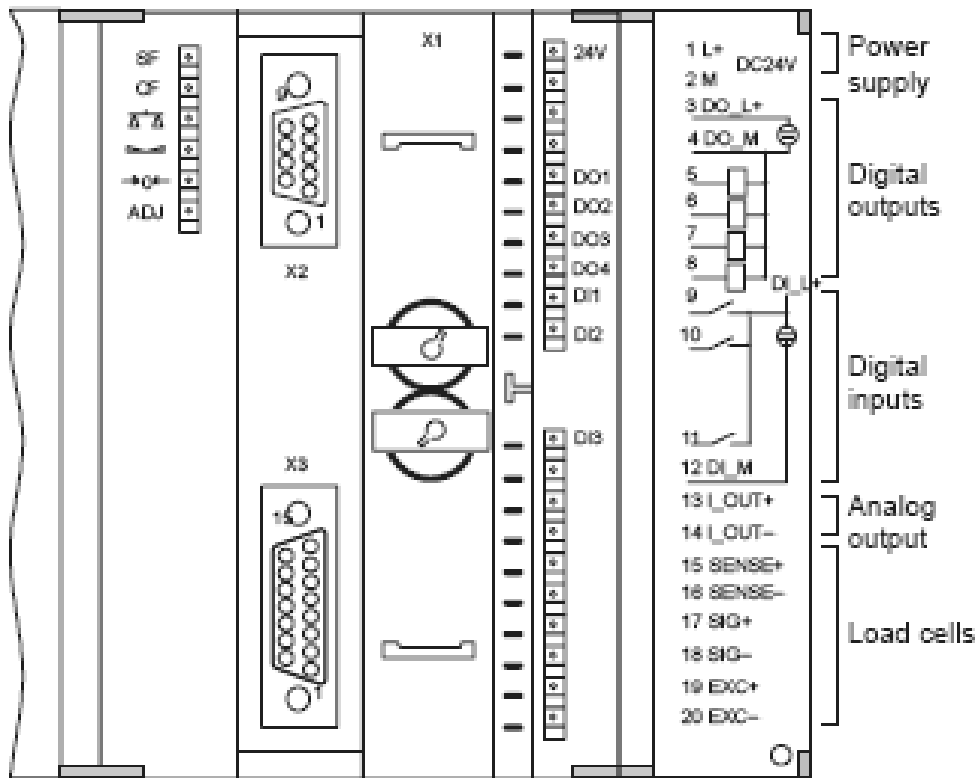


Рисунок 2.43 – Загальний вигляд SIWAREX M з клемними підключеннями

На додаток до функції вимірювання ваги SIWAREX M контролюють дозування незалежно від циклу системи керування. Такі функції, як точне й грубе дозування, автоматичне змішування з/без функції «дотягування», також з функцією оптимізації точного дозування дозволяють оптимально вирішити будь-яке завдання дозування.

Датчики ваги або зусилля, що підключаються до SIWAREX M, повинні мати такі характеристики:

- напруга живлення 10,3...24 В;
- спосіб вимірювання на основі резистивного моста;
- живлення датчиків гальванічно роздільне від 24 В живлення модуля.

При підключенні тензометричних датчиків рекомендується застосувати 6-провідне підключення для з'єднання коробки. Якщо застосовується 6-провідне підключення, то усувається термопомилка проводів.

На рисунку 2.44 застосовано 6-провідне підключення, що дозволяє усунути термопомилку проводів і підвищити точність вимірювання ваги.

Приклад. Датчик визначає вагу в бункері, час комутації електронних елементів якого становить 3,3 мс. Для стійкості системи період дискретності повинен бути $T_0 = 4$ мс.

Визначимо діапазон регулювання:

$$D_B = \frac{M \cdot T_0}{d} = \frac{147 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{0,001} = 586, \quad (2.135)$$

де d – ціна дискрети: $d = 0,001$,
 M – максимальна вага, c^{-1} .

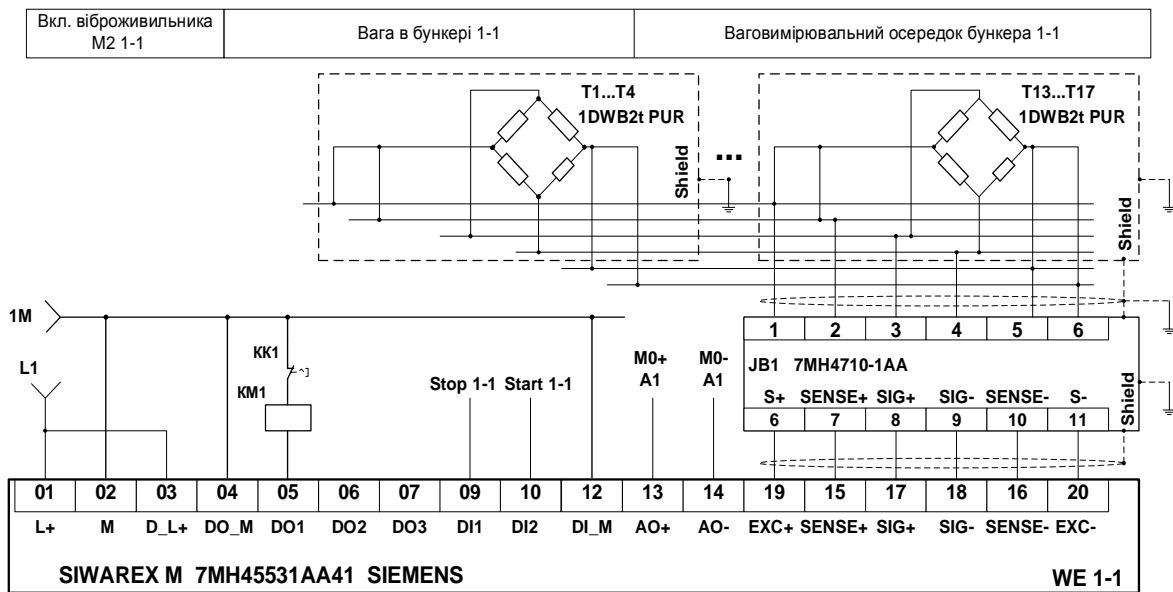


Рисунок 2.44 – Схема зовнішніх підключень ваговимірювальних датчиків

Максимальна роздільна здатність датчика:

$$N_{ДВ} \geq \frac{2\pi \cdot D_B}{T_0 \cdot \omega_{об}} = \frac{2\pi \cdot 586}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 147} \approx 6200 \frac{\text{дискрет}}{\text{вага}}. \quad (2.136)$$

Визначимо кількість розрядів для задавання коду:

$$n_B = \log_2 N_{ДВ} = \log_2 6200 = 13 \text{ розрядів}. \quad (2.137)$$

3 ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

У третьому розділі виконується розроблення структурної електричної й електричних схем зовнішніх підключень технічних засобів автоматизації до модулів станції центрального програмованого логічного контролера (ПЛК) для реалізації завдань керування.

3.1 Розроблення структурної електричної схеми АСК

Розроблення структурної схеми здійснюється на початкових стадіях проектування й передує розробленню схем інших типів. Структурна схема визначає основні функціональні частини виробу, їх призначення та взаємозв'язки між ними. Схема відображає принцип дії виробу в найзагальнішому вигляді.

Дійсне розташування складових частин на структурній схемі не враховують і спосіб зв'язку не розкривають. Побудова схеми має давати наочне уявлення про склад АСК, послідовність взаємодії її функціональних частин. Функціональні частини на схемі зображують у вигляді прямокутників або умовних графічних позначок. При зображенні функціональних частин у вигляді прямокутників їх найменування, типи і позначки вписують всередину прямокутників.

Напрямок ходу процесу, що відбувається в АСК, позначають стрілками, що з'єднують функціональні частини. На схемах простих АСК ТП функціональні частини розташовують у вигляді ланцюжка відповідно до ходу робочого процесу в напрямку зліва направо. Схеми, що містять кілька основних робочих каналів, рекомендується креслити у вигляді паралельних горизонтальних рядків.

Нижче на кількох прикладах показано правила й особливості побудови структурних схем пристроїв і систем [1].

На рисунку 3.1 наведено структурну схему автоматичної системи регулювання теплопостачання й гарячого водопостачання (ГВП) будівлі.

Система містить такі функціональні частини:

1) вузол обліку теплової енергії, за допомогою якого визначається кількість спожитої теплової енергії та витрати гарячої води;

2) система регулювання опалення призначена для підтримання заданої температури й тиску теплоносія (води) у контурі опалення, заданої температури повітря в приміщеннях будівлі;

3) система регулювання ГВП призначена для підтримання необхідної температури й тиску гарячої води;

4) система електропостачання всіх блоків автоматичної системи регулювання,

5) персональний комп'ютер.

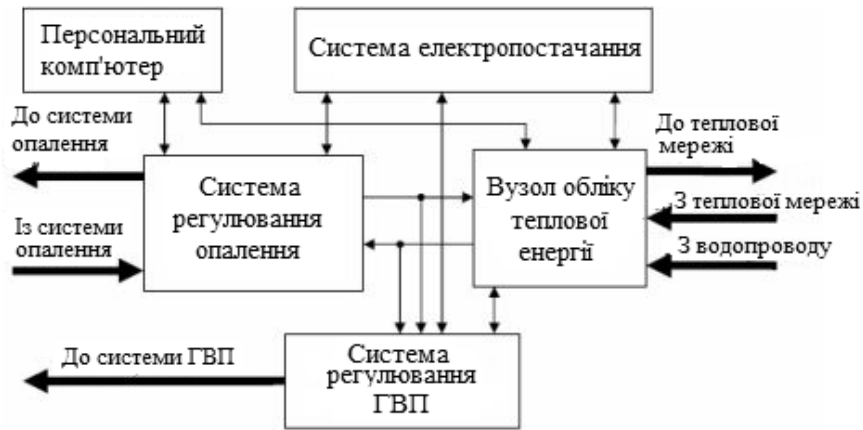


Рисунок 3.1 – Приклад оформлення структурної електричної схеми АСК теплопостачання будівлі

Особливістю цієї схеми є те, що на ній показані не тільки зв'язки між окремими блоками системи регулювання, а й напрямки потоків теплоносія та гарячої води.

Для складних АСК ТП, що складаються з декількох функціональних частин, для кожної частини також можуть бути розроблені їхні структурні схеми.

На структурній схемі допускається вказувати характеристики функціональних частин, пояснювальні написи й діаграми, що визначають послідовність процесів у часі, а також параметри в характерних точках (величини струмів, напруг, форми й величини імпульсів тощо). Дані розташовуються поруч з графічною позначкою або на вільному полі схеми (рис. 3.2).

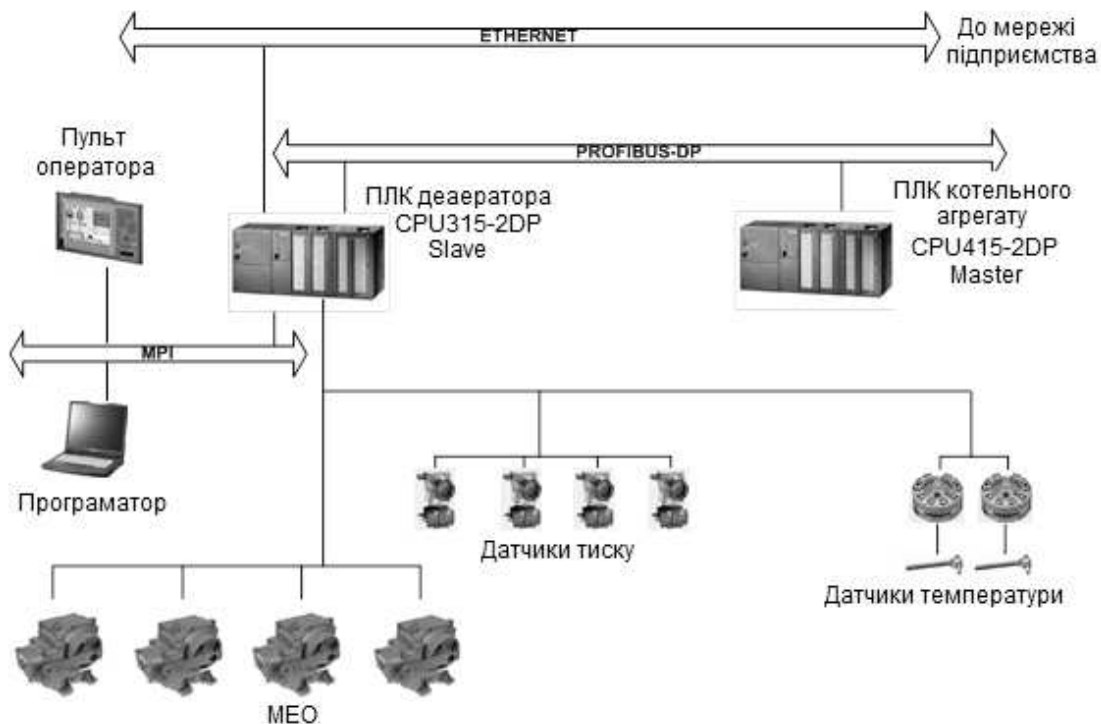


Рисунок 3.2 – Приклад оформлення структурної електричної схеми АСК деаераторної установки

Після закінчення проектування структурна схема АСК включається до експлуатаційної документації.

Після розроблення структурної та функціональної схем автоматизованої системи керування виконується:

- аналіз інформаційних і керівних сигналів, необхідних для реалізації технологічного процесу в автоматизованому режимі;
- вибір керівного пристрою (програмованого логічного контролера) і його периферії;
- об'єднання систем керування розподілених технологічних ділянок промислової мережі в єдиний комплекс з метою централізованого керування.

3.2 Вибір технічних засобів автоматизації на базі програмованих логічних контролерів

Предметом проектування є цифрова система керування локального рівня, яка містить у собі такі компоненти [18]:

- засоби керування й організація інтерфейсу;
- інформаційні пристрої;
- виконавчі пристрої;
- перетворювальні пристрої;
- апаратура з'єднання;
- щити й пульти керування для розміщення засобів керування й контролю;
- алгоритмічне й програмне забезпечення.

Розроблення проектної документації виконується в такій послідовності.

На першому етапі об'єкт керування декомпонується на окремі вузли й механізми так, щоб можна було визначити:

- місця розташування зон концентрації інформаційних, перетворювальних і виконавчих пристроїв і відстані між цими зонами;
- місця встановлення шаф і пультів керування;
- засоби, необхідні для з'єднання територіально розподілених пристроїв;
- інформацію, яка повинна відображатися на панелі оператора.

З цією метою корисно скласти план розташування апаратних засобів системи.

Зараз для контролю й керування широко застосовуються багатофункціональні агрегатовані системи. Практично всі сучасні системи керування технологічного рівня забезпечують можливість інтеграції в системи верхніх рівнів керування за допомогою їх підключення до промислової мережі Ethernet.

При виборі апаратури керування важливо врахувати, яку інформаційну, апаратну й програмну підтримку забезпечує виробник цієї апаратури. Під час проектування рекомендується віддавати перевагу технічним засобам автоматизації (ТЗА) фірми Siemens AG на базі технології Simatic. При виборі ТЗА інших виробників слід приділяти увагу:

- номенклатурі пропонованих засобів автоматизації;
- спектру послуг, що надаються у сфері автоматизації проектного об'єкта;
- можливості розподілу в просторі апаратної частини за допомогою промислових польових шин;
- можливості інтеграції в системи верхніх рівнів керування за допомогою їх підключення до промислової мережі Industrial Ethernet.

Після вибору системи автоматизації із застосуванням програмованого логічного контролера аналізуються інформаційні й керівні сигнали технологічного процесу й засоби їх вимірювання. Аналізувати доцільно в табличній формі (табл. 3.1).

Приклад заповнення таблиці відповідно до наведеної вище функціональної схеми автоматизації деаераторної установки (див. рис. 3.2) наведено в таблиці 3.2.

За складеною таблицею аналізується тип інформаційних і керівних сигналів. Сигнали групуються за типами, і підраховується кількість однотипних сигналів. За результатами підрахунків визначається необхідна кількість сигнальних модулів проектованої АСК ТП.

3.3 Конфігурація та параметрування апаратури центральних станцій у середовищі STEP 7

Порядок конфігурації й параметрування стійок

Під *конфігуруванням* розуміється розміщення інтерфейсних, функціональних і комунікаційних модулів, а також стійок у вікні станції. Стійки подаються за допомогою конфігураційної таблиці, яка, як і реальна стійка, допускає певну кількість встановлюваних модулів [18; 20].

Параметрування

Під параметруванням розуміють установлення властивостей модулів. Наприклад, для CPU встановлюється час контролю циклу, для шини PROFIBUS встановлюються параметри шини, провідного й ведених модулів. Параметризація дозволяє легко замінювати модулі, тому що встановлені параметри автоматично завантажуються в новий модуль у процесі запуску.

Властивості програмованих контролерів і модулів S7 встановлюються за умовчанням. Однак конфігурація обов'язково виконується в таких випадках, якщо:

Таблиця 3.1 – Форма таблиці аналізування інформаційних і керівних сигналів АСК

Параметр	Позначка на схемі	Одиниці вимірювання	Тип сигналу				Межі вимірювання датчика (виконавчого мех.)	Межі зміни параметра	Назва вимірювального пристрою (виконавчого мех.)	Діапазон вх./вих. сигналу
			DI	DO	AI	AO				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Таблиця 3.2 – Контрольовані й керівні параметри АСК деаераторної установки

Параметр	Позначка на схемі	Одиниці вимірювання	Тип сигналу				Межі вимірювання датчика (виконавчого мех.)	Межі зміни параметра	Назва вимірювального пристрою (виконавчий мех.)	Діапазон вх./вих. сигналу
			DI	DO	AI	AO				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Регулювання тиску води в деаераторі	PE1 PT	МПа	-	-	+	-	4...20 мА	0,6	Метран-150NG-2	0...1
Клапан регульівний ЕМГ М1 (відчинено)	HS NS	%	-	-	+	-	-/-	0...100	МЕО	0...100
Клапан регульівний ЕМГ М1 (відчинено)	HS NS	%	-	+	-	-	24 В	-	МЕО	-
Клапан регульівний ЕМГ М1 (зачинено)	HS NS	%	-	+	-	-	-/-	-	МЕО	-
Клапан регульівний ЕМГ М1 (відчинено)	HS NS	%	+	-	-	-	-/-	-	МЕО	-
Клапан регульівний ЕМГ М1 (зачинено)	HS NS	%	+	-	-	-	-/-	-	МЕО	-
Температура води на вході до деаератора	TE1 TT	°С	-	-	+	-	4...20 мА	0...60	ТСПУ Метран-276Ex	0...100
Регулювання тиску пари в деаераторі	PE4 PT	МПа	-	-	+	-	-/-	0,12	Метран-150NG-2	0...1
Клапан регульівний ЕМГ М2 (відчинено)	HS NS	%	-	-	+	-	-/-	0...100	МЕО	0...100
Клапан регульівний ЕМГ М2 (відчинено)	HS NS	%	-	+	-	-	24 В	-	МЕО	-

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Клапан регульований ЕМГ М2 (зачинено)	HS NS	%	-	+	-	-	-//-	-	МЕО	-
Клапан регульований ЕМГ М2 (відчинено)	HS NS	%	+	-	-	-	-//-	-	МЕО	-
Клапан регульований ЕМГ М2 (зачинено)	HS NS	%	+	-	-	-	-//-	-	МЕО	-
Рівень води в деаераторі	LE LT	-	-	-	+	-	4...20 мА	170	Rosemount 3100	-
Клапан регульований ЕМГ М4 (відчинено)	HS NS	%	-	-	+	-	-//-	0...100	МЕО	0...100
Клапан регульований ЕМГ М4 (відчинено)	HS NS	-	-	+	-	-	24 В	-	МЕО	-
Клапан регульований ЕМГ М4 (зачинено)	HS NS	-	-	+	-	-	-//-	-	МЕО	-
Клапан регульований ЕМГ М4 (відчинено)	HS NS	-	+	-	-	-	-//-	-	МЕО	-
Клапан регульований ЕМГ М4 (зачинено)	HS NS	-	+	-	-	-	-//-	-	МЕО	-
Клапан регульований ЕМГ М4 (зачинено)	HS NS	-	+	-	-	-	-//-	-	МЕО	-
Тиск води на виході деаератора	PE3 PT	МПа	-	-	+	-	4...20 мА	0,1...0,15	Метран-150NG-2	0...1
Температура води на виході деаератора	TE2 TT	°С	-	-	+	-	-//-	0...100	ТСПУ Метран-276 Ex	0...100
Клапан регульований ЕМГ М3 (відчинено)	HS NS	%	-	-	+	-	-//-	0...100	МЕО	0...100
Витрата води на вході деаератора	FE FT	м³/ч	-	-	+	-	-//-	2...7	Rosemount 8800D-57-S-A1-E-D-A1	0,8...30
Клапан регульований ЕМГ М3 (відчинено)	HS NS	-	-	+	-	-	24 В	-	МЕО	-
Клапан регульований ЕМГ М3 (зачинено)	HS NS	-	-	+	-	-	-//-	-	МЕО	-
Клапан регульований ЕМГ М3 (відчинено)	HS NS	-	+	-	-	-	-//-	-	МЕО	-
Клапан регульований ЕМГ М3 (зачинено)	HS NS	-	+	-	-	-	-//-	-	МЕО	-

- необхідно змінити параметри модуля, встановлені за умовчанням, наприклад: дозволити для модуля переривання процесу;
- потрібно проектувати комунікаційні з'єднання;
- використовується шина PROFIBUS-DP, на яку встановлюються станції з децентралізованою периферією;
- створюються станції S7-300 / 400 з декількома CPU або стійками розширення;
- проектуються системи підвищеної надійності (H).

Основний порядок конфігурування апаратури

Для конфігурування системи автоматизації в додатку Hardware Configuration використовуються два вікна:

- вікно станції Simatic Station, у якому розміщуються стійки;
- вікно Hardware Catalog (Каталог апаратури), з якого вибираються необхідні апаратні компоненти (стійки, сигнальні та інтерфейсні модулі).

На рисунку 3.3 центральна стійка позначена (0) UR, де 0 – порядковий номер стійки, UR – тип стійки (Universal Rack – універсальна стійка).

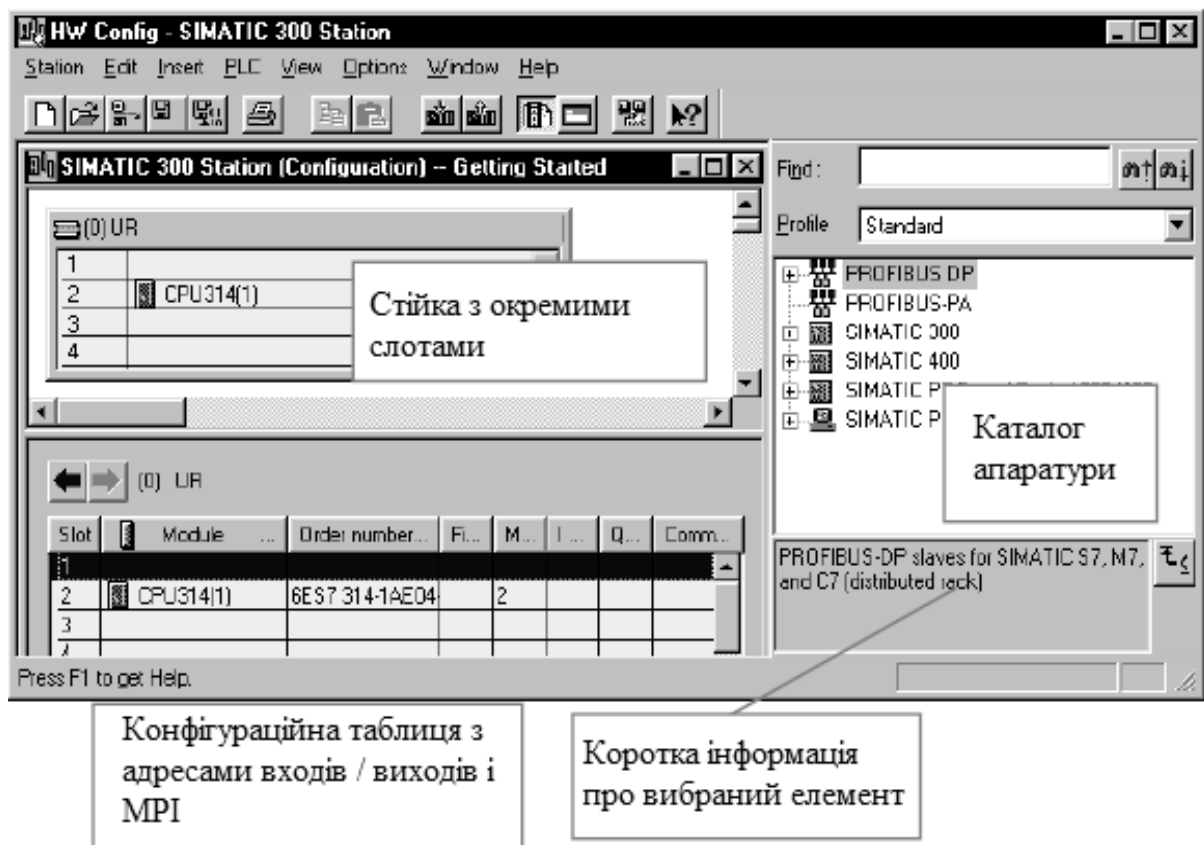


Рисунок 3.3 – Розташування вікон інтерфейсу в середовищі конфігурації HW Config

Процес конфігурації полягає в тому, що необхідні компоненти вибираються у вікні Hardware Catalog і переносяться у вікно станції.

Центральна станція складається з головної стійки і стійок розширення. Компонування станції відображається в конфігураційній таблиці стійки, розташованій під вікном станції (рис. 3.4). У таблиці присутні номери слотів, назви модулів, їхні адреси та номери замовлень.

Слот	Модуль	Номер замовлення	Адреса MPI	Коментар			
Slot	Module	Order number	Firmware	MPI address	I addr...	Q addr...	Comment
1	PS 307 10A	6ES7 307-1KA00-0AA0					
2	CPU 314	6ES7 314-1AE01-0AB0	2				
3							
4	DI8xAC120/230V	6ES7 321-1FF10-0AA0			0		
5	AI8x12Bit	6ES7 331-7KF02-0AB0			272...287		
6	AI8x16Bit	6ES7 331-7NF10-0AB0			288...303		
7	AI8xTC/4xRTD, Ex	6ES7 331-7SF00-0AB0			304...319		
8	AO2x12Bit	6ES7 332-5HB00-0AB0				320...323	
9	AO2x12Bit	6ES7 332-5HB81-0AB0				336...339	
10							
11							

Рисунок 3.4 – Вид таблиці конфігурації стійки

Основний порядок параметрування

Після того, як компонент розміщений у вікні станції, можна перейти до режиму діалогу для зміни встановлених за умовчанням параметрів або адрес (режим параметрування).

Для переходу до вікна встановлення властивостей компонента можна застосувати один із способів:

- двічі клацнути на компоненті лівою кнопкою миші;
- вибрати команду меню Edit ⇨ Object Properties (Редагування ⇨ Властивості об'єкта);

– за допомогою правої кнопки миші вибрати з контекстного меню команду Object Properties (Властивості об'єкта).

Для налагодження поведінки системи особливе значення мають властивості CPU. На вкладках CPU можна встановити характеристики запуску, області локальних даних і пріоритети для переривань, області пам'яті, характеристики реманентності (збереження даних у пам'яті після вимкнення живлення), тактові меркери, рівень захисту й пароль.

У вкладці General (Загальне) CPU можна параметрувати інтерфейси, наприклад MPI або вбудований інтерфейс PROFIBUS-DP.

Правила конфігурації й параметрування [18; 20]

STEP 7 контролює правильність конфігурації станції. При цьому автоматично перевіряються адресні області, так що одна й та сама адреса не може бути зайнята двічі.

Порядок розташування модулів у слотах показаний на рисунку 3.5.

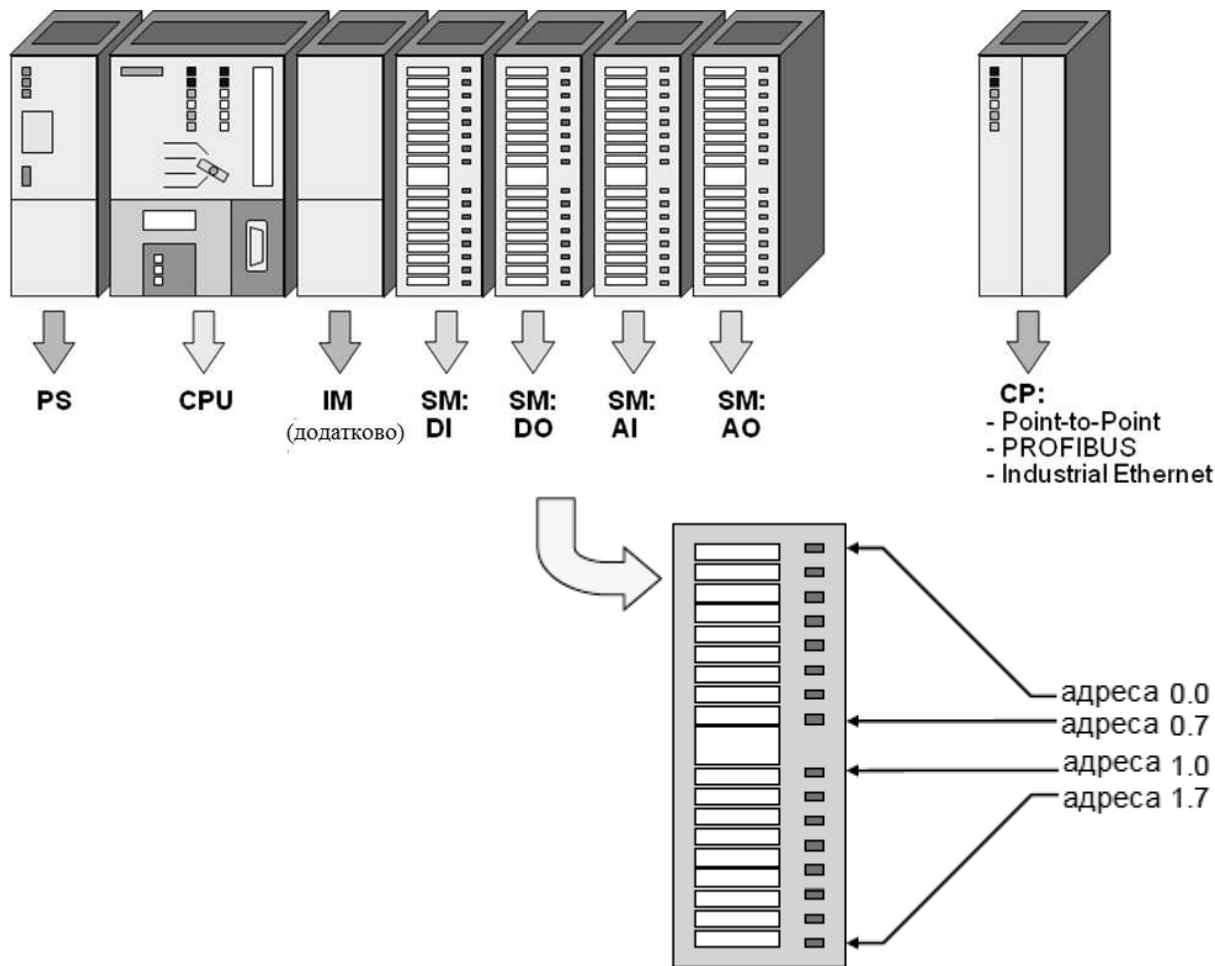


Рисунок 3.5 – Схема розташування модулів у слотах і автоматичної адресації входів-виходів

Слот 1 призначений для встановлення модуля живлення (PS). Процесорний модуль повинен бути встановлений у слот 2 головної станції (CPU). У станціях S7-300 слот 3 резервується для встановлення інтерфейсного модуля (IM), а слот 4 є першим місцем для встановлення модулів введення-виведення (SM), комунікаційних процесорів (CP) або функціональних модулів (FM).

На рисунку 3.5 показано розміщення модулів. Якщо в слоті 4 встановлений цифровий модуль, то адресація входів-виходів починається з адреси 0. Для кожного слота зарезервовано 4 байта адреси. Незавжди визначити, що в цифровому модулі, наприклад, слота 6 адресація буде починатися з 8.0.

Примітка. Адреси входів позначаються символом I, наприклад I 4.0, а адреси виходів – символом Q.

Збереження конфігурації станції S7-300

Щоб зберегти конфігурацію з усіма встановленими параметрами і адресами, необхідно вибрати команду меню *Station* ⇒ *Save* або команду меню *Station* ⇒ *Save and Compile* (*Станція* ⇒ *Зберегти і скомпілювати*).

Для збереження незакінченої конфігурації виберіть команду меню *Station* ⇒ *Save*.

Указівки щодо конфігурації станції S7-300

Створення станції. Станція може створюватися тільки безпосередньо під проектом. Тому спочатку необхідно виділити проект у лівій частині вікна, а потім вибрати команду меню *Insert* ⇒ *Station* ⇒ *Simatic 300-Station* (*Вставити* ⇒ *Станція* ⇒ *Станція Simatic 300*).

Станція створюється з ім'ям, даним за умовчанням. Це ім'я можна замінити іншим, більш інформативним.

Після створення станції необхідно:

1. Виділити у вікні проектів об'єкт *Station*, після чого в правій частині вікна станції стає видимим об'єкт *Hardware* (*Апаратура*).

 – об'єкт «Station»,  – об'єкт «Hardware».

Можна також виділити об'єкт *Station* і вибрати команду меню *Edit* ⇒ *Open Object* (*Редагувати* ⇒ *Відкрити об'єкт*).

У результаті на екрані з'являються вікно станції і каталог модулів.

У вікні станції можна помістити стійку й інші компоненти відповідно до структури станції, а з каталогу модулів у вікні *Hardware Catalog* вибрати необхідні для побудови станції компоненти.

Командою меню *Station* ⇒ *New* (*Станція* ⇒ *Новая*) можна конфігурувати в тому самому проекті ще одну станцію.

Проектування центральної стійки. Центральна стійка проектується в такій послідовності:

1. У вікні *Hardware Catalog* потрібно вибрати центральну стійку (*Rack*). Для *Simatic 300* це профільна шина (*Rail*), для *Simatic 400* може бути, наприклад, універсальна стійка (*UR1*).

2. Використовуючи метод *Drag & Drop*, слід відбуксирувати стійку у вікно станції. Стійка з'являється у вигляді невеликої конфігураційної таблиці у верхній частині вікна станції. У нижній частині вікна станції з'являється докладний вигляд стійки з додатковими даними: рекомендованим номером, адресою *MPI*, адресами входів/виходів.

3. Компонування стійки здійснюється в такій послідовності [18; 20].

4. Вибирається модуль з вікна *Hardware Catalog*. При цьому слоти, у які можна встановити цей модуль, виділяються кольором.

5. З використанням *Drag & Drop* модуль буксирується до відповідного рядка стійки. При цьому *STEP 7* перевіряє, чи не порушені правила для слотів.

6. Кроки 1 і 2 повторюються доти, поки стійка не буде повністю оснащена бажаними модулями.

Примітка: При виділенні слота в стійці можна побачити список усіх можливих для установлення модулів. Для цього необхідно правою кнопкою миші відкрити контекстно-залежне меню і в ньому вибрати *Insert*

Object (*Вставити об'єкт*) або Replace Object (*Замінити об'єкт*). Ця можливість позбавляє від необхідності пошуку апаратури в каталозі.

Відображення інтерфейсів і інтерфейсних модулів. Інтерфейси або інтерфейсні модулі відображаються в конфігураційній таблиці у власному рядку. Цей рядок позначено так само, як і конектор інтерфейсу, наприклад X1.

За наявності вбудованих інтерфейсів ім'я інтерфейсу з'являється в стовпці Module (*Модуль*). Для встановлення інтерфейсних модулів потрібно перенести відповідний інтерфейсний модуль (IF) з вікна Hardware Catalog до відповідного рядка, використовуючи Drag & Drop.

Якщо CPU має більше ніж одну версію операційної системи, то він показується у вікні Hardware Catalog як папка з іконками, що мають різні порядкові номери.

Конфігурація стійок розширення для Simatic 300. Для станцій Simatic 300 як у якості центральної стійки, так і в якості стійок розширення використовуються тільки профільні шини. Кількість профільних шин визначається реальною конструкцією, однак не повинно бути більше ніж чотири.

Стійки розширення з'єднуються в STEP 7 шляхом встановлення відповідних *інтерфейсних модулів*:

- для розширення тільки на одну стійку в стійках 0 і 1 встановлюються модулі IM 365;

- для підключення до трьох стійок розширення в стійці 0 встановлюється модуль IM 360, а в стійках з 1 по 3 – модулі IM 361.

Правила заповнення слотів станції S7-300 у стійках полягають у такому.

Стійка 0:

- Слот 1: тільки блок живлення (наприклад, 6ES7 307 -...) або порожній.

- Слот 2: тільки CPU (наприклад, 6ES7 314 -...).

- Слот 3: інтерфейсний модуль (наприклад, 6ES7 360) або порожній.

- Слоти з 4 по 11: сигнальні або функціональні модулі, комунікаційні процесори або порожні.

Стійки з 1 по 3:

- Слот 1: тільки блок живлення (наприклад, 6ES7 307 -...) або порожній.

- Слот 2: порожній.

- Слот 3: інтерфейсний модуль.

- Слоти з 4 по 11: сигнальні або функціональні модулі, комунікаційні процесори (залежно від використовуваного інтерфейсного модуля) або порожні.

Приклад конфігурації станції S7-300 наведено на рисунку 3.6.

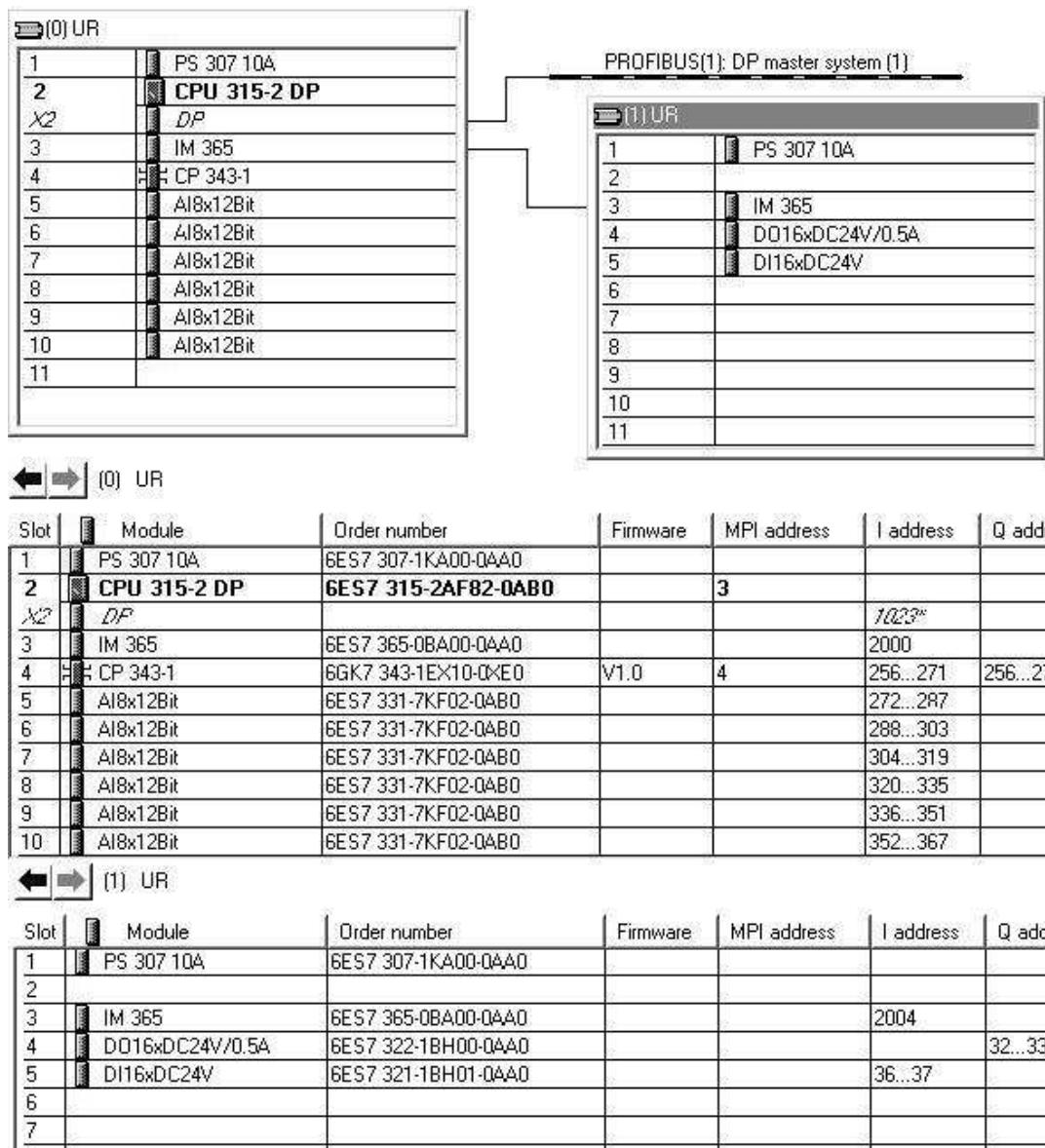


Рисунок 3.6 – Приклад конфігурації стійок

3.4 Проектування електричних схем підключення технічних засобів автоматизації до сигнальних модулів станції Simatic S7-300

Розглянемо особливості та електричні схеми підключення датчиків температури, а саме термопар до аналогових модулів введення інформації SM331 фірми Siemens AG [21; 22].

Для підключення необхідно дотримуватися таких умов:

- термопары повинні встановлюватися на мінімальній відстані від аналогового модуля для безпосереднього підключення кабелю до модуля;
- у разі віддаленого розташування термопар від аналогового модуля компенсаційні проводи замінюються на мідні, підключення яких здійснюється через проміжний клемник, поруч з яким встановлюється зовнішній компенсаційний блок.

Структурна схема підключення термопар до аналогових модулів введення інформації SM331 станції Simatic S7-300 наведена на рисунку 3.7.

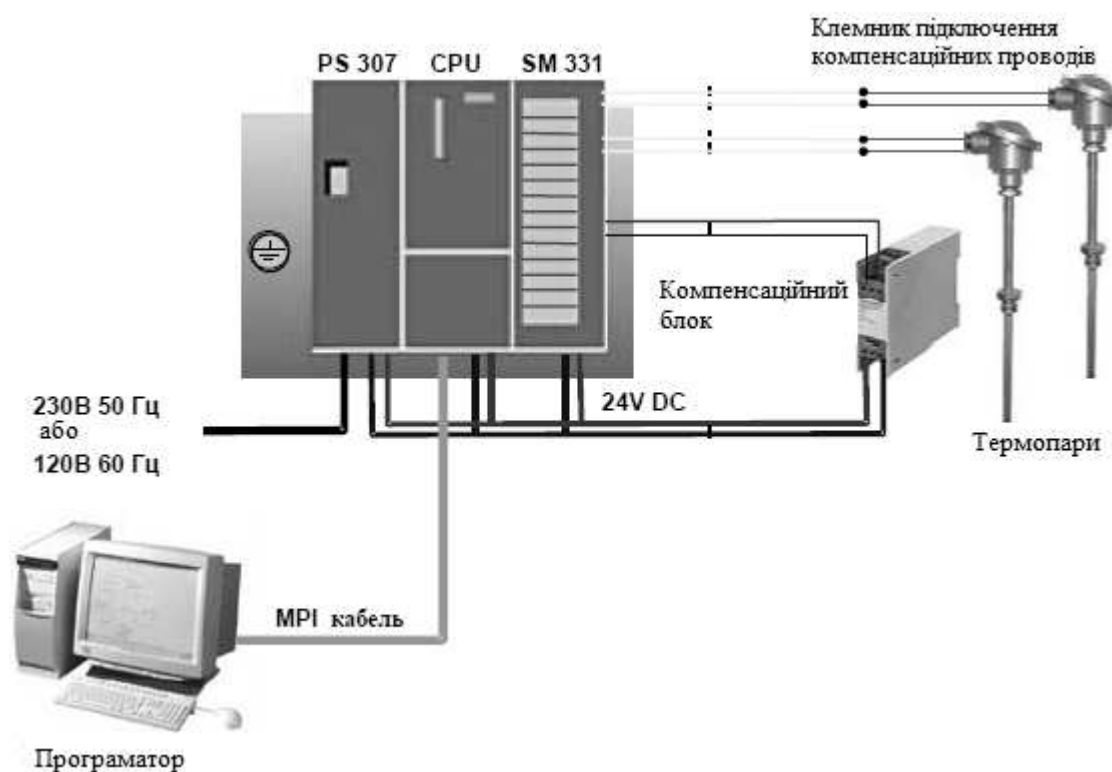


Рисунок 3.7 – Структурна схема підключення термопар до аналогових модулів введення інформації SM331 станції Simatic S7-300

При підключенні термопар монтаж аналогового модуля SM331 відрізняється тільки вибором використовуваної компенсації температури холодного спаю:

- внутрішня;
- зовнішня.

Необхідно використовувати для аналогових сигналів екрановані кручені пари провідників. Це підвищує перешкодозахищеність. Екран при цьому повинен заземлюватися з обох сторін. При виникненні деякої різниці потенціалів між кінцями екрана, може з'явитися компенсаційний струм, який викликає наведення на аналоговий сигнал. У цьому разі треба заземлювати один із двох кінців екрана або встановлювати компенсуючі провідники. Особливості підключення термопар до аналогових модулів введення наведено в таблиці 3.3.

Функціональну електричну схему підключення термопар за допомогою компенсаційних проводів з внутрішньою компенсацією температури холодного спаю наведено на рисунку 3.8.

Слід зазначити, що компенсаційний провід завжди виготовляється з того самого матеріалу (сплаву), що й сама термопара, а також до групи каналів повинні підключатися тільки термопари одного типу.

Таблиця 3.3 – Особливості підключення термопар до аналогових модулів введення SM331

Особливості підключення	Використання компенсації	
	внутрішньої	зовнішньої
Використання термопар одного типу	Може бути підключено 8 термопар	
Використання термопар різного типу	До кожної групи каналів може бути підключено 2 термопари однакового типу. Усього 8 термопар 4 різних типів може бути підключено.	Неможливе використання термопар різних типів. Усі канали модуля компенсуються щодо однієї температури холодного спаю. Це означає, що можуть бути підключені тільки 8 термопар одного типу.
Використання з'єднувального проводу	- пряме підключення термопар; - підключення через компенсаційні проводи.	Можна використовувати довгі мідні проводи. Підключення термопар безпосередньо в зоні температури холодного спаю.

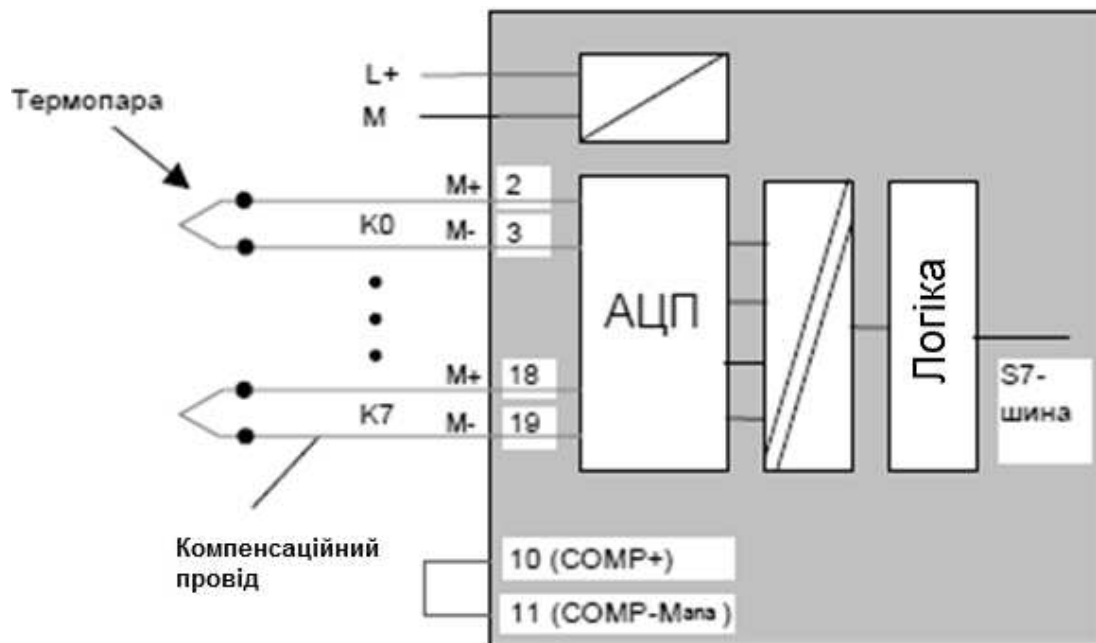


Рисунок 3.8 – Функціональна схема підключення термопар до аналогового модуля SM331 з внутрішньою компенсацією температури холодного спаю

Ілюстрацію підключення термопар до модуля SM331 наведено на рисунку 3.9 [22].

Функціональну електричну схему підключення термопар із зовнішньою компенсацією температури холодного спаю до аналогового модуля SM331 наведено на рисунку 3.10.

Схема, наведена на рисунку 3.11, показує підключення до аналогового модуля SM331:

- термопар через клемник для компенсаційних проводів;
- зовнішнього компенсаційного блоку.

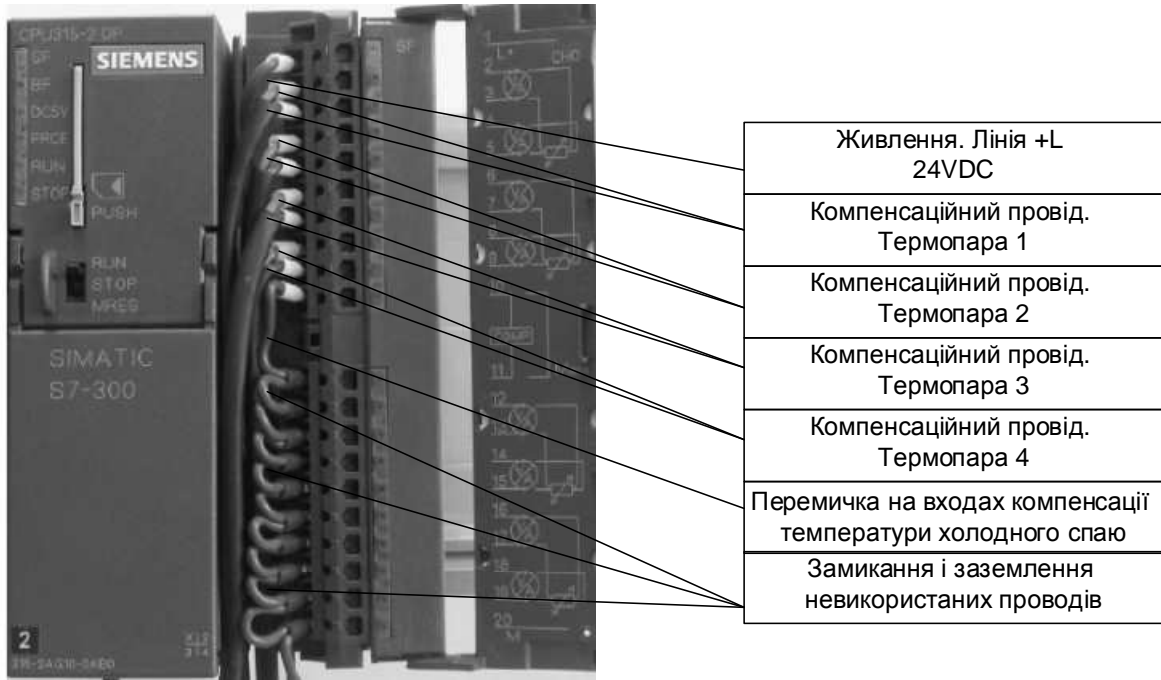


Рисунок 3.9 – Ілюстрація підключення термопар за допомогою компенсаційних проводів з внутрішньою компенсацією температури холодного сну до модуля SM331

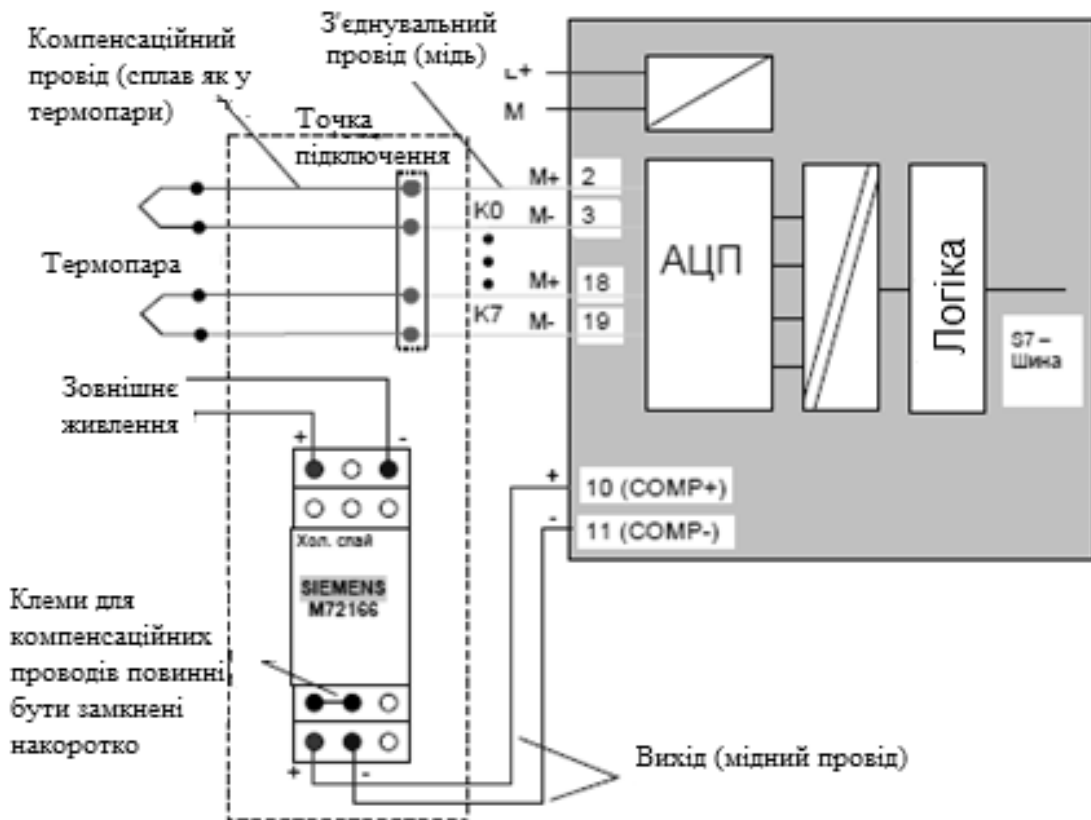
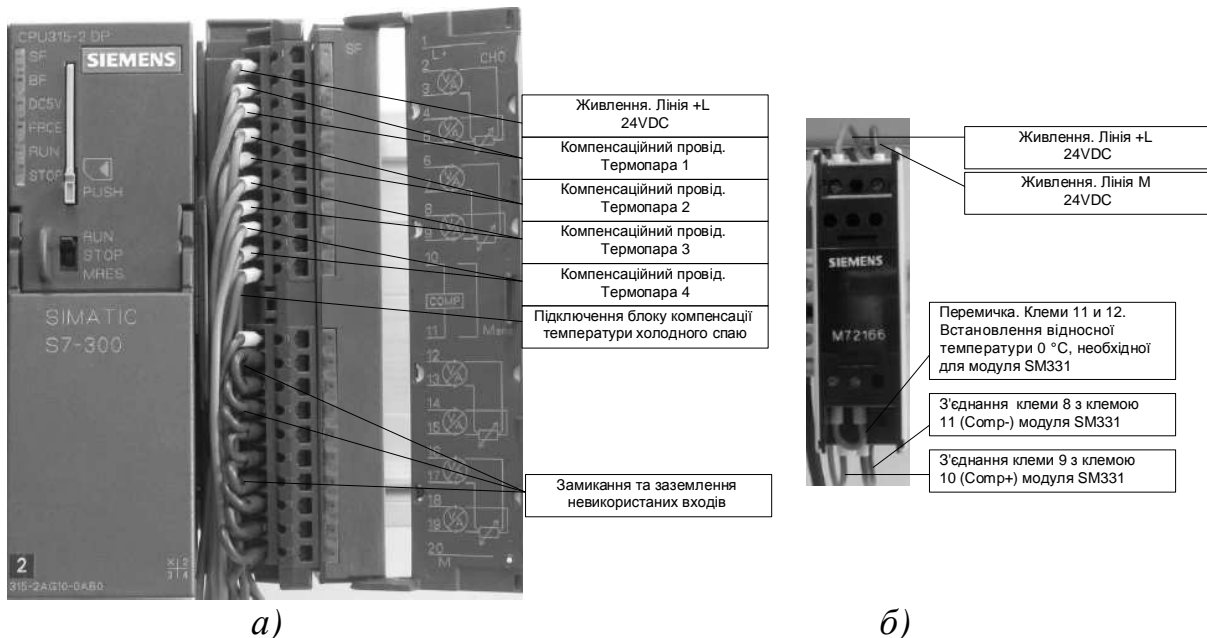


Рисунок 3.10 – Функціональна електрична схема підключення термопар із зовнішньою компенсацією температури холодного сну до аналогового модуля SM331



а – модуль SM331; б – компенсаційний блок

Рисунок 3.11 – Ілюстрація підключення термопар із зовнішньою компенсацією температури холодного снаю до аналогового модуля SM331

При використанні зовнішньої компенсації температури холодного снаю (див. рис 3.11, а), термопары підключаються через компенсаційний клемник. Компенсаційний блок (див. рис. 3.3, б) з мостом з компенсаційних проводів, калібрується за фактичною температурою (температура калібрування). Клемник підключення компенсаційних проводів повинен знаходитися в безпосередній близькості від компенсаційного блоку. Тільки в цьому разі буде забезпечено, що температура навколишнього середовища термопары й компенсаційного блоку буде однаковою [22].

Розглянемо особливості та електричні схеми підключення терморезистора (PT100) до аналогових модулів введення інформації SM331 фірми Siemens AG [21].

Існують три можливості підключення терморезистора:

- 4-провідне з'єднання;
- 3-провідне з'єднання;
- 2-провідне з'єднання.

Різні схеми підключення датчиків опору (терморезисторів) застосовуються у зв'язку з тим, що вимірювальним параметром при застосуванні таких датчиків є опір датчика, однак проводи мають власний опір і вносять тим самим певну похибку.

Наприклад, якщо датчик температури Pt100 при нулі градусів Цельсія (опір 100 Ом) підключений за двома провідними схемами мідним проводом перерізом 0,12 мм, довжина кабелю 3 м, то два проводи в сумі дадуть опір близько 0,5 Ом. Унаслідок набігає похибка – датчик показує сумарний опір 100,5 Ом, що відповідає температурі приблизно 101,2 °С.

Цю похибку можна скоригувати приладом (якщо прилад це дозволяє), увівши коригування на $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однак таке коригування не може повністю компенсувати опір проводів датчика. Це пов'язано з тим, що мідні проводи є самі по собі термоопорними, тобто опір проводів так само змінюється від температури. Причому в разі, наприклад, коли камера нагрівається, частина проводів, яка знаходиться разом з датчиком, нагрівається теж і змінює опір, а частина за межами камери змінюється зі зміною температури в кімнаті.

У випадку, розглянутому вище, при опорі проводів $0,5\text{ Ом}$ при нагріванні на кожні $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ опір проводів може змінитися практично вдвічі, давши додатково $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ похибки.

Для виключення впливу опору проводів застосовують трипровідну схему підключення датчика температури. При такій схемі підключення прилад вимірює сумарний опір датчика з проводами і опір двох проводів (або одного проводу й множить його на 2) і віднімає опір проводів з сумарного, виділяючи тим самим чистий опір датчика. Така схема підключення дозволяє отримувати досить високу точність при значних впливах опорів проводів на точність вимірювання. Однак ця схема не враховує, що проводи через похибку виготовлення можуть мати різний опір (через неоднорідність матеріалу, зміну перерізу за довжиною тощо). Такі похибки вводять менші відхилення у видимій температурі, ніж при двох провідних схемах, проте при великих довжинах проводів можуть бути істотними. У таких випадках може знадобитися застосування чотирипровідної схеми підключення, у якій прилад вимірює безпосередньо опір датчика без урахування сполучних проводів.

Специфіка застосування двопровідної схеми підключення:

1. Діапазон вимірювання не великий (наприклад, $0\dots 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) і потрібна невисока точність (наприклад, $1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2. Сполучувані проводи мають великий переріз, і довжина їх не велика, тобто опір проводів малий у порівнянні з опором датчика й не вносить істотної похибки. Наприклад, сумарний опір 2 проводів – $0,1\text{ Ом}$, а опір датчика змінюється на $0,5\text{ Ом}$ на градус, необхідна точність – $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, таким чином опір проводів вносить похибку меншу, ніж допустима похибка.

Застосування трипровідної схеми підключення датчиків температури опору. Найбільш поширена схема підключення, застосовувана для вимірювань на віддаленні від датчика від 3 до 100 м, що дозволяє в діапазоні до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ мати похибку близько $0,5\%$, тобто $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Чотирипровідна схема підключення застосовується, як правило, для прецизійних вимірювань з точністю понад $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для 4- і 3-провідних з'єднань модуль підводить постійний струм від своїх затискачів $I_c +$ і I_c , які компенсують падіння напруги у вимірювальних проводах. Важливо, щоб з'єднувальні проводи постійного струму були підключені безпосередньо до терморезистора.

При 4-провідному підключенні (рис. 3.12) напруга на терморезисторі вимірюється на клеммах $M + i$ та $M -$. Причому слід переконаватися в тому, що полярність з'єднання $I_c + / M + i$ та $I_c - / M -$ є правильною й проводи приєднані безпосередньо до терморезистора.

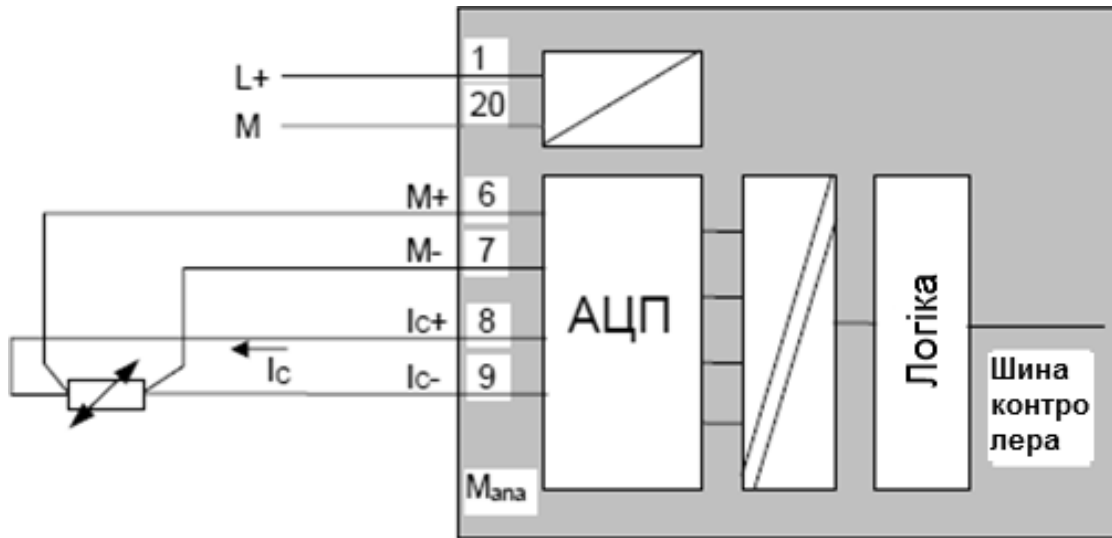


Рисунок 3.12 – Функціональна електрична схема підключення терморезистора за 4-провідною схемою до аналогового модуля SM331

При 3-провідному підключенні терморезистора (рис. 3.13) встановлюється перемичка між $M -$ і $I_c -$. Обов'язково, щоб проводи $I_c +$ і $M +$ були безпосередньо підключені до терморезистора.

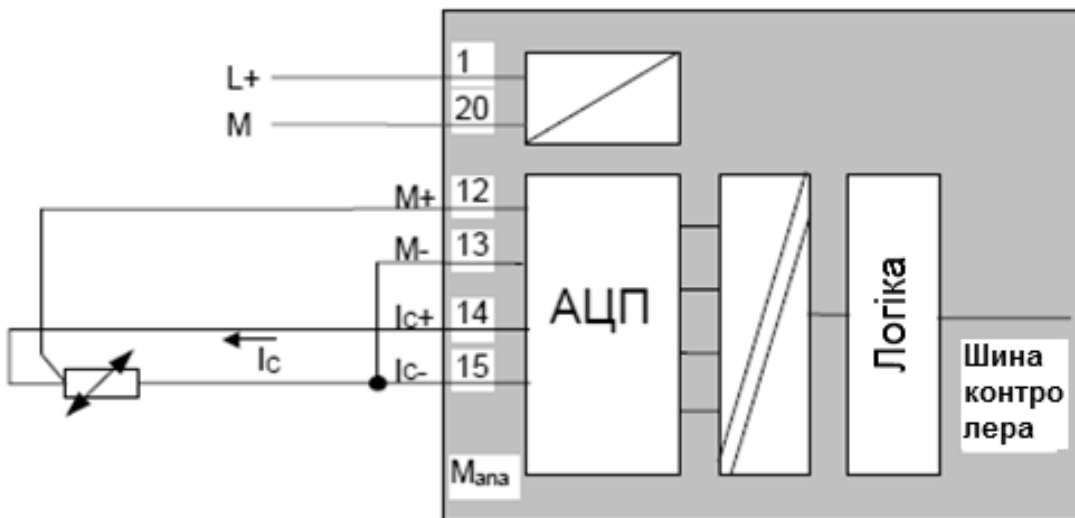


Рисунок 3.13 – Функціональна електрична схема підключення терморезистора за 3-провідною схемою до аналогового модуля SM331

При 2-провідному підключенні терморезистора (рис. 3.14) одна перемичка повинна встановлюватися на фронтальному з'єднанні модуля між клеммами $M + i$ та $I_c +$, а друга перемичка – між затискачами $M -$ і $I_c -$.

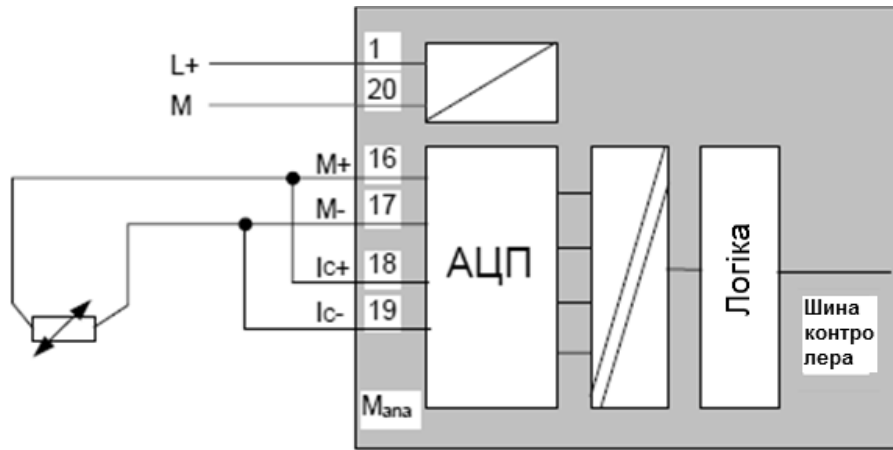


Рисунок 3.14 – Функціональна електрична схема підключення терморезистора за 2-провідною схемою до аналогового модуля SM331

Приклад схеми електричної зовнішніх підключень термопар до аналогового модуля введення інформації SM331 наведено на рисунку 3.15, а датчиків тиску – на рисунку 3.16.

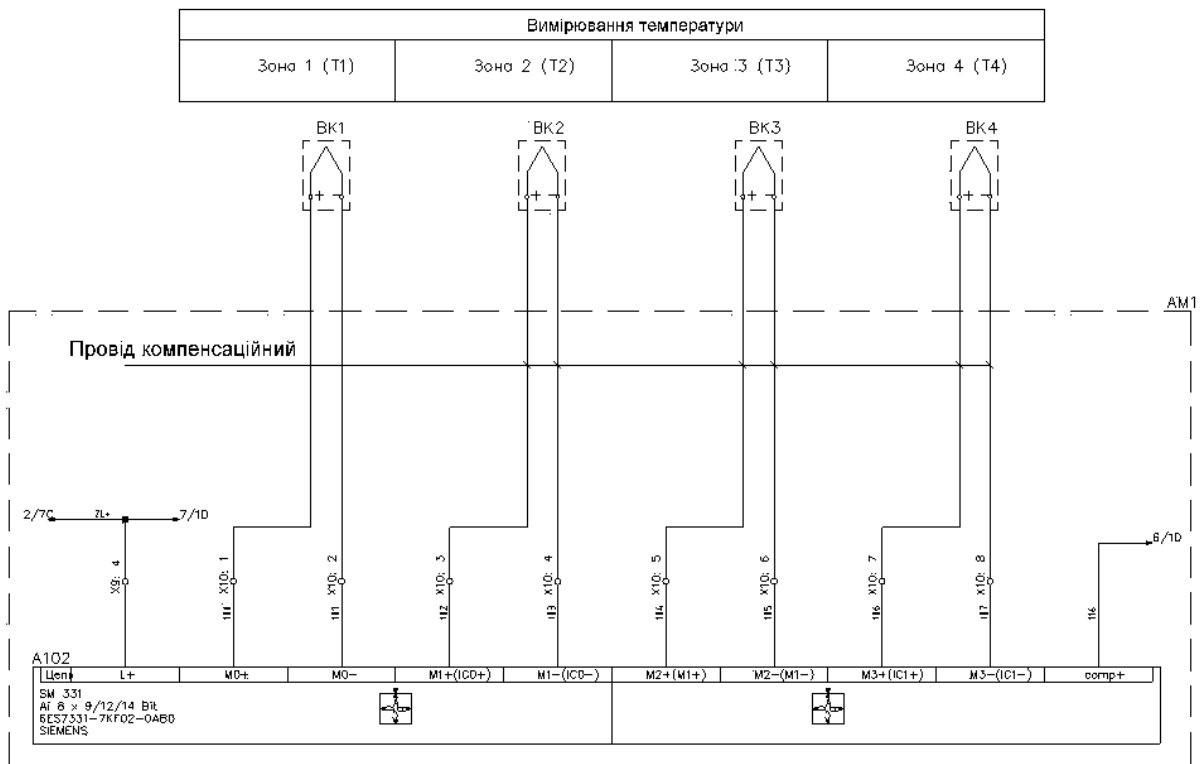


Рисунок 3.15 – Схема електрична зовнішніх підключень термопар до аналогового модуля введення інформації SM331

Регулювання технологічних параметрів АСК часто здійснюється механізмами електричними однообертними (МЕО). Функціонування й принцип роботи МЕО полягає в перетворенні електричного командного сигналу на обертальний рух вихідного органа.

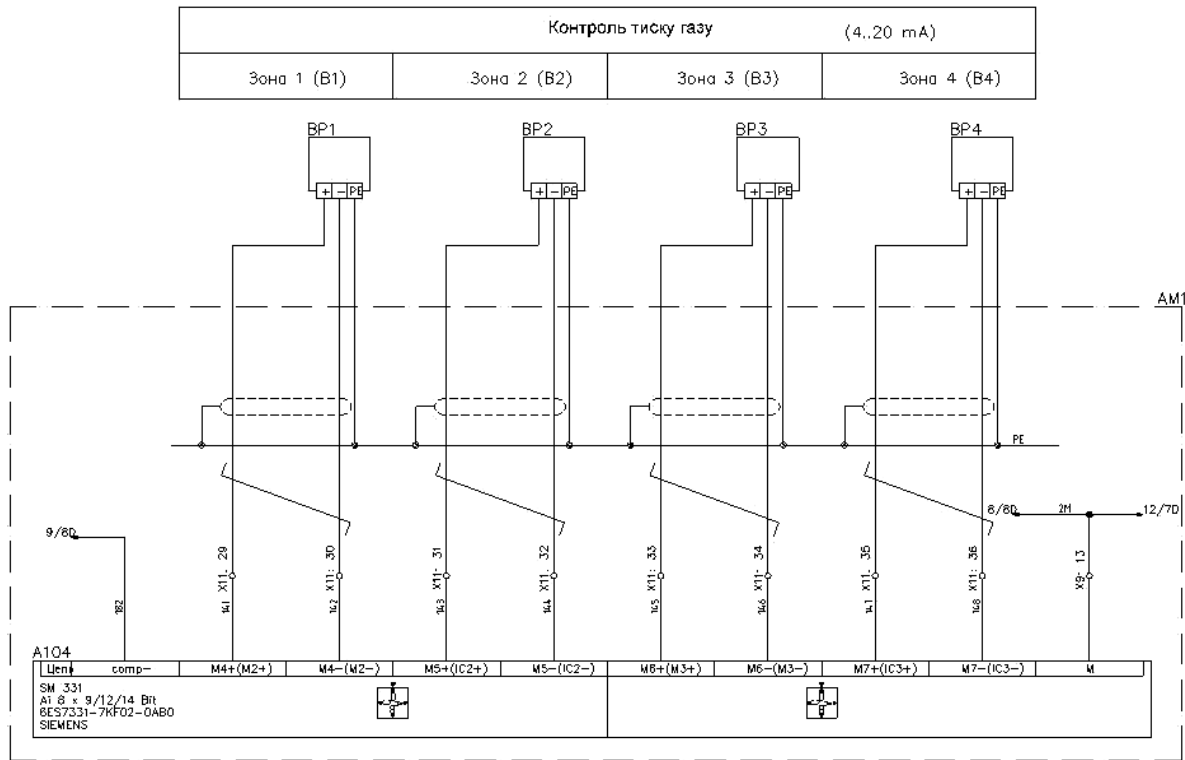


Рисунок 3.16 – Схема електрична зовнішніх підключень датчиків тиску до аналогового модуля введення інформації SM331

Основним вузлом виконавчого органа є редуктор, на якому встановлюються всі інші вузли, що входять до складу механізму.

У корпусі редуктора розміщена черв'ячна передача. За допомогою шестірни, встановленої на черв'яка, передача пов'язана кінематичною передачею з приводним електродвигуном. Черв'як редуктора пов'язаний з електроприводом через проміжний вал-шестірню.

Виконавчі механізми серії МЕО виготовляються тільки зі струминними датчиками [3]

- БСПР – реостатним (Р),
- БКВ – безконтактним (БКВ),
- БСПІ – індуктивним (І),
- БСПТ – струминним (У)

і вбудованим блоком живлення БП-20.

Принципову електричну схему наведено на рисунку 3.17.

На схемі прийняті такі умовні позначки елементів схеми: М – електродвигун; Х1 – рознім РП10-30; А – блок датчика; G – блок живлення; U – пристрій; S1...S4 – вимикачі положення. Для керування МЕО потрібен підсилювач, який керує трифазним електродвигуном типу АОЛ. Як підсилювач вибраний пускач безконтактний реверсивний ПБР-3А, який застосовується для двигунів типу АОЛ потужністю до 1,1 кВт.

Схему керування виконавчим механізмом наведено на рисунку 3.18.

ПБР-3А працює при температурі повітря від 5 до 50 °С, відносній вологості від 30 до 80 %. Також витримує вібрації частотою 25 Гц амплітудою до 0,1 мм.

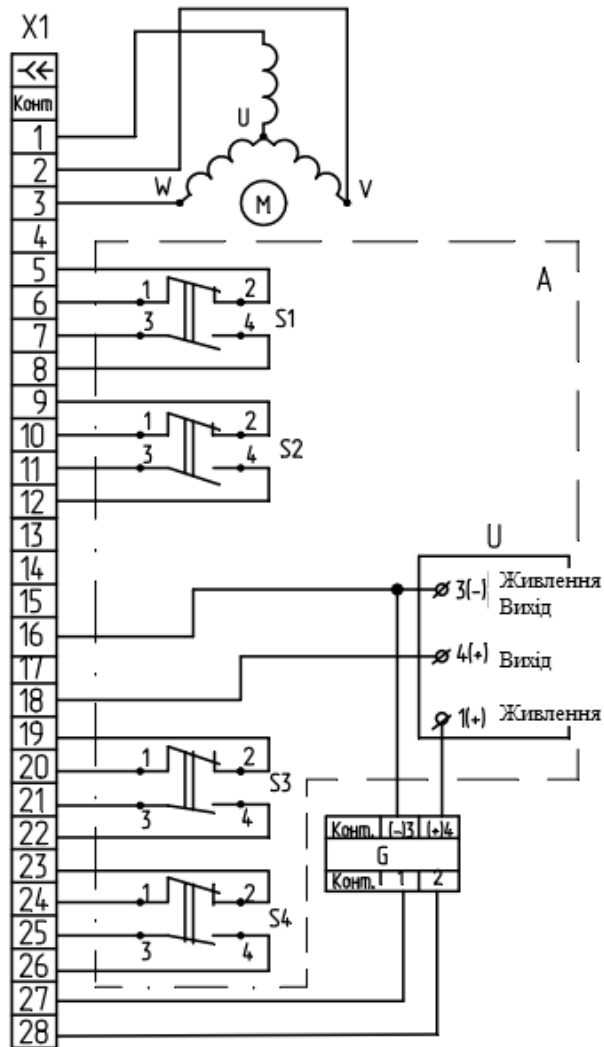


Рисунок 3.17 – Схема електрична принципова механізму МЕО-1000/63-0,63У-92КБ

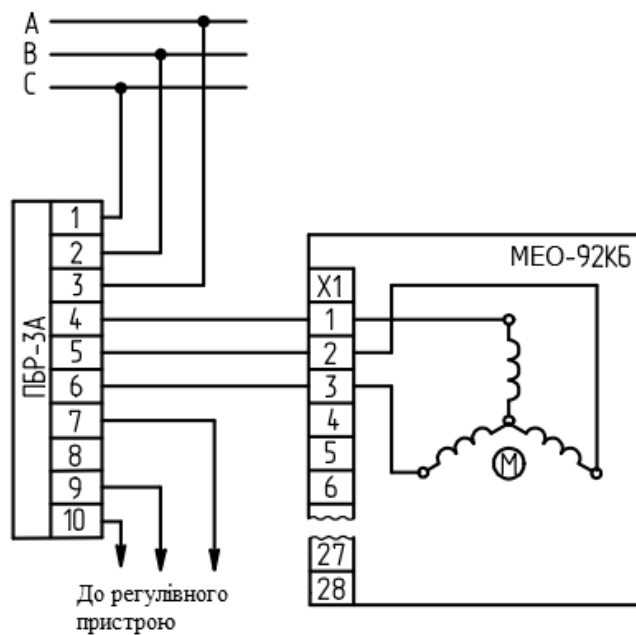


Рисунок 3.18 – Схема керування виконавчим механізмом МЕО-92КБ

Приклад схем електричних зовнішніх підключень виконавчого механізму МЕО зображені на рисунках 3.19–3.22.

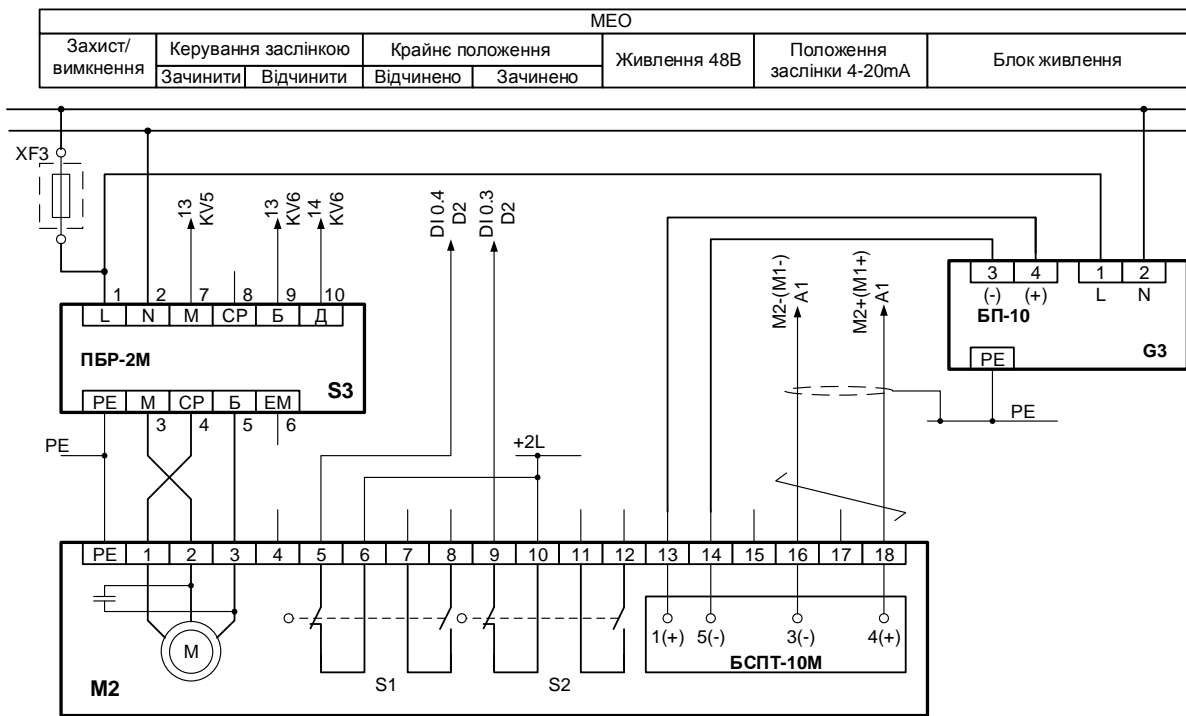


Рисунок 3.19 – Схема електрична зовнішніх підключень виконавчого механізму МЕО-40/25-0,25-99

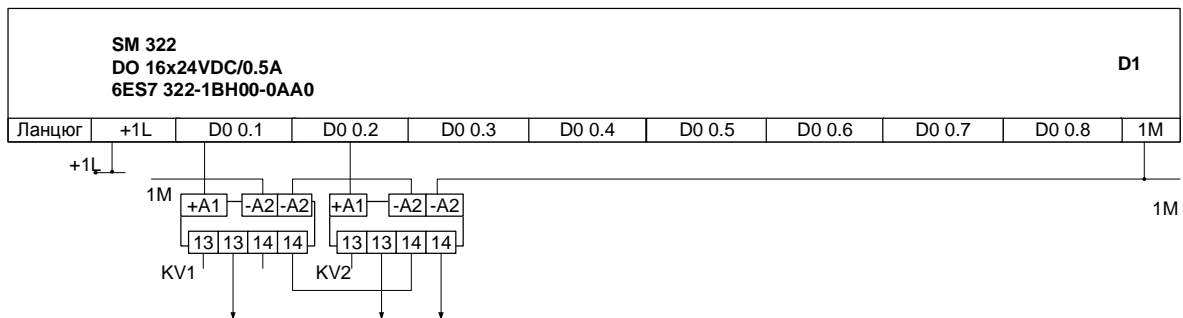


Рисунок 3.20 – Схема електрична зовнішніх підключень МЕО до дискретного модуля виведення SM332

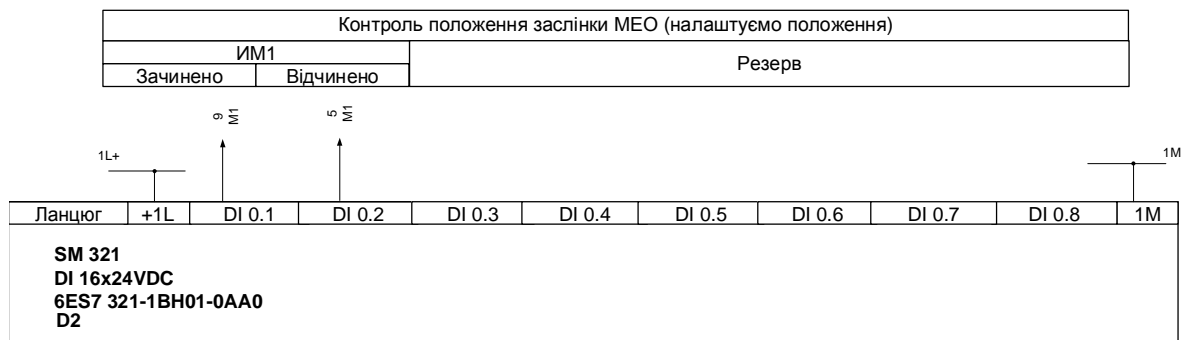


Рисунок 3.21 – Схема електрична зовнішніх підключень МЕО до дискретного модуля введення SM331

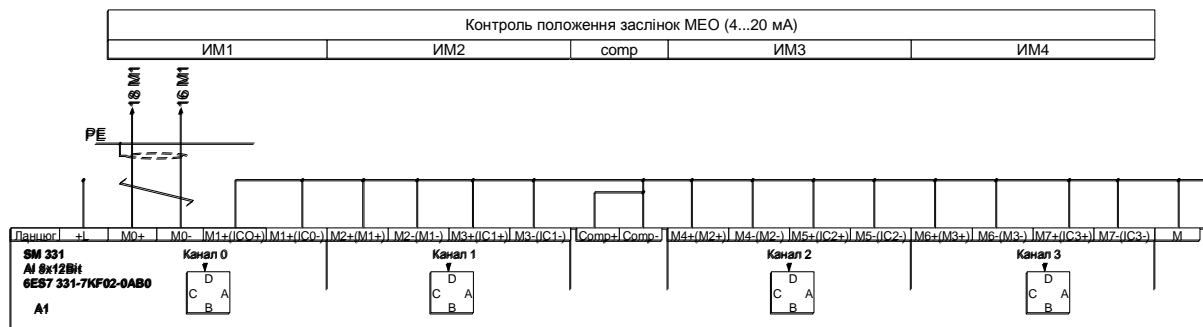


Рисунок 3.22 – Схема електрична зовнішніх підключень МЕО до аналогового модуля SM331

Керування механізмом здійснюється як контактне, так і безконтактне. На схемі 3.17 застосовано безконтактне керування за допомогою пускача типу ПБР-2М (ПБР-2М1). Пуск електродвигуна для обертання в заданому напрямку («зачинити» або «відчинити») здійснюється шляхом подання відповідного керівного сигналу на вхід ПБР «13» – «зачинити», а на вхід «14» – «відчинити». Керівні сигнали, які задають напрямок обертання, формуються на виході дискретного сигнального модуля виведення SM322. Так, при подаванні сигналу на виході DO 0.1 = «1» віддається команда на закриття заслінки, а при DO 0.2 = «1» – на відкриття заслінки (рис. 3.20).

Контроль крайніх положень заслінки здійснюється кінцевими вимикачами, вбудованими в МЕО. Так, при спрацьовуванні вимикача S1 на виході 5 формується сигнал про досягнення крайнього положення «відчинено», а при спрацьовуванні S2 на виході 9 формується сигнал «зачинено». Ці інформаційні сигнали надходять на відповідні входи DI 0.1 і DI 0.2 сигнального дискретного модуля введення SM321 (рис. 3.21).

Контроль проміжного положення заслінки здійснюється за вихідним сигналом датчика положення МЕО БСПТ-10М (рознім 16 і 18). Інформаційний сигнал положення надходить безпосередньо на входи M0 + і M0 сигнального аналогового модуля SM331 (рис. 3.22).

Інші схеми підключення виконавчих механізмів і датчиків наведено в додатку А.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Технические средства автоматизации : методические указания к самостоятельной работе для студентов специальности 6.092501 «Автоматизированное управление технологическими процессами» / сост. А. В. Разживин. – Краматорск : ДГМА, 2012. – 52 с.

2 Технические средства автоматизации : методические указания к выполнению контрольной работы для студентов специальности 7.092501 «Автоматизированное управление технологическими процессами» / сост. А. В. Разживин. – Краматорск : ДГМА, 2012. – 52 с.

3 Механизмы исполнительные электрические однооборотные МЭО [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ap.net.ua/meo.html>.

4 Механизмы исполнительные электрические однооборотные ВЭО, VOGEZ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.et.kh.ua/products/vogez/VES.html>.

5 Ключев, В. И. Выбор электродвигателей для производственных механизмов / Ключев В. И. – М. : Энергия, 1974. – 96 с.

6 Электрические машины и аппараты. Модуль 1 : конспект лекций для студентов специальности 7.092501 / сост. А. В. Разживин. – Краматорск : ДГМА, 2008. – 140 с.

7 Электрические машины и аппараты : методические указания к выполнению практических работ для студентов специальности 7.092501 «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии» дневной формы обучения / сост. А. В. Разживин. – Краматорск : ДГМА, 2011. – 48 с.

8 Клименко, Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник / Клименко Б. В. – Харків : Точка, 2012. – 340 с.

9 Электрические и электронные аппараты : учеб. для вузов / под ред. Ю. К. Розанова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Информэлектро, 2001. – 420 с.

10 Чунихин, А. А. Электрические аппараты. Общий курс : учебник для вузов / Чунихин А. А. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 720 с. : ил.

11 Справочник по средствам автоматики / под ред. В. Э. Низэ, И. В. Антика. – М. : Энергоиздат, 1983. – 504 с.

12 Бурштинський, М. В. Давачі / М. В. Бурштинський, М. В. Хай, Б. М. Харчишин. – 2-е вид. доп. – Львів : ТзОВ «Простір М», 2014. – 202 с.

13 Датчики температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aotera.com.ua/pages/ru/sensors.html?gclid=CP3FIJyO9NACFQKkGAo dt3UKHA>.

14 Датчики температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/ruRU/brands/Metran/products/Temperature/Pages/index.aspx>

15 Датчики давления. Датчик давления газа, жидкости. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ukrteh.kiev.ua/page/text/category=pressure>.

16 Датчики давления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/ru-RU/brands/Metran/products/Pressure/Pages/index.aspx>

17 Расходомеры. Счетчики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/ruRU/brands/Metran/products/Flow/Pages/index.aspx>

18 Сердюк, О. О. Проектування систем автоматизації Simatic : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / О. О. Сердюк, О. В. Разживін. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 208 с.

19 Интерактивный каталог продуктов Siemens IA&DT. Техника автоматизации Siemens [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://w5.siemens.com/web/ua/ru/iadt/ia/FAPA/Pages/as.aspx>

20 Simatic. Программирование с помощью Step 5 V5.5. Руководство. Редакция 01/2010, A5E00261405-1.

21 Программируемые контроллеры Simatic S7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://w5.siemens.com/web/ua/ru/iadt/ia/FAPA/PLC/Pages/PLC.aspx>.

22 Автоматизация в промышленности. Каталог Siemens CA01 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://w5.siemens.com/web/ua/ru/iadt/Pages/ca01.aspx>.

Навчальне видання

**РАЗЖИВІН Олексій Валерійович,
СУБОТІН Олег Володимирович**

ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Навчальний посібник

Редагування, комп'ютерне верстання О. М. Болкова

125/2016. Формат 60 × 84/16. Ум. друк. арк. 7,67.
Обл.-вид. арк. 9,44. Тираж 50 пр. Зам. № 1373.

Видавець

Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1633 від 24.12.2003

Виготівник

ЦТPI «Друкарський дім»
84306, м. Краматорськ, вул. Олекси Тихого, 1-б,
тел.: (06264) 6-73-34, (066) 076-76-21.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 5071 від 23.03.2016