

Лекція №1

Загальні відомості про проектування систем автоматизації та електрифікації, автоматизації і енергопостачання

Мета:

План:

1. Вихідні дані для проектування та їх аналізу.
2. Основні нормативні документи з проектування.
3. Стадійність проектування.
4. Автоматизація проектних робіт.

1.1. Вихідні дані для проектування та їх аналізу

Проектуванням називається складання та розробка технічної та техніко-економічної документації, яка необхідна для створення новітніх або удосконалення існуючих об'єктів і систем, зокрема систем електрифікації та автоматизації процесів сільськогосподарського виробництва і побуту сільського населення.

Метою проектування систем електрифікації та автоматизації є підготовка документації для замовлення електрообладнання, засобів автоматизації, щитів і пультів керування, матеріалів для з'єднувальних ліній та ін.; забезпечення робіт з монтажу електрообладнання, пристроїв контролю і керування; визначення вартості устаткування, його монтажу і налагодження та оцінка економічної ефективності внаслідок впровадження проекту.

Вихідний документ для проектних робіт – це завдання з проектування систем електрифікації та автоматизації, яке є складовою частиною загального завдання на проектування відповідного технологічного об'єкта і затверджується у встановленому порядку.

Завдання з проектування складається замовником або генеральним проектувальником разом із замовником. Завдання погоджується з виконавцями проекту (будівельно-монтажними та налагоджувальними організаціями).

Завдання з проектування повинно мати такі дані:

- найменування об'єкта, його призначення, мета проекту та підстави для проектування;
- перелік технологічного обладнання, агрегатів, потокових ліній тощо;
- характеристика приміщень, в яких розташоване обладнання;
- перелік потрібного електрообладнання (електроприводи, електронагрівні та електротехнологічні установки, електроосвітлення);
- перелік процесів, за якими розроблятимуться системи автоматичного керування, регулювання, контролю, сигналізації, захисту та блокування;
- техніко-економічне обґрунтування (ТЕО), яке містить обґрунтування технічної можливості та економічної доцільності реалізації проекту і будівництва об'єкта в даному місці й у певні терміни;

- стадійність проектування;
- орієнтований рівень капітальних витрат на електрифікацію та автоматизацію виробництва;
- розробники проекту;
- виконавці проекту.

До технічного завдання додаються схеми водо-, тепло-, повітро-, електропостачання із зазначенням витрат, тиску, температури, вологості, запиленості, напруги; вимоги до надійності систем електрифікації та автоматизації та ін.

Завдання на проектування доповнюють:

- технологічними кресленнями;
- технічною документацією (паспортними даними та основними характеристиками об'єкта);
- іншими матеріалами, що додатково характеризують об'єкт електрифікації та автоматизації.

Додаткові матеріали мають давати загальне уявлення про об'єкти, що проектуються. На кресленнях необхідно показати місця розташування технологічного та електротехнічного обладнання; кріплення електричних щитів, а також пультів автоматики. Ці креслення мають давати можливість визначити відстань від щитів і пультів до електрообладнання та засобів автоматизації.

До складу додаткових матеріалів мають входити також схеми електропостачання змінним і постійним струмом різної напруги, схеми тепло- і водопостачання тощо.

Завдання на проектування і додатки до нього повинні чітко відображати особливості об'єктів сільськогосподарського виробництва, що характеризуються наявністю біологічних організмів (рослин, тварин, птиці тощо), які вимагають певних умов утримання, суворого дотримання режимів роботи технологічного та електротехнічного обладнання.

За комплексної електрифікації та автоматизації сільськогосподарського виробництва має бути досягнуто гармонійне поєднання прогресивних технологій, систем електрифікованих машин, автоматизації технологічних процесів і раціональної організації праці та виробництва, внаслідок чого здійснюватиметься вискоєфективне виробництво сільськогосподарської продукції. При цьому електрифікація та автоматизація сприятиме поліпшенню умов праці сільських робітників.

Якщо операції з виробництва продукції здійснюються системою пов'язаних між собою машин, то така організація виробництва називається потоковою; а система машин – потоковою лінією, яка найбільше пристосована для автоматизації.

На ефективність застосування автоматизації мають значний вплив *специфічні умови сільськогосподарського виробництва*, які потрібно брати до уваги під час розробки проектів електрифікації та автоматизації. Головні з них такі:

- наявність біологічних об'єктів (тварин, птиці, рослин тощо), для яких велике значення має безперебійність постачання електроенергії, а також обов'язковість точного дотримання параметрів навколишнього середовища;
- машини та електрообладнання працюють у дуже різноманітних умовах навколишнього середовища (різке коливання температури і вологості в різні пори року, підвищений вміст у повітрі аміаку, вуглекислоти, сірководню, пилу тощо);
- розосередженість електронавантаження по господарству, що спричиняє використання протяжних електромереж, збільшення кількості трансформаторних підстанцій;
- сезонність технологічних процесів призводить до малої кількості годин використання електрообладнання.

Проектування систем електрифікації та автоматизації в сільському господарстві без урахування вищезгаданих особливостей призводить до істотного зниження ефективності сільськогосподарського виробництва. Після вивчення та аналізу конкретної ситуації треба прийняти такі проектні рішення, які б сприяли використанню переваг електроенергії.

1.2. Основні нормативні документи з проектування

Під час розробки проектної документації слід користуватися нормативними матеріалами, які складаються з державних будівельних норм і правил (ДБН, СНіП), відомчих норм технологічного проектування об'єктів сільського господарства (ВНТП), інструкцій і вказівок з будівельного проектування (БН), а також державних і міждержавних стандартів (ДСТУ, ГОСТ), відомчих (галузевих) будівельних норм (ВБН) та ін.

ДБН установлюють основні вимоги з питань проектування та будівництва міст, населених пунктів, підприємств, будинків, споруд, конструкцій, інженерного обладнання, а також визначають їхню кошторисну вартість.

ВНТП – це нормативні документи, що складені відповідно до специфіки проектування об'єктів сільського господарства (ферм і комплексів великої рогатої худоби, свиноферм і свинокомплексів, птахоферм і птахофабрик, тепличних господарств, овочесховищ тощо).

ВБН визначають правила і норми з проектування та улаштування конкретних інженерних засобів, установок і споруд (силове електрообладнання, автоматизація та ін.).

Міждержавні і державні стандарти України (ГОСТ, ДСТУ) містять вимоги, яким має відповідати продукція промисловості та сільського господарства. Об'єктами державної стандартизації є також одиниці виміру, терміни та визначення, технологічні процеси, методи випробувань і вимірювання, характеристики виробів,

що визначають якість готової продукції або напівфабрикату, вимоги до техніки безпеки та ін.

Галузеві стандарти (ГСТУ, ГКД, ОСТ) – це нормативні документи обмеженого застосування для окремих галузей промисловості й відомств. ОСТи не повинні суперечити відповідним державним і міждержавним стандартам.

СТП – стандарти підприємств, що відображають специфіку конкретних виробництв, мають обмежене застосування і не повинні суперечити відповідним державним і міждержавним стандартам та іншим нормативним документам вищого рівня.

ЄСКД – Єдина система конструкторської документації. Діючі нині стандарти ЄСКД переведені в ранг міждержавних стандартів. Всі документи, що входять у проект, повинні виконуватись відповідно до вимог систем документації:

- конструкторські – за ЄСКД (клас стандартів 2);
- програмні – за ЄСКД (клас стандартів 19).

Вся технічна документація проекту повинна відповідати вимогам ДСТУ Б А 2.4-4-99 (ГОСТ 21.101-97) “Основні вимоги до проектної і робочої документації”, ДСТУ Б А 2.4-6-95 (ГОСТ 21.50893) “Правила виконання робочої документації генеральних планів підприємств, споруд та житлових будівельних об’єктів” та ДСТУ 300895 “Документація. Звіти в галузі науки і техніки. Структура і правила оформлення”. Позначення повинні бути вказані на кожному аркуші документа, який виконано на кількох аркушах.

Для основних конструкторських документів (ГОСТ 2.102-68) структура позначень за ГОСТ 2.201-80.

Код класифікаційної характеристики надають виробу або конструкторському документу за класифікатором виробів та конструкторських документів машинобудування і приладобудування (класифікатор ЄСКД). Структура коду класифікаційної характеристики наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Коди класифікаційної характеристики

XXX	X	XXX	XXX
Код організації розробника вибирають за модифікатором (прізвище, ім'я, по батькові)	Клас (1 – системи; 2 – прилади і групи; 3 – прилади, блоки; 4 – блоки, вузли; 5, 6 – вузли; 7, 8 – деталі)	Код класифікаційної характеристики вибирають з класифікатора ЄСКД	Порядковий номер розробки від 001 до 999

Позначення конструкторського документа (ПЗ, складальне, габаритне, монтажне чи електромонтажне креслення, креслення загального вигляду, схеми, експлуатаційні документи та ін.) повинні складатися з позначення основного

документа (специфікація або креслення деталей) і коду документа, встановленого стандартами

ЕСКД – ГОСТ 2.102-68, ГОСТ 2.701-84 (СТ РЕВ 651-77, СТ РЕВ 527-77).

Державні стандарти, що використовуються під час проектування, наведені в таблиці 1.2.

Позначення технологічних документів, що входять до проекту, виконуються згідно з ГОСТ 3.1201-74.

Позначення програм і програмних документів повинні відповідати ГОСТ 19.103-77.

Зміст, розміщення і розмір граф основних надписів, а також розміри рамок на кресленнях і схемах повинні відповідати формі 1, в текстових документах – формам 2 і 2а за ГОСТ 2.104-69.

Таблиця 1.2 – Державні стандарти, що використовуються при проектуванні

Документ	Стандарт
Пояснювальна записка	ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Загальні вимоги до текстових документів. ГОСТ 2.106-68 ЕСКД. Текстові документи. ГОСТ 19.106-78 ЕСКД. Вимоги до програмних документів, виконаних друкованим способом. ГОСТ 19.404-79 ЕСКД. Пояснювальна записка. Вимоги до змісту та оформлення
Специфікація	ГОСТ 2.108-69. Специфікація. ГОСТ 19.202-78 ЕСКД. Специфікація. Вимоги до змісту та оформлення. ДСТУ Б А 2.4-10-95 СПДБ. Правила виконання специфікацій обладнання, виробів і матеріалів
Креслення	ГОСТ 2.109-73 ЕСКД. Основні вимоги до креслень. ГОСТ 2.119-73 ЕСКД. Ескізний проект. ГОСТ 2.120-73 ЕСКД. Технічний проект. ГОСТ 2.417-78 ЕСКД. Правила виконання креслень друкованих плат
Схеми	ГОСТ 2.701-84 ЕСКД. Схеми. Види і типи. Загальні вимоги до виконання. ГОСТ 2.702-75 ЕСКД. Правила виконання електричних схем. ГОСТ 2.708-81 ЕСКД. Правила виконання електричних схем цифрової обчислювальної техніки. ГОСТ 2.710-81 ЕСКД. Позначення буквено-цифрові в електричних схемах. ГОСТ 2.711-82 ЕСКД. Схеми розподілу виробу на основні частини. ГОСТ 19.701-90 ЕСКД. Схема алгоритмів і програм. Позначення умовно графічні
Програми і програмні документи	ГОСТ 19.101-77 ЕСКД. Види програм і програмних документів. ГОСТ 19.105-78 ЕСКД. Загальні вимоги до програмних документів. ГОСТ 19.401-78 ЕСКД. Текст програми. ГОСТ 19.402-78 ЕСКД. Опис програми

Під час проектування використовують також допоміжну літературу: довідники, рекомендації та вказівки щодо проектування різних об'єктів, методики, порадики, прейскуранти на будівництво об'єктів, цінники на обладнання та його монтаж. Ці матеріали містять нормативи витрат матеріалів, сировини, енергії, а також потреб площі, теплоти, освітлення, повітря, води та ін.

1.3. Стадійність проектування

Системи електрифікації та автоматизації процесів сільськогосподарського виробництва проектують в одну або дві стадії згідно з ГОСТ 2.103-68 “Стадії розробки” та ДБН А 2.2-3-2004 “Склад, порядок розробки, погодження та затвердження проектної документації для будівництва”. За дво-стадійного проектування в першій стадії виконується технічний проект (ТП), а в другій – робочі креслення (РК). За одно-стадійного проектування виконується техно-робочий проект (ТРП), який об'єднує технічний проект з робочими кресленнями.

У дві стадії проектують, як правило, складні об'єкти. Проекти нескладних об'єктів виконують в одну стадію. Проектування в одну стадію здійснюється також для об'єктів, що будуються за типовими і повторно застосовуваними проектами.

Дво-стадійне проектування передбачає виконання робочих креслень після затвердження технічного проекту. На стадії технічного проекту проектні матеріали розробляють у скороченому обсязі, потрібному для визначення видів і кількості обладнання, необхідних робочих площ приміщень, матеріалів, а також для розрахунку капітальних вкладень у здійснення проекту.

До складу технічного проекту входять пояснювальна записка з обґрунтуванням прийнятих рішень щодо електрифікації та автоматизації; технологічні схеми виробництва продукції; плани розміщення технологічного й електричного обладнання, щитів, пультів та прокладання проводок; схеми електро-, водо-, тепло- і газопостачання; структурні схеми контролю і керування виробництвом (для складних систем керування), функціональні схеми автоматизації технологічних процесів; принципові електричні, пневматичні та гідравлічні схеми, схеми з'єднання і підключення; перелік нестандартного обладнання; відомості обладнання, приладів і матеріалів.

Технічний проект є підставою для замовлення основного і допоміжного обладнання, електротехнічних засобів, приладів контролю і автоматичного регулювання та визначення обсягу витрат на реалізацію проекту.

Після розгляду спеціалістами і затвердження в установленому порядку технічного проекту виконують робочі креслення, складають специфікацію на будівельні матеріали, труби, арматуру, кабелі, монтажне обладнання, інструменти та допоміжні матеріали.

На другій стадії проектування уточнюють і деталізують передбачені технічним проектом рішення таким чином, щоб були забезпечені монтажно-налагоджувальні роботи під час реалізації проекту.

Комплект робочих креслень містить такі частини:

- креслення енергетичних, водорозподільних і каналізаційних комунікацій;
- функціональні схеми автоматизації, принципові електричні, пневматичні та гідравлічні схеми керування (контролю, регулювання, сигналізації, захисту, блокування, живлення);
- креслення основного обладнання у збірці з комутаційними трубопроводами, з елементами кріплення відбірних пристроїв та інших засобів автоматики, що розташовані за місцем (безпосередньо на обладнанні);
- загальний вигляд щитів і пультів;
- креслення монтажно-комутаційних систем щитів і пультів керування (або таблиці для монтажу електричних і трубних проводок);
- креслення нестандартного обладнання і нетипових конструкцій;
- пояснювальна записка;
- таблиця вихідних даних і результати розрахунків регулювальних органів;
- специфікації для замовлення електрообладнання, приладів і засобів автоматизації, щитів, пультів, трубопровідної арматури, кабелів і проводів, монтажних матеріалів і виробів, нестандартного обладнання; перелік нормативно-технічної документації на монтаж апаратури, щитів, пультів, допоміжних пристроїв та ін.

За одно-стадійного проектування до складу проекту входять усі перелічені вище матеріали, а також кошториси на обладнання і монтаж, техніко-економічне обґрунтування доцільності електрифікації та автоматизації об'єкта. Розробляючи проекти, необхідно максимально використовувати типові рішення для подібних об'єктів.

1.4. Автоматизація проектних робіт

Останнім часом у проектній практиці все частіше використовують сучасну обчислювальну техніку. Існує багато задач, пов'язаних з обробкою і зберіганням великих об'ємів інформації, а також задач, коли з великої кількості можливих варіантів треба вибрати один оптимальний або необхідно виконати багатокрокові числові розрахунки. У таких випадках розв'язання задач за допомогою ЕОМ істотно полегшується, прискорюється і здешевлюється.

З використанням ЕОМ є можливість створювати комплексні системи автоматизації проектних робіт (САПР). Підраховано, що САПР дає можливість скоротити термін проектування в два–чотири рази, підвищити ефективність праці на 20–50 % і знизити загальну вартість проектних робіт на 20–30 %.

САПР, як правило, складається з підсистем, функціонування яких підпорядковане загальній меті. Окремі підсистеми взаємодіють одна з одною. Тому кожна з підсистем не може розроблятися незалежно одна від одної.

У САПР реалізують принцип одноразового введення вхідних даних для подальшого їх використання в наступних роботах. Розробка САПР для проектування лише одного об'єкта (одноразового використання) вважається недоцільною.

Для роботи САПР потрібно мати відповідне технічне забезпечення – комплекс технічних засобів. Головним інструментом САПР є обчислювальна машина, яка повинна мати необхідне математичне забезпечення – сукупність алгоритмів, процедур і правил разом з усією пов'язаною з цими компонентами документацією.

САПР повинна мати відповідне програмне забезпечення – комплекс програм, які мають забезпечити нормальний процес функціонування САПР.

Програмне забезпечення – це пакет прикладних програм простої або складної структури. Розрізняють дві групи пакетів прикладних програм: пакети програм загального призначення і пакети програм з технологічною специфікою. Пакети загального призначення використовують для вирішення загальних математичних і технічних задач, а технологічні програми призначені для розв'язання задач, пов'язаних безпосередньо з виробництвом.

Для нормального функціонування САПР також має бути підготовлено необхідне інформаційне, лінгвістичне та організаційне забезпечення.

Інформаційне забезпечення – це сукупність єдиної системи класифікації та кодування технологічної і техніко-економічної інформації, уніфікованих систем документації та масивів інформації. Зберігання таких даних (опис нормативних таблиць, технологічних обмежень, комплектуючих елементів і вузлів) здійснюється в пам'яті машини.

Лінгвістичне забезпечення – це сукупність науково-технічних термінів та інших мовних чинників, що використовуються в САПР, а також правил формалізації природної мови, включаючи методи стиснення та розгортання текстів, для підвищення ефективності машинної обробки інформації та полегшення спілкування людини з машиною.

Організаційне забезпечення – це сукупність описів функціональної, технічної та організаційної структур, правил, інструкцій і регламентів проектування, що забезпечує задане функціонування САПР.

Об'єкти проектування у САПР подають у вигляді моделей – абстрактно поданих (математичних) або матеріально реалізованих (фізичних) систем, що відображають або відтворюють об'єкт. Модель заміщує об'єкт і дає про нього потрібну інформацію.

Математичні моделі базуються на однаковості математичного опису процесів у моделі та об'єктів. При цьому допускаються значні спрощення явищ (не беруться до уваги другорядні деталі).

Фізичні моделі, як правило, мають ту саму фізичну основу, що й об'єкт, проте в іншому масштабі.

Оскільки в процесі проектування більше половини всіх матеріалів подається в графічній формі, в САПР створюється окрема підсистема відображення графічних даних. Засоби і методи кодування та декодування графічної інформації називають *машинною графікою*.

Засобами зв'язку людини з ЕОМ є пристрій виведення інформації, який називається дисплеєм або монітором. У дисплеях відбувається декодування інформації, що надходить до ЕОМ, і перетворення її на зорову. На дисплей виводиться як алфавітно-цифрова, так і графічна інформація. Інколи дисплеї дають змогу не тільки спостерігати виведену інформацію, але й вводити вручну на ЕОМ додаткову інформацію за допомогою світлового пера, зокрема, графічної інформації. Дисплеї дають змогу здобувати на екрані малюнок, стирати окремі лінії, вносити поправки.

З питань автоматизації проектних робіт є багато літератури, проте досвід практичного використання САПР у проектних організаціях сільського спрямування поки що незначний. Застосування обчислювальної техніки у проектній справі дає можливість знаходити оптимальні рішення, отримувати потрібні характеристики системи, що проектується, за найменших витрат ресурсів та енергії. САПР забезпечує вибір засобів автоматизації та пристроїв відображення інформації, розрахунки, пов'язані з проектуванням силових і контрольних проводок, із визначенням показників надійності систем, що проектуються.

Машинні методи застосовуються під час складання кошторисів, специфікацій на прилади, засоби автоматики і допоміжні матеріали. Нарешті за допомогою ЕОМ можна визначити оптимальні значення налаштувань систем автоматичного керування і засобів захисту електрообладнання від аномальних режимів роботи.

Запитання для самоперевірки

1. Що таке проектування?
2. Яка мета проектування?
3. Які існують вихідні документи для проектних робіт?
4. Які данні повинні мати завдання з проектування?
5. Які основні нормативні документи з проектування ви знаєте?
6. Що таке стадійність проектування?
7. Які частини містить комплект робочих креслень?
8. Що таке автоматизація проектних робіт?

Список літератури

1. Бурбело, М. Й. Б91 Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.
2. Бурбело М.Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків. Навчальний посібник. – 2-е вид., перероб. і доп. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 148 с.
3. Справочник по проектированию электроснабжения /Под ред. Ю.Г. Барыбина и др.- М.: Энергоатомиздат, 1990.-576 с.
4. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию /Под ред. А.А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1987.– Т.1 – 580 с., Т.2 – 591 с.

Лекція №2

Матеріально-технічні та енергетичні розрахунки виробництва

План:

1. Визначення розмірів виробничих приміщень;
2. Електропостачання об'єктів сільського господарства;
3. Визначення витрат електроенергії в сільському господарстві:
 - 3.1. Розрахунки навантаження на освітлення;
 - 3.2. Розрахунки електро-споживання силових установок;
 - 3.3. Розрахунки електроспоживання на побутові потреби;
4. Визначення потужності системи опалення;
5. Розрахунки вентиляції сільськогосподарських виробничих приміщень;
6. Розрахунки водопостачання.

1. Визначення розмірів виробничих приміщень

Під час проектування заходів з електрифікації та автоматизації виробничих процесів сільського господарства потрібно знати або визначити надходження й витрати всіх матеріально-енергетичних ресурсів виробництва, для якого розробляється проект.

Вихідними даними для матеріально-енергетичних розрахунків є характер і обсяг виробництва сільськогосподарської продукції, кількість поголів'я тварин (птиці), її продуктивність, площа споруд захищеного ґрунту і врожай овочів, обсяг переробки і зберігання молока, овочів, плодів, зерна, відходів виробництва, приготування кормів та ін.

Ці обсяги зумовлюють розміри виробничих приміщень, номенклатуру і кількість технологічного та електричного обладнання, потреби електроенергії, теплоти, холоду, води, пари, повітря та інших матеріальних енергетичних ресурсів.

До сільськогосподарських виробничих приміщень відносяться будівлі для утримання тварин і птиці, кормоцехи, комбікормові цехи і заводи, споруди захищеного ґрунту, зерно-обробні пункти, сховища сільськогосподарської продукції, водокачки, цехи з переробки сільськогосподарської продукції (консервні, ковбасні, сироварні, масло-бійні, крупо-рушні, млини тощо), цехи і споруди для утилізації відходів та ін.

Виробничі будівлі, як правило, будують за типовими проектами, які мають передбачати застосування прогресивних технологій і сучасного технологічного обладнання, а також можливість подальшого нарощування, удосконалення систем механізації й широке використання засобів автоматизації.

Розміри приміщень мають відповідати певним нормативам. Наприклад,

- для великої рогатої худоби (ВРХ) норми площ у разі прив'язного

утримання становлять на одну голову 8–10 м², у разі безприв'язного 5–6 м², на відгодівлі – 3,5–4 м². Фронт годівлі залежно від віку ВРХ може бути від 0,5 до 1 м.

- Для свиноматок у разі індивідуального утримання норма площі на одну тварину становить 4–5 м², у разі групового – 2,5–3 м², відгодівлі свиней – 0,65–0,7 м², для молодняку – 0,2–0,4 м. Фронт годівлі для свиней – 0,2–0,3 м.

- У разі утримання птиці на підлозі на 1 м² розміщують 4–5 голів, у разі кліткового – 11 голів.

Розміри приміщень для інших виробничих цілей визначаються за нормами, що викладені у відповідних ДБН, ВНТП, а також у довідковій літературі. Визначивши розміри виробничого приміщення, вибирають відповідний типовий проект споруди.

2. Електропостачання об'єктів сільського господарства

У найбільш сприятливому 1991 р. електро-споживання сільського господарства перевищило 30 млрд. кВт·год., що становило понад 10 % від кількості електроенергії, виробленої всіма електростанціями України. На виробничі цілі було використано 2/3 електроенергії, з них 1/3 – на побутові потреби. Питоме комунально-побутове споживання електроенергії на одну особу становило в середньому 453 кВт·год./особу (від 352 до 608 кВт·год./особу) для різних регіонів України.

Споживачі електроенергії в сільській місцевості розкидані на значній території не тільки через значну відстань між населеними пунктами, але й через розосередженість усередині селищ. Тому сільські електромережі мають велику протяжність. Приблизно 80 % загальної кількості ліній обслуговує сільське господарство. За конфігурацією лінії бувають здебільшого радіальними, що не забезпечує високої надійності електропостачання. Для підвищення її надійності часто здійснюють живлення не від одного, а від двох незалежних джерел електроенергії.

За вимогою до надійності електропостачання всі споживачі, зокрема і сільськогосподарські, згідно з ПУЕ, поділяються на три категорії.

До *першої категорії надійності* відносяться споживачі, у яких порушення електропостачання спричинює значні матеріальні збитки.

Споживачі першої категорії мають діставати електроенергію по двох лініях електропередачі від двох незалежних джерел живлення з пристроєм автоматичного вмикання резерву на вводах до споживачів.

Для забезпечення безперебійного електропостачання потрібно під час проектування передбачити установку дизельної електростанції. Перерва в електропостачанні споживачів першої категорії допускається лише на час, потрібний для автоматичного відновлення електроживлення.

До *другої категорії надійності* відносяться споживачі електроенергії, для яких перерва електропостачання понад 3,5 год. призводить до порушення виробничого процесу, зниження виходу сільськогосподарської продукції або її часткового псування.

Споживачам другої категорії рекомендується постачати електроенергію від двох незалежних джерел. Проте, якщо протяжність ліній електропередачі становить менш ніж 10 км, а розрахункова тривалість перерви їх електропостачання не більш як 15 год. на рік за одноразових перерв не більш як 3,5 год., то для таких споживачів допускається забезпечення електроенергією по одній лінії електропередач.

До *третьої категорії надійності* відносяться всі інші споживачі.

Споживачі третьої категорії постачаються електроенергією від одного джерела і по одній електролінії. Тривалість одноразової перерви електропостачання не повинна перевищувати однієї доби.

Сільські споживачі електроенергії дістають живлення від знижувальних трансформаторів по низьковольтних лініях напругою 380/220 В. Трансформатори встановлюються на трансформаторних підстанціях. Крім цього, на підстанціях встановлюються комутаційна апаратура, пристрої захисту від аварійних режимів і прилади контролю та обліку.

Споживчі трансформаторні підстанції на селі мають напругу 10/0,4 кВ, рідше 35/0,4 та 20/0,4 кВ. Найбільш поширеними в сільському господарстві є *комплектні трансформаторні підстанції* (КТП). Комплектні трансформаторні підстанції монтують повністю на заводі і постачають на місце встановлення в складеному стані.

Якщо споживачів першої категорії надійності не вдається забезпечити постачанням електроенергії з двох незалежних джерел, то застосовують резервні електростанції. Промисловість випускає пересувні та стаціонарні резервні електростанції потужністю від 0,5 до 1000 кВт.

Резервні електростанції складаються з первинного двигуна бензинового або дизельного, електричного генератора та розподільного пристрою, який складається з приладів керування, регулювання, контролю та захисту.

Для електростанцій потужністю до 16 кВт первинними двигунами є бензинові та карбюраторні. Дизельні агрегати випускають потужністю від 5 до 1000 кВт (5; 8; 10; 12; 16; 20; 30; 50; 70; 75; 100; 200; 320; 500; 630 і 1000 кВт).

Дизельні електростанції (ДЕС) розрізняють за потужністю: малої – до 50 кВт, середньої – до 200 кВт і великої – понад 200 кВт. ДЕС бувають автоматизовані й неавтоматизовані. Неавтоматизовані ДЕС працюють під наглядом обслуговуючого персоналу. Автоматизовані залежно від ступеня автоматизації можуть забезпечити безперервну роботу без обслуговуючого персоналу тривалістю до 10 діб.

Схеми електричних з'єднань ДЕС прості та однотипні. Відмінності є лише в системах збудження генераторів. Існують генератори дизельних електростанцій з машинними і статичними системами збудження.

Під час проектування систем електрифікації та автоматизації необхідно передбачити заходи щодо економії електроенергії та інших електроресурсів. Розробляючи проекти новітніх об'єктів сільського господарства, потрібно вибирати і використовувати в проектах новітні енергоощадні технології та технічні засоби, а саме: створювати там, де це можливо, безперервні технологічні процеси замість циклічних; застосовувати регульований електропривод; використовувати децентралізовані схеми електротеплопостачання; передбачити установлення електронагрівників замість нагрівників на більш дефіцитному органічному паливі; використовувати люмінесцентні, газорозрядні та світло-діодні лампи замість ламп розжарювання; впроваджувати в технології імпульсні режими освітлення і опромінення. Такі заходи можуть дати економію електроенергії до 15 % порівняно з об'єктами, на яких використовуються старі технології і технічні засоби.

У разі реконструкції об'єкта треба застаріле технологічне й електротехнічне обладнання замінити на сучасніше, перспективніше, замінити лампи розжарювання на люмінесцентні, газорозрядні та світло-діодні застосувати електронагрівники і електросушарки замість нагрівників і сушарок на рідкому паливі, ширше застосовувати автоматизацію технологічних процесів, що дасть змогу здійснювати оптимальні режими роботи обладнання та істотно економити електроенергію та інші енергоресурси.

У проектах слід передбачити заходи щодо технічного обслуговування технологічного і електротехнічного обладнання та засобів систем автоматизації: заміна спрацьованих деталей, регулювання робочих органів, загострення різальних частин машин, підсилення теплоізоляції в нагрівних і теплопередавальних пристроях, усунення витоків теплоти, зняття бруду з поверхонь, що обігріваються, очищення ламп і освітлювальної арматури, періодичне миття вікон у приміщеннях, які оснащені електроосвітленням, перевірка та уточнення налаштувань автоматичних регуляторів.

Для всіх галузей і процесів сільськогосподарського виробництва розроблені норми витрат енергоресурсів, зокрема електроенергії. Впровадження цих нормативів у виробництво через проекти дає можливість зекономити до 10 % споживаної електроенергії, а для цього треба в проектах передбачити установку електролічильників на кожній окремій в госпрозрахунковому відношенні ділянці (теплиця, молочна ферма ВРХ, пташник, кормоцех, овочесховище тощо).

В окремих випадках можна проектувати режими вмикання електроспоживачів за певними графіками. Але такі графіки мають бути погодженими з технологічними режимами і не спричиняти їх порушень. Особливо це стосується

утримання тварин і птиці та режимів вирощування рослинної продукції в спорудах захищеного ґрунту. Рациональне використання електроенергії за встановленими графіками може давати щорічно економію до 3–5 тис. кВт·год. на одну трансформаторну підстанцію.

Вмикання електроспоживачів за графіком доцільне для таких установок, які можуть працювати в провали електричного навантаження (наприклад, у нічні години). Такі графіки здійснюватимуться лише за умов застосування пільгових тарифів на електроенергію. Для цього потрібно передбачити встановлення багато-тарифних електролічильників. Електротехнічна промисловість України випускає дво- і три-тарифні приставки до одно- і трифазних лічильників, які окремо здійснюють облік електроенергії в звичайних і пільгових режимах подачі електроенергії.

Автоматичне вмикання електроустановок, які можуть працювати в будь-який час доби, і акумуляторів теплоти в години поза-пікового навантаження електромереж забезпечує зниження втрат електроенергії в мережах та істотно зменшує платню споживачів електроенергії. Вартість 1 кВт·год в поза-пікові години приблизно в 10 разів менше, ніж в години “пік навантаження”.

Для зниження втрат електроенергії в електромережах потрібно передбачити влаштування конденсаторних установок, що компенсують реактивну потужність. Промисловість випускає комплектні конденсаторні установки для мереж 0,38 кВ.: нерегульовані типу УК-0,38 потужністю від 75 до 216 кВа і регульовані типу УКН/П/Н-0,38 потужністю від 75 до 300 кВа із вбудованим автоматичним регулятором і кількістю ступенів регулювання до 6.

Застосування електро-водо-нагрівних установок дає можливість децентралізувати систему теплопостачання, наблизити одержання гарячої води і пари до місць її безпосереднього використання, що забезпечує економію 5–12 % теплової енергії внаслідок зменшення втрат під час транспортування.

Велика кількість енергоресурсів витрачається на обігрівання захищеного ґрунту. На 1 га площі теплиць за рік витрачається 2–2,5 тис. т умовного палива або на 1 т овочів – 10–11 тонн умовного палива (ТУП). Відомо, що з підвищенням температури лише на 1°C збільшуються витрати палива в середньому на 6,3 % або на 125–150 кг на 1 га площі теплиці. Тому система автоматичного регулювання температури, що проектується, повинна якомога точніше забезпечувати агротехнічні вимоги до температурного режиму в теплицях.

Велике значення для економії енергоресурсів має раціональна організація технологічних процесів виробництва. Наприклад, виробництво трав'яного борошна на агрегатах типу АВМ і СБ має бути безперервним, оскільки під час пуску кожного агрегату тільки на розігрівання витрачається до 30 % годинної витрати палива, а номінальна продуктивність встановлюється лише через 2 години після початку подачі сировини до барабану. Тому економічно

обґрунтований сезонний виробіток для агрегатів АВМ-0,65 становить 70–80 т, а для агрегатів АВМ-1,5 – не менш як 150 т.

Під час досушування сіна активним вентиляванням витрати на електроенергію становлять приблизно половину всіх витрат на заготівлю сіна. Особливо великі витрати енергії на підігрівання повітря. Тому доцільно застосовувати автоматизацію установок активного вентилявання. При цьому автоматика має вмикати пристрої підігрівання повітря лише за його високої відносної вологості (понад 60 %). Економія електроенергії становитиме 5–10 %.

Перспективним є застосування в сільському господарстві для обігрівання приміщень теплових насосів. Під час використання теплових насосів у системі створення штучного мікроклімату коефіцієнт перетворення енергії визначають за формулою:

$$K_{П.Е} = Q_T / W, \quad (2.1)$$

де Q_T – теплопродуктивність установки, кДж год⁻¹; W – спожита тепловим насосом енергія, кДж год⁻¹.

Коефіцієнт $K_{П.Е.}$ становить 2,5–4. Отже, на одиницю затраченої енергії можна здобути 2,5–4 одиниці теплоти.

3. Визначення витрат електроенергії в сільському господарстві

3.1. Розрахунки навантаження на освітлення

Кількість електроенергії на освітлення визначається добутком встановленої потужності освітлюваної установки на річну кількість годин використання встановленої потужності. Встановлену потужність визначають за питомою потужністю, Вт/м, і площею приміщення, що освітлюється за зовнішнім обміром. Величини питомих потужностей і годин використання встановленої потужності наводяться в довідниках із сільської електрифікації. Якщо в довіднику дається кількість годин використання максимальної потужності освітлювальної установки, то встановлену потужність потрібно помножити на коефіцієнт попиту, який також вказується в довідниках.

Інколи відома не зовнішня, а внутрішня площа приміщення. Щоб визначити зовнішню площу, потрібно значення внутрішньої площі збільшити приблизно на 20 % або помножити на коефіцієнт 1,2.

Питому потужність для люмінесцентних ламп беруть у два рази меншою, ніж для ламп розжарювання, оскільки світловіддача перших приблизно в 4 рази вища, але норма освітленості під час їх використання дається в 2 рази більша, ніж для ламп розжарювання (внаслідок присмеркового ефекту люмінесцентних ламп).

Отже, для кожного приміщення витрати електроенергії визначаються за формулою:

$$W_i = P_{П} S_{ЗОВ} T_B = P_{Bi} T_{Bi} = P_{МАКСi} T_{МАКСi} \quad (2.2)$$

де P_{Π} – питома потужність електроосвітлення, кВт/м²; $S_{ЗОВ}$ – площа приміщення за зовнішнім обміром, м²; T_B , T_{Bi} – тривалість використання встановленої потужності, год.; P_{Bi} – встановлена потужність електроосвітлення в i -му приміщенні, кВт; $P_{МАКСi}$ – максимальна потужність освітлювальної установки, кВт; $T_{МАКСi}$ – час використання максимуму навантаження, год.

Вуличне освітлення лампами розжарювання беруть на підставі норми 3,5 Вт на 1 м вулиці і 140 Вт на селянський двір. Тривалість горіння становить в середньому 2400 годин на рік. У разі освітлення вулиць газорозрядними лампами типу ДРЛ розрахункову норму слід брати в 1,5 разу нижчою.

Загальні витрати електроенергії по господарстві на освітлення визначаються як сумарні по всіх об'єктах.

3.2. Розрахунки електро-споживання силових установок

Витрати електроенергії на електроприводах робочих машин визначають множенням максимальної споживаної потужності на кількість годин роботи установки. Максимальну потужність обчислюють за встановленою потужністю електродвигуна з урахуванням ККД ($n_{ед}$), каталожної неузгодженості ($K_{к.н.}$) і ступеня завантаження робочої машини (K_3):

$$W_{\Pi} = P_{\max} T_{\text{рік}} = \frac{P_n K_{к.н.} K_3}{n_{ед}} T_{\text{рік}} \quad (2.3)$$

Для електро-нагрівних і електро-технологічних установок розрахункова (максимальна) потужність дорівнює встановленій. Тому витрати електроенергії цими установками визначають як добуток встановленої потужності та часу роботи установки.

Загальну потребу електроенергії на силові та електро-технологічні установки визначають як суму витрат всіх таких споживачів у господарстві.

3.3. Розрахунки електроспоживання на побутові потреби

Під час проектування потужності електро-споживачів в одному сільському будинку беруть:

- у населених пунктах переважно старої побудови з газифікацією розрахункова потужність електроприймачів становить 1,5 кВт, без газифікації – 1,8 кВт;
- у населених пунктах переважно нової забудови з газифікацією 1,8 кВт, без газифікації – 2,2 кВт;
- у селищах міського типу, в будинках при великих сільськогосподарських комплексах із газифікацією – 4 кВт (на квартиру), без газифікації – 5 кВт;

- навантаження для жилих будинків з електроплитами беруть рівним 6 кВт, а з електроплитами і водо-нагрівниками 7,5 кВт. Під час використання побутових кондиціонерів розрахункова потужність збільшується ще на 1 кВт.

Під часи розрахунків електро-споживання встановлену потужність електроприймачів множити на кількість годин використання встановленої потужності (беруть 450–500 год. на рік).

Електричне навантаження на вводах у приміщення комунально-побутового призначення (їдальні, магазини, лазні, клуби та ін.) визначають за нормами, що наводяться у відповідних довідниках. Там же вказується кількість годин використання встановленої потужності.

Для визначення загальної потреби господарства в електроенергії підсумовують витрати електроенергії всіма споживачами і до них додають ще 6 % електроенергії для врахування втрат в електромережах господарства, тобто:

$$W_{\text{заг}} = 1,06 \sum_{i=1}^n W_i. \quad (2.4)$$

4. Визначення потужності системи опалення

Для визначення потужності системи опалення сільськогосподарського приміщення складають його тепловий баланс для найбільш холодного періоду року з огляду на положення, що надходження та втрати теплоти збалансовані і температура повітря залишається незмінною.

Тепловий баланс приміщення складають на підставі тепло-надходження від тварин, птиці, установок освітлення, електрообладнання та інше, а також на підставі витрат теплоти на випаровування та інфільтрацію повітря, витрат крізь огорожувальні конструкції.

Рівняння теплового балансу для тваринницького (птахівничого) приміщення має вигляд, Вт:

$$Q_{\text{он}} + Q_{\text{об}} + Q_{\text{тв}} = Q_{\text{ог}} + Q_{\text{инф}} + Q_{\text{тв}}, \quad (2.5)$$

де $Q_{\text{он}}$ – потік теплоти від системи опалення; $Q_{\text{об}}$ – тепловиділення технологічного обладнання; $Q_{\text{тв}}$ – теплота від тварин (птиці); $Q_{\text{ог}}$ – тепловтрати крізь огорожувальні конструкції; $Q_{\text{инф}}$ – витрати теплоти з інфільтрацією повітря; $Q_{\text{тв}}$ – витрати теплоти на випаровування вологи.

З рівняння теплового балансу потужність системи опалення дорівнює:

$$Q_{\text{он}} = Q_{\text{ог}} + Q_{\text{инф}} + Q_{\text{в}} - Q_{\text{об}} - Q_{\text{тв}}. \quad (2.6)$$

Для будь-якого іншого приміщення потужність системи опалення визначається:

$$Q_{\text{он}} = Q_{\text{ог}} + Q_{\text{инф}} + Q_{\text{в}} - Q_{\text{об}} - Q_i, \quad (2.7)$$

де Q_i – інші тепловиділення (наприклад, виділення теплоти з овочів у овочесховищах тощо).

5. Розрахунки вентиляції сільськогосподарських виробничих приміщень

Вентиляція виробничих приміщень потрібна для підтримання в допустимих нормативних межах вологості і температури повітря, а також допустимої концентрації шкідливих газів і пилу в атмосфері.

Вентилятори вибирають за тиском і витратою. Розрахункову витрату вентилятора Q_v , м³/год., визначають за повітрообміном, який потрібен для забезпечення заданого мікроклімату в приміщенні, що вентилується, а розрахунковий тиск – за значенням втрат тиску в повітропроводах та обладнанні.

Повітрообмін визначають за допустимими значеннями вмісту вуглекислоти, вологовмісту і температури повітря.

За допустимим вмістом вуглекислоти в повітрі *тваринницького приміщення* повітрообмін:

$$L_{\Pi} \Sigma n_i m_i / (x_d - 0,3), \quad (2.8)$$

де n_i – кількість тварин даної групи; m_i – кількість вуглекислоти, що виділяється однією твариною, л/год.; x_d – допустима норма концентрації вуглекислоти в приміщенні, л/м³; 0,3 л/м³ – вміст вуглекислоти в зовнішньому повітрі.

Для *птахівницьких приміщень* повітрообмін визначають за формулою:

$$L_{\Pi} = n g m / (x_d - 0,3), \quad (2.9)$$

де n – кількість птиці; g – середня маса птиці; m – кількість вуглекислоти на 1 кг живої маси птиці, л/(кг год.).

Гранична допустима норма концентрації вуглекислоти в тваринницьких приміщеннях – 2,5 л/м³, у птахівничих – 1,8–2 л/м³.

За допустимим вологовмістом повітрообмін визначається:

$$L_{\Pi} = \Sigma W / [(d_d - d_H) \gamma_c], \quad (2.10)$$

де ΣW – сумарне надходження водяних парів із усіх джерел до атмосфери приміщення, кг/год.; d_d – вологовміст повітря в приміщенні за допустимої відносної вологості для даного виду тварин; d_H – вологовміст зовнішнього повітря, який визначається по $I-d$ діаграмі; γ_n – маса 1 м³ сухого повітря, кг.

Сумарне волого-виділення в тваринницьких (птахівничих) приміщеннях визначають як загальне виділення вологи від тварин (птиці), підстилки, гною (посліду), поїлок тощо.

Орієнтовано повітрообмін можна визначити за формулою:

$$L_{\Pi} = G L_{\Pi IT}, \quad (2.11)$$

де G – сумарна маса всіх живих тварин (птиці), що перебувають у приміщенні, кг; $L_{\Pi IT}$ – повітрообмін на 1 кг живої маси, м³/(кг·год.), (див. табл. 2.1).

Після визначення L_{Π} знаходять кратність повітрообміну K , тобто скільки разів змінюється повітря в приміщенні за 1 год.:

$$K = L_{\Pi} / V, \quad (2.12)$$

де V – об'єм приміщення, що вентилується, м³.

Для тваринницьких приміщень кратність повітрообміну $K = 3\text{--}5$ разів/год.

Таблиця 2.1 – Повітрообмін на 1 кг маси тварин (птиці)

Вид тварин (птиці)	Повітрообмін, м ³ /(кг год.)		
	взимку	у перехідний період	Влітку (не менше)
Корови та молодняк ВРХ	0,17	0,25	0,40
Телята	0,20	0,25	0,40
Свиноматки, кнури, поросята	0,15	0,45	0,60
Свині на відгодівлі	0,20	0,45	0,65
Кури при утриманні на підлозі	1,4	4,0	7,0
Кури при утриманні в клітках	1,1	3,6	5,5
Бройлери	1,1	3,0	6,0

За однакової швидкості руху повітря на всіх ділянках повітропровідної мережі розрахунковий тиск вентилятора визначається за формулою:

$$H = \gamma v^2 / 2(\lambda l / d + \Sigma \beta), \text{ Па} \quad (2.13)$$

де γ – густина повітря (у середньому 1,2 кг/м³); v – швидкість руху повітря в трубі (не більш як 12–15 м/с для горизонтальних і 10 м/с для вертикальних повітропроводів); λ – коефіцієнт тертя (для круглих залізних труб $\lambda = 0,02$); l – довжина повітропроводу, м; d – внутрішній діаметр труби, м; $\Sigma \beta$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів (див. табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти місцевих опорів

Місцевий опір	Коефіцієнт B
Коліно:	
прямокутне	1,1
з кутом 120°	0,55
>> 150°	0,20
Коліно з плавним заокругленням при відношенні радіуса заокруглення R до діаметра труби D , що дорівнює 1	0,25
Те саме при відношеннях:	
$R/D = 1,5$	0,175
$R/D = 2,0$	0,15
Несподіване звуження при відношенні діаметра меншої труби d до діаметра більшої D , що дорівнює 0,1	0,29
Те саме при відношеннях:	
$d/D = 0,3$	0,25
$d/D = 0,4$	0,21
$d/D = 0,5$	0,18
Несподіване розширення при $d/D = 0,1$	0,81
Те саме:	
при $d/D = 0,3$	0,49
при $d/D = 0,5$	0,25
Дросель або засувка	0,01... 0,08
Боковий вхід	1,0
Вхід із кінця	0,3
Вихід із кінця	1,0

Сітка з живою площею перерізу 80 %	0,1
Жалюзі:	
вхід	0,5
вихід	3,0

Якщо швидкість руху повітря на ділянках неоднакова, то витрати тиску в кожному місцевому опорі визначають окремо за формулою:

$$h_m = \beta \gamma v^2 / 2, \quad (2.14)$$

а розрахунковий тиск за формулою:

$$H = \lambda \gamma v^2 (l/2) d + \Sigma h_m. \quad (2.15)$$

За розрахунковими значеннями L_{Π} і H вибирають у каталозі вентилятор (з округленням у більшу сторону), далі визначають розрахункову потужність електродвигуна P , кВт, за формулами (4.4) та (4.5).

6. Розрахунки водопостачання

У сільськогосподарських об'єктах воду витрачають на напування тварин і птиці, зрошення рослин, а також на технологічні, гігієнічні, господарчі та протипожежні потреби. Добову кількість води за формулою визначають, m^3 :

$$Q_{\text{доб.сп}} = \sum_{i=1}^n q_i m_i, \quad (2.16)$$

де q_i – добова норма витрат води одним споживачем, m^3 ; m_i – кількість споживачів, які мають однакову норму витрат води. У таблиці 2.3. наведено норми витрати води.

У південних сухих і жарких районах України норми можуть бути підвищені на 25 %. Якщо в тваринницькому приміщенні передбачено гідрозмив гною, тоді передбачають додатково витрати води від 4 до 10 л на кожну тварину.

Таблиця 2.3 – Норми витрати води в тваринництві

Вид тварин (птиці)	Норма витрат, л/год.	Вид тварин (птиці)	Норма витрат, л/год.
Корови молочні	100	Кнури	25
Корови м'ясної породи	70	Свині з поросятами	60
Бугаї та нетелі	60	Свиноматки без поросят	25
Молодняк ВРХ	30	Поросята	5
Телята	20	Свині на відгодівлі	15
Коні робочі	60	Кури	1
Лошата до 1,5р.	45	Індики	1,5
Вівці дорослі	10	Качки, гуси	2
Молодняк овець	6	Кролі	3

Примітка: Для молодняку птиці норми зменшують удвічі.

Для типових тваринницьких комплексів визначені такі добові витрати води: у свинокомплексі з вирощування та відгодівлі 108 тис. голів – 2953 m^3 (з них

майже 60 % використовують на гідрозмив гною і прибирання приміщень); у комплексі з вирощування та відгодівлі 10 тис. голів молодняку ВРХ – 935 м³, у молочному комплексі на 1200 корів – 460 м³.

У довідковій літературі наведено норми витрат води в спорудах захищеного ґрунту, у підприємствах з переробки сільськогосподарської продукції (консервні, маслоробні, молочні, м'ясопереробні та ін.).

Для забезпечення населення водою застосовують такі добові норми на одного мешканця: у житлових будинках з водопроводом і каналізацією без ванн – 125–160 л; те саме з ваннами і місцевими водонагрівачами – 160–230 л; те саме з централізованим гарячим водопостачанням – 250–350 л.

Крім регулярного забезпечення водою сільськогосподарського виробництва і сільського населення, систему водопостачання розраховують на гасіння пожеж. Витрати води на гасіння однієї пожежі у виробничих приміщеннях визначають враховуючи вогнестійкість будівель, їхні розміри та категорії виробництва. Для більшості сільськогосподарських споруд витрати води на одну пожежу становлять від 10 до 20 л/с з тривалістю гасіння пожежі три години.

Запитання для самоперевірки

1. Назвіть категорії надійності електропостачання споживачів?
2. Комплектні трансформаторні підстанції?
3. З чого складаються резервні електростанції?
4. Як розрізняють дизельні електростанції?
5. Як визначити добове споживання кількості води в тваринництві?
6. Як провести розрахунок вентиляції сільськогосподарських виробничих приміщень?
7. Як визначити потужності системи опалення?
8. Як провести розрахунки електроспоживання на побутові потреби?
9. Як провести розрахунки навантаження на освітлення?
10. Як провести розрахунки електроспоживання силових установок?

Павлик Лекція № 3

Розрахунки і вибір технічних засобів електрифікації

План:

- 1. Розрахунок і вибір електроприводів;*
- 2. Розрахунок і вибір освітлювальних та опромінювальних установок;*
 - 2.1. Види і системи освітлення;*
 - 2.2. Світильники;*
 - 2.3. Розрахунок і проектування освітлення;*
 - 2.4. Розрахунок і вибір установок для опромінення рослин за умов захищеного ґрунту;*
 - 2.5. Розрахунок і вибір установок для ультрафіолетового опромінення;*
 - 2.6. Розрахунок і вибір установок інфрачервоного та комбінованого опромінення;*
- 3. Розрахунок та вибір електронагрівників;*
 - 3.1. Розрахунок і вибір установок для нагрівання води;*
 - 3.2. Електричне обігрівання в парниках і теплицях;*
 - 3.3. Електричне обігрівання підлоги;*
 - 3.4. Тепловий та електричний розрахунок електронагрівальних установок;*
- 4. Розрахунки і вибір установок для застосування електротехнологій у сільськогосподарському виробництві;*

1. Розрахунок і вибір електроприводів

Електропривод – це електромеханічний пристрій для електрифікації та автоматизації робочих процесів. У загальному випадку електропривод складається з перетворювального, електрорушійного, передавального та керуючого пристроїв. В окремих випадках перетворювального і передавального пристроїв (або одного з них) електропривод може не мати.

Електропривод має якісно забезпечувати нормальне протікання технологічного процесу при розрахунковій продуктивності робочої машини і високій економічній ефективності. Рациональний електропривод слід вибирати за такими вимогами:

- найбільш повна відповідність електроприводу приводним характеристикам робочої машини (технологічним, кінематичним, механічним, навантажувальним та інерційним);
- максимальне використання потужності електродвигуна в процесі роботи;
- відповідність елементів електропривода умовам навколишнього середовища;
- відповідність електропривода параметрам електромережі, від якої він живиться;

- прийнятний зовнішній вигляд, зручність і безпечність експлуатації.

Нині сільськогосподарські машини здебільшого поставляються комплексно з електроприводом. Тому лише в окремих випадках доводиться виконувати повний вибір електродвигуна за родом струму, величиною напруги, режимом роботи, електричною модифікацією, формою виконання за способом кріплення і конструкцією підшипникових вузлів, кліматичним виконанням, ступенем захисту від впливу зовнішнього середовища, частотою обертання та потужністю.

Частіше задача вибору електропривода зводиться до оцінки відповідності його робочій машині та мережі живлення. При цьому перевіряють таке:

- відповідність електропривода робочій машині за умовами пуску і забезпечення нормального протікання технологічного процесу за відомих параметрів живильної мережі; відповідність елементів електропривода умовам зовнішнього середовища;

- правильність вибору і налагодження апаратури керування і захисту;

- можливість забезпечення необхідного числа вмикань електродвигуна під час повторно-короткочасного режиму роботи.

Під час визначення відповідності електропривода робочій машині проводять його енергетичну оцінку.

Відповідність елементів електропривода умовам зовнішнього середовища визначають порівнюючи умови роботи електропривода з виконанням електрообладнання. Залежно від навколишнього середовища сільськогосподарські виробничі приміщення, в яких експлуатується електрообладнання, поділяють на такі категорії:

- *сухі* (відносна вологість не перевищує 60 %) – приміщення для обслуговуючого персоналу ферм, інкубаторів, обладнання для обробки яєць, приміщення для розміщення шаф, ящиків і пультів керування, опалювальні склади;

- *вологі* (відносна вологість більше як 60 %, але не перевищує 75 %, пара та волога, що конденсується, виділяються лише тимчасово і в невеликих кількостях) – неопалювані склади для негорючих матеріалів;

- *вогкі* (відносна вологість тривало перевищує 75 %) – молочні та доїльні зали, а також корівники, свинарники, телятники, пташники за наявності установок для створення мікроклімату;

- *особливо вогкі* (вологість повітря близька до 100 %) – кормоцехи для приготування вологих кормів, мийні відділення, парники, теплиці, зовнішні установки (під навісом);

- *приміщення з хімічно активним або органічним середовищем* (постійно або тривало містять агресивну пару, гази, рідини, утворюються відкладення або плісень, які руйнують ізоляцію і струмопровідні частини обладнання) – склади хімічних добрив, приміщення для протруювання насіння, а також корівники,

свинарники, телятники, пташники та інші тваринницькі приміщення за відсутності в них установок для створення мікроклімату;

- *запилені приміщення* (за умовами виробництва виділяється технологічний пил у такій кількості, що осідає на проводи, проникає всередину машин і апаратів) – пункти післяжнивної обробки зерна та технічних культур, агрегати для приготування трав'яного борошна, комбікормові заводи, склади сипучих негорючих матеріалів тощо. Запилені приміщення поділяють на приміщення з струмопровідним пилом і з не струмопровідним пилом;

- *жаркі приміщення* (температура постійно або періодично більше доби становить 35 °С) – сушарки, котельні.

Приміщення можуть мати *пожежо-небезпечні зони*: класу П-I – склади горючих рідин з температурою спалаху вищою за 61 °С; класу П-II – приміщення, в яких виділяється горючий пил чи волокна з нижчою межею займання більш як 65 г/м³ щодо об'єму повітря; П-IIa – зони в приміщеннях, де перебувають тверді горючі речовини; П-III – зони за межами приміщень, в яких є горючі рідини, що мають температуру спалаху більшу за 61 °С, або тверді горючі речовини.

Приміщення можуть мати вибухонебезпечні зони, в яких є або можуть утворюватись вибухонебезпечні суміші.

У кінці марок електротехнічних виробів проставляють літери і цифри, що позначають кліматичне виконання і категорію розміщення виробу згідно з ГОСТ 15150-69 (наприклад, У1, У2, У3 і т.д.).

Кліматичними факторами зовнішнього середовища є температура, вологість повітря, тиск повітря чи газу (висота над рівнем моря), сонячна радіація, дощ, вітер, пил (зокрема сніговий, різкі зміни температури, соляний туман, іній, гідростатичний тиск води, дія плісневих грибів, вміст у повітрі корозійно активних агентів).

Вироби, призначені для експлуатації на суші, ріках, озерах, мають такі *кліматичні виконання*: У – для макрокліматичних районів з помірним кліматом; ХЛ – для макрокліматичних районів з холодним кліматом; УХЛ – для макрокліматичних зон з помірним і холодним кліматом; ТВ і ТС – відповідно для макрокліматичних зон з тропічним вологим і тропічним сухим кліматом; Т – для макрокліматичних зон з тропічним сухим і тропічним вологим кліматом; О – для всіх макрокліматичних районів на суші (загально-кліматичне виконання).

Категорії розміщення електрообладнання позначають такими цифрами:

1 – для роботи на відкритому повітрі;

2 – для роботи у приміщеннях, де коливання температури і вологості повітря неістотно відрізняються від коливань на відкритому повітрі, наприклад у наметах, кузовах, причепах, металевих приміщеннях без теплоізоляції, а також у кожухах комплектних пристроїв виробів категорії I або під навісом (відсутня пряма дія сонячної радіації і атмосферних опадів на виріб);

3 – для роботи у закритих приміщеннях з природною вентиляцією без штучного регулювання кліматичних умов, де коливання температури і вологості повітря, а також дія піску та пилу значно менші, ніж зовні, наприклад у металевих з теплоізоляцією, кам'яних, бетонних, дерев'яних приміщеннях (значне зменшення дій сонячної радіації, вітру, атмосферних опадів, відсутність роси);

4 – для роботи у приміщеннях з штучно регульованим мікрокліматом, наприклад у закритих з опаленням чи охолодженням і вентиляцією виробничих та інших, зокрема, підземних приміщеннях з доброю вентиляцією (відсутність прямої дії сонячної радіації, відсутність дії атмосферних опадів, вітру, а також піску та пилу зовнішнього повітря);

5 – для роботи у приміщеннях з підвищеною вологістю.

Електричні вироби сільськогосподарського призначення згідно з ГОСТ 19348-82 “Вироби електротехнічні сільськогосподарського призначення” мають виготовлятися у кліматичному виконанні У. До макрокліматичних районів з помірним кліматом відносяться райони, в яких середня із щорічних абсолютних максимумів температури повітря становить плюс 40 °С або нижча, а середня із щорічних абсолютних мінімумів температури повітря становить – 45 °С або вища.

Згідно з ГОСТ 14254-96 “Ступені захисту, що забезпечуються оболонками (Код IP)” на оболонках виробів або табличках з паспортними даними проставляють літери IP, далі дві характеристичні цифри або символи X та за необхідності одну або дві додаткові літери (наприклад, IP23CH, IP54C, IPX1C, IP5X, IPXXC, IPX5/IPX7).

Перша цифра вказує на ступінь захисту персоналу від дотику до струмопровідних і рухомих частин обладнання під оболонкою, а також від потрапляння твердих сторонніх предметів, друга – ступінь захисту електрообладнання від потрапляння води під оболонку.

На першому місці після літер IP можуть стояти такі умовні цифрові позначення:

0 – відсутній захист персоналу від випадкового дотику до струмопровідних чи рухомих частин, що містяться під оболонкою, а також обладнання від потрапляння твердих сторонніх тіл;

1 – захист від випадкового дотику великої ділянки поверхні людського тіла до струмопровідних та рухомих частин, що містяться під оболонкою, та захист обладнання від потрапляння під оболонку твердих тіл, діаметр яких перевищує 52,5 мм;

2 – захист від випадкового дотику пальців до струмопровідних чи рухомих частин, що містяться під оболонкою, і захист обладнання від потрапляння твердих сторонніх тіл діаметром не менш як 12,5 мм;

3 – захист від зіткнення інструменту, дроту чи інших подібних предметів завтовшки понад 2,5 мм з струмопровідними або рухомими частинами дрібних твердих сторонніх предметів діаметром не менш як 2,5 мм;

4 – захист від зіткнення інструменту, дроту чи інших подібних предметів завтовшки понад 1 мм з струмопровідними частинами, що містяться під оболонкою, захист обладнання від потрапляння дрібних твердих сторонніх тіл завтовшки понад 1 мм;

5 – повний захист персоналу від випадкового дотику до струмопровідних чи рухомих частин, що містяться під оболонкою, і захист обладнання від шкідливих відкладень пилу;

6 – повний захист персоналу від випадкового дотику до струмопровідних чи рухомих частин, що містяться під оболонкою, і повний захист обладнання від потрапляння пилу;

X – за відсутності в нормуванні вказаного захисту.

Друга цифра розшифровується так:

0 – обладнання, не захищене від проникнення води всередину оболонки;

1 – захист від крапель сконденсованої води. Краплі сконденсованої води, що падають вертикально на оболонку, не повинні шкідливо діяти на обладнання, що міститься під оболонкою;

2 – захист від крапель води, що падають на оболонку, нахилену під кутом 15° щодо вертикалі. Краплі не повинні шкідливо діяти на обладнання, що міститься під оболонкою;

3 – захист від дощу. Дощ, що падає на оболонку, нахилену під кутом не більш як 60° щодо вертикалі, не повинен шкідливо діяти на обладнання, що міститься під оболонкою;

4 – захист від бризок, що падають під будь-яким кутом. Бризки не повинні шкідливо діяти на обладнання, що міститься під оболонкою;

5 – захист від струменів води. Водною із брансбойту з насадкою поливають оболонку за умов, що зазначені в стандартах чи технічних умовах на окремі види електрообладнання, при цьому вода не повинна шкідливо впливати на обладнання, що міститься під оболонкою;

6 – захист від впливів, характерних для палуби корабля (включаючи палубне водонепроникне обладнання). При заливанні морською хвилею вода не повинна проникати під оболонку за умов, що зазначені в стандартах чи технічних умовах на окремі види електрообладнання;

7 – захист при зануренні у воду на час, передбачений стандартами або технічними умовами на окремі види електрообладнання. Вода не повинна проникати під оболонку;

8 – захист від необмежено тривалого занурення у воду при тиску, що зазначений в стандарті чи технічних умовах на окремі види електрообладнання. Вода не повинна проникати під оболонку;

X – за відсутності в нормуванні вказаного захисту.

Додаткові літери застосовуються для визначення захисту від доступу до небезпечних частин:

A – захист від доступу тильної сторони руки або щупом діаметром 50 мм;

B – захист від доступу пальцем руки або щупом діаметром 12 мм;

C – захист від доступу інструментом або щупом діаметром 2,5 мм;

D – захист від доступу дротом або щупом діаметром 1,0 мм.

Допоміжні літери застосовуються для надання додаткової інформації про небезпечні фактори:

H – високовольтні апарати;

M – шкідлива дія від потрапляння води під оболонку для обладнання з рухомими частинами, які знаходяться в стані руху;

S – шкідлива дія від потрапляння води під оболонку для обладнання з рухомими частинами, які знаходяться в нерухомому стані.

Додаткові літери використовують лише в тих випадках, коли дійсний захист від доступу до небезпечних частин вище захисту, який вказаний першою характеристичною цифрою або якщо позначений тільки захист від доступу до небезпечних частин, а перша характеристична цифра замінена символом X.

Згідно з ГОСТ 19348-82 “Вироби електротехнічні сільськогосподарського призначення” оболонки низьковольтних комплектних пристроїв повинні мати ступінь захисту: IP23, IP30, IP31, IP41, IP44, IP51, IP54 та IP55. Рекомендовані для сільськогосподарського виробництва типи електродвигунів наведено в табл. 4.1.

Технічні характеристики електродвигунів серії АІР основного та сільськогосподарського виконань наведені в додатках 8 і 9.

Допустиме число вмикань електродвигуна за годину визначають за формулою:

$$Z_{\text{дон}} = 2250 \frac{(1-\varepsilon)(1+\alpha)}{K_i^2 \cdot t_{\text{розг.дон}}},$$

де ε – коефіцієнт відносної тривалості вмикання електродвигуна (відношення часу роботи до часу циклу); α – коефіцієнт втрат (відношення постійних втрат до змінних втрат електродвигуна); K_i – кратність пускового струму; $t_{\text{розг.дон}}$ – допустимий час розгону електродвигуна.

Для енергетичної оцінки електропривода визначають коефіцієнт завантаження, коефіцієнт потужності та питому витрату електроенергії на виробництво одиниці продукції. Коефіцієнт завантаження електродвигунів, що працюють у тривалому режимі, повинен задовольняти такі умови:

$$0,7 < K_{зав} \leq 1.$$

(4.2)

Таблиця 4.1 – Електродвигуни, рекомендовані для застосування у сільськогосподарському виробництві

Електродвигуни	Приміщення
1. Асинхронні основного виконання серії АИ...УЗ	Сухі і вологі
2. Асинхронні серії АИР...КРУЗ для короткочасного режиму роботи	Те саме
3. Асинхронні серії АИРС...УЗ	Те саме
4. Асинхронні серії АИ...БСУ2 сільськогосподарського виконання з вбудованим температурним захистом	Вологі, особливо вологі і для установок під навісом
5. Асинхронні серії АИ...ЗБСУ2 з вбудованим датчиком температури і прибудованим електронним блоком температурного захисту	Те саме
6. Асинхронні серії АИР...КРУ2 для короткочасного режиму роботи	Те саме
7. Асинхронні серії АИРС...У2 з підвищеним ковзанням	Те саме
8. Асинхронні серії АИРП...У2 для приводу вентиляторів тваринницьких і птахівницьких комплексів	Те саме
9. Асинхронні багато-швидкісні серії АИР112...УХЛ1 та АИР132...УХЛ1	Особливо вологі з хімічним або органічним середовищем
10. Асинхронні серії АИР...КРБСУ1 з температурним захистом для короткочасного режиму роботи	Те саме
11. Асинхронні серії АИРП80А8/4СУ2 для приводу вентиляторів тваринницьких і птахівницьких комплексів	Те саме

Розробляючи схеми централізованого керування потоковою лінією, передбачають ручне і автоматичне керування. Ручне керування забезпечує пуск і зупинку кожного електродвигуна окремо. Автоматичне керування забезпечує автоматичний пуск машин і механізмів у напрямі, зворотному потоку продукту, а зупинку – у напрямі руху продукту. При цьому робота машин вхолосту і з недовантаженням має бути зведена до мінімуму. У разі зупинки однієї з машин автоматично вимикатимуться всі інші, що їй передують, а наступні машини вимикатимуться лише після переробки матеріалу, який у них залишився.

Керування потоковою лінією здійснюється з пульта або щита керування. На пульті (щиті) керування розміщують засоби контролю і керування. Для полегшення роботи оператора на фасаді передньої панелі щита або на похилій панелі пульта розміщують спрощену схему технологічного процесу

(мнемосхему). Передбачають звукову та світлову сигналізацію, яка виконує контроль за станом машин і попереджає обслуговуючий персонал про порушення нормального ходу технологічного процесу.

У сучасному електроприводі сільськогосподарських машин і агрегатів широко використовують комплектні пристрої керування - блоки, шафи, ящики, пульти, станції тощо.

Умовне позначення низьковольтних комплектних пристроїв керування за ОСТ 16.0.800.876-81 розшифровується так:

Перший знак – літера – характеристика за конструкцією (Б – блок, П – панель, Ш – шафа, Щ – щит відкритий, Я – ящик, С – пульт).

Другий знак – цифра – позначення класу, наприклад: 5 – керування трифазними асинхронними електродвигунами із короткозамкненим ротором; 6 – те саме, але для двигунів з фазним ротором; 7 – керування синхронними машинами; 8 – вводу та розподілу електроенергії; 9 – автоматичного регулювання та керування спеціальними електроприводами.

Третій знак – цифра – позначення групи в певному класі.

Наприклад, в класі 5 в такі групи: 1 – прямий пуск електродвигуна без реверсування та електричного гальмування; 4 – прямий пуск двигуна, реверсування, гальмування проти вмикання; 6 – прямий пуск, без реверсування чи з реверсуванням, з динамічним гальмуванням; 7 – керування багато-швидкісними двигунами; 8 – пуск двигуна при зниженій напрузі, регулювання швидкості зміною напруги на статорі; 9 – керування кількома двигунами; 0 – з іншими особливостями, відмінними від вищезазначених.

Четвертий і п'ятий знаки – цифри – порядковий номер розробки в межах однієї групи.

Шостий і сьомий знаки – цифри – позначення за номінальною силою струму головних кіл: 26-4А; 30-10А; 32-16А; 34-25А; 36-40А; 38-63А; 40-100А; 42-160А; 44-250А.

Восьмий знак – цифра або літера – умовне позначення за номінальною напругою головного кола (4-220В, 7-380 В, А-660 В змінного струму).

Дев'ятий знак – цифра або літера – позначення напруги кіл керування (Б-12В, 3-24В, Г-36В, А-48В, 1-110В, 2-220 В постійного струму; Л-36В, М-42В, 3-110В, Н-127В, 4-220В, 7-380 В змінного струму).

Десятий і одинадцятий знаки – кліматичне виконання та категорія розміщення.

Наприклад, шафа керування електроприводами кормоцеху КОРК-15 має позначення Ш5926-4674УХЛ4 і розшифровується так:

Ш – шафа; 5 – клас керування трифазними асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором; 9 – група (керування кількома електродвигунами); 26 – порядковий номер розробки; 46 – позначення

номінальної сили струму (400А); 7 – номінальна напруга головного кола (380 В); 4 – номінальна напруга кіл керування (220 В); УХЛ4 – кліматичне виконання і категорія розміщення за ГОСТ 15150-69.

Для приводу робочих машин і механізмів, що розробляється у курсовому або дипломному проекті, електродвигуни вибирають за родом струму, величиною напруги, режимом роботи, електричною модифікацією, формою виконання (способом кріплення і конструкцією підшипникових вузлів), кліматичним виконанням, ступенем захисту від впливу зовнішнього середовища, частотою обертання та потужністю.

Для машин, що мають тривалий режим роботи з постійним або мало змінним навантаженням, розрахункову потужність електродвигуна визначають за формулою:

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{м}} / \eta_{\text{пер}}, \quad (4.3)$$

де $P_{\text{м}}$ – потужність, потрібна на валу машини, кВт; $\eta_{\text{пер}}$ – ККД передачі.

Розрахункову потужність для насоса визначають за формулою:

$$P_{\text{дв}} = \frac{Q_{\text{н.ном}} H_{\text{н.ном}} \gamma g K_{\text{зан}}}{\eta_{\text{н}} \eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (4.4)$$

де $Q_{\text{н.ном}}$ – номінальна подача насоса, м³/с; $H_{\text{н.ном}}$ – номінальний напір, м; γ – густина води, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; $\eta_{\text{н}}$ – номінальний ККД насоса; $K_{\text{зан}}$ – коефіцієнт запасу потужності (беруть при потужності: до 0,75 кВт – 2; від 0,75 до 1,5 – 1,5; від 1,5 до 3,5 – 1,2; від 3,5 до 35 – 1,15 і при потужності понад 35 кВт – 1,1).

Розрахункову потужність для вентилятора визначають за формулою:

$$P_{\text{дв}} = \frac{L_{\text{в.ном}} P_{\text{в.ном}} K_{\text{зан}}}{\eta_{\text{в}} \eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (4.5)$$

де $L_{\text{в.ном}}$ – номінальна подача вентилятора, м³/с; $P_{\text{в.ном}}$ – номінальний тиск вентилятора, Па; $K_{\text{зан}}$ – коефіцієнт запасу потужності електродвигуна (для електродвигунів осьових $K_{\text{зан}} = 1,1$; для електродвигунів відцентрових вентиляторів приймають: при розрахунковій потужності до 0,5 кВт – 1,5; від 0,5 до 1,0 кВт – 1,3; від 1,0 до 2,0 – 1,2; від 2,0 до 3,0 кВт – 1,15); $\eta_{\text{в}}$ – номінальний ККД вентилятора.

Під час визначення фактичної потужності, потрібної на валу насоса (вентилятора), слід враховувати розбіжність між номінальною і фактичною частотами обертання. Перерахування основних параметрів насосів і вентиляторів виконують за формулами:

$$Q = Q_{\text{ном}} (n/n_{\text{ном}}); H = H_{\text{ном}} (n/n_{\text{ном}})^2 \quad (4.6)$$

$$M_{\text{с}} = M_{\text{с.н.н}} (n/n_{\text{ном}})^2, P_{\text{сп}} = P_{\text{сп.но}} (n/n_{\text{ном}})^3 \quad (4.7)$$

де $n_{\text{ном}}$, n – відповідно номінальна і фактична частоти обертання насоса (вентилятора); $Q_{\text{ном}}$, Q – відповідно номінальна і фактична продуктивність; $M_{\text{с.ном}}$,

M_c – відповідно номінальний і фактичний моменти статичних спорів; $P_{cn \text{ ном}}$, P_{cn} – потужності, споживані вентилятором (насосом) за номінальної і фактичної частот обертання.

Для приводу вакуум-насоса потужність електродвигуна визначається за формулою, кВт:

$$P_{\partial\partial} = \frac{Q_{в.н} h}{\eta_{в.н} \eta_{пер}} 10^{-3},$$

де $Q_{в.н}$ – подача вакуум-насоса, м³/с; h – вакуум, створюваний вакуум-насосом, Па; $\eta_{в.н}$ – ККД вакуум-насоса.

Потужність електродвигуна для приводу транспортувальних машин здебільшого визначають методом наближених розрахунків. Так, для скребкових, стрічкових і гвинтових конвеєрів розрахунки виконують за формулою:

$$P_{\partial\partial} = \frac{Q_{кв} K_{ем} (K_{он} L \cos \alpha + H)}{376 \eta_{кв} \eta_{пер}},$$

де $Q_{кв}$ – продуктивність конвеєра, т/год.; $K_{ем}$ – коефіцієнт втрат потужності під час пуску конвеєра (наближено можна брати: для скребкових конвеєрів – 1,8; стрічкових – 1,4; гвинтових – 1,1); $K_{он}$ – загальний коефіцієнт опору переміщенню матеріалу (для скребкових конвеєрів – 2,0; стрічкових – 0,15; гвинтових при транспортуванні зерна – 1,85); L – довжина конвеєра, м; H – висота підйому матеріалу конвеєром, м; $\eta_{кв}$ – ККД конвеєра.

Для машин, що мають тривалий режим зі змінним навантаженням, потужність приводного електродвигуна за умовами нагрівання вибирають користуючись методом середніх втрат або методами еквівалентних струму, моменту чи потужності.

Під час пуску асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором споживають струм у кілька разів вищий за номінальний. Цей струм спричинює в трансформаторі та мережі додаткові втрати напруги. Момент, який розвиває асинхронний електродвигун, пропорційний квадрату підведеної напруги. Напруга може спадати настільки, що двигун не зможе запуститись. Тому електромережі напругою 0,38 кВ перевіряють за умовами пуску асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором. Електромережа має забезпечувати нормальний пуск кожного електродвигуна та стійку роботу під час пуску всіх інших, раніше ввімкнених, електродвигунів.

Пуск електродвигуна і нормальна робота раніше ввімкнених електродвигунів будуть можливі за таких умов:

$$\Delta U_{фак} \leq \Delta U_{дон} \text{ і } \Delta U_{фак.пр} \leq \Delta U_{дон.пр}, \quad (4.8)$$

де $\Delta U_{фак}$, $\Delta U_{фак.пр}$ – відповідно спад напруги на затискачах електродвигуна під час його пуску і на затискачах працюючих електродвигунів; $\Delta U_{дон}$, $\Delta U_{дон.пр}$ –

відповідно допустимий спад напруги на затискачах електродвигуна, що запускається, і на затискачах працюючих електродвигунів, %.

На затискачах електродвигуна під час пуску спад напруги дорівнює:

$$\Delta U = U_{\text{ном}} - U_{\text{пус}}; \quad (4.9)$$

у відсотках від його номінального значення визначається як:

$$\Delta U = (1 - U_{\text{пус}} / U_{\text{ном}}) 100, \quad (4.10)$$

де $U_{\text{пус}}$ – напруга на затискачах електродвигуна на початку пуску, В.

Момент електродвигуна пропорційний квадрату напруги:

$$(U_{\text{пус}} / U_{\text{ном}})^2 = M_{\text{пус}} / M_{\text{пус.ном}} \quad (4.11)$$

де $M_{\text{пус}}$ – пусковий момент, який розвиває електродвигун на початку пуску; $M_{\text{пус.ном}}$ – номінальне значення пускового моменту.

Для запуску електродвигуна потрібно, щоб виконувалася умова:

$$M_{\text{пус}} \geq M_{\text{зр}} + M_{\text{над}}, \quad (4.12)$$

де $M_{\text{зр}}$ – момент зрушення робочої машини, Н·м; $M_{\text{над}}$ – надлишковий момент електродвигуна, потрібний для забезпечення необхідного прискорення агрегату під час пуску, Н·м.

Максимальне допустиме значення напруги, відсоток, на затискачах електродвигуна дістанемо, підставивши в формулу (4.10) замість напруг моменти з формул (4.11) та (4.12):

$$\Delta U_{\text{дон}} = \left(1 - \sqrt{\frac{M_{\text{зр}} + M_{\text{над}}}{M_{\text{пуск.ном}}}} \right).$$

Надлишковий момент беруть рівним 20–30 % від номінального моменту $M_{\text{ном}}$.

Номінальне значення пускового моменту визначаємо за формулою:

$$M_{\text{пус}} = \mu_{\text{пус}} M_{\text{ном}}, \quad (4.14)$$

де $\mu_{\text{пус}}$ – каталожна кратність пускового моменту електродвигуна.

Для працюючих електродвигунів:

$$\Delta U_{\text{дон.пр}} = \left(1 - \sqrt{\frac{M_{\text{макс.нав}}}{M_{\text{к}}}} \right),$$

де $M_{\text{макс.нав}}$ – максимальний момент навантаження за навантажувальною діаграмою двигуна, Н·м; $M_{\text{к}}$ – каталожний максимальний (критичний) момент електродвигуна. $M_{\text{к}} = \mu_{\text{макс}} M_{\text{ном}}$, де $\mu_{\text{макс}}$ – каталожна кратність максимального моменту електродвигуна.

На затискачах електродвигуна під час пуску спад напруги визначаємо за формулою, відсоток:

$$\Delta U_{\text{фак}} = \Delta U_{\text{фак.л}} + \Delta U_{\text{тр}} - \Delta U_{\text{над}} \pm \Delta U_{\text{шпн}}, \quad (4.16)$$

де $\Delta U_{\text{фак.л}}$ – втрати напруги у попередньо завантаженій лінії під час пуску електродвигуна, відсоток; $\Delta U_{\text{тр}}$ – втрата напруги у трансформаторі, відсоток;

$\Delta U_{над}$ – надбавка напруги трансформатора, відсоток; $\Delta U_{шпн}$ – відхилення напруги на шинах первинної напруги трансформатора (знак “–” беруть при позитивному відхиленні), відсоток.

У попередньо завантаженій лінії під час пуску електродвигуна втрата напруги складає, відсоток:

$$\Delta U_{фак.л} = \Delta U_1 + Z_l / (Z_l + Z_{дв}) 100, \quad (4.17)$$

де $Z_l = \sqrt{R_l^2 + X_l^2}$ – повний опір лінії, Ом; ΔU_1 – втрата напруги на лінії до пуску електродвигуна, Ом.

Параметри ΔU_1 , %, і $Z_{дв}$, %, визначають за такими формулами:

$$\Delta U_1 = \frac{\sqrt{3} I_{макс} l (R_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi)}{U_{ном}} 100;$$

$$Z_1 = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} I_{ном} K_i},$$

$$I_{макс} = \frac{S_{роз}}{\sqrt{3} U_{ном}}$$

де $I_{макс}$ – максимальний струм у лінії перед пуском електродвигуна, А; $S_{роз}$ – розрахункове навантаження лінії без електродвигуна, що запускається, В·А; l – довжина лінії, км; R_0 , x_0 – відповідно активний і реактивний опори одного кілометра лінії, Ом/км; $\cos \varphi$ – середньозважене значення коефіцієнта потужності навантаження; $U_{ном}$ – номінальна напруга лінії, В; K_i – кратність пускового струму електродвигуна; $I_{ном}$ – номінальний струм електродвигуна, А.

Значення $\Delta U_{над}$ і $\Delta U_{шпн}$ беруть з таблиці відхилень напруги у споживачів, яку складають під час розрахунку електричних мереж (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Відхилення напруги у споживачів

Елементи схеми електропостачання	Відхилення і втрати напруги у споживачів під час навантаження, %	
	100	25
Шини підстанції 35/10 кВ	+5	0
Повітряна лінія	–6	–1,5
Трансформатор 10/0,4 кВ:		
а) втрати	–4	–1
б) постійна надбавка	+5	+5
в) регульована надбавка	+2,5	+2,5
Витрати напруги в лінії 0,38 кВ	–7,5	0
Допустиме відхилення напруги у споживачів	–5	+5
Відхилення напруги у споживачів	–5	+5

Втрату напруги у трансформаторі під час пуску електродвигуна, відсоток, з урахуванням впливу інших приєднаних до трансформатора електроприймачів розраховують за формулою:

$$\Delta U_{mp} = \frac{100}{S_k} \sqrt{(K_{фак} S_{дв} \cos \varphi_{нyc} + S_{нав} \cos \varphi_{нав})^2 + (K_{фак} S_{дв} \sin \varphi_{нyc} + S_{нав} \sin \varphi_{нав})^2}$$

де S_k – потужність короткого замикання трансформатора, кВ·А; $K_{фак}$ – фактична кратність пускового струму електродвигуна з урахуванням впливу джерела живлення і лінії; $S_{дв}$ – номінальна повна потужність електродвигуна, кВ·А; $\cos \varphi_{нyc}$ – коефіцієнт потужності електродвигуна в перший момент пуску; $S_{нав}$ – сумарна потужність інших споживачів, приєднаних до шин низької напруги трансформатора, кВ·А; $\cos \varphi_{нав}$ – середньозважене значення коефіцієнта навантаження інших споживачів.

Величини S_k , $\cos \varphi_{нyc}$ і $K_{фак}$ визначають за формулами:

$$S_k = \frac{100 S_{ном}}{U_k};$$

$$\cos \varphi_{нyc} = \frac{\eta_{ном} \cos \varphi_{ном} (\mu_{нyc} + 0,025 k_i^2)}{(1 - S_{ном}) k_i};$$

$$K_{фак} = \frac{100 k_i}{100 + U_k k_i} \frac{Z_{дв}}{S_{ном} Z},$$

де $S_{ном}$ – номінальна потужність трансформатора, кВ·А; $\eta_{ном}$, $\cos \varphi_{ном}$ – відповідно номінальні значення ККД і коефіцієнта потужності електродвигуна; k_i – кратність пускового моменту електродвигуна; S_n – номінальне ковзання електродвигуна; Z – повний опір кола електрична лінія – обмотки електродвигуна дорівнює:

$$Z = \sqrt{(R_{дв} + R_l)^2 + (X_{дв} + X_l)^2},$$

де $X_{дв}$ і $R_{дв}$ – відповідно реактивна і активна складові повного опору короткого замикання електродвигуна ($R_{дв} = Z_{дв} \cos \varphi_{нyc}$; $X_{дв} = Z_{дв} \sin \varphi_{нyc}$); R_l і X_l – відповідно активний і реактивний опори лінії.

Якщо умови перевірки не виконуються, то слід збільшити поперечні перерізи проводів або зменшити відстань між джерелом живлення (силовим трансформатором) і споживачем.

2. Розрахунок і вибір освітлювальних та опромінювальних установок

2.1. Види і системи освітлення

Штучне освітлення виробничих приміщень поділяють на такі види: робоче, аварійне (для продовження роботи), безпеки (для евакуації людей) і охоронне (для територій).

Робоче освітлення – це основний вид освітлення, що забезпечує потрібну освітленість робочих площин. З робочого освітлення може бути виділено до 10 %

світильників для чергового освітлення в приміщеннях, у яких потрібно вночі періодично спостерігати за тваринами, птицею тощо.

Аварійне освітлення обладнують у приміщеннях, у яких аварійне вимикання робочого освітлення і пов'язане з цим порушення нормального обслуговування обладнання і механізмів може спричинити: вибух, пожежу, отруєння людей; тривале порушення технологічного процесу; небезпеку масового травматизму в місцях великого скупчення людей; порушення нормального обслуговування хворих; порушення роботи особливо важливих об'єктів (електростанцій, вузлів радіопередач і зв'язку, диспетчерських пунктів, насосних установок водопостачання тощо).

Найменша освітленість за аварійного освітлення має становити 5 % від освітленості, що нормується для робочого освітлення, але не менш як 5 лк всередині приміщень і не менше одного для територій підприємств.

Існують системи загального, місцевого і комбінованого освітлення.

Штучне освітлення виконується системою загального освітлення або системою комбінованого, коли до загального освітлення додається місцеве.

Загальне освітлення поділяють на *загальне рівномірне* і *загальне локалізоване* (виконується з урахуванням розташування обладнання).

Місьцеве освітлення обладнують на окремих робочих машинах, щитах і пультах керування. Застосування лише місцевого освітлення всередині приміщень не дозволяється.

Потрібна освітленість у приміщеннях створюється за допомогою світильників з лампами розжарювання, люмінесцентними лампами або газорозрядними лампами високого тиску та світлодіодними лампами. При цьому слід віддавати перевагу люмінесцентним та світлодіодним лампам.

Найменша освітленість робочих площин має відповідати нормам, наведеним у ДБН В 2.5.28-2006 “Природне і штучне освітлення”, або галузевим нормам. Освітлення робочих площин нормується окремо для освітлення лампами розжарювання і люмінесцентними лампами, до того ж норми для люмінесцентного освітлення в 2–2,5 разу вищі, ніж для ламп розжарювання.

Для зменшення нерівномірності освітленості робочої поверхні застосовують систему комбінованого освітлення зі встановленням світильників місцевого та загального освітлення. Згідно з діючими нормами і правилами, світильники загального освітлення мають створювати на робочих поверхнях не менш як 10 % освітленості, що передбачена для даного виду робіт.

Діючими нормами і правилами осліплювальна дія освітлення обмежується висотою підвішування світильників над розрахунковою поверхнею залежно від захисного кута, типу відбивача і потужності лампи. Дані про висоту підвішування різних типів світильників наведено в довідковій літературі.

У приміщеннях з постійним перебуванням людей світильники з люмінесцентними лампами повинні мати захисний кут на менш як 15° . Для загального освітлення приміщень не дозволяється застосовувати світильники з захисним кутом, меншим за 10° , без розсіювача із лампами розжарювання в прозорій колбі.

2.2. Світильники

Світильник – це освітлюваний прилад, що здійснює перерозподіл світлового потоку лампи всередині значних тілесних кутів.

Світильник складається з джерела світла і освітлюваної арматури.

Основними світлотехнічними характеристиками світильників є криві сили світла, коефіцієнт підсилення, коефіцієнт корисної дії (ККД) та захисний кут.

Кожен світильник має своє умовне позначення, структуру якого розшифровують так: 1 2 3 4-5 6-7-8, де

1 – літера, що означає джерело світла: Н – лампи розжарювання загального призначення; С – лампи світильники (дзеркальні, та дифузні); И – кварцові галогенні (лампи розжарювання); Л – прямі трубчасті люмінесцентні лампи; Ф – фігурні люмінесцентні лампи; З – еритемні люмінесцентні лампи; Р – ртутні лампи типу ДРЛ; Г – ртутні лампи типу ДРИ; Ж – натрієві лампи; Б – бактерицидні лампи; К – ксенонові трубчасті лампи;

2 – літера, що вказує на спосіб встановлення світильника: С – підвісні; П – стельові; Б – настінні; Н – настільні; Т – такі, що розміщуються на підлозі; В – вмонтовані; К – консольні; Р – ручні, що вмикаються в мережу; Ф – ручні, які живляться від акумуляторів; Г – такі, що розміщуються на голові; Д – прибудовані;

3 – літера, що означає основне призначення світильника: П – для промислових підприємств; Р – для копалень та шахт; О – для громадських будинків; Б – для жилих (побутових) приміщень; У – для зовнішнього освітлення (вулиці, площі і т. п.);

4 – двозначне число, що означає номер серії;

5 – цифра (цифри), що вказує на кількість ламп у світильнику (цифра 1 не вказується);

6 – цифра, що вказує на потужність ламп, Вт;

7 – тризначне число (001–999) номер модифікації;

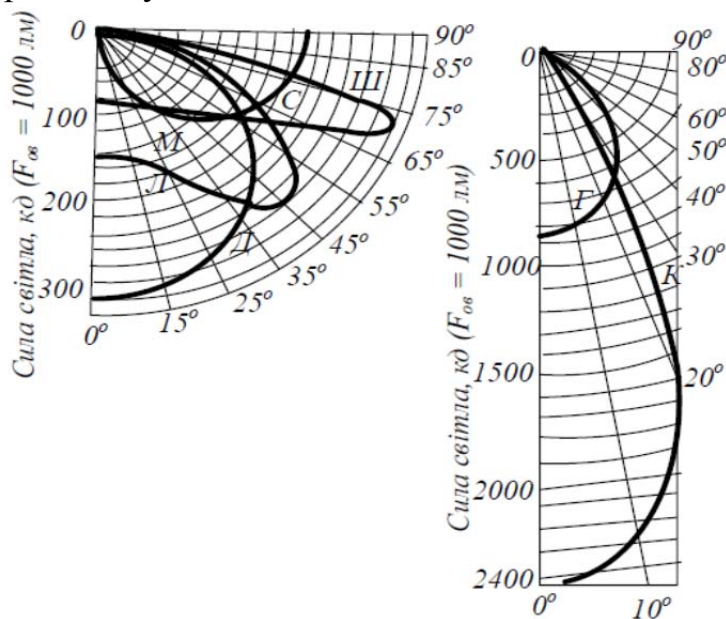
8 – літера і цифра, що означають кліматичне виконання і категорію розміщення світильників (кліматичне виконання У і категорію розміщення 4 можна не зазначати).

Допускається поряд з умовним позначенням присвоювати світильникам власні умовні назви, які проставляють після умовного позначення світильника (наприклад, “Астра-1”).

Світильники поділяють на класи залежно від того, яку частку всього потоку світильника становить потік нижньої напівсфери, а саме:

- прямого світла (П) – потік нижньої напівсфери становить понад 80%;
- переважно прямого світла (Н) – 60–80;
- розсіяного світла (Р) – 40–60;
- переважно відбитого світла (В) – 20–40
- і відбитого світла (О) – менш як 20%.

Криві сили світла світильника – це побудовані в полярній системі координат графіки залежності сили світла від напрямку світлового потоку, який характеризується кутом між напрямом світлового потоку і віссю симетрії світильника (рис. 4.1). Криві сили світла світильника у будь-яких меридіональних площинах у верхній і нижній напів-сферах, розбиті на сім типів і позначені відповідними літерами: К – концентрована; Г – глибока; Д – косинуса; Л – напівширока; Ш – широка; М – рівномірна і С – синусна. Світильники, криві сили світла яких не відповідають наведеним типам, є світильниками спеціального світлорозподілу.



К – концентрована; Г – глибока; Д – косинусна; Л – напівширока; Ш – широка; М – рівномірна; С – синусна

Рис. 4.1. Типи кривих сили світла для світлового потоку світильника з умовною лампою 1000 лм:

Коефіцієнт корисної дії світильника – це відношення світлового потоку світильника до світлового потоку джерела світла. Найбільш поширені світильники мають ККД від 0,6 до 0,85.

Під *коефіцієнтом підсилення* розуміють відношення максимальної сили світла до середньої сферичної сили світла джерела світла.

Захисним називають кут між горизонталлю, яка проходить через тіло розжарювання лампи, і лінією, що з'єднує крайню точку тіла розжарювання з

протилежним краєм відбивача. Світильники з люмінесцентними лампами характеризуються двома значеннями захисного кута: у поперечній, перпендикулярній до лампи, і повздовжній площинах:

$$I_{\text{ср.сф}} = \Phi_{\text{л}} / 4\pi, \quad (4.25)$$

де $\Phi_{\text{л}}$ – світловий потік вимірювальної лампи.

Для освітлення територій і робочих місць на відкритому просторі часто використовують прожектори. Від світильника прожектор відрізняється значно більшою концентрацією світлового потоку джерела світла.

Тип світильника для приміщень вибирають на підставі таких чинників: умов середовища, вимог до світлорозподілу і зменшення осліплювальної дії, економічних і естетичних вимог.

2.3. Розрахунок і проектування освітлення

Проектування освітлення об'єктів різного призначення здійснюють на підставі нормативних вимог БНіП 11-4-79 “Природне і штучне освітлення”, “Правил влаштування електроустановок” (ПУ), “Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів” та “Галузевих норм освітлення сільськогосподарських підприємств, будівель і споруд”.

Спочатку ознайомлюються з характеристикою об'єктів і з'ясовують необхідні параметри приміщень (площу, довжину, ширину, висоту, особливості технологічного процесу, характер навколишнього середовища, коефіцієнт відбиття стін, стелі та підлоги, умови електропостачання). Потім вибирають тип джерела світла, систему освітлення, тип світильників і мінімальну нормовану освітленість для кожного приміщення.

Для освітлення виробничих приміщень з мінімальною температурою повітря не нижче мінус 5 °С (приміщення для утримання тварин і птахів, лабораторії, майстерні тощо) рекомендується застосовувати люмінесцентні лампи низького тиску (ЛБ, ЛХБ, ЛБР, ЛД, ЛДЦ) або лампи розжарювання (Б, БК, Г). Для освітлення кормоцехів, складських приміщень, в яких постійно не перебувають люди, для аварійного освітлення тощо застосовують лампи розжарювання (В, Б, Г). Для освітлення проїздів, виробничих майданчиків тощо застосовують ртутні лампи високого тиску (ДРЛ, ДРИ) і лампи розжарювання галогенні (КГ) та загального призначення (Г).

Розрахунок освітлення проводять методами коефіцієнта використання світлового потоку, питомої потужності та точковим.

Дані розрахунків зводять у світлотехнічну відомість (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Світлотехнічна відомість

Номер на плані	Найменування приміщення	Площа, м ²	Висота, м	Клас за умовами навколишнього середовища	Коефіцієнт відбиття			Система освітлення	Вид освітлення	Нормована освітленість, лк
					стін	стелі	підлоги			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Продовження таблиці 4.3

Коефіцієнт запасу	Світильник		Лампи		Штепсельні розетки чи понижувальні трансформатори		Встановлена потужність приладів, Вт	Примітка
	тип	число	тип	потужність, Вт	число	тип і потужність, В·А		
12	13	14	15	16	17	18	19	20

Метод коефіцієнта використання світлового потоку застосовують під час розрахунку загального рівномірного освітлення закритих приміщень за відсутності істотних затінювачів. За питомою потужністю розраховують загальне рівномірне освітлення незаставлених приміщень у тих випадках, коли в довідковій літературі є відповідні таблиці питомої потужності.

Точковий метод використовують для розрахунку зовнішнього і місцевого освітлення, а також для перевірки освітленості в окремих точках робочої поверхні закритих приміщень.

Під час розміщення світильників враховують архітектурні особливості приміщення, розміщення вікон, будівельних конструкцій, технологічного обладнання тощо.

Світильники загального освітлення розміщують локалізовано або рівномірно.

Під час локалізованого розміщення світильники розташовують вздовж технологічних проходів, над окремими групами робочих місць тощо.

Під час рівномірного розміщення світильники з точковими джерелами світла розташовують у вершинах квадратів (зі стороною квадрата L) або прямокутників (із сторонами L_a і L_b) (рис. 4.2). Для прямокутних площин рекомендується брати $L_a:L_b \leq 1,5$. У вузьких приміщеннях застосовують однорядне розміщення світильників.

Світильники з люмінесцентними лампами рекомендується встановлювати рядами. Відстань між світильниками визначають за формулою:

$$L = \lambda h_p, \quad (4.26)$$

де λ – відносна відстань між світильниками; h_p – розрахункова висота підвішування світильника (відстань від світильника до розрахункової поверхні), м.

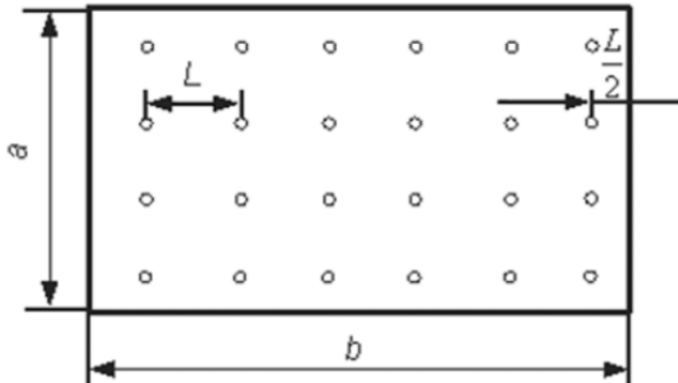


Рис. 2. Розміщення світильників по вершинах квадратних площин

Відносну відстань між світильниками вибирають за умовою, що:

$$\lambda_c \leq \lambda < \lambda_e, \quad (4.27)$$

де λ_c , λ_e – відповідно світлотехнічні та економічно вигідні відносні відстані.

Залежно від типової кривої сили світла світильника значення λ_c і λ_e відповідно становлять: концентрована – 0,6 і 0,6; глибока – 0,9 і 1,0; косинусна – 1,4 і 1,6; напів-широка – 1,6 і 1,8; рівномірна – 1,6 і 1,8.

За відомими значеннями L і розмірами приміщень визначають кількість рядів світильників і їхню загальну кількість:

$$n_a = a/L; \quad (4.28)$$

$$n_b = b/L; \quad (4.29)$$

$$N = n_a \cdot n_b, \quad (4.30)$$

де a , b – відповідно довжина і ширина приміщення, м; n_a і n_b – кількість світильників у ряду; N – загальна кількість світильників.

Значення n_a і n_b округляють до цілих чисел так, щоб λ залишалась у рекомендованих межах.

Під час розрахунку освітлення за методом коефіцієнта використання світлового потоку визначають потрібний світловий потік ламп у кожному світильнику за формулою:

$$\Phi = \frac{ESK_3Z}{N\eta},$$

де E – мінімальна нормована освітленість, лк; S – площа освітлювального приміщення, м²; η – коефіцієнт використання світлового потоку; K_3 – коефіцієнт запасу; N – кількість світильників; Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення (відношення середньої освітленості до мінімальної).

Коефіцієнт використання світлового потоку залежить від індексу приміщення (характеризує конфігурацію)

$$i = \frac{ab}{h_p(a+b)},$$

коефіцієнтів відбиття стелі ρ_c , стін $\rho_{ст}$ і підлоги ρ_n – для деяких світильників значення коефіцієнта використання світлового потоку наведені в табл. 4.4 і 4.5.

Таблиця 4.4 – Коефіцієнти використання світлового потоку для світильників з люмінесцентними лампами

Параметри, від яких залежить коефіцієнт η	Тип світильника									
	ПВЛМ-2х40; 2х80 з лампами ЛБР					ПВЛМ- 3х40; 1х80 з лампами ЛБР				
$\rho_c, \%$ $\rho_{ст}, \%$ $\rho_n, \%$	Коефіцієнти відбиття									
	770	770	550	330	00	770	770	750	330	00
	550	550	330	110	00	050	550	330	110	00
	330	110	110	110	00	330	110	310	110	00
Індекс приміщення i	Коефіцієнт використання світлового потоку $\eta, \%$									
0,5	28	27	20	13	11	27	26	17	12	11
0,6	33	32	22	17	14	31	30	21	16	14
0,7	38	36	27	20	17	36	34	25	20	17
0,8	42	40	30	23	20	39	37	28	22	20
0,9	47	44	34	26	22	43	40	32	25	22
1	51	47	37	29	25	47	43	34	28	25
1,1	54	50	39	31	27	50	46	37	30	27
1,25	57	53	42	34	29	52	48	39	32	29
1,5	63	57	47	38	33	58	52	44	36	33
1,75	67	61	50	42	36	61	56	47	40	36
2	70	63	53	44	38	64	58	49	42	38
2,25	73	66	55	47	40	67	60	51	44	40
2,5	76	68	57	49	42	69	63	53	47	41
3	80	71	60	52	44	73	65	56	50	44
3,5	82	73	62	54	46	75	67	58	52	46
4	85	75	64	56	48	78	69	60	54	57
5	90	79	69	61	52	82	72	64	58	51
Потік нижньої напівсфери $\Phi_{\cup}, \%$	66					66				
Потік верхньої напівсфери $\Phi_{\cap}, \%$	19					19				

Коефіцієнт запасу для сільськогосподарських приміщень з газорозрядними лампами беруть 1,3, а з лампами розжарювання – 1,15.

Коефіцієнт нерівномірності освітлення беруть 1,15 для світильників з лампами розжарювання прямого світла і 1,1 – в інших випадках.

Таблиця 4.5 – Коефіцієнти використання світлового потоку для світильників з лампами розжарювання

Параметри, від яких залежить коефіцієнт η	Тип світильника																			
	У; УПМ-15 “Астра-1, 11, 12”					ППД-100; ППД-200					ППД-500					ППР, НСП-01 - ПСП-09				
	70	70	50	30	0	770	770	750	530	30	770	770	550	330	00	770	770	550	330	00
$\rho_{\text{с}}, \%$	50	50	30	10	0	550	550	330	110	10	550	550	330	110	00	550	550	330	110	00
$\rho_{\text{ст}}, \%$	30	10	10	10	0	330	110	310	110	10	330	210	110	110	00	330	110	110	110	00
Індекс переміщення i	Коефіцієнт використання світлового потоку $\eta, \%$																			
0,5	24	22	20	17	16	25	24	20	17	16	23	18	15	13	18	18	12	9	6	8
0,6	34	32	26	23	21	31	30	24	20	19	27	21	17	16	24	23	15	11	8	12
0,7	42	39	34	30	29	39	36	30	26	25	32	26	22	21	29	27	19	15	12	14
0,8	46	44	38	34	33	43	41	36	32	31	37	31	28	26	33	31	23	18	14	15
0,9	49	47	41	37	36	45	43	38	34	33	39	33	29	27	35	33	25	19	15	16
1	51	49	43	39	37	47	44	39	36	34	40	34	30	28	37	35	26	20	16	18
1,1	53	50	45	41	39	49	45	41	38	36	41	35	31	30	40	37	28	22	18	19
1,25	56	52	47	43	41	51	47	42	39	37	43	37	33	31	43	40	30	24	19	20
1,5	60	55	50	46	44	55	51	45	42	40	46	40	36	34	46	42	32	25	20	22
1,75	63	58	53	48	46	58	53	49	45	43	48	42	38	36	49	45	35	27	22	23
2	66	60	55	51	49	61	55	51	47	45	50	44	40	38	52	47	37	29	23	24
2,25	68	62	57	53	51	63	57	53	49	47	52	46	42	40	54	49	39	31	24	25
2,5	70	64	59	55	53	65	58	54	51	49	53	48	44	41	56	50	40	32	25	27
3	73	66	62	58	56	68	61	56	54	52	56	50	46	44	60	53	43	35	27	28
3,5	76	68	64	61	59	70	63	58	56	54	58	52	48	46	62	55	45	36	28	30
4	78	70	66	62	60	72	64	60	57	56	59	54	50	48	69	57	47	38	30	32
5	81	73	69	64	62	74	65	62	58	57	61	56	52	49	67	59	49	40	32	
Потік нижньої напівсфери, $\Phi \cup \%$,	75					68					60					47				
Потік верхньої напівсфери $\Phi \cap, \%$	0					0					6					30				

Коефіцієнт відбиття стелі в чистих приміщеннях (конторах, квартирах та ін.) беруть 70 %, в чистих виробничих приміщеннях – 50, в брудних – 30 і в брудних і задимлених – 10 %. Коефіцієнт відбиття стін у чистих приміщеннях беруть 50–60 %, у брудних 30 або 10 %. Коефіцієнт відбиття підлоги беруть 30 % для чистих приміщень і 10 % для всіх інших приміщень.

Потужність лампи P при розрахунку освітлення за методом питомої потужності дістають за формулою:

$$P = \frac{\omega S}{Nn},$$

де S – площа приміщення, м^2 ; ω – питома потужність загального рівномірного освітлення, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$; N – кількість світильників у приміщенні; n – кількість ламп у світильнику.

Питома потужність ω (відношення встановленої потужності світильників до площі освітлювального приміщення) є важливим енергетичним показником освітлювальної установки і широко використовується для оцінки економічності прийнятих рішень (табл. 4.6 і 4.7). У табл. 4.6 і 4.7 враховано такі значення: $\rho_c = 50$ %; $\rho_{ст} = 30$ %; $\rho_{п} = 10$ %; $K = 1,3$; $Z = 1,15$.

За точкового методу розрахунку освітлення світло, що відбивається, і освітленість від віддалених світильників враховують наближено або й зовсім не враховують. За розрахункову беруть контрольну точку освітлювальної площини, в якій передбачається найменша освітленість. Для цієї точки визначають умовну освітленість від найближчих світильників, вважаючи, що в них вставлено лампи з світловим потоком 1000 лм.

Сумарну умовну освітленість у контрольній точці знаходять за формулою:

$$\sum e = \frac{I\alpha_1 \cos^3 \alpha_1}{h_p^2} + \frac{I\alpha_2 \cos^3 \alpha_2}{h_p^2} + \dots + \frac{I\alpha_n \cos^3 \alpha_n}{h_p^2},$$

де I_α – сила світла світильників з умовною лампою 1000 лм у напрямі освітлювальної точки, кд; α – кут між напрямом сили світла в контрольну точку та перпендикуляром, опущеним із світлового центра джерела до горизонтальної площини, на якій розміщена ця точка (рис.4.3); h_p – розрахункова висота підвішування світильника, м.

Умовну освітленість у контрольній точці від одного світильника визначають за правилами просторових ізолюксів. Графіки просторових ізолюксів (рис. 4.4 і 4.5) – це сім'я кривих з однаковою горизонтальною освітленістю.

Таблиця 4. 6 – Питома потужність загального рівномірного освітлення для світильників ППД-100 і ППД-200

$h, \text{ м}$	$s, \text{ м}^2$	Питома потужність (Вт/м^2) при освітленості, лк						
		5	10	20	30	50	75	100
2–3	10–15	2,9	5,1	9,3	13,5	19,8	28,1	37,5
	15–25	2,3	3,9	7,3	9,6	15,7	22,4	29,9
	25–50	1,9	3,5	6,2	8,3	13,7	19,6	26,1
	50–150	1,6	2,9	4,9	6,8	11,3	16,4	21,8
	150–300	1,4	2,5	4,4	6,1	10,1	14,6	19,4
	>300	1,3	2,3	4,0	5,5	9,2	14,4	17,8
3–4	10–15	3,5	6,0	11,8	16,5	27,8	41,8	55,7
	15–20	3	5,2	9,8	14,4	23,2	34,7	46,3
	20–30	2,5	4,3	7,9	11,5	18,8	28,3	37,7
	30–50	2,0	3,4	6,1	9,0	14,9	22,4	29,8
	50–120	1,7	2,9	5,3	7,9	12,9	19,4	25,8
	120–300	1,4	2,5	4,4	6,5	10,7	16,0	21,4
	>300	1,2	2,1	3,9	5,8	9,2	13,7	18,3

Таблиця 4.7 – Питома потужність загального рівномірного освітлення для світильників ППР-100 і ППР –200

$h, \text{ м}$	$s, \text{ м}^2$	Питома потужність (Вт/м^2) при освітленості, лк						
		5	10	20	30	50	75	100
2–3	10–15	3,7	6,3	12,8	18,2	31	46,5	62
	15–25	3,1	5,3	39,7	14,4	23,4	35	46,1
	25–50	2,5	4,4	7,9	11,7	18,8	28,1	37,5
	50–150	2	3,6	6,4	9,2	15	22,5	30
	150–300	1,7	2,9	5,4	7,8	12,8	19,2	25,6
	>300	1,5	2,6	4,8	7	11,4	17	22,7
3–4	10–35	5,8	10	18,8	28,2	47	70,5	94
	15–20	4,1	7,8	15,5	23,2	38,6	58	77,3
	20–30	3,2	6,3	12,4	18,5	30,9	46,4	61,8
	30–50	2,6	4,8	9,3	13,9	23,2	34,7	46,3
	50–120	2,2	3,9	7,4	11,1	18,5	27,8	37
	120–300	1,7	3,1	6	8,9	14,9	22,4	29,8
	>300	1,4	2,6	4,7	7,1	11,8	17,7	23,6

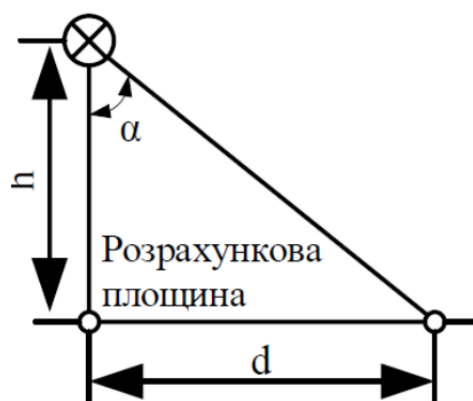
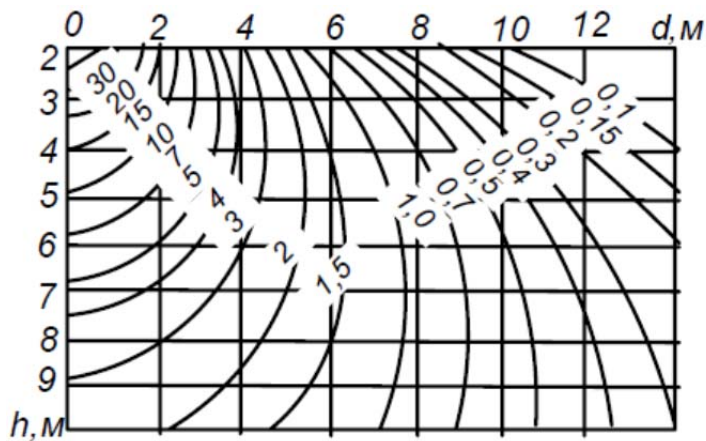


Рис. 3. Схема розрахунку освітленості горизонтальної площини точковим методом



d – відстань від контрольної точки до проекції світлового центра джерела світла на розрахункову площину

Рис. 4. Графік просторових ізолюксів для світильників “Астра-1”, “Астра-11”, “Астра-12”:

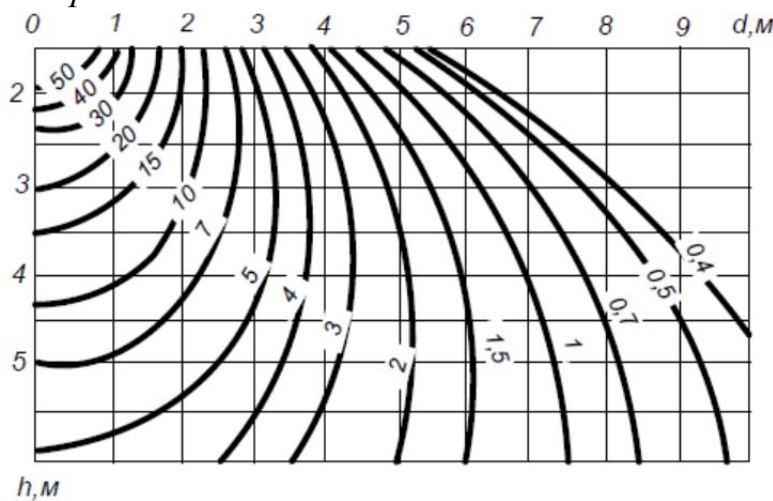


Рис. 5. Графік просторових ізолюксів для світильників ППД-100 і ППД-200

Світловий потік лампи Φ_d визначають за формулою:

$$\Phi = \frac{1000Ek}{\mu \sum e},$$

де E – нормована освітленість, лк; μ – коефіцієнт додаткової освітленості, який враховує дію віддалених світильників і світло, що відбивається (беруть у межах 1,1–1,2); k – коефіцієнт запасу.

За здобутим значенням світлового потоку вибирають стандартну лампу, потік якої близький до розрахункового. Окремі люмінесцентні лампи або їх ряди можна розглядати як світні лінії, якщо їх довжина більше половини розрахункової висоти підвішування світильника. Світні лінії бувають безперервні і з проміжками.

При розрахунку освітленості від світної лінії вибирають контрольну точку і для неї визначають відносну освітленість від кількох рядів ламп, користуючись графіками лінійних ізолюксів умовної горизонтальної освітленості. Ізолюкси лінії з однаковою умовною освітленістю (рис.4.6).

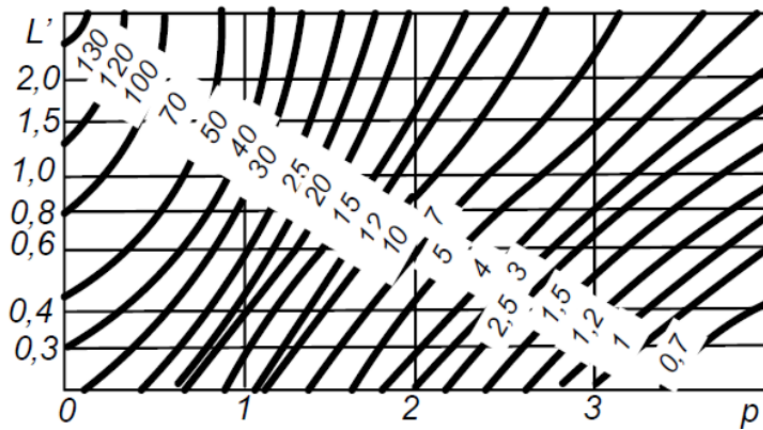


Рис. 6. Графіки лінійних ізолюксів умовної горизонтальної освітленості для світильників ПВЛМ з двома лампами ЛБР

На осі ординат відкладені величини $L' = L / h$, а на осі абсцис $p = p/h$, де h – розрахункова висота підвішування світильників; p – відстань від освітлювальної точки до проекції осі світної лінії на освітлювальну площину (рис. 4.7). Графіки побудовані для випадку, коли світна лінія розміщена на висоті 1м над освітлюваною площиною, світловий потік одного метра світної лінії становить 1000 лм, а розрахункова точка лежить проти кінця світної лінії. Якщо розрахункова точка лежить у межах світної лінії (наприклад, точка A_2 на рис.4.7), то світну лінію умовно ділять на дві пластини L_1 і L_2 . Тоді розрахункова точка лежатиме проти кінців цих частин і відносна освітленість у ній дорівнюватиме:

$$e = e_1 + e_2, \quad (4.36)$$

де e_1, e_2 – відносні освітленості у заданій точці, утворені відповідно частинами L_1 і L_2 , світної лінії L , лк.

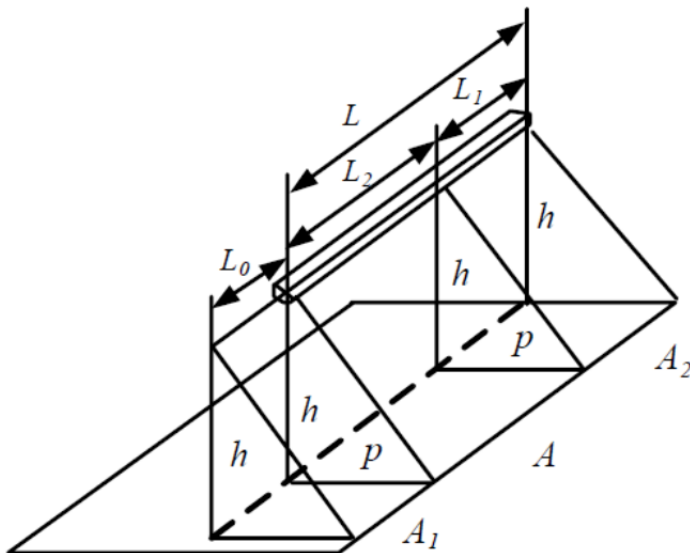


Рис. 7. Схема до розрахунку освітленості, створюваної світною лінією

Розрахункова точка може лежати за межами світної лінії. Тоді освітлювальну лінію продовжують наскільки, щоб розрахункова точка була розміщена проти її кінця. Відносну освітленість у точці визначають як різницю відносної освітленості від лінії $L_1 + L_0$ та відносної освітленості від лінії L_0 світної лінії.

Потрібну густину світлового потоку Φ , $\text{лм}\cdot\text{м}^{-1}$, у реальному ряду безперервної світної лінії для забезпечення нормованої освітленості у контрольній точці визначають за формулою:

$$\Phi = \frac{1000Ek_3h_p}{\mu \Sigma e},$$

де E – нормована освітленість, лк; Σe – сумарна відносна освітленість у контрольній точці від найближчих рядів. Світловий потік світної лінії визначається як:

$$\phi_l = \Phi L, \quad (4.37)$$

де L – довжина світної лінії, м.

Кількість світильників у ряду визначається за формулою:

$$N = \frac{\phi_{\text{лік}}}{n\phi_{\text{л}}},$$

де n – кількість ламп у світильнику, шт.; $\phi_{\text{л}}$, – світловий потік одної лампи, лм.

Освітленість у контрольній точці для безперервної лінії визначається за виразом:

$$E = \frac{\phi_{\text{лін}}\mu \Sigma e}{1000kh_pL};$$

для лінії з проміжками визначається за виразом:

$$E = \frac{\phi_c\mu \Sigma e}{1000kh_pL},$$

де l – довжина лампи, м; L – умовна частина світної лінії, м; ϕ_c – світловий потік ламп у світильнику, лм.

Приклад 4.1. Розрахувати освітленість корівника, який має площу $68 \times 20 = 1360 \text{ м}^2$.

З використанням ламп розжарювання нормована горизонтальна освітленість на рівні підлоги $E=30$ лк. Беремо світильник ППР-200. Висота підвішування від підлоги $h_p = 2,7$ м. Коефіцієнт відбиття стелі $\rho_c = 0,5$, стін $\rho_{\text{ст}} = 0,3$, підлоги $\rho_{\text{п}} = 0,1$. Коефіцієнт запасу. $K=1,15$. Відносна відстань між світильниками $\lambda=2$.

Коефіцієнт нерівномірності освітлення $Z=1,1$. Відстань між світильниками $L=2 \cdot 2,7=5,4$ м. Відстань від крайніх світильників до стіни

$$l=0,51 \cdot L = 0,5 \cdot 5,4 = 2,7 \text{ м.}$$

Кількість рядів світильників визначаємо за виразами (4.28) і (4.29):

$$n_a = 20/5,4 = 4; n_b = 68/5,4 = 13;$$

Загальна кількість світильників за формулою (4.30):

$$N = 4 \cdot 13 = 52.$$

Індекс приміщення:

$$i = \frac{68 \cdot 20}{2,7(68 + 20)} \approx 5,7.$$

Беремо найближче табличне значення індексу 5 і знаходимо коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,49$.

Необхідний світловий потік лампи

$$\Phi = \frac{30 \cdot 1360 \cdot 1,15 \cdot 1,1}{52 \cdot 0,49} = 2026 \text{ лм.}$$

За значенням світлового потоку вибираємо стандартну лампу, світловий потік якої близький до розрахункового. Це лампа типу Г 220-230-150 із світловим потоком $\Phi_{\text{л}} = 2090$ лм.

Визначаємо розрахункову освітленість:

$$E_p = E \frac{\Phi_{\text{л}}}{\Phi} = 30 \frac{2090}{2026} = 30,9 \text{ лм.}$$

У разі освітлення люмінесцентними лампами беремо світильник ПВЛМ-2×40 з двома лампами типу ЛБ-40 ($\Phi_{\text{л}} = 3000$ лк). Нормована горизонтальна освітленість $E = 75$ лк. Висота підвішування світильника від підлоги $h_p = 2,7$ м.

При значенні індексу приміщення $i = 5$ знаходимо коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,69$. Коефіцієнт запасу $K = 1,3$, коефіцієнт нерівномірності освітлення $Z = 1,1$, коефіцієнт додаткової освітленості $\mu = 1,2$. Відносна відстань між світильниками $\lambda = 1,4$, довжина лампи $l_{\text{л}} = 1,2$ м.

Відстань між світильниками:

$$L = \lambda \cdot h_p = 1,4 \cdot 2,7 = 4 \text{ м.}$$

Відстань від крайніх світильників до стіни:

$$l = 0,5L = 0,5 \times 4 = 2 \text{ м.}$$

Кількість рядів світильників:

$$n_a = 20/4 = 5; n_b = 68/4 = 17.$$

Загальна кількість світильників:

$$N = 17 \cdot 5 = 85.$$

Беремо розрахункову точку, яка міститься в центрі прямокутника, в вершинах якого розміщено світильники. Відстань між світильниками в ряду:

$$l = (68 - 17 - 1,2) : 17 = 2,8 \text{ м.}$$

Тоді для вибраної точки: $\rho = 2$ м; $L = 1,2$ м; $L_0 = 1,4$ м.

Визначимо сумарну відносну освітленість у контрольній точці Σe . Для цього кожен світну лінію, якою є світильник, доповнимо відрізком $L_0 = 1,4$ м. Тоді для кожної доповненої лінії:

$$\rho' = 2 : 2,7 = 0,74; L' = (1,2 + 1,4) : 2,7 = 0,96,$$

за допомогою рис. 4.6 визначаємо $e = 64$ лк. Для відрізка L_0 :

$$\rho' = 2 : 2,7 = 0,74; L = 1,4 : 2,7 = 0,52,$$

знову за допомогою рис. 4.6 визначаємо $e = 40$ лк. Сумарна відносна освітленість від чотирьох світильників:

$$\Sigma e = 4(64 - 40) = 96 \text{ лк.}$$

Освітленість у контрольній точці дорівнює:

$$E = \frac{\phi_{\lambda} \mu \Sigma e}{1000 k h_p (l_{\partial} + L_0)} = \frac{6000 \cdot 1,2 \cdot 96}{1000 \cdot 1,3 \cdot 2,7 \cdot 2,6} = 75,7 \text{ лк.}$$

Отже, здобуте значення близьке до нормованої горизонтальної освітленості $E = 75$ лк.

2.4. Розрахунок і вибір установок для опромінення рослин за умов захищеного ґрунту

В осінньо-зимовий період частка природного освітлення знижується порівняно з літніми умовами в 100 разів. Тривалість світлового дня скорочується в 2–3 рази. Для компенсації нестачі природного випромінювання під час вирощування овочевих культур у теплицях застосовують опромінювальні установки (табл.4.8) з газорозрядними та люмінесцентними лампами (табл.4.9). Вони забезпечують потрібний рівень опроміненості 6–10 тис. лк, якщо використовувати систему світлових величин і одиниць.

Таблиця 4.8 – Тепличні опромінювальні установки і світильники

Найменування	Напруга, В	Тип лампи, кількість ламп, потужність, Вт	Габаритні розміри, мм
1	2	3	4
ОТ-400 МИ-045-У5	220	ДРЛФ-400-1 1×400	155×560
ОТ-400 МЕ-046-У5	220	ДРЛФ-400-01 1×400	155×680
ОТ-1000МИ-049-У4	220	ДРЛФ-1000 1×1000	280×440
ОГС О1-000-УХЛ4 “Фотос-1”	380	ДРИ-1000-6 1×1000	350×500
ОГС О1-1000-002-УХЛ4 “Фотос-2”	380	ДРИ-1000-6 1×1000	350×500
ОГС О1-2000-ООІ-УХЛ4 “Фотос-3”	380	ДРИ-2000-6 1×2000	350×600
ОГС О1-2000-002-УХЛ4 “Фотос-4”	380	ДРИ-2000-6 1×2000	350×600
ОГС О1-3500-001-УХЛ4 “Фотос-5”	380	ДРИ-3500 1×3500	350×600
ОГС О1-3500-002-УХЛ4 “Фотос-6”	380	ДРИ-3500 1×3500	350×600
020П-ДРИ-2000-УХЛ4 “Светотрон”	380	ДРИ-2000-6 1×2000	490×1470
Світильник ССПОЗ-750-001-УХЛ4	220	ДРВ-750 1×750	270×x440
Світильник ЖСП 1 8-400-00 1-УХЛ4	220	ДНаТ-400. 1×400	450×375
Світильник ГСП 26-400-00 1-УХЛ4	220	ДРИ-400-5 1×400	440×540
КОП2-001-УХЛ4 “Светотрон”	380	ДРИ-2000-6 12×2000	36000×1080

Таблиця 4.9 – Характеристика ламп для опромінення рослин

Тип	Потужність	Напруга, В	Струм, А	Світловий потік, клм	ФАР ($\lambda=400-700$ Нм), Вт	Фітопотік, фт.	Термін служби, тис. год
ДРЛФ-400	0,4	135	3,25	16	55	27,2	2
ДРЛФ-1000	1,0	130	9,0	55	200	95	2
ДРИ-1000-6	1,0	230	4,7	90	240	140	3
ДРИ-2000-6	2,0	230	9,5	190	520	294	2
ДРИ-400-5	0,4	130	3,3	35	98,0	60	10
ДНаТ-400	0,4	125	4,2	47	108	62	15
ДРВ-750	0,5	200	3,4	19,5	49	62	2
ДРЛ-2000	2,0	270	8	120	300	182	6
ДМЗ-3000	3,0	105	15	270	855	467	1,5
ДКсТ- 10000	10,0	220	96	240	1300	630	1,0
ЛФ-40-1	0,04	103	0,43	1,88	6	4,2	12
ЛФ-40-2	0,04	103	0,43	1,72	6	4,45	12
ЛБ-40	0,04	103	0,43	3,1	8,8	3,74	12

Найбільш важливу роль під час вирощування рослин відіграє випромінювання з довжиною хвиль 400–700 нм. Воно дістало назву фотосинтетичне активної радіації (ФАР). Максимальну фотосинтезну дію на лист рослини проявляють випромінювання з довжиною хвилі 680 нм, тому за одиницю вимірювання фотосинтезного потоку 1 фіт беруть потік в 1 Вт із довжиною хвилі 680 нм.

Для будь-якої лампи значення фітопотіку можна здобути методом графічного інтегрування:

$$\Phi_f = g_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda=300}^{\lambda=750} \varphi(\lambda) k(\lambda)_p d\lambda,$$

де $g_{\lambda_{\max}} = 0,95$ максимальна фотосинтезна активність випромінювання; $\varphi(\lambda)$ – спектральна інтенсивність випромінювання лампи; $k(\lambda)_p$ – відносна спектральна чутливість середнього листа рослини.

Частіше фіто-потік ламп визначають за формулою:

$$\Phi_f = \Phi / K_f, \quad (4.42)$$

де Φ – світловий потік, лм; K_f – коефіцієнт переведення освітленості на фотоопромінення, лм/(фт·м²).

Висоту підвішування опромінювачів вибирають за умови забезпечення заданого рівня опроміненості та запобігання перегріванню рослин. Виходячи з цих умов, стаціонарні опромінювані з потужними джерелами випромінювання підвішують на висоті не менш як 0,5 м над рослинами. Загальна тривалість штучного і природного опромінення має становити 14–18 год., а обов'язкова нічна перерва – 6–8 год.

На практиці під час проектування опромінювальних установок з точковими джерелами випромінювання широко застосовують метод питомої опроміненості або метод питомої потужності. Необхідний фіто-потік чи необхідну потужність визначають за формулами:

$$\Phi_{\phi} = \omega_{\phi} S, \quad (4.43)$$

$$P = \omega S. \quad (4.44)$$

Дані про питомий фіто-потік і потужність наведено в довідковій літературі. Для розсади питомий фіто-потік становить 15–40 фт / м², для дорослих рослин приблизно на третину вищій.

З метою економії електроенергії для опромінення рослин слід вибирати лампи з високою фіто-віддачею (фт/Вт). Це лампи ДРИ і ДНаТ. Тривалістю світлового і темного періодів і величиною фітоопроміненості залежно від періоду вирощування рослин слід керувати автоматично за допомогою спеціальних програмних пристроїв.

2.5. Розрахунок і вибір установок для ультрафіолетового опромінення

Ультрафіолетове випромінювання є важливим фактором зовнішнього середовища. Під час утримання в приміщеннях у тварин і птиці виникає “ультрафіолетове голодування”, яке послаблює імунобіологічні властивості організму. Багатьма дослідженнями доведено, що ці негативні явища можна ліквідувати, застосовуючи штучне ультрафіолетове опромінення області УФ-В ($\lambda=280\text{--}315\text{нм}$).

Ультрафіолетові випромінювання області УФ-С ($\lambda = 100\text{--}280 \text{ нм}$) згубно діють на бактерії, тому їх застосовують для стерилізації повітря і технологічного обладнання в тваринницьких приміщеннях.

Важливе значення має дозування ультрафіолетового опромінення. Експозиція (доза) опромінення – це рекомендована на підставі біологічних досліджень кількість опромінення, дія якої на об’єкт викликає необхідний ефект. Оптимальні дози для різних тварин і птиці визначені експериментально і наведено в табл.4.10.

Таблиця 4.10 – Добові дози ультрафіолетового опромінення тварин і птиці

Вид тварини чи птиці	Доза опромінення, мер·год/м ²
Корови і бички	270–290
Телиці та нетелі	180–210
Телята: старші за 6 міс	160–180
до 6 місяців	120–140
Поросята-сосуни	20–25
Поросята	60–80
Те саме на відгодівлі та свиноматки	60–80
Кури	40–50
Курчата	15–25

Технічна характеристика джерел ультрафіолетового випромінювання наведена в табл. 4.11, установок ультрафіолетового опромінення – в табл. 4.12.

Таблиця 4.11 – Технічна характеристика джерел ультрафіолетового випромінювання

Тип	Технічні дані					
	потужність, Вт	напруга, В	світловий потік, лм	еритемний (вітальний) потік, віт (ер)	бактерицидний потік, бк	термін служби, тис. год
1	2	3	4	5	6	7
ЛЗ-15	15	127	40	0,3	0,055	5,0
ЛЗ-30	30	220	110	0,75	0,125	5,0
ЛЗР-30	30	220	90	1,35	0,105	5,0
ЛЗР-40	40	220	130	1,6	0,15	3,0
ЛЗО-15	15	127	660	0,11	-	5,0
ЛЗО-30	30	220	1350	0,27	-	5,0
ЛЗО-40	40	220	1850	0,37	-	5,0
ДРВЗД-160	160	220	1600	0,35	-	1,5
ДРВЗД-250	250	220	3200	0,6	-	1,5
ДРТ-230	230	220	4800	3,0	6,7	1,5
ДРТ-400	400	220	8000	4,75	10,5	2,7
ДРТ-1000	1000	220	26000	16,5	39,5	1,5

Таблиця 4.12 – Установки ультрафіолетового опромінення

Тип	Лампа		Потужність, Вт	Напруга, В
	тип	кількість		
ЭНПО1-30	ЛЭ-3С	1	37	220
Э0-ІхЗОМ-001	ЛЭ-30	1	37	220
ОРК-2	ДРТ-400	1	450	220
ОРКШ	ДРТ-400	1	450	220
УО-4М	ДРІ-400	4	2000	380/220
УОК-1	ДРТ-400	2	1400	380/220
ОЭСПО2	ЛЭР-40	1	96	220

Для адаптації тварин і птиці до ультрафіолетового випромінювання спочатку програму опромінювання задають частками від повної розрахункової, а потім роблять перерву на кілька діб.

У довідковій літературі наводять значення еритемної опроміненості (мер·м⁻²) від різних джерел залежно від висоти підвішування.

Так, лампа ЛЭ-30 дає еритемну опроміненість на висоті підвішування 1 м над спиною тварин 42 мер·м⁻², а на висоті 2 м – 10,6 мер·м⁻².

Поділивши значення добової дози опромінення на опроміненість при заданій висоті підвішування опромінювача, матимемо значення тривалості опромінювання в годинах на добу.

Для пересувних установок потрібну кількість проходів опромінювача за добу, яка забезпечує денну норму опромінення тварин, за відомих типу лампи,

даних арматури і висоті підвішування опромінювача над тваринами визначають за формулою:

$$n = \frac{\pi^2 v H_{ep} h_p}{2 \Phi_{ep} K_n \sin \alpha}$$

де n – кількість проходів опромінювача; H_{ep} – денна доза опромінення, мер·год/2; h_p – розрахункова висота підвішування опромінювачів, v – швидкість руху опромінювачів, м/год; Φ_{ep} – еритемний потік лампи; K_n – коефіцієнт підсилення арматури ($K_n = 1,3$); α – кут, що дорівнює половині кута дії опромінювача (для УО-4М кут $\alpha = 67^\circ$).

Кількість опромінення в певній точці в загальному випадку дістають за формулою:

$$H = E \cdot t, \quad (4.46)$$

де E – опроміненість, мер·м⁻²; t – час, год.

Одну й ту саму експозицію можна здобути за різних комбінацій значень опроміненості й часу. Для підвищення продуктивності тварин рекомендують брати меншу опроміненість за тривалішого проміжку часу, який не перевищує тривалості світлового дня.

Розрахунок тривалості опромінення від стаціонарних опромінювальних установок можна виконати точковим методом. За розрахункову беруть точку з найкращими умовами опромінення, щоб запобігти переопроміненню тварин чи птиці. Криві розподілу еритемного потоку випромінювання $\Phi = f(\alpha)$ беруть для окремих ламп з довідкової літератури. При цьому коефіцієнт нерівномірності опромінення не повинен бути меншим за 0,8.

2.6. Розрахунок і вибір установок інфрачервоного та комбінованого опромінення

Інфрачервоне випромінювання широко використовують для обігрівання молодняку тварин і птиці. Воно не тільки надає теплової дії, але й активізує біологічні процеси в організмі тварин, підвищує їх тонус. Найбільший ефект досягається за відповідності максимумів спектральної чутливості шкіри тварин і спектрального розподілу енергії випромінювача. Шкірою тварин практично повністю поглинаються випромінювання з довжиною хвиль 2,5–3,5 мкм, а в діапазоні 0,4–2 мкм коефіцієнт поглинання становить 0,5–0,08 і значною мірою залежить від виду тварин та їхнього кольору.

Особливо добрі результати дає одночасне опромінення тварин і птиці інфрачервоними і ультрафіолетовими променями. У табл. 4.13 наведено технічні дані установок для інфрачервоного і комбінованого (інфрачервоного і ультрафіолетового) опромінення.

Для обігрівання і ультрафіолетового опромінення телят використовують установки ИКУФ та “Луч”. За утримання у клітках один опромінювач встановлюють для обігрівання та опромінення двох сусідніх кліток, а за групового утримання – один опромінювач на 4 м площі.

Таблиця 4.13 – Технічна характеристика установок інфрачервоного і комбінованого (інфрачервоного та ультрафіолетового) опромінення

Тип установки	Тип джерела випромінювання
ИКУФ-1	ИКЗК-220-250×2, ЛЗ-І5×1
ИКУФ-1М	ИКЗК-220-250×2, ЛЗ-І5×1
“Луч”	ИКЗК-220-250×2, ЛЗ-Т5×1
Сож-1	ИКЗК-220-250×2, ДРТ-100, ДРТ-2-100
ССПО1-250-001	ИКЗК-220-250 або ИКЗС-220-250
ОКГ-1376А	ТЭН-400×3
ССПО5-250	ИКЗК-220-250
ОВИ-2, ОРИ-2	ИКЗК-220-250
ОСХ-01-1000	КГТ-220-1000

Для обігрівання *поросят* використовують опромінювачі ССПО1-250-001, ОРИ-2 та опромінювальні установки ИКУФ, “Луч”.

Для обігрівання *молодняку птиці* використовують інфрачервоні лампи тільки з пофарбованою нижньою частиною колби типу ИКЗК та опромінювачі ИКУФ, “Луч” і ССПО1-250-001. Однією лампою ИКЗК-220-250 можна обігріти 100–120 курчат, 60–80 індичат, гусенят або каченят.

Кількість опромінювальних установок n можна визначити залежно від кількості молодняку тварин або птиці в приміщенні N і щільності їх посадки в зоні обігрівання однієї установки n_1 , що дорівнює:

$$n = N / n_1. \quad (4.47)$$

Потужність системи місцевого обігрівання визначається за формулою:

$$P = P_1 \cdot n, \quad (4.48)$$

де P_1 – встановлена потужність однієї установки, кВт.

Величина енергетичної опроміненості залежить від віку молодняку тварин і птиці та температури повітря в приміщенні. Тому точніше кількість опромінювачів можна визначити за енергетичною опроміненістю, яку потрібно створити.

Кількість опромінювачів визначають за формулою:

$$n = \frac{kE_{onm}S}{P_1\beta U},$$

де S – площа опромінювальної поверхні, м²; P_1 – потужність одного випромінювача, Вт; β – енергетичний ККД опромінювача (0,66 для ламп ИКЗК-220-250 та ИКЗК-220-500, 0,38 для опромінювача ОКБ-3296Т); U – коефіцієнт ефективності використання ламп, залежить від висоти підвішування ламп і площі приміщення (знаходиться у межах 0,7–0,85); K – коефіцієнт запасу (беруть у

межах 1,1–1,25); E_{opt} – оптимальна енергетична опроміненість, Вт·м⁻². На рис. 4.8. зображені криві для визначення енергетичної опроміненості для курчат.

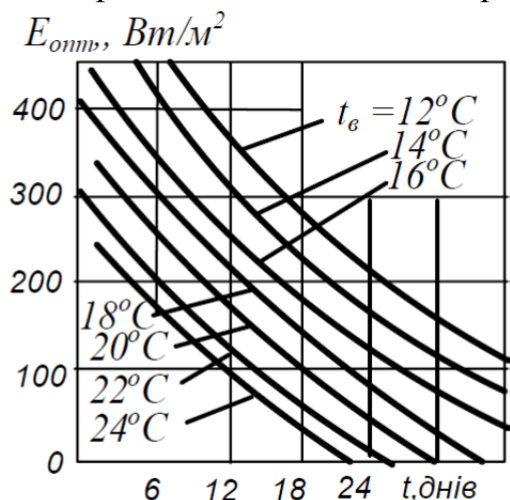


Рис. 4.8. Номограма для визначення оптимальної енергетичної опроміненості для курчат

За відсутності номограм для визначення оптимальної енергетичної опроміненості для тварин чи птиці певного віку і за заданої температури навколишнього середовища можна визначити наближено за формулою:

$$E_{opt} = (E_0 - St_s)(1 - \alpha/l), \quad (4.50)$$

де E_0 – оптимальна енергетична опроміненість для новонародженого в сухому приміщенні при температурі $t_s = 0^\circ\text{C}$, Вт/м² (курчата – 825; поросята – 700; телята – 500; ягнята – 380; індиченята – 900; каченята і гусенята – 710); S – температурний градієнт опромінення, $S = 25$ Вт/(м²·град) (для ягнят – 13 Вт/(м²·град)); α – вік тварини чи птиці, днів; l – кількість днів для повної температурної адаптації (беруть $\alpha = 100$ днів); t_s – температура в приміщенні, $^\circ\text{C}$.

3. Розрахунок та вибір електронагрівників

Сільськогосподарське виробництво є споживачем теплової енергії. В структурі загального енергобалансу тепла енергія становить більш як 65 %, у тваринництві потреба в тепловій енергії становить 80–90 % всього енергоспоживання.

Головне питання, яке потрібно вирішити під час проведення теплоенергетичних розрахунків, є вибір доцільного енергоносія, який проводять за допомогою техніко-економічного порівняння різних варіантів. Варіанти, які порівнюють, мають бути близькими за об'ємом вироблюваної продукції, якісними параметрами, соціальним і часовим факторами.

Вибираючи енергоносії, слід брати до уваги, що ефективність електричного нагрівання в значній мірі залежить від теплового навантаження окремих споживачів. Електричне нагрівання, порівняно з іншими енергоносіями, дає найбільший ефект за менших значень одиничних теплових навантажень споживачів.

Важливе значення має економія енергоресурсів. Слід постійно дбати про збільшення коефіцієнта використання енергоресурсів, який являє собою відношення ефективно спожитої енергії до її загальної кількості, що, крім ефективно спожитої енергії, включає в себе також витрати в навколишнє середовище і на нагрівання корпусу конструкції.

3.1. Розрахунок і вибір установок для нагрівання води

Гаряча вода потрібна для багатьох технологічних процесів, а також для опалення приміщень. Тваринницькі ферми споживають дуже багато теплої води. Для їх централізованого теплопостачання використовують електрокотли.

Від електрокотлів до споживачів передають гарячу воду та пару. Пару використовують для запарювання та пропарювання кормів, пастеризації молока, пропарювання молочного посуду тощо. У табл. 4.14 наведено норми витрати пари по деяких процесах у тваринництві.

Таблиця 4.14 – Питома витрата пари по деяких процесах тваринництва

Процес	Показник	Питома витрата
Варіння зернових	1 кг	0,12–0,15
Запарювання:		
коренебульбоплодів	1 кг	0,16–0,2
подрібненої соломи	1 кг	0,4–0,5
змішаних кормів	1 кг	0,3–0,4
Пропарювання різних видів кормів	1 кг	0,4
Пастеризація молока	1 кг	0,12–0,15
Опалення приміщення кормоцеху	1 м ³ /добу	0,5–0,75
Пропарювання молочної фляги	1 шт.	0,1–0,2
Нагрівання води від 10 до 90°C	1 л	0,18–0,2

Для нагрівання води на місці її споживання використовують водонагрівачі. В табл. 4.15 наведено норми витрати гарячої води на фермах великої рогатої худоби і свинофермах.

Таблиця 4.15 – Норми витрати гарячої води на фермах

Вид тварин	Добова норма витрати гарячої води, л/год.
Корови дійні	15
Бички й нетелі	5
Телята	2
Свиноматки	26
Свині на відгодівлі	9
Ремонтний молодняк	9
Поросята відлучені	4

Для приготування кормів потрібна вода з температурою 40–65 °С, для підмивання вим'я у корів – 37–39 °С, для миття посуду та іншого обладнання – 50–60 °С. Воду нагрівають спочатку до температури 70–90 °С, а потім змішують

із холодною, щоб вода набула потрібної температури. Між витратами гарячої і змішаної води існує залежність:

$$G_2 = G_{3m}(t_{3m} - t_x)/(t_2 - t_x), \quad (4.51)$$

де G_2 – витрата гарячої води; G_{3m} – витрата змішаної води, $\text{м}^3 \cdot \text{год}^{-1}$; t_2 , t_x і t_{3m} – відповідно температура гарячої, холодної і змішаної води, $^{\circ}\text{C}$.

Щоб визначити потужність водонагрівачів, слід побудувати добовий графік споживання гарячої води. Особливо розглядають можливість підігрівання води в години провалів у графіках електроспоживання (вночі, в обідню перерву).

Кількість теплоти Q кДж, потрібної для нагрівання води, дістають за формулою:

$$Q = cm(t_k - t_n), \quad (4.52)$$

де c – теплоємність води, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{град}^{-2}$; m – маса води, кг.

Кількість теплоти Q кДж, щоб здобути пару, знаходять за формулою:

$$Q = cm(i - \lambda), \quad (4.53)$$

де m – сумарна витрата пари, кг; i – ентальпія пари, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ (тиск 20 кПа, $i = 9690 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$); λ – теплоємність конденсату, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ (при температурі 90°C $\lambda = 380 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$).

Розрахункову середню за годину потужність електротеплогенерувальної установки гарячого водопостачання у разі вільного режиму електропостачання визначають за формулою:

$$P_p = Q_{\text{макс}} / (3600\eta), \quad (4.54)$$

де P_p – розрахункова середня за годину потужність електротеплогенерувальної установки, кВт; $Q_{\text{макс}}$ – максимальне годинне споживання теплоти, $\text{кДж} \cdot \text{год}^{-1}$, η – ККД електронагрівальної установки (з урахуванням втрат теплоти в системі роздавання гарячої води); 3600 – тепловий еквівалент потужності, $\text{кДж}(\text{кВт} \cdot \text{год})^{-1}$.

У разі використання водонагрівачів з акумуляторами теплоти розрахункову середню за годину потужність електротеплогенерувальної установки гарячого водопостачання дістають за формулою:

$$P_{p.a} = Q_g / (24 \cdot 3600 \eta), \quad (4.55)$$

де Q_g – добове споживання теплової енергії, кДж.

Під час вимушеного режиму електроспоживання (наприклад, з урахуванням провалів на графіку електронавантажень енергосистеми) застосовують тепло-акумуляційні системи теплопостачання з акумулявальними резервуарами. При цьому режим роботи електротеплогенерувальної установки вибирають на підставі графіка електронавантажень трансформаторних підстанцій, резерву потужності і практичних міркувань.

Розрахункову середню за годину потужність електротеплогенерувальної установки при вимушеному режимі електропостачання визначають за формулою:

$$P_{p.в} = Q_g / (3600t \eta), \quad (4.56)$$

де t – добова тривалість роботи електротеплогенерувальної установки, год.

Теплова енергія, що потрібна для нагрівання води, нерівномірно споживається протягом доби та року. Щоб знайти потужність електротеплогенерувальних установок гарячого водопостачання, слід побудувати графіки теплового навантаження для зимового і літнього періодів.

На рис. 4.9 зображено зимовий добовий графік теплового навантаження гарячого водопостачання молочної ферми на 400 голів дійних корів.

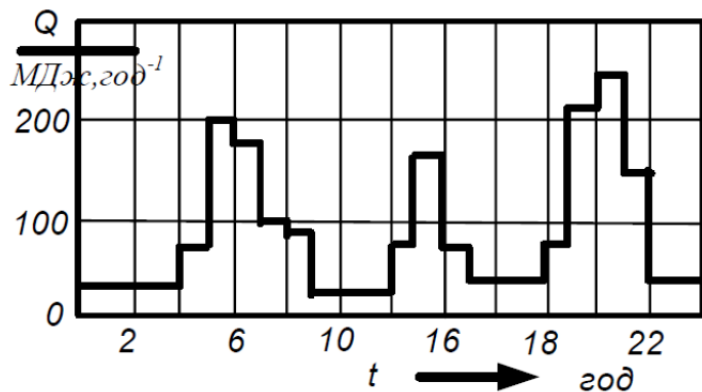


Рис. 4.9. Добовий графік теплового навантаження молочної ферми на 400 голів дійних корів

Площа графіка теплового навантаження в певному масштабі – це добове споживання теплової енергії Q_g . Добовий графік характеризується максимальним Q_{\max} і середнім $Q_{\text{сер}}$ навантаженням.

Середнє навантаження визначають за формулою:

$$Q_{\text{сер}} = Q_g / 24. \quad (4.57)$$

Критерієм завантаження теплогенерувального обладнання є коефіцієнт використання максимуму:

$$K_m = Q_{\text{сер}} / Q_{\max}. \quad (4.58)$$

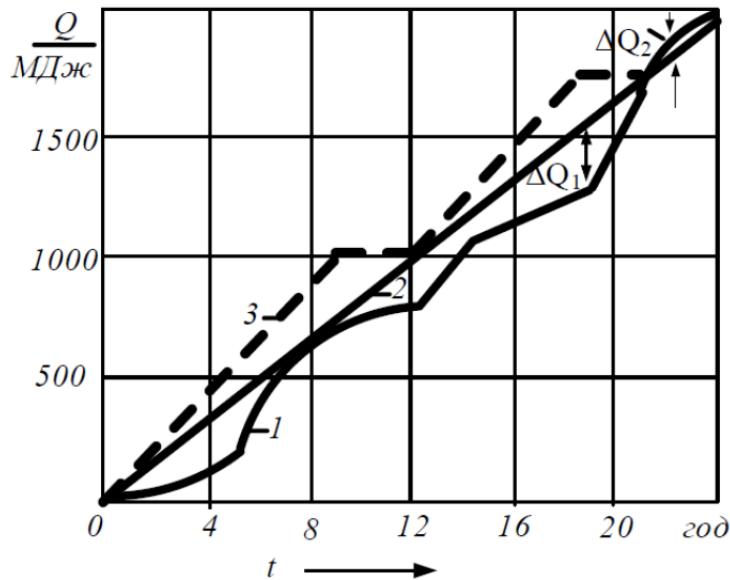
На сучасних теплофікованих молочних фермах $K_{\max} = 0,25\text{--}0,35$, на свинофермах – $K_{\max} = 0,55\text{--}0,75$.

Розрахункову потужність електротеплогенерувальної установки можна зменшити, вирівнюючи графік теплових навантажень та збільшуючи кількість годин роботи установки.

Потрібну ємність теплоакумлювальних електроводонагрівачів або спеціальних резервуарів-акумуляторів можна визначити за добовим інтегральним графіком теплового навантаження гарячого водопостачання (рис. 4.10), який будують на підставі добового графіка теплового навантаження (рис. 4.9).

Інтегральним графіком витрати теплоти є ламана лінія 1 (рис. 4.10), координати точок якої дорівнюють (у певному масштабі) витраті теплоти від початку доби до моменту, що відповідає даній ординаті.

Інтегральним графіком подачі теплоти під час цілодобової роботи з теплоаккумуляційною ємністю є пряма лінія 2; під час вимушеного режиму роботи (з перервами від 9 до 12 год., і від 18 до 21 год.) – ламана лінія 3.



1 – витрат теплоти; 2 – подачі теплоти при цілодобовій роботі електротеплогенерувальної установки; 3 – подачі теплоти при вимушеному режимі роботи електротеплогенерувальної установки

Рис. 4.10. Добові інтегральні графіки теплового навантаження гарячого водопостачання ферми на 400 голів дійних корів:

Ємність тепло-акумулятора залежить від максимальної різниці ординат інтегральних графіків подачі та витрати теплоти, що показано на рис. 4.10 та дорівнює:

$$Q_a = \Delta Q_1 + \Delta Q_2, \quad (4.59)$$

і визначається за формулою:

$$V_a = Q_a / \gamma (c_z - i_x), \quad (4.60)$$

де V_a – теплоакумулювальна ємність, м^3 ; Q_a – максимальна різниця ординат інтегральних графіків подачі і витрати теплоти, кДж ; γ – густина води ентальпії гарячої і холодної при розрахунковій температурі, кгм^{-3} ; $(i_z - i_x)$ – різниця води, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

3.2. Електричне обігрівання в парниках і теплицях

У сільському господарстві для вирощування розсади широко використовують парники. Переведення парників з біологічного обігрівання на електричне дає змогу значно знизити затрати праці на вирощування розсади.

У парниках застосовують ґрунтово-повітряне або тільки ґрунтове обігрівання. Для цього використовують нагрівальні елементи зі сталевого оцинкованого дроту або нагрівальні проводи ПОСХВ і ПОСХП. Стандартний парник складається з 20 рам. Довжина рами становить 1,6 м, ширина – 1,06 м.

Теплиці використовують для вирощування розсади й овочів. Поділяють їх на весняні та зимові. У весняних теплицях вирощують овочі та розсаду, в зимових – овочі протягом цілого року. Теплиці бувають блочні (площею від 1000 до 30000 м^2) і ангарні (площею від 500 до 1000 м^2) із закленим дахом або вкритим

поліетиленовою плівкою. В теплицях застосовують ґрунтово-повітряне обігрівання.

Ґрунт обігрівають сталевими оцинкованим дротом або нагрівальними проводами ПОСХВ, ПОСХП та ПОСХВТ.

Під час розрахунку електрообігрівання парників і теплиць потужність нагрівальних елементів P , кВт, визначають за формулою:

$$P = K F (t_6 - t_3) \cdot 10^3 \quad (4.61)$$

де K – зведений коефіцієнт теплопередачі через засклену поверхню парника чи теплиці; F – площа заскленої поверхні, яка омивається зовнішнім повітрям, м^2 ; t_6 і t_3 – відповідно температура повітря всередині культивацийного приміщення і розрахункова температура зовнішнього повітря в найхолоднішій місяць роботи парника або теплиці, $^{\circ}\text{C}$.

Значення зведеного коефіцієнта теплопередачі наближено можна визначити за формулами:

- для утепленого перекриття:

$$K = 4,5 + 0,08 v^2; \quad (4.62)$$

- для не утепленого перекриття:

$$K = 5,5 + 0,1 v^2, \quad (4.63)$$

де v – швидкість вітру, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Розрахункова температура зовнішнього повітря дорівнює:

$$t_3 = 0,6 t_{\min} + 0,4 t_{\text{сер}}, \quad (4.64)$$

де t_{\min} , $t_{\text{сер}}$ – мінімальна і середня температура найхолоднішого місяця в період вирощування даної культури, $^{\circ}\text{C}$ (значення температур беруть з агро-кліматичних довідників).

Розрахункову температуру повітря всередині культивацийного приміщення беруть згідно з нормами ОНТП-СХ 10-82.

Потужність нагрівальних елементів розподіляють між нагрівальними елементами ґрунту і повітря в співвідношенні: для парників – 1/2 або 2/1, а для теплиць – 1/2.

У парниках і теплицях застосовують автоматичне регулювання температурного режиму, що забезпечує високу продуктивність рослин і дає змогу економити до 30 % електроенергії.

Більш точно потужність нагрівальних елементів можна визначити за рівнянням теплового балансу:

$$Q_{\text{на}} = Q_{\text{ог}} + Q_{\text{вен}} + Q_{\text{гр}}, \quad (4.65)$$

де $Q_{\text{ог}}$ – втрати теплоти через огороження культивацийного приміщення; $Q_{\text{вен}}$ – втрати теплоти з вентиляційним повітрям; $Q_{\text{гр}}$ – втрати теплоти в ґрунт; $Q_{\text{на}}$ – теплопродуктивність нагрівальної установки.

Більш детально розрахунки втрат теплоти в культивацийних приміщеннях висвітлені в довідковій літературі.

3.3. Електричне обігрівання підлоги

Вирощування молодняку тварин і птиці потребує створення оптимального температурного режиму в певних зонах приміщення. Для нього використовують установки місцевого обігрівання (теплу підлогу, електробрудери, інфрачервоні лампи, електрообігрівальні килимки, напівпровідникові нагрівники, електрообігрівальні панелі тощо).

Для створення теплої підлоги в окремі ділянки підлоги закладають електронагрівальні елементи з проводів ПОСХВ, ПОСХП і ПОСХВТ або сталевого оцинкованого дроту.

Встановлена потужність електронагрівальних елементів P_0 становить приблизно $0,15\text{--}0,2 \text{ кВт}\cdot\text{м}^2$ площі підлоги, яку обігрівають.

При розрахунках приймають, що площа теплої підлоги дорівнює для поросят одного опоросу $1\text{--}1,4 \text{ м}^2$, для курчат при утриманні на підлозі – $1,4\text{--}1,6 \text{ м}^2$ на 100 курчат.

Загальну потужність електронагрівників теплої підлоги P , кВт для одного приміщення, визначають за формулою:

$$P = P_0 F, \quad (4.66)$$

де F – загальна площа теплої підлоги, м^2 .

$$F = N / \Delta N, \quad (4.67)$$

де N – загальне поголів'я молодняку тварин чи птиці в приміщенні; ΔN – щільність посадки, гол. $\cdot\text{м}^2$.

Електронагрівники в приміщенні розбивають на кілька трифазних секцій, кожна з яких має самостійне живлення і регулятор температури теплої підлоги.

Потужність однієї фази секції дорівнює:

$$P_{\phi.c} = P / 3n, \quad (4.68)$$

де n – кількість секцій.

Довжина дроту на одну фазу секції дорівнює:

$$L = P_{\phi.c} / \Delta P, \quad (4.69)$$

ΔP – питоме навантаження на один метр проводу, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}$.

3.4. Тепловий та електричний розрахунок електронагрівальних установок

Встановлену потужність електронагрівальної установки, кВт, визначають за формулами:

- під час нагрівання матеріалів:

$$P = K_3 G_c (t_2 - t_1) / (3600 \eta), \quad (4.70)$$

- під час плавлення і випаровування:

$$P = \frac{K_3 G [c(t_1 - t_2) + a]}{3600 \eta},$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, що враховує старіння нагрівальних елементів і можливе зниження електричної напруги, беруть 1,1–1,3); G – продуктивність установки, $\text{кг} \cdot \text{год}^{-1}$, $\text{м}^3 \cdot \text{год}^{-1}$ та ін.; c – середня за період нагрівання питома теплоємність тіла, a – питома теплота разового перетворення (питома теплота плавлення випаровування) $\text{кДж} \cdot \text{кг}$; η – ККД електронагрівальної установки, який складається з електричного ККД і теплового ККД (наближено беруть $\eta = 0,9$ – $0,95$ для теплоізованих установок безперервної дії і $\eta = 0,7$ – $0,8$ – для установок періодичної дії та неізованих); t_1 і t_2 – початкова та кінцева температура тіла, град.

Електричний розрахунок електронагрівальних установок полягає у виборі способу нагрівання, напруги і частоти струму та визначенні основних геометричних розмірів і робочої температури.

Вибір трубчастих нагрівальних елементів проводять за розрахунковою потужністю та за допустимим питомим навантаженням поверхні трубки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16 – Допустимі навантаження на ТЕНи

Середовище, яке нагрівається	Характер нагрівання	Матеріал трубки	Допустиме-питоме навантаження, $\text{Вт} \cdot \text{см}^2$
Вода	Нагрівання, кип'ятіння і випаровування	Латунь, нержавіюча сталь X18H10T	9,0–11,0
Повітря	Нагрівання в спокійному повітрі до температури на поверхні ТЕНів:		
	500°C понад 500°C	Сталі 10 і 20 Нержавіюча сталь X18H10T	1,2–1,8 2,3–5,0
Жири харчові, мінеральне масло	Нагрівання у ванні	Сталь 10 і 20	2,3–3,0
Молоко	Нагрівання у ванні	Нержавіюча сталь X18H10T	1,5–2,0
Побутові плити	ТЕНи, залиті в метал електроконфорки	Сталь 10 і 20	5,0–7,0
Променисте обігрівання тварин і птиці	У тваринницькому приміщенні	Нержавіюча сталь X18H10T	5,0–6,0

Потрібну активну поверхню нагрівників визначають за формулою:

$$S = \frac{P}{10\delta_{\text{дон}}},$$

де P – потужність нагрівальної установки, кВт; $\delta_{дон}$ – допустиме питоме навантаження на поверхню трубки, Вт·см⁻²; S – активна поверхня нагрівача, м².

З каталогу вибирають трубчастий нагрівальний елемент, який відповідає заданим умовам роботи, і визначають його активну поверхню за формулою:

$$S_l = \pi d L 10^{-3}, \quad (4.73)$$

де d – діаметр трубки, мм; L , – активна довжина одного трубчастого нагрівального елемента, м.

Потрібну кількість електронагрівників знаходять за формулою:

$$N = S/S_l. \quad (4.74)$$

Розрахунок нагрівальних елементів за робочим струмом і таблицями навантаження. В табл. 4.17 наведено дані про навантаження ніхромового дроту. В разі переходу від умов роботи, для яких складено таблицю, до реальних вводять поправкові коефіцієнти монтажу та середовища (K_m та K_c).

Таблиця 4.17 – Навантаження ніхромового дроту, підвішеного горизонтально в спокійному повітрі при температурі 20°C

Діаметр дроту, мм	Переріз, мм ²	Допустиме навантаження, А, при розрахунковій температурі, t_p , °C					
		200	400	600	700	800	900
1	2	3	4	5	6	7	8
4	12,6	37	60	80	93	110	129
3	7,07	22,3	37,5	54,5	64	77	88
2,5	4,91	16,6	27,5	40	46,6	57,5	66,5
2	3,14	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0
1,5	1,77	7,9	13,2	19,2	22,4	25,7	30
1,1	0,95	5,4	8,7	12,4	13,9	16,5	19,1
1	0,785	4,85	7,7	10,8	12,1	14,3	16,8
0,9	0,636	4,25	6,7	9,35	10,45	12,3	14,5
0,8	0,503	3,7	5,7	8,15	9,15	10,8	12,3
1	2	3	4	5	6	7	8
0,7	0,385	3,1	4,8	6,95	7,8	9,1	10,3
0,6	0,342	2,52	4	5,7	6,5	7,5	8,5
0,5	0,195	2	3,15	4,5	5,2	5,9	6,75
0,4	0,126	1,5	2,34	3,3	3,85	4,4	5
0,3	0,085	1,05	1,63	2,27	2,7	3,05	3,4
0,2	0,0314	0,65	1,03	1,4	1,65	1,82	2
0,1	0,00785	0,1	0,47	0,63	0,72	0,8	0,9

Поправкові значення коефіцієнта K_m залежно від конструктивного виконання нагрівача наведено в табл. 4.18.

Менші значення коефіцієнта монтажу беруть для малих діаметрів дроту. Поправочні значення коефіцієнта K_c для деяких умов навколишнього середовища наведено в табл. 4.19.

Таблиця 4.18 – Поправкові значення коефіцієнти K_m залежно від конструктивного виконання нагрівача

Конструктивне виконання	Коефіцієнт
Дріт при горизонтальному розміщенні у спокійному повітрі	1
Спіраль з дроту без теплової ізоляції в спокійному повітрі	0,8-0,85
Спіраль з дроту на вогнетривкому каркасі в спокійному повітрі	0,7
Дріт на вогнетривкому каркасі у спокійному повітрі	0,6-0,7
Нагрівальні опори з доброю теплоізоляцією (трубчасті електро-нагрівники електронагрівальні елементи в ґрунті та підлозі)	0,3-0,4

Робочий струм нагрівального пристрою визначають за формулами:

- для однофазних установок:

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{U \cdot n},$$

- для трифазних:

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta},$$

де P – потужність установки, кВт; U – напруга, В; n – кількість паралельних секцій в одній фазі.

Таблиця 4.19 – Поправкові значення коефіцієнта K_c для деяких умов навколишнього середовища

Умови навколишнього середовища	Коефіцієнт
Спіраль з дроту у потоці повітря, що рухається зі швидкістю, м·с ⁻¹ :	
3	1,8
5	2,1
10	3,1
Нагрівальний елемент:	
у воді	2,5
у потоці рідини	3–3,5

Далі вибирають матеріал дроту і його допустиму температуру в довідниковій літературі.

Розрахункову температуру дроту визначають враховуючи коефіцієнти монтажу і середовища:

$$t_p = \frac{t_d}{K_m K_c},$$

де t_d – допустима температура дроту, °С.

За робочим струмом I та розрахунковою температурою t_p вибирають із табл. 4.17 діаметр і поперечний переріз дроту.

Довжину одної секції дроту, м, одержують за формулою:

$$l = \frac{U_{\phi}^2 S}{10^3 P_c \rho_t},$$

де U_ϕ – фазна напруга, В; S – площа поперечного перерізу, мм²; P_c – потужність одної секції, кВт; ρ_t – питомий опір при розрахунковій температурі, Ом·м, визначається за формулою:

$$\rho_t = \rho_{20}[1 + \alpha(t_p - 20)] \quad (4.79)$$

де ρ_{20} – питомий опір при температурі 20°C, Ом·м; α – температурний коефіцієнт опору, град⁻¹; t_p – розрахункова температура, °C.

Приклад 4.2. Визначити потужність та геометричні розміри нагрівальних елементів трифазного елементарного електроводонагрівача місткістю 400 л, якщо вода підігрівається від 5 до 50 °C протягом 2 год. ККД водонагрівача $\eta = 0,9$, фазна напруга $U_\phi = 220$ В.

За умови, що $K_3 = 1,2$; $G = 400:2 = 200$ кг·год⁻¹; $c = 4,2$ кДж·кг⁻¹·град⁻¹; $t_1 = 5$ °C; $t_2 = 50$ °C потужність трифазного елементарного водонагрівача:

$$P = \frac{K_3 G c (t_2 - t_1)}{3600 \eta} = \frac{1,2 \cdot 200 \cdot 4,2 (50 - 5)}{3600 \cdot 0,9} = 14 \text{ кВт.}$$

Якщо нагрівальні елементи з'єднані на “зірку” і кількість паралельних секцій в одній фазі $n=2$, то робочий струм дорівнює:

$$I = \frac{14 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 2} = 10,6 \text{ А.}$$

Вибираємо для нагрівальної спіралі дріт з потрібного ніхрому Х15Н60-Н і вважаємо, що робоча температура $t_0 = 1050$ °C.

Беремо коефіцієнт монтажу $K_n = 0,7$ і коефіцієнт середовища $K_c = 2,5$. Тоді розрахункова температура дроту дорівнює:

$$t_p = \frac{1050}{0,7 \cdot 2,5} = 600^\circ \text{C.}$$

За робочим струмом та розрахунковою температурою вибираємо з табл. 4.17 ніхромовий дріт діаметром 1 мм і перерізом 0,785 мм².

При температурі 600 °C питомий опір ніхромового дроту:

$$\rho_{600} = 1,1 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0000163 \cdot (600 - 20)) = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Потужність однієї секції водонагрівача:

$$P_c = 14:6 = 2,333 \text{ кВт.}$$

Довжина дроту на одну секцію дорівнює:

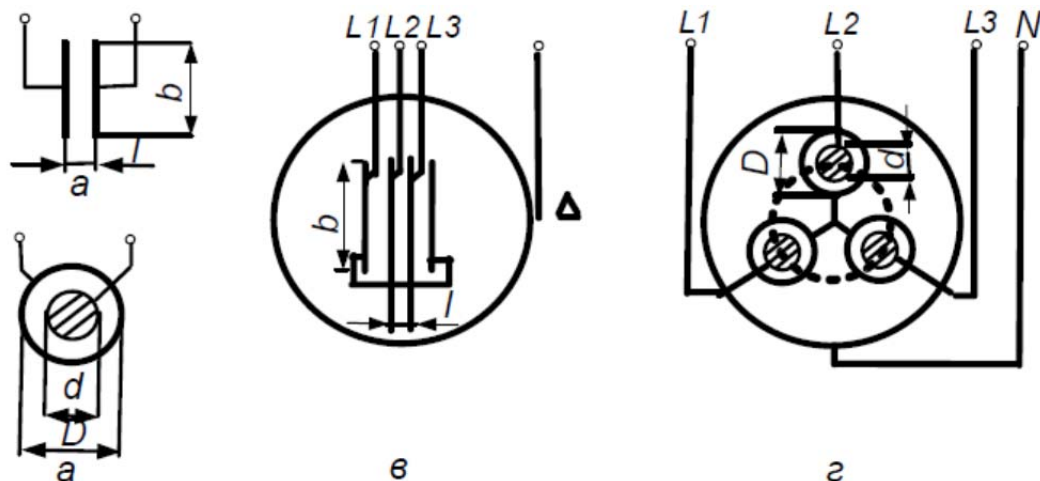
$$l = \frac{U_\phi^2 S}{10^3 P_c \rho_t} = \frac{220^2 \cdot 0,785 \cdot 10^{-6}}{10^3 \cdot 2,333 \cdot 1,11 \cdot 10^{-6}} = 14,67 \text{ м.}$$

Розрахунок електродних нагрівників. Електродні нагрівники – це система електродів (рис. 4.11). Нагрівальним елементом є безпосередньо матеріал.

Розраховуючи електродні нагрівники, вибирають їх конструктивне виконання та визначають площі електродів і відстані між ними.

Максимальна напруженість поля між електродами $E_{дон}$ для води 125–250 В·см⁻¹. Максимальна густина струму на електродах наприкінці періоду нагрівання

не повинна перевищувати $2 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ під час нагрівання води циліндричними електродами і $0,5 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ під час нагрівання плоскими електродами.



а – однофазний з плоскими електродами; б – однофазний з циліндричними коаксіальними електродами; в – трифазний з пластинчастими електродами; г – трифазний з коаксіальними електродами

Рис. 4.11. Найпоширеніші типи електродних нагрівників:

Відстань між електродами визначається за формулою:

$$l = U/E_{\text{дон}}, \quad (4.80)$$

де U – напруга, що подається до електродів, В.

Не рекомендується брати l менш як 1,5 см.

Незалежно від схеми з'єднань електродів потужність трифазного нагрівника визначають за формулою:

$$P = (3U_{\phi}^2 10^{-3})/R_{\phi}, \quad (4.81)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга, В; R_{ϕ} – опір однієї фази, Ом.

З нагріванням води опір її зменшується завдяки збільшенню швидкості руху іонів – носіїв електричних зарядів.

Для розрахунку беруть середнє значення опору, яке визначають за формулою:

$$R_{t \text{ сеп}} = K \cdot \rho_{t \text{ сеп}} / h, \quad (4.82)$$

де K – геометричний коефіцієнт; $\rho_{t \text{ сеп}}$ – середній питомий опір води за період нагрівання, Ом·см; h – висота електродів, см.

Геометричний коефіцієнт для різних електродних систем (рис. 4.11) одержують за формулами:

- для однофазної системи з плоскими електродами:

$$K = l/b; \quad (4.83)$$

- для трифазної системи з пластинчастими електродами:

$$K = l/(n-1)b; \quad (4.84)$$

- для трифазної системи з коаксіальними електродами:

$$K = (l/2\pi) \cdot \ln(D/d); \quad (4.85)$$

де l – відстань між електродами; n – кількість пластин; d, D – відповідно діаметри електрода і антиелектрода; b – ширина пластин.

Питомий опір води при температурі t дорівнює:

$$\rho_t = P_{20} / [1 + \alpha (t - 20)], \quad (4.86)$$

де α – температурний коефіцієнт (0,025–0,035).

Якщо взяти $\alpha = 0,025$, то матимемо спрощену формулу:

$$\rho_t = 40 \rho_{20} / (20 + t), \quad (4.87)$$

За період нагрівання середня температура дорівнює:

$$t_{\text{сеп}} = 0,5(t_1 + t_2), \quad (4.88)$$

де t_1 – температура води до нагрівання, град; t_2 – те саме води наприкінці нагрівання, град.

За період нагрівання середній питомий опір дорівнює:

$$\rho_{\text{тсеп}} = 40 \rho_{20} / (20 + t_{\text{сеп}}). \quad (4.89)$$

Підставивши в формулу (4.81) значення $R_{\text{тсеп}}$, дістанемо значення середньої потужності за період нагрівання:

$$P_{\text{сеп}} = 3U_{\phi} 10^{-3} (20 + t_{\text{сеп}})h / (40K\rho_{20}). \quad (4.90)$$

Звідси визначимо висоту електродів:

$$h = 13,3 \cdot 10^3 P_{\text{сеп}} \rho_{20} K / (U_{\phi}^2 (20 + t_{\text{сеп}})). \quad (4.91)$$

Підставивши замість $P_{\text{сеп}}$ її значення з формули (4.70), отримаємо вираз для визначення висоти електрода:

$$h = 3,62 K_3 G_c \rho_{20} K (t_1 - t_2) / (U_{\phi}^2 \eta (20 + t_{\text{сеп}})). \quad (4.92)$$

Максимальна густина струму має бути меншою за допустиму, оскільки розрахункову площу електродів слід перевірити за максимальною густиною струму. Для цього спочатку визначають потужність однієї фази наприкінці нагрівання води:

$$P_{\text{мф}} = U_{\phi}^2 h (20 + t_2) 10^{-3} / 40K\rho_{20}. \quad (4.93)$$

Потім визначаємо максимальну густина струму на електродах за формулою:

$$j = K_n P_{\text{мф}} 10^3 / (U_{\phi} S), \quad (4.94)$$

де K_n – коефіцієнт, що враховує нерівномірність густини струму на поверхні електродів (беруть 1,1–1,4); S – активна поверхня електрода однієї фази, см².

Якщо максимальна густина струму більша за допустиму, то слід взяти менше значення максимальної напруженості поля між електродами.

Приклад 4.3. Визначити потужність та геометричні розміри трифазного електродного нагрівника з пластинчастими електродами продуктивністю 0,2 м³ гарячої води за годину при нагріванні від 10 до 70 °С. Питомий опір води за годину при 20 °С становить 2000 Ом·см, ККД водонагрівача $\eta = 0,96$, напруга живлення – 380 В.

Потрібна потужність нагрівача (при $K_3 = 1,1$):

$$P_{\text{сеп}} = [K_3 G_c (t_2 - t_1)] / 3600 \eta = [1,1 \cdot 0,2 \cdot 10^3 \cdot 4,19(70 - 10)] / (3600 \cdot 0,96) = 16 \text{ кВт}.$$

Середня температура нагрівання води:

$$t_{\text{сер}} = 0,5(t_1 + t_2) = 0,5(10 + 70) = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Відстань між електродами ($E_{\text{доп}} = 130 \text{ В}$):

$$l = 380/130 = 2,9 \text{ см.}$$

Узявши чотири електроди з шириною пластин $l = 10 \text{ см}$, знаходимо геометричний коефіцієнт:

$$K = l / [(n-1) b] = 2,9 / [(4-1) 10] = 0,097.$$

Висота пластин дорівнює:

$$h = \frac{40 P_{\text{сер}} K \rho_{20}}{3 U_{\phi}^2 \cdot 10^{-3} (20 + t_{\text{сер}})} = \frac{40 \cdot 16 \cdot 0,097 \cdot 2000}{3 \cdot 380^2 \cdot 10^{-3} \cdot 60} = 4,8 \text{ см.}$$

Потужність однієї фази наприкінці нагрівання дорівнює:

$$\begin{aligned} P_{\text{мф}} &= U^2 h (20 + t_2) 10^{-3} / (40 \rho_{20} K) = \\ &= 380^2 \cdot 4,8 (20 + 70) 10^{-3} / (40 \cdot 2000 \cdot 0,097) = 5,3 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Максимальна густина струму на електродах дорівнює:

$$j = K_n P_{\text{мф}} \cdot 10^3 / (U_{\phi} S) = 1,4 \cdot 5,3 \cdot 10^3 / (380 \cdot 10 \cdot 4,8) \approx 0,4 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$$

або менша від допустимого значення $0,5 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$.

Розрахунок сталевих нагрівальних елементів. Розрахунок нагрівальних елементів, виготовлених із сталевого дроту, утруднюється нестандартністю електричних характеристик сталі. Тому точність розрахунку становить $\pm 20\%$. Щоб підвищити точність розрахунку, потрібно експериментально визначити питомий опір сталевого дроту, з якого будуть виготовлені нагрівальні елементи. Сталевий дріт має низький питомий опір $\rho_{20} = (0,11-0,15) 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ і високий температурний коефіцієнт опору $\alpha = 0,004-0,006 \text{ град}^{-1}$. Допустима температура нагрівання сталевого дроту становить $300-350 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Відношення опору сталевого проводу змінному струму певної частоти до опору постійного струму називають *коефіцієнтом поверхневого ефекту*.

При частоті 50 Гц для дроту $d = 1-6 \text{ мм}$ наближено значення коефіцієнта поверхневого ефекту можна визначати за емпіричною формулою:

$$K = 1 + 0,0176 d^{2,2}, \quad (4.95)$$

де d – діаметр дроту, мм.

Повний опір дроту визначаємо за формулою:

$$Z = K \cdot R / \cos \varphi, \quad (4.96)$$

де R – опір дроту постійному струму, Ом; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності (можна взяти $0,86$).

Активну потужність нагрівача визначаємо за формулою:

$$P = U_2 \cos \varphi / (K \cdot R), \quad (4.97)$$

Визначаємо довжину дроту:

$$L = \sqrt{\frac{10^5 P U^2 \cos^2 \varphi R_t^2}{4 \pi \rho_1 (t - t_0)^2}},$$

де U – напруга, на яку розрахований нагрівник, В; R_T – термічний опір від дроту, що нагрівається $\text{м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{Вт}^{-1}$; ρ_l – питомий опір дроту при температурі t , $\text{Ом} \cdot \text{см}$; t – температура дроту, град; t_0 – температура зовнішньої поверхні матеріалу, що нагрівається, град.

Приклад 4.4. Визначити довжину сталевого оцинкованого дроту діаметром 3 мм ($\rho_{20} = 0,135 \times 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$; $\alpha = 0,0045 \text{ град}^{-1}$) для обігрівання ґрунту в парниках. Потрібна потужність на одну фазу становить 20 кВт. Дріт прокладають у азбоцементній трубі під шаром ґрунту. Термічний опір від дроту до ґрунту $R_T = 0,04 \text{ м}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{Вт}^{-1}$, температура ґрунту – 18 °С, напруга живлення – 220 В. Беремо за робочу температуру дроту 250 °С, $\cos \gamma = 0,86$.

При робочій температурі питомий опір дроту дорівнює:

$$\rho_t = 0,135 \cdot 10^{-4} [1 + 0,0045(250 - 18)] = 0,276 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Коефіцієнт поверхневого ефекту:

$$K = 1 + 0,0176 \cdot d^{2,2} = 1 + 0,0176 \cdot 3^{2,2} = 1,2.$$

Довжина дроту дорівнює:

$$L = \sqrt[3]{\frac{105 \cdot 20 \cdot 220^2 \cdot 0,86^2 \cdot 0,04^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,267 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 232^2}} \approx 172 \text{ м}.$$

4. Розрахунки і вибір установок для застосування електротехнологій у сільськогосподарському виробництві

В останні роки в сільськогосподарському виробництві все ширше застосовують електротехнологію – використання електрики безпосередньо в технологічних процесах з метою електричної дії на предмет праці без попереднього перетворення електроенергії на інші види енергії, в електродвигунах, електронагрівальних установках, в електроосвітлювальних і опроміненні.

У галузі електротехнології на сьогодні проведено багато наукових досліджень, результати яких знайшли практичне застосування в сільськогосподарському виробництві. Хоча промисловість випускає ще мало установок і машин, в яких використовуються принципи електротехнології, однак питання щодо застосування електротехнологій у сільськогосподарському виробництві дуже актуальне. Нині в сільськогосподарське виробництво почали впроваджувати деякі електротехнології.

Електронно-іонна технологія використовує взаємодію сильних електронних полів з електрично зарядженими частинками твердих або рідких матеріалів. Особливо широко використовується коронний розряд, який виникає з підвищенням напруги між електродами до значення, що спричинює інтенсивну іонізацію повітря або газу. Серед установок, які використовують коронний

розряд, найбільш поширені електричні іонізатори повітря та електричні сепаратори зерна.

Електричні іонізатори використовують для іонізації повітря в тваринницьких приміщеннях, інкубаторах і для знепилювання повітряного середовища вивідних шаф і інкубаторів.

В електричних сепараторах використовують властивість зерна та різних домішок, що до нього потрапляють, здобувати заряд в електричному полі. Величина заряду здебільшого залежить від діелектричної проникності, провідності, форми та розмірів зерна. Зерно та домішки розділяють залежно від їхніх фізичних властивостей.

Для нормальної роботи електричних сепараторів зерна потрібно створювати електричне поле напруженістю близько $2 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$. Тому для живлення електричних сепараторів зерна використовують підвищувальні трансформатори, випрямлячі та схеми множення напруги, які забезпечують на виході напругу 30–70 кВ. На рис 4.12 наведено однонапівперіодну схему множення напруги.

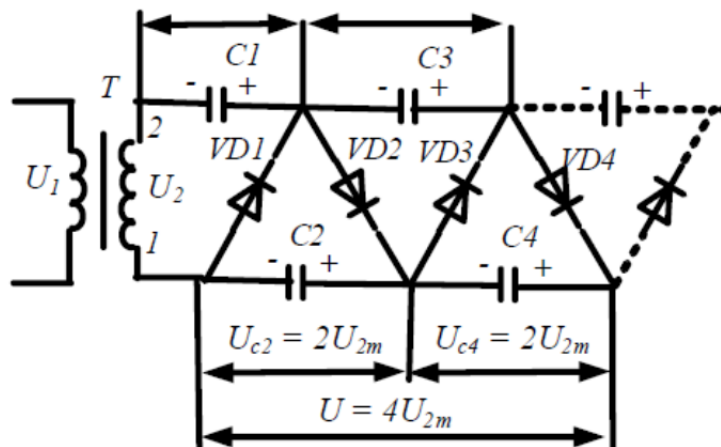


Рис. 4.12. Однонапівперіодна схема множення напруги

Ці схеми в режимі холостого ходу дають змогу дістати напругу на виході:

$$U_{xx} = 2nU_{2m}, \quad (4.99)$$

де n – число каскадів множення; U_{2m} – амплітудне значення напруги на вторинній обмотці підвищувального трансформатора.

Зі струмом навантаження I спад напруги U в однонапівперіодичній схемі визначаємо за формулою:

$$\Delta U = I / 6fC(4n^3 + 3n^2 + 2n), \quad (4.100)$$

де C – ємність конденсаторів; f – частота мережі живлення.

Напругу на виході схеми визначаємо за формулою:

$$U = 2n\sqrt{2} \cdot U_2 - \Delta U,$$

де U_2 – діюче значення напруги на вторинній обмотці трансформатора.

Для розрахунку схем множення беруть номінальну напругу конденсаторів більшу або таку, що дорівнює $2,85 U_2$. Зворотну напругу напівпровідникових вентилів беруть такої самої величини.

Обробка сільськогосподарських матеріалів електричним струмом. У сільськогосподарському виробництві широко застосовують електричну обробку насіння, електричне розсолення і знезараження ґрунту та електроплазмоліз рослинної сировини.

Під час *електричної обробки насіння* перед посівом його вміщують у конденсатор, між пластинами якого створюється електричне поле напруженістю 100–400 кВ/м. Тривалість обробки насіння становить 20–180 с.

Для *розсолення ґрунту* на ділянці поля встановлюють систему електродів з металевих труб або стержнів. Густина струму в ґрунті 1–10 А·м⁻².

У парниках ґрунт стерилізують на глибину 0,12–0,15 м, а в теплицях – на глибину 0,25 м. Для цього використовують стаціонарні або переносні установки, які є системою електродів зі сталевих пластин, розташованих на відстані 0,2–0,25 м один від одного. Досліди показали, що фітопатогенні гриби в ґрунті гинуть при температурі 55–65 °С.

Електроплазмоліз рослинної сировини здійснюють у валкових плазмолізаторах. До двох валиків, що обертаються назустріч один одному, підводиться електрична напруга через контактні кільця. Напруженість електричного поля в зоні обробки рослинної сировини становить 60–75 кВ·м⁻¹. Тривалість сушіння трави порівняно з природним сушінням зменшується в 1,5–2 рази.

Електроімпульсну техніку і технологію використовують в електричних огорожах, для створення електрогідралічного ефекту, електроерозійної обробки металів.

Електричні огорожі призначені для загінного випасання великої рогатої худоби, свиней, овець та кіз.

Електрогідралічний ефект застосовують для подрібнення або пластичної деформації різних матеріалів, знезараження рідин, очищення вовни тощо.

Електроерозійна обробка застосовується для створення в металі отворів складної форми діаметром менш як 0,3 мм, виготовлення інструментів тощо.

Магнітну обробку матеріалів застосовують під час очищення насіння проса і багаторічних трав від бур'янів (електромагнітний сепаратор), для очищення кормів від залізних предметів, видалення залізних предметів із шлунка ВРХ та магнітної обробки води.

Іскровий розряд використовують для обробки рослинної сировини, прорідження прорості культурних рослин, боротьби з бур'янами тощо.

Розрахунок установок для штучної іонізації повітря у сільськогосподарських приміщеннях. Визначаючи аероіонізацію повітря у приміщенні, спочатку знаходять питому силу струму коронного розряду, мкА/м³:

$$I_v = 0,44 n_{\text{л}}^2 \cdot 10^{-12}, \quad (4.102)$$

де n_n – рекомендована (табл. 4.20) концентрація легких негативно заряджених іонів у зоні дихання тварини чи птиці, см^{-2} .

Таблиця 4.20 – Режимы штучної іонізації повітря у птахівничих і тваринних приміщеннях

Вид тварин	Вік тварин (птиці) 10^3см^2	Тривалість сеансу аероіонізації повітря, діб	Тривалість паузи між сеансами, діб	Добова тривалість сеансу аероіонізації повітря, год	Особливості режиму
Яйця курячі інкубаційні	13	19		24	Після однієї години іонізації перерва на 1 год
Кури несучки	300	30	30	4–8	
Курчата	25	5	5	1–2	
Корови	300	30	10–20	5	
Телята	150–250	30		6–8	
Дорослі свині	400–500	28–30	21–28	0,5	
Поросята	300–350	28–30	21–28	0,5	

Далі визначають загальну силу струму всіх коронуючих електродів у приміщенні, А:

$$I_{\text{заг}} = I_v \cdot V \cdot 10^{-6}, \quad (4.103)$$

де V – внутрішній об'єм приміщення, м^3 .

За $I_{\text{заг}}$ вибирають аероіонізуючу установку або проводять її розрахунок за методиками, наведеними в [19].

Запитання для самоперевірки

1. Призначення електроприводу?
2. За якими вимогами слід вибирати раціональний електропривод?
3. Які ви знаєте категорії розміщення електрообладнання?
4. Які ви знаєте комплектні пристрої керування?
5. Які ви знаєте види і системи освітлення?
6. Призначення світильника та з чого він складається?
7. Для чого застосовують метод коефіцієнта використання світлового потоку?
8. Призначення установок для опромінення рослин?
9. Призначення установок для ультрафіолетового опромінення?
10. Призначення установок інфрачервоного та комбінованого опромінення?
11. Які ви знаєте установки застосування електротехнології у сільськогосподарському виробництві?

Лекція № 4

Розрахунок і вибір засобів автоматизації у сільськогосподарських процесах План:

1. Дослідження і розрахунок характеристик об'єктів автоматизації;
2. Методики синтезу та аналізу систем автоматичного керування;
 - 2.1. Методика уточнення лінійних алгоритмів керування;
 - 2.2. Основні інженерні методики розрахунку параметрів регуляторів на стадії проектування;
3. Розрахунки і вибір технічних засобів автоматизації;
 - 3.1. Вибір комплексу технічних засобів лінійних систем автоматичного регулювання
 - 3.2. Вибір комплексу технічних засобів позиційних систем автоматичного регулювання
 - 3.3. Вибір комплексу технічних засобів імпульсних систем автоматичного керування;
4. Типові комплекти технічних засобів автоматизації.

1. Дослідження і розрахунок характеристик об'єктів автоматизації;

З огляду на задачі, які слід розв'язувати, автоматизація поділяється на такі види:

- часткова, що передбачає автоматизацію окремих технологічних процесів, пристроїв, елементів обладнання; досить часто це досягається простими технічними засобами;

- комплексна, що проводиться на ділянці, в бригаді, цеху, на підприємстві, які функціонують як єдиний взаємозв'язаний комплекс;

при цьому автоматизацією охоплюються всі основні виробничі функції підприємства, відділення;

- повна, що передбачає передачу всіх функцій управління і контролю виробництвом автоматичній системі керування.

Агрегат, механізм, технологічний процес і виробництво, які підлягають автоматизації, називається *об'єктом автоматизації* або *об'єктом керування*. Поєднання об'єкта управління з комплексом технічних засобів автоматизації називають *системою автоматичного керування*. Статичні та динамічні властивості об'єкта автоматизації визначають структуру комплексу технічних засобів автоматизації.

Тому поняття *об'єкта керування* є одним із центральних. В автоматизації технологічних процесів використовуються різноманітні системи автоматичного керування, які можна класифікувати так:

- за принципом функціонального зв'язку між змінними – *розімкнуті* та *замкнуті*;
- за характером зміни заданого значення змінної – системи *стабілізації*, *програмні* та *слідкуючі*;
- за принципом формування регулюючої дії – системи, в яких керування здійснюється за відхиленням величини, що регулюється – *інваріантні*, *комбіновані*;
- за властивостями в стійкому режимі – на *статичні* та *астатичні*;
- за характером сигналів, що використовуються в системах – *безперервні*, *релейні*, *імпульсні* та *цифрові*;
- за ступенем ідеалізації математичної моделі – *лінійні* та *нелінійні*, *стаціонарні* та *нестационарні*, із *зосередженими* і *розподіленими параметрами*;
- за структурою – *одно-* і *багатоконтурні*;
- за можливостями змінювати характеристики – *адаптивні* та *не-адаптивні*;
- за видом допоміжної енергії – *електричні*, *пневматичні*, *гідравлічні* та *комбіновані*.

Створюючи системи автоматизації, важливо встановити найдоцільніший рівень автоматизації виробничого процесу, що визначається перш за все економічною ефективністю в умовах конкретного виробництва.

Систему автоматизації розробляють в певній послідовності. Перш за все розробляється структурна схема, за якою визначаються складові частини об'єкта, а також зв'язки між ними. Далі проектується схема автоматизації, на підставі якої встановлюються функціональні властивості кожного з елементів системи, зокрема й всієї системи.

Наступний етап – дослідження властивостей об'єкта автоматизації (статичних і динамічних), що дає змогу вибрати для об'єкта відповідний алгоритм керування та регулятор (комплекс технічних засобів), який реалізує цей алгоритм. Потім розробляються схеми принципова, з'єднань та підключень, вибирається щитова продукція та оцінюється ефективність розробленої системи.

При розробці систем автоматизації властивості об'єкта автоматизації визначають склад комплексу технічних засобів та алгоритм керування, тобто об'єкт автоматизації можна розглядати як деякий базис, а всі інші елементи системи як надбудову.

У сільськогосподарському виробництві найсприятливіші умови для автоматизації забезпечуються для стаціонарних процесів у тваринництві, закритому ґрунті, переробці та зберіганні сільськогосподарської продукції. Останнім часом завдяки розвитку мікроелектроніки стала можливою автоматизація мобільної техніки: тракторів, комбайнів, сівалок.

Отже, об'єктами автоматизації в сільському господарстві є:

- різноманітні технологічні процеси (створення мікроклімату, приготування та роздача кормів, сушка та очищення продукції, стабілізація рівня рідин),
- окремі механізми та апарати (стабілізація частоти обертання робочих машин, забезпечення завантаження дробарок та ін.).

Об'єкти автоматизації можна класифікувати так: прості та складні; із зосередженими та розподіленими параметрами.

Прості – це такі об'єкти, динамічні властивості яких описуються за допомогою двох узагальнених координат (координат входу та виходу). *Складні* – це об'єкти динаміка яких для опису потребує не менше трьох координат. Об'єкти із *зосередженими параметрами* – це такі, в яких динамічні та статичні властивості постійні у всіх їхніх просторових точках. Об'єкти із *розподіленими параметрами*, навпаки, потребують ще й просторової координати, оскільки їхня динаміка в різних просторових точках різна. Звідси витікає, що об'єкти із розподіленими координатами одночасно є й складними.

Як уже зазначалось, властивості об'єкта керування дають змогу визначити алгоритм керування та підібрати комплекс технічних засобів для його реалізації. Для цього застосовують математичні моделі об'єктів автоматизації здебільшого у вигляді передавальних функцій.

Існує багато методів отримання передавальних функцій об'єктів керування, коротко розглянемо лише деякі.

Аналітичний метод дослідження об'єктів. У цьому випадку застосовують один із трьох відомих законів збереження: кількості енергії, руху та речовини. Так, для сільськогосподарського виробництва закони збереження можуть бути інтерпретовані у вигляді:

- для теплових об'єктів:

$$mc \frac{d\theta}{dt} = Q_T,$$

де m – маса об'єкта; c – питома теплоємність; θ – температура; Q_T – сума теплових потоків, що спрямовані на об'єкт та з нього;

- для об'єктів, що здійснюють коловий рух:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M,$$

де J – момент інерції; ω – колова частота обертання; M – сума моментів;

- для об'єктів, що здійснюють лінійний рух:

$$m \frac{d\vartheta}{dt} = F,$$

де ϑ – лінійна швидкість; F – сума сил, що діють на об'єкт;

- для об'єктів, які наповнюються рідинами:

$$S \frac{dh}{dt} = Q,$$

де S – площа основи резервуара (має бути незмінною за висотою); h – рівень рідини; Q – потоки рідини;

- для об'єктів, які підлягають сушці або зволоженню:

$$m_0 \frac{d\omega}{dt} = W,$$

де m_0 – маса абсолютно сухої речовини; ω – відносна вологість; W – маса води, що надходить за одиницю часу.

Слід пам'ятати, що для здобуття передавальних функцій диференціальні рівняння в кінцевому випадку мають бути складені у відхиленнях. Це потрібно для їх лінеаризації.

На прикладі резервуара розглянемо послідовність побудови аналітичної моделі об'єкта у вигляді передавальної функції.

Приклад 5.1. До резервуара з витратою Q_n під тиском p_1 через вентиль із коефіцієнтом опору J_1 та площею перерізу S_1 подається рідина. Номінальний рівень рідини H_0 , тиск підпору p_d , тиск, що створюється водяним стовпом p_v . Рідина забирається насосом ($Q_v = \text{const}$) при тиску p_2 через вентиль з площею S_2 та коефіцієнтом опору J_2 (рис 5.1).

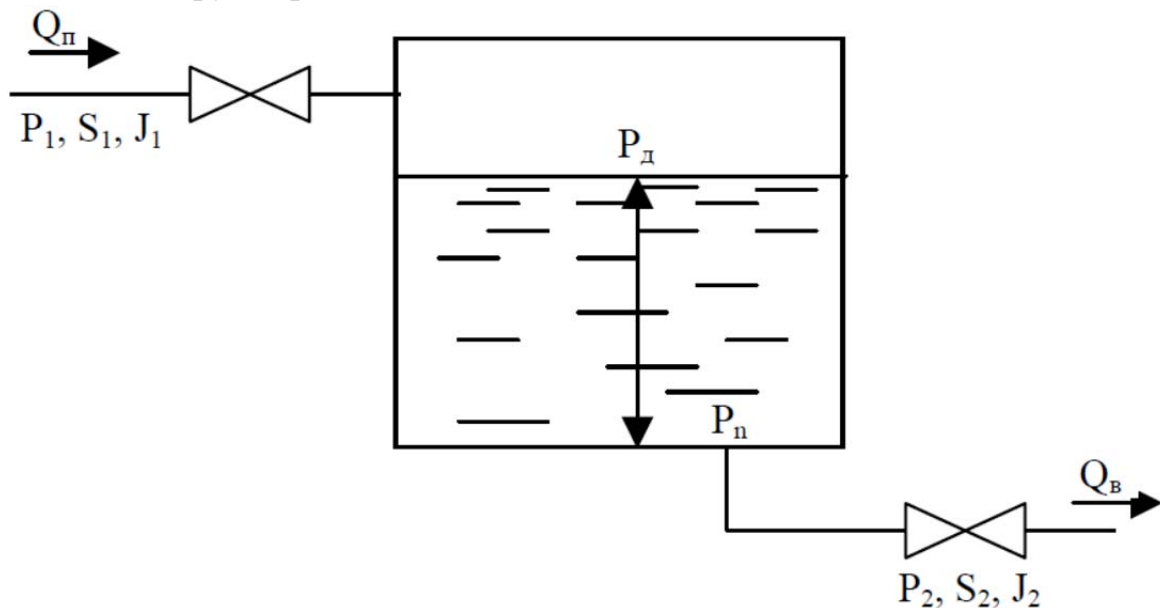


Рис. 5.1. Узагальнена схема резервуара

Потрібно визначити передавальну функцію для каналу керування “Рівень H – зміна площі вентиля S_1 ”.

На підставі закону збереження для нашого об'єкта запишемо:

$$S \frac{dH}{dt} = \Delta Q = Q_n - Q_v,$$

де S – площа основи резервуара. Відомо, що:

$$Q_n = S_1 \sqrt{\frac{2}{\rho J} (p_1 - p_v)},$$

де ρ – питома вага рідини.

Отже,

$$S \frac{dH}{dt} = S_1 \sqrt{\frac{2}{\rho J} (p_1 - p_e)} - Q_e.$$

Враховуючи, що залежність (5.7) нелінійна, рівняння (5.8) слід записати у відхиленнях. Для цього змінимо вхідну величину об'єкта на ΔS_1 . Це призведе до зміни вихідної величини на ΔH . Отже, матимемо:

$$S \frac{d(H + \Delta H)}{dt} = (S_1 + \Delta S_1) \sqrt{\frac{2}{\rho J_1} (p_1 - p_e)} - Q_e.$$

Витік рідини при цьому не змінився, оскільки рідина забирається насосом.

Якщо від рівняння (5.9) віднімемо формули (5.8), то дістанемо:

$$S \frac{d\Delta H}{dt} = \Delta S_1 \sqrt{\frac{2}{\rho J_1} (p_1 - p_e)}.$$

Залежність (5.10) вже лінійна і може бути використана для визначення передавальної функції через перетворення Лапласа.

Позначивши $d/dt \rightarrow p$ матимемо:

$$W(p) = \frac{\Delta H(p)}{\Delta S_1(p)} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho J_1} (p_1 - p_e)}}{S p} = \frac{1}{T p},$$

де $T = S / \sqrt{\frac{2}{\rho J_1} (p_1 - p_e)}$ – стала часу.

Отже, для зазначених умов динамічні властивості резервуара описуються інтегруючою ланкою.

Аналітичний метод дослідження має одну основну перевагу перед іншими – значно дешевший (не потребує затрат на експерименти, матеріали), проте моделі за рахунок прийнятих спрощень та допущень не завжди мають достатню точність.

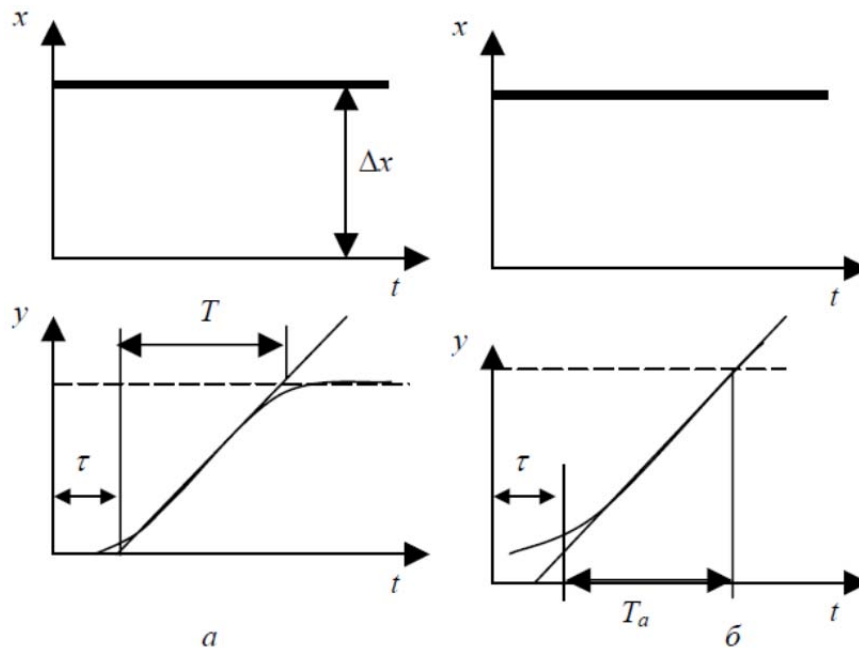
Експериментальні методи досліджень об'єктів. Ці методи поділяються на методи активного та пасивного експерименту. Під час активного експерименту на вхід об'єкта подається сигнал стандартної форми. Реакція об'єкта на цей сигнал дає змогу визначити його передавальну функцію. Найчастіше з усіх випробувальних сигналів використовують прямокутну приступку (рис. 5.2). Реакція об'єкта – це крива розгону. Щоб здобути передавальну функцію, її обробляють графічним методом, методом інтегральних площин та іншими. Коротко про ці методи. Графічна апроксимація полягає в тому, що через точку перетину (для статичного об'єкта) проводять дотичну, яка дає змогу визначити сталу часу T та час запізнювання τ .

Коефіцієнт передачі знаходять як:

$$K = \frac{\Delta y(\infty)}{\Delta x}.$$

Отже, для об'єкта керування – кривої розгону, яка зображена на рис. 5.2, а, передавальна функція буде мати вигляд:

$$W(p) = \frac{Ke^{-p\tau}}{T_p + 1}.$$



а – статичних; б – астатичних

Рис. 5.2. Криві розгону об'єктів:

Для астатичного об'єкта структура передавальної функції має вигляд:

$$W(p) = \frac{\varepsilon}{p} e^{-p\tau},$$

де ε – швидкість розгону об'єкта,

$$\varepsilon = \frac{K}{T_a} = \frac{y_n / \Delta x}{T_a},$$

y_n – номінальне значення вихідної величини об'єкта керування; T_a – час розгону (як визначається, видно з рис. 5.2, б).

Слід зазначити, що графічна апроксимація може бути застосована лише для певного класу об'єктів, у яких точка перегину міститься близько до осі абсцис. У протилежному разі точність апроксимації буде невисокою.

Метод інтегральних площин більш універсальний і точний, ніж метод апроксимації. Тому його можна рекомендувати практично для всіх об'єктів автоматизації. Структура передавальної функції при цьому матиме вигляд:

$$W(p) = W^*(p) K e^{-p\tau}, \quad (5.15)$$

де $W^*(p)$ – безрозмірна передавальна функція.

Коефіцієнт передачі об'єкта визначається як і при графічній апроксимації. Час запізнення – це час, протягом якого об'єкт не реагує (або практично не реагує) на вхідний сигнал – прямокутну приступку.

Основна робота, як видно, полягає у знаходженні структури та параметрів безрозмірної передавальної функції. Розглянемо це дещо детальніше.

Загальний вигляд структури безрозмірної передавальної функції:

$$W^*(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1},$$

де a_n, b_m – коефіцієнти, що можуть бути визначені *методом площ* за розв'язком такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} a_1 = b_1 + s_1; \\ a_2 = b_2 + s_1 b_1 + s_2; \\ a_3 = b_3 + b_2 s_1 + b_1 s_2 + s_3; \\ \dots \dots \dots \\ a_k = b_k + s_k + \sum_{i=1}^{k-1} b_i s_{k-i}, \end{cases}$$

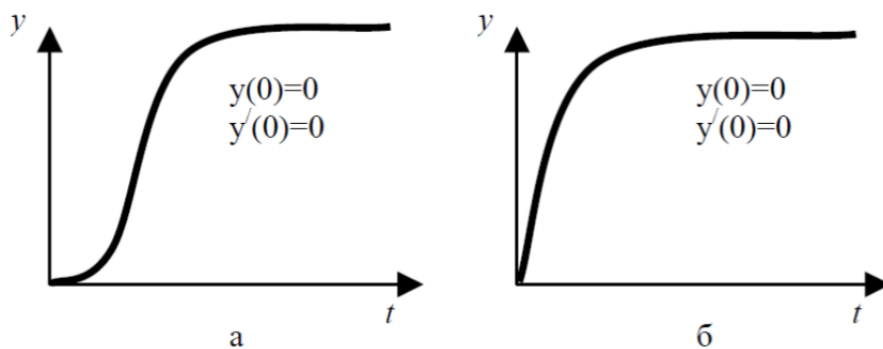
де S_1, S_2, S_i – інтегральні площини.

Враховуючи, що для інженерних розрахунків досить використовувати лише три інтегральні площини S_1, S_2 і S_3 , визначення безрозмірної передавальної функції дещо спрощується, а саме:

- якщо крива розгону (рис. 5.3, а) має точку перегину, тобто характеризується умовами $y''(0) = 0$, то структура безрозмірної передавальної функції матиме вигляд:

$$W^*(p) = \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + \dots + a_1 p + 1},$$

де $a_3 = S_3, a_2 = S_2, a_1 = S_1$.



а – з точкою перегину; б – без точки перегину

Рис. 5.3. Варіанти кривих розгону за методом інтегральних площин:

Якщо при цьому $S_3 < 0$, то:

$$W^*(p) = \frac{b_1 p + 1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1},$$

і коефіцієнти b_1, a_1, a_2 можуть бути отримані з рівнянь (5.17):

$$\begin{cases} a_1 = s_1 + b_1; \\ a_2 = s_2 + b_2; \\ 0 = s_3 + b_1 s_2. \end{cases}$$

- якщо крива розгону точки перегину немає (рис. 5.3, б), тобто характеризується умовами $y(0) = 0$, $y'(0) \neq 0$, то структура безрозмірної передавальної функції має вигляд виразу (5.19), а його параметри обчислюють за системою рівнянь (5.20).

Інтегральні площини S_1 , S_2 та S_3 розраховують у такій послідовності:

- увесь часовий проміжок, на якому розміщена крива розгону, розбивають на рівні інтервали Δt так, щоб на кожному із них вона мало відрізнялась від прямої (при цьому враховується, що час запізнення τ уже виділений);

- визначають нормовану криву розгону:

$$h(t) = \frac{y(t) - y(0)}{y(\infty) - y(0)};$$

- знаходять першу інтегральну площину:

$$s_1 = \int_0^{\infty} (1 - h(t)) dt;$$

- змінюють масштаб часу:

$$\theta(t) = t/s_1; \quad (5.23)$$

- обчислюють другу інтегральну площину

$$s_2 = s_1^l \int_0^{\infty} (1 - h(t)) \left[\frac{-\theta(t)}{1!} + \frac{(-\theta(t))^0}{0!} \right] dt = s_1^l \int_0^{\infty} (1 - h(t))(1 - \theta(t)) dt; \quad (5.24)$$

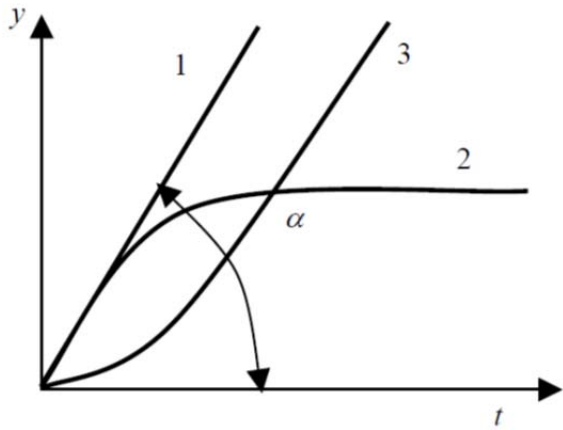
- обчислюють третю інтегральну площину:

$$s_3 = s_1^2 \int_0^{\infty} (1 - h(t)) \left[\frac{\theta(t)^2}{2!} - \frac{\theta(t)}{1!} + \frac{s_2}{s_1^2} \right] dt.$$

Загальна формула для обчислення інтегральної площини має вигляд:

$$S_k := (S_1)^{k-1} \cdot \int_0^{\infty} (1 - h(t)) \cdot \left[\frac{(-\theta(t))^{k-1}}{(k-1)!} + \frac{(-\theta(t))^{k-2}}{(k-2)!} + \begin{cases} 0 & \text{if } k \leq 2 \\ \sum_{i=0}^{k-3} \left[\frac{S_{k-1-i} \cdot \theta(t)^i}{(S_1)^{k-1-i} \cdot (i!)} \right] & \text{if } k > 2 \end{cases} \right] dt$$

Передавальні функції астатичного об'єкту визначаються як різниця передаточних функцій, що відповідають кривим розгону 1 і 2 (рис. 5.4).



1 – крива розгону ідеалізованого астатичного об'єкта; 2 – крива розгону статичного об'єкта; 3 – крива розгону реального астатичного об'єкта

Рис. 5.4. Допоміжні графічні побудови для астатичного об'єкта:

Крива розгону теплообмінного пристрою була отримана при зміні положення затвора регулювального органа на 20 % (рис. 5.5).

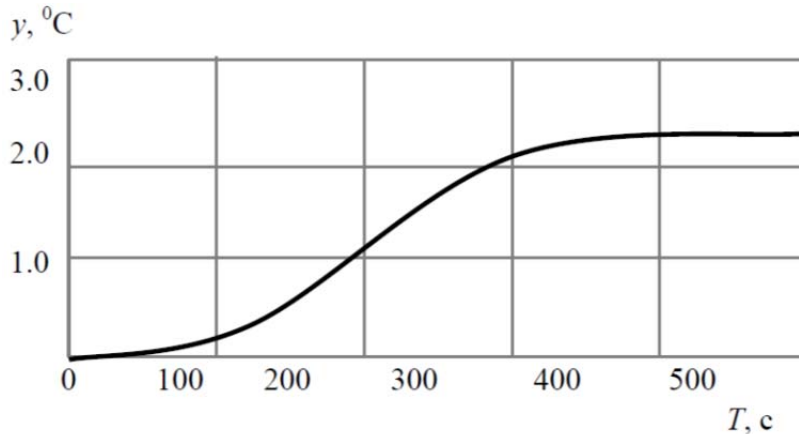


Рис.5.5. Крива розгону теплообмінного пристрою

Використовуючи метод інтегральних площин, знаходимо передавальну функцію:

$$W(p) = [W_1^*(p)W_2^*(p)] \cdot [\Delta y_2(\infty)] / \Delta x,$$

де $W_1^*(p)$ – безрозмірна передавальна функція для ідеальної інтегруючої ланки (лінія 1 на рис. 5.4), що визначається як:

$$W_1^*(p) = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\Delta y_2(\infty)} \cdot \frac{1}{p},$$

де $W_2^*(p)$ – безрозмірна передавальна функція, що відповідає кривій 2 на рис.5.4. Послідовність її визначення була показана вище.

Приклад 5.2. На випробувальне збурення $\Delta x = 20$ було отримано розгінну характеристику $y(t)$, у якої $\Delta y(\infty) = 2.4$. За кривою розгону $y(t)$ знаходимо час запізнення $\tau = 5$ с та нормовану розгінну характеристику:

$$h(t) = \frac{y(t) - y(0)}{y(\infty) - y(0)}.$$

За формулами (5.21)–(5.26) обчислюємо інтегральні площини:

$$S_1 := \int_0^{\infty} (1 - h(t)) dt \quad S_1 = 1,05$$

$$\theta(t) := \frac{t}{S_1}$$

$$S_2 := (S_1)^1 \cdot \int_0^{\infty} (1 - h(t)) \cdot \left[\frac{-\theta(t)}{1!} + \frac{(-\theta(t))^0}{0!} \right] dt \quad S_2 = 8,423$$

$$S_3 := (S_1)^2 \cdot \int_0^{\infty} (1 - h(t)) \cdot \left[\frac{\theta(t)^2}{2!} - \frac{\theta(t)}{1!} + \frac{S_2}{(S_1)^2} \right] dt \quad S_3 = -13,055$$

У зв'язку з тим, що площа S_3 менше нуля, переходимо від структури передавальної функції типу (5.18) до структури типу (5.19).

Для цього необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$a_3 := 0b \quad 1 := 1$$

$$b_2 := 0a \quad 1 := 3$$

$$b_3 := 0a \quad 2 := 2$$

Given

$$a_1 - b_1 = S_1$$

$$a_2 - b_2 - b_1 \cdot S_1 = S_2$$

$$a_3 - b_3 - b_2 \cdot S_2 = S_3$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} := \text{Find}(b_1, a_1, a_2) \quad \begin{pmatrix} b_1 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,55 \\ 2,6 \\ 10,05 \end{pmatrix}$$

Отже, безрозмірна передаточна функція матиме вигляд:

$$W^*(p) = \frac{1,55p + 1}{10,05p^2 + 2,6p + 1}$$

Коефіцієнт передачі об'єкта:

$$K = \Delta y(\infty) / \Delta x = 2,4 / 20 = 0,12.$$

Із урахуванням попередньо виділеного часу запізнення остаточно передавальна функція матиме вигляд:

$$W^*(p) = \frac{K(1,55p + 1)}{10,05p^2 + 2,6p + 1} e^{-5p} = \frac{0,86p + 0,12}{10,05p^2 + 2,6p + 1} e^{-5p}. \quad (5.30)$$

За умов пасивного експерименту об'єкт керування (його вхід та вихід) підключається до вимірювача і протягом тривалого часу фіксуються параметри. Використовуючи спеціальні розділи математики (теорію ймовірності випадкових процесів), розраховують передавальну функцію об'єкта автоматизації. Послідовність розрахунків при цьому така:

- вважають, що випадкові процеси на вході $x(t)$ та виході $y(t)$ об'єкта є стаціонарними ергодичними, що дає змогу вести всі інші розрахунки;

- за реалізаціями випадкових процесів на вході та виході визначають їх статистичні характеристики: математичне сподівання $M(x)$, $M(y)$, дисперсію $D(x)$, $D(y)$; центрують випадкові процеси $y^0(t) = y(t) - M(y)$, $x^0(t) = x(t) - M(x)$; розраховують кореляційні та взаємкореляційні функції центрованих випадкових процесів $R_x(\tau)$, $R_y(\tau)$, $R_{xy}(\tau)$; якщо кореляційні функції при зсуві між ординатами $\tau \rightarrow \infty$ згасають до 0, то вибрана гіпотеза про ергодичність та стаціонарність випадкових процесів справедлива; при цьому слід пам'ятати, що ординати випадкового процесу вимірюються через інтервали часу (час дискретизації), які знаходять за теоремою Котельникова:

$$\Delta t = \pi / 10 \omega_g, \quad (5.31)$$

де ω_g – вища частота в спектрі частот, які подано в реалізації випадкового процесу;

- за кореляційними функціями обчислюють спектральні щільності [1], що дає змогу побудувати амплітудно-фазову характеристику об'єкта:

$$W(i\omega) = S_{xy}(\omega) / S_x(\omega), \quad (5.32)$$

де $S_{xy}(\omega)$ – взаємна спектральна щільність; $S_x(\omega)$ – спектральна щільність вхідного сигналу;

- амплітудно-фазова характеристика апроксимується передавальною функцією $W(p) = ke^{-p\tau} / (Tp + 1)$, де $k = OA$ (рис. 5.6):

$$\tau = \Delta\phi(\omega_i) / \omega_i, \quad (5.33)$$

$$T = \arctg \phi(\omega_i) / \omega_i. \quad (5.34)$$

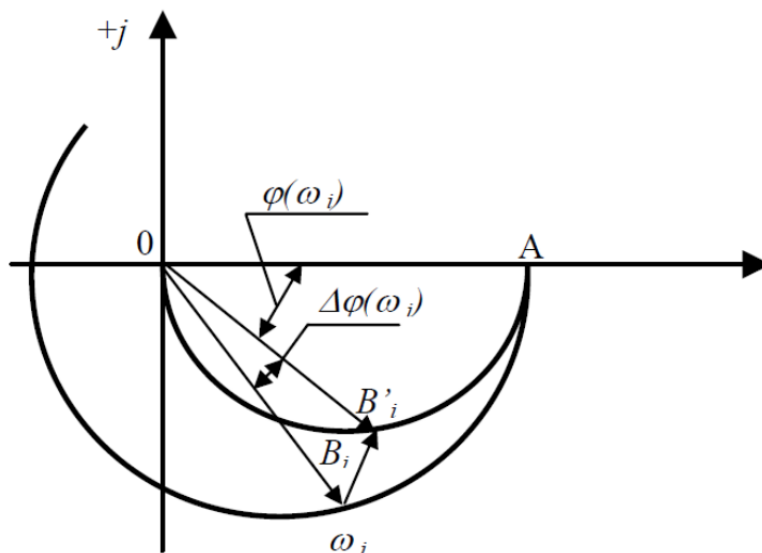


Рис. 5.6. Апроксимація амплітудно-фазочастотної характеристики об'єкта керування

Оскільки для побудови амплітудно-фазової характеристики об'єкта потрібно 5–6 значень, стала часу та час запізнення усереднюються:

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n}; \quad T = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}; \quad n = 5 - 6. \quad (5.35)$$

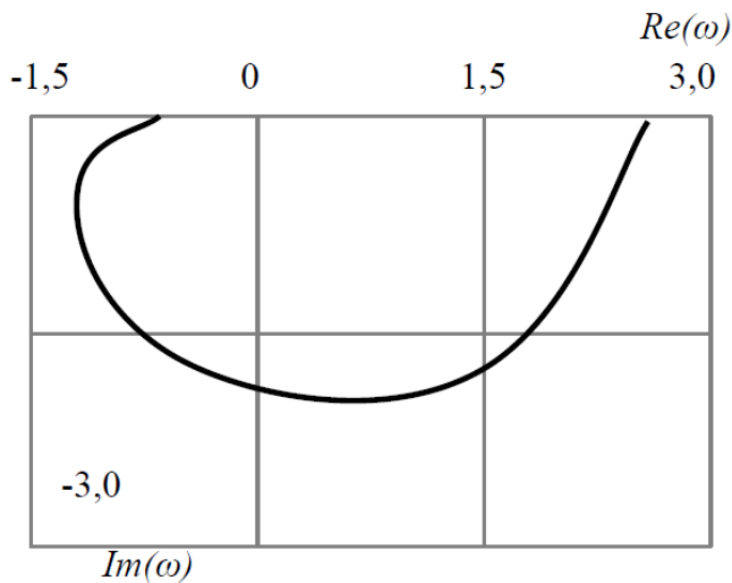
Приклад 5.3. Визначити передаточну функцію об'єкта, якщо його кореляційна та взаємно-кореляційна функції наведено на рис. 5.7,а.

Як відомо [1], амплітудно-фазова характеристика об'єкта може бути побудована за такими виразами:

$$W(i\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_x(\omega)} = K(\omega) + jM(\omega); \quad (5.36)$$

$$K(\omega) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}; \quad (5.37)$$

$$M(\omega) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}; \quad (5.38)$$



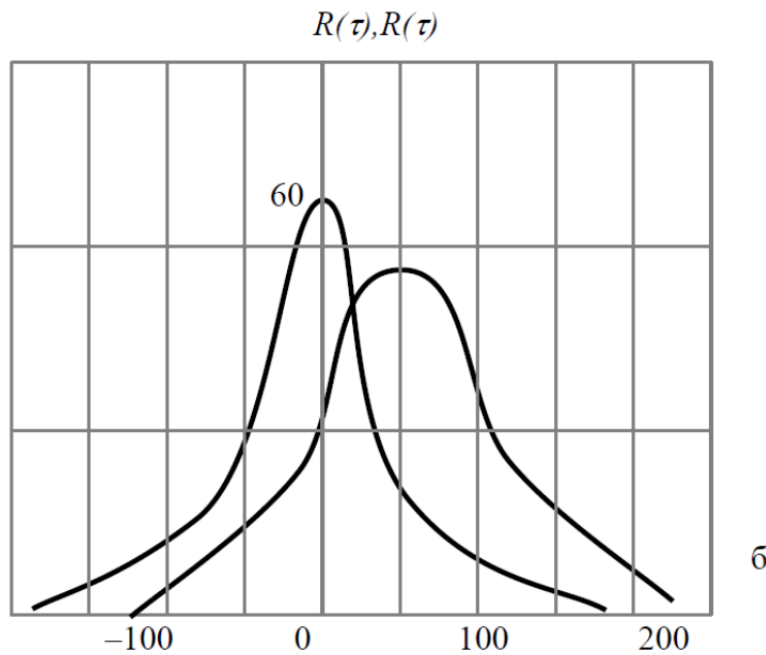


Рис. 5.7. Амплітудно-фазочастотна характеристика об'єкта керування (а) та кореляційні функції (б)

Для конкретного випадку вирази (5.37) та (5.38) матимуть вигляд:

$$K(\omega) = \frac{\int_0^{250} R_{xy}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau + \int_0^{150} R_{xy}(-\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}{2 \int_0^{250} R_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}, \quad (5.39)$$

$$M(\omega) = \frac{\int_0^{250} R_{xy}(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau + \int_0^{150} R_{xy}(-\tau) \sin(\omega\tau) d\tau}{2 \int_0^{250} R_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}. \quad (5.40)$$

Параметри кореляційних функцій знаходимо за методом найменших квадратів.

Результати розрахунків за виразами (5.39) та (5.40) вміщено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунків амплітудно-фазової характеристики

ω	0,005	0,006	0,007	0,008	0,01	0,012
$K(\omega)$	2,57	2,02	0,83	0,06	-0,7	-1,22
$M(\omega)$	-0,01	-1,03	-1,78	-1,7	-1,2	-0,09

За табл. 5.1 будуюмо амплітудно-фазову характеристику (рис. 5.7, б). Скориставшись виразами (5.33), (5.34) та усереднивши значення часу запізнення і сталої часу за виразом (5.35), остаточно матимемо:

$$W(p) = 2,57e^{-70,8p} / (128p + 1).$$

2. Методики синтезу та аналізу систем автоматичного керування

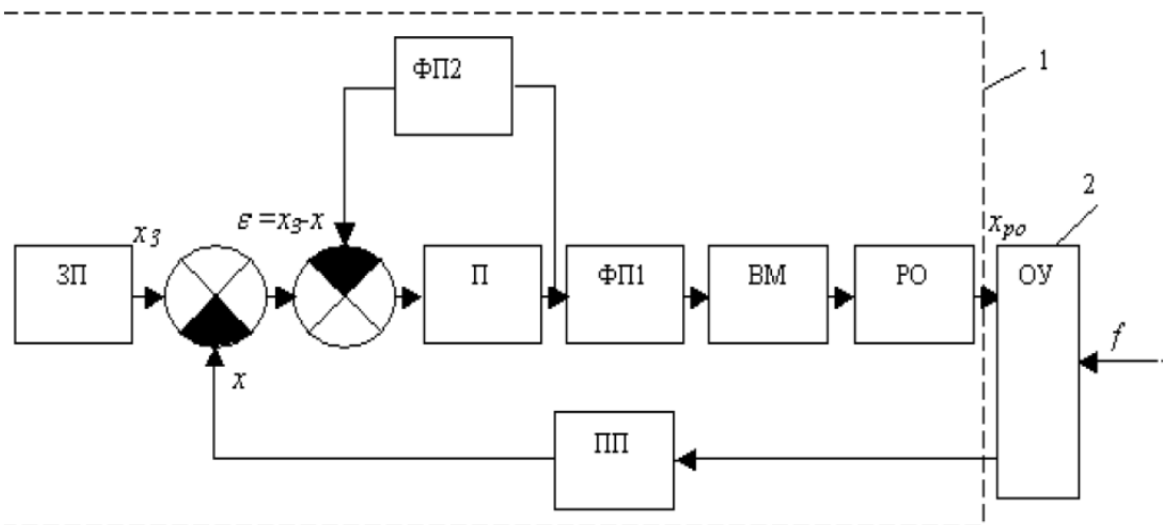
2.1. Методика уточнення лінійних алгоритмів керування

Динамічні властивості об'єктів керування дають змогу розробникам систем на стадії проектування визначити алгоритм керування. Для цього слід проаналізувати співвідношення між сталою часу та часом запізнення об'єкта керування. Якщо $0,2 \leq \tau/T \leq 1$, то рекомендують лінійний алгоритм керування; за умов, коли $\tau/T > 1$ – позиційний, а при $x/T > 1$ – імпульсний алгоритм керування.

Визначаючи алгоритм керування, слід пам'ятати, що структура передавальної функції має відповідати виразам (5.12) та (5.13).

Найчастіше динаміка об'єктів описується більш складною структурою (наприклад, за умов використання методу інтегральних площин). У цьому разі цю складну структуру за відомою методикою [2] перетворюють на вирази (5.12) та (5.13).

Відомі та використовуються на практиці такі алгоритми керування: пропорційний, інтегральний, пропорційно-інтегральний, пропорційно-диференціальний, пропорційно-інтегрально-диференціальний. Кожний із них реалізується відповідним комплексом технічних засобів – регулятором, який входить до складу системи автоматичного керування (рис. 5.8). Розглянемо коротко вказані алгоритми керування.



ЗП – задавальний пристрій; ПП – первинний перетворювач; П – підсилювач у прямому каналі регулювання; ФП1, ФП2 – формувальний пристрій (пристрій, що формує алгоритм керування); ВМ – виконавчий механізм; РО – регулювальний орган; ОУ – об'єкт керування (2); 1 – регулятор

Рис. 5.8. Функціональна схема системи автоматичного керування:

Пропорційний (П) алгоритм – це такий алгоритм, для якого справедливе співвідношення:

$$X_{p.o.} = k \cdot y, \quad (5.41)$$

де $X_{p.o.}$ – переміщення затвора регулювального органа; k – коефіцієнт передачі регулятора; y – відхилення параметра, що регулюється, від норми (виставляється на шкалі регулятора).

У динамічному відношенні комплекс технічних засобів, що реалізує П-алгоритм керування – це без-інерційна ланка з передавальною функцією $W_n(p) = k$.

Основна перевага П-алгоритма – це швидкодія, що дає змогу використовувати його для об'єктів, у яких незначне або відсутнє самовирівнювання та мають місце різні й часті збурення.

Головний недолік указанного алгоритму – це наявність статичної похибки, що знижує точність регулювання:

$$\Delta f = fs = f/(1 + k k_{o.k.}), \quad (5.42)$$

де Δf – статична похибка щодо збурення; s – коефіцієнт естатизму; $k_{o.k.}$ – коефіцієнт передачі об'єкта керування; f – збурення на об'єкт;

$$\Delta x = \Delta x_z(1 - s k k_{o.k.}), \quad (5.43)$$

де Δx – статична похибка щодо керування; Δx_z – зміна уставки на шкалі регулятора.

Інтегральний (І) алгоритм характеризується виразом:

$$dx_{p.o.}/dt = (1/T_I)y, \quad (5.44)$$

де T_I – стала часу регулятора.

У динамічному відношенні цей алгоритм описується інтегруючою ланкою з передавальною функцією $W(p) = 1/T_I p$.

Перевага І-алгоритму полягає у відсутності статичної похибки, а головним недоліком є його сповільнена дія. Тому рекомендується його використовувати в об'єктах зі значним самовирівнюванням, а також при нечастих змінах навантаження.

Пропорційно-інтегральний (ПІ) алгоритм може бути описаний таким рівнянням:

$$dx_{o.p.}/dt = k dy/dt + (k/T_i)y, \quad (5.45)$$

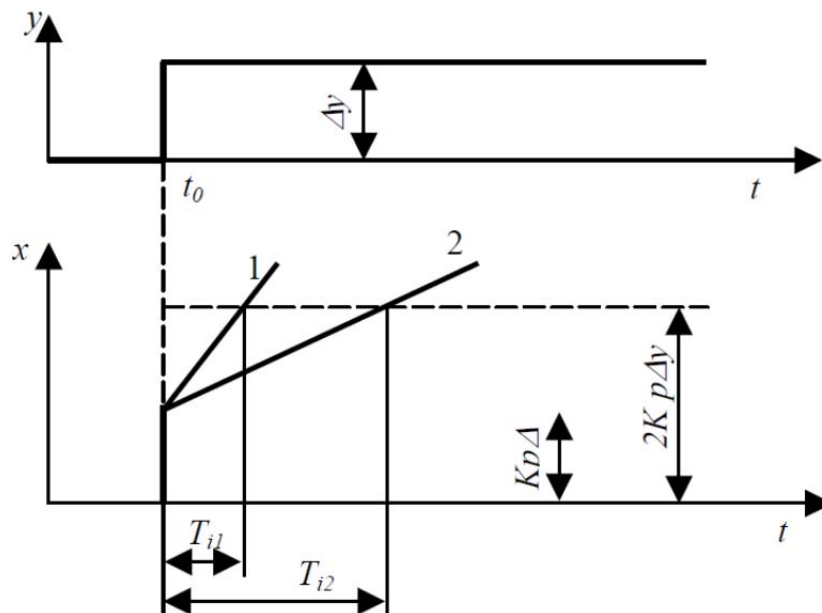
де T_i – час ізодрому.

Як видно, швидкість переміщення регульовального органа пропорційна відхиленню параметра, ще регулюється, а також швидкості, з якою здійснюється це відхилення.

Передавальна функція може бути здобута на підставі виразу (5.45):

$$W_{n.i.}(p) = k[1 + 1/T_i p]. \quad (5.46)$$

Час ізодрому (або час подвоювання) можна визначити за кривою розгону для комплексу технічних засобів, що реалізують ПІ-алгоритм керування (рис. 5.9) як час, протягом якого затвор регулятора під дією інтегральної складової подвоює своє попереднє переміщення, здобуте внаслідок дії пропорційної складової.



1 – характеризується часом ізодрому T_{i1} , 2 – характеризується часом ізодрому T_{i2}

Рис. 5.9. Крива розгону комплексу технічних засобів, що реалізують ПІ-алгоритм керування:

ПІ-алгоритми можуть використовуватись як для об'єктів із самовирівнюванням, так і без нього в тих випадках, коли потрібна велика точність регулювання при значних, проте плавних, змінах навантаження.

Пропорційно-диференціальний (ПД) алгоритм керування ще називають пропорційним із додатковою дією за похідною щодо відхилення параметра, що регулюється:

$$x_{p.o.} = k(y + T_n dy/dt), \quad (5.47)$$

де T_n – час передування, що характеризує вплив похідної на переміщення затвора регулювального органа.

У динамічному відношенні ПД-алгоритм реалізує пропорційно-диференціальна ланка із передаточною функцією:

$$W_{n.o.}(p) = k(1 + T_n p). \quad (5.48)$$

Її крива розгону наведена на рис. 5.10. Як видно, затвор регулятора стрибком переміщується, однак потім під дією пропорційної складової займає певне постійне положення, яке визначається величиною коефіцієнта передачі K .

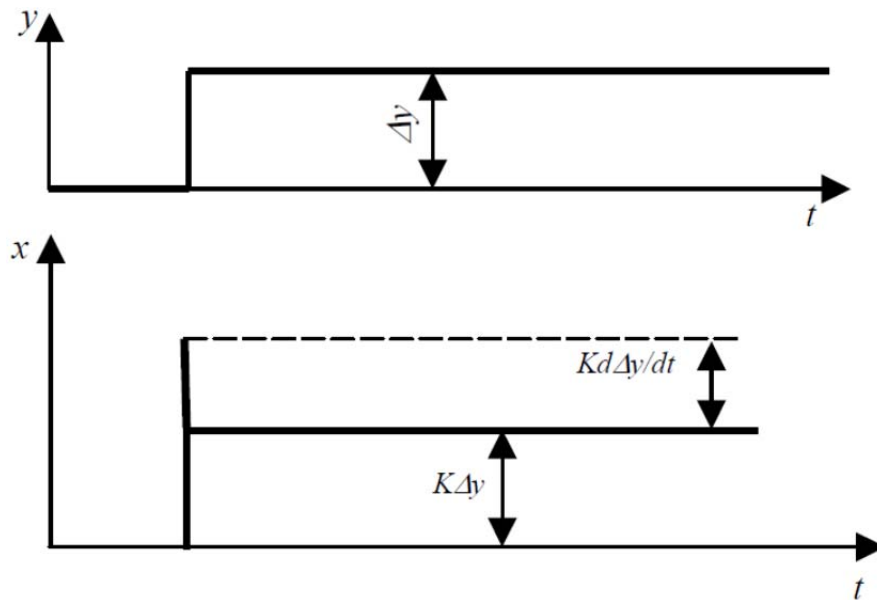


Рис. 5.10. Крива розгону для комплексу технічних засобів, що реалізують ПД-алгоритм керування

ПД-алгоритм може забезпечувати пряме і зворотне передування. Пряме передування рекомендується використовувати для об'єктів з великою сталою часу, зворотне – для об'єктів з незначною сталою часу.

Пропорційно-інтегрально-диференційні (ПІД) алгоритми керування рекомендується використовувати на об'єктах, що не допускають статичної нерівномірності, навантаження в яких змінюється часто й різко та які характеризуються значним запізненням.

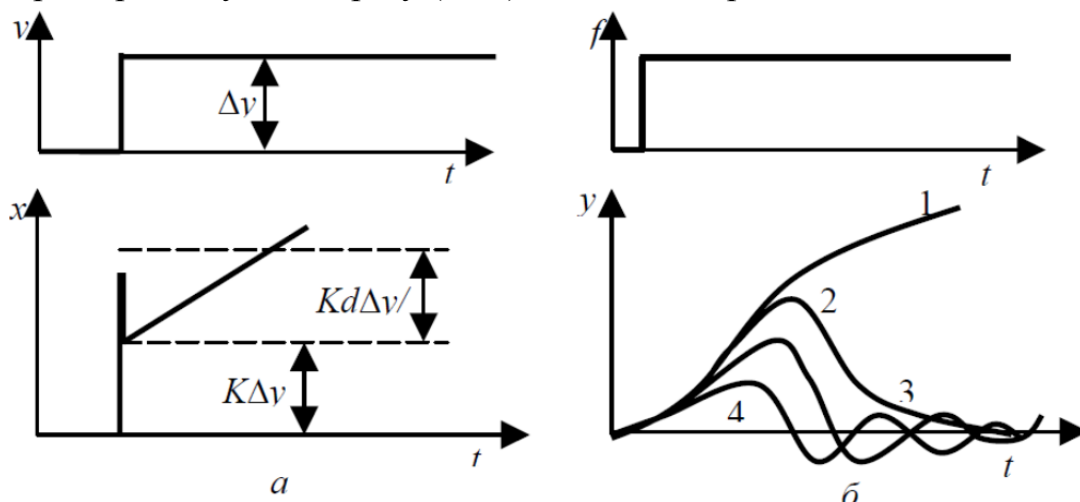
Формалізація ПІД-алгоритму здійснюється за рівнянням:

$$\frac{dx_{p.o.}}{dt} = k \left(\frac{1}{T_i} y + \frac{dy}{dt} \pm T_{\Pi} \frac{d^2 y}{dt^2} \right). \quad (5.49)$$

Знак “+” або “–” указує, що передування може бути прямим або зворотним. Використавши перетворення Лапласа, передавальну функцію для комплексу технічних засобів, що реалізує ПІД-алгоритм, можна подати у вигляді:

$$W_{\text{ПІД}}(p) = k(1 + (1/T_i)p \pm T_{\Pi}p). \quad (5.50)$$

Крива розгону для виразу (5.50) наведена на рис. 5.11, а.



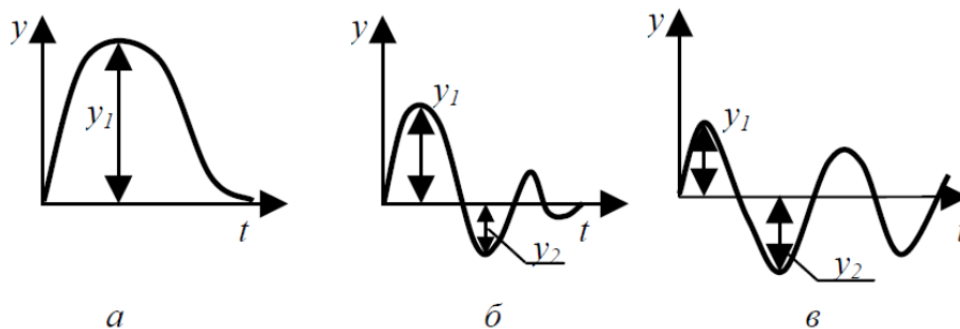
1 – крива розгону об'єкта керування; 2 – перехідний 3 – саме, але за умов реалізації ПІ-алгоритма; 4 – те саме, але за умов реалізації ПІД-алгоритма

Рис. 5.11. Крива розгону для комплексу технічних засобів, що реалізують ПІД-алгоритм керування (а) та результат дії на об'єкт різних алгоритмів керування (б):

Результат дії різних алгоритмів на перехідний процес (за умови використання одного й того самого об'єкта) зображено на рис. 5.11, б. Як видно, найменший час регулювання забезпечує ПІ-алгоритм, однак при цьому з'являється статична похибка. І-алгоритм хоча й повертає параметр, що регулюється, до заданого значення, проте час регулювання при цьому значний за суттєвих “викидів” параметра. Кращі результати дають ПІ- та ПІД-алгоритми.

Слід пам'ятати, що в практиці вибирають такий алгоритм, який забезпечив би один із трьох типових перехідних процесів: аперіодичний, із 20 % перерегулюванням, і з мінімальним інтегральним показником якості (рис. 5.12).

Аперіодичний процес характеризується максимальним динамічним відхиленням, мінімальним часом регулювання та відсутністю пере-регулювання. Із 20 % регулюванням – це середній за якістю перехідний процес, із мінімальним інтегральним показником якості (площа між кривою перехідного процесу та віссю часу мінімальна), який характеризується значним пере-регулюванням, найбільшим часом регулювання та мінімальним динамічним відхиленням. Конкретний типовий перехідний процес може бути вибраний на підставі вимог технологів до конкретного об'єкта керування (технологічного процесу).



а – аперіодичний; б – з 20 % пере-регулюванням; в – з мінімальним інтегральним показником якості

Рис. 5.12. Типові перехідні процеси в системах автоматичного керування:

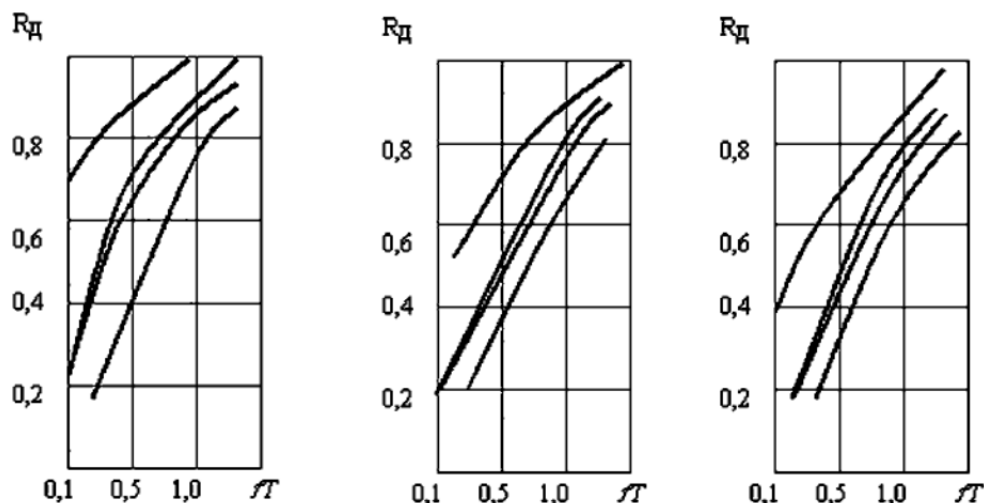
Динамічний коефіцієнт регулювання дає змогу вибрати найкращий алгоритм для конкретного об'єкта керування.

Методика вибору найкращого алгоритму керування полягає у визначенні динамічного коефіцієнта регулювання. Для статичних об'єктів:

$$R_D = y_1 / (K_0 u_{\max}), \quad (5.51)$$

де y_1 – максимальне динамічне відхилення; K_0 – коефіцієнт передачі об'єкта керування; u_{\max} – максимально можливе значення збурення за навантаженнями

(береться у відсотках переміщення регулювального органа). Далі за графічними залежностями (рис. 5.13) дістають алгоритм керування.



а – для типового аперіодичного перехідного процесу; б – для типового перехідного процесу з 20 % пере-регулюванням; в – для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості; 1 – П-алгоритм керування; 2 – І-алгоритм керування; 3 – ПІ-алгоритм керування; 4 – ПІД-алгоритм керування

Рис. 5.13. Залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування:

Для астатичних об'єктів:

$$R_d = y_1 / (\varepsilon_0 \tau y_{\max}), \quad (5.52)$$

де ε_0 – швидкість розгону об'єкта; τ – час запізнення.

Для астатичного об'єкта алгоритм керування знаходять за табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Динамічні коефіцієнти регулювання для астатичних об'єктів

Алгоритм керування	Динамічний коефіцієнт регулювання		
	аперіодичний	із 20% перерегулюванням	із мінімальним інтегральним критерієм
П	2,9	1,4	–
ПІ	1,4	1,3	0,9
ПІД	1,3	1,1	0,8

Щоб переконатись у правильності вибору алгоритму керування, слід обчислити час регулювання, який порівнюють з вимогами технологів:

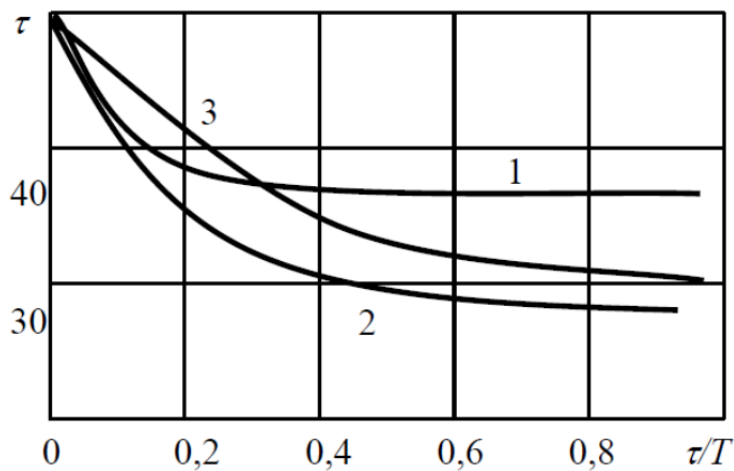
$$t = \psi \tau, \quad (5.53)$$

де ψ – відносний час регулювання, що вибирається з табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Відносний час регулювання

Алгоритм керування	Об'єкт	Відносний час регулювання		
		аперіодичний	із 20% перерегулюванням	із мінімальним інтегральним критерієм
Пропорційний	Статичний	4,5	6,5	9,0
	Астатичний	6,0	8,0	-
Пропорційно-інтегральний	Статичний	8,0	12,0	16,0
	Астатичний	14,0	16,0	18,0
Пропорційно-інтегрально-диференційний	Статичний	5,5	7,0	10,0
	Астатичний	9,0	12,0	13,0

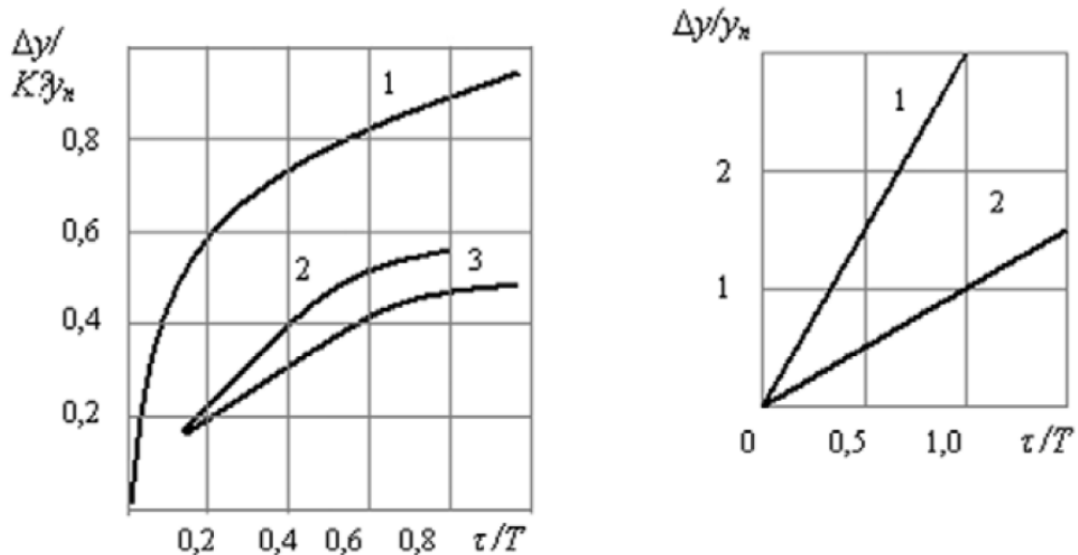
Для статичних об'єктів відносний час регулювання при інтегральному алгоритмі керування дістають за допомогою графічних залежностей, що наведені на рис. 5.14.



1 – для аперіодичного типового перехідного процесу, 2 – для типового перехідного процесу з 20 % пере-регулюванням; 3 – для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості

Рис. 5.14. Залежність відносного часу регулювання за умов використання І-алгоритм керування для статичних об'єктів керування:

Якщо виявиться, що П-алгоритм керування найкращий, то в цьому разі потрібно визначити статичну похибку та порівняти її з допустимою. Статична похибка може бути знайдена за графічними залежностями, що наведені на рис. 5.15.



1 – аперіодичний типовий перехідний процес; 2 – з 20 % пере-регулюванням; 3 – з мінімальним інтегральним показником якості

Рис. 5.15. Графічні залежності для визначення статичної похибки за умов використання П-алгоритму керування:

Приклад 5.4. Для теплового об'єкта з $W(p)=0,2e^{-80p}/(266p+1)$ задані такі показники якості: $y_1=5$ °C, статична похибка $\Delta y = 0,3$ °C, $t_p = 500$ с, пере-регулювання за збуренням $\sigma = 0,3$, $y_{\max} = 40$ %. Визначити найкращий алгоритм керування.

Враховуючи, що об'єкт статичний, то:

$$R_d = 5/(0,2 \cdot 40) = 0,625.$$

Вибираємо для даного об'єкта аперіодичний перехідний процес. За рис. 5.13, а знаходимо пропорційний алгоритм керування.

Перевіримо, чи забезпечуватиметься при цьому потрібний час регулювання: за табл. 5,4 беремо $\psi = 4,5$, тоді $t_{рп} = 4,5 \cdot 80 = 360$ с. Видно, що $360 < 500$. Перевіримо виникнення при цьому статичної похибки. За рис. 5,15, а визначаємо $\Delta = K_0 \cdot y_{\max} \cdot 0,57 = 0,2 \cdot 40 \cdot 0,57 = 4,56$ °C.

Оскільки $0,3 < 4,56$, то П-алгоритм керування не задовольняє вимог технологів. Для ПІ-алгоритму за матеріалами табл. 5.4. знаходимо $t_{рп} = 8 \cdot 80 = 640 > 500$. Отже, за часом регулювання цей алгоритм не підходить. Для ПІД-алгоритму $t_{рпід} = 5,5 \cdot 80 = 440 < 500$.

Видно, що цей алгоритм керування забезпечує час регулювання, який вимагається технологіями. Оскільки для нього статична похибка відсутня, то його й слід вибрати.

2.2. Основні інженерні методики розрахунку параметрів регуляторів на стадії проектування

Для лінійних систем автоматичного регулювання розрахунок параметрів настройки регуляторів, за якими їх вибирають на стадії проектування, ведуть

здебільшого за трьома інженерними методиками: на заданий запас стійкості; на задані частотний та кореневий показники коливності.

Розрахунок параметрів регуляторів на заданий запас стійкості системи.

Згідно з критерієм Найквіста:

$$W_{роз}(j\omega) = -1, \quad (5.54)$$

де $W_{роз}(j\omega)$ – амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи. На підставі рис. 5.8, можна записати, що:

$$W_{роз}(j\omega) = W_p(j\omega) W_o(j\omega), \quad (5.55)$$

де $W_p(j\omega)$ – амплітудно-фазова характеристика (АФХ) регулятора; $W_o(j\omega)$ – те саме для об'єкта керування.

Із формули (5.55) видно, що положення годографа АФХ розімкненої системи відносно характерної точки з координатами $(-1, j_0)$ визначатиметься параметрами регулятора. Зміна їх спричинить зміну запасу стійкості всієї системи. Ця обставина і використовується для розрахунку параметрів настройки регуляторів.

Розрахунок параметрів регуляторів на заданий частотний показник коливальності. Побудуємо АФХ розімкненої системи та забороненої зони, куди ця АФХ не повинна заходити. Розташування забороненої зони на комплексній площині пов'язано з частотним показником коливальності, який визначається як:

$$M = A(\omega_p)/A(0), \quad (5.56)$$

де M – частотний показник коливальності; $A(\omega_p)$ – значення амплітудно-частотної характеристики замкненої системи автоматичного регулювання при резонансній частоті ω_p ; $A(0)$ – те саме, але при частоті, що дорівнює 0; ω_p – резонансна частота (при ній амплітудно-частотна характеристика досягає свого максимуму).

Із теорії автоматичного керування відомо, що частотний показник коливальності визначає якість перехідного процесу [3]. Тому забезпечивши цей показник параметрами настройки відповідного регулятора, проектувальники систем керування забезпечують відповідну якість перехідного процесу.

Послідовність розрахунків за даною методикою така (рис. 5.16):

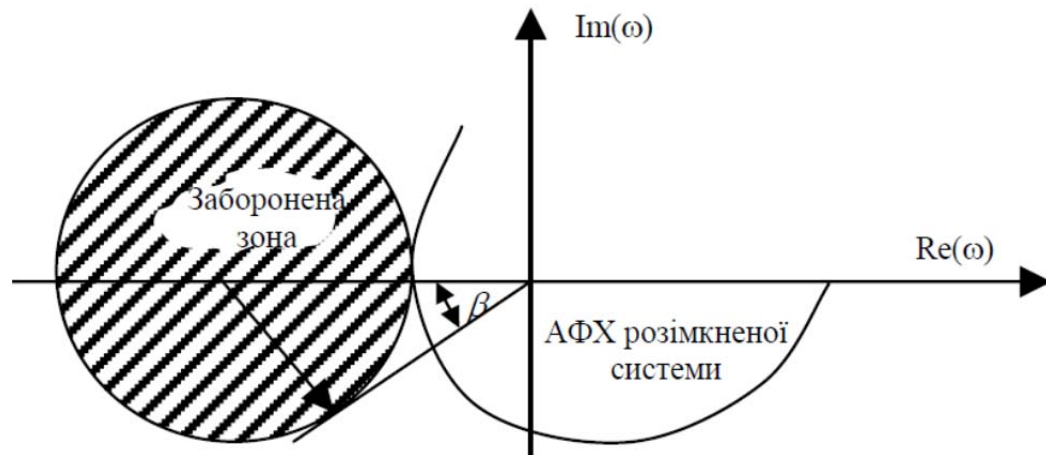


Рис. 5.16. До методики розрахунку параметрів регуляторів за умов обмеження системи керування на заданий частотний показник коливальності

- будують АФХ об'єкта (за його передаточною функцією);
- проводять промінь під кутом β до від'ємної дійсної півосі (величина β визначається як $\beta = \arcsin(1/M)$);
- вважаючи, що коефіцієнт передачі регулятора дорівнює 1, будують АФХ розімкнутої системи (якщо обчислюють параметри ПІ - або ПІД-регуляторів, то при цьому ще задаються часом ізодрому);
- проводять коло, центр якого має бути розташований на від'ємній дійсній півосі, і воно має дотикатися до АФХ розімкнутої системи та променя.

Радіус кола, яке є заборонною зоною для АФХ розімкнутої системи, однозначно пов'язаний із коефіцієнтом передачі відповідного регулятора:

$$K = M / (M^2 - 1) \cdot 1/r, \quad (5.57)$$

Детальніше ця методика розглядатиметься в п. 5.3.

Розрахунок параметрів регуляторів на заданий кореневий показник коливальності. Визначення параметрів регулятора ґрунтується на розширених АФХ та на критерії Найквіста. Кореневий показник коливальності:

$$m = \alpha / \beta, \quad (5.58)$$

де α , β – відповідно дійсна та уявна складові пари домінуючих коренів характеристичного рівняння замкненої системи (тих, що розташовані найближче до уявної осі).

Згідно з теорією автоматичного керування заданий кореневий показник коливальності визначає певну якість системи керування [3].

Розширену АФХ можна дістати за передавальною функцією, якщо $p \rightarrow (-m + j)\omega$. Із урахуванням сказаного критерій Найквіста для розширеної АФХ формалізуватиметься у вигляді:

$$W_{роз} [(-m + j)\omega] = W_p [(-m + j)\omega] \cdot W_o [(-m + j)\omega] = -1, \quad (5.59)$$

де $W_{роз} [(-m + j)\omega]$ – розширена АФХ розімкнутої системи; $W_p [(-m + j)\omega]$ регулятора; $W_o [(-m + j)\omega]$ – те саме для об'єкта керування.

Запишемо вираз (5.59) як:

$$W_p [(-m + j)\omega] = 1/W_o [(-m + j)\omega] = -Re_o^{(-1)}(m, \omega) - jIm_o^{(-1)}(m, \omega), \quad (5.60)$$

де $Re_o^{(-1)}(m, \omega)$ – дійсна обернена складова АФХ об'єкта керування; $Im_o^{(-1)}(m, \omega)$ – уявна обернена складова АФХ об'єкта керування.

Із рівняння (5.60) можна записати основну систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} Re_p(m, \omega) &= -Re_o^{(-1)}(m, \omega); \\ Im_p(m, \omega) &= Im_o^{(-1)}(m, \omega), \end{aligned} \right\} \quad (5.61)$$

де $Re_p(m, \omega)$, $Im_p(m, \omega)$ – відповідно дійсна та уявна складові розширеної АФХ регулятора.

Система (5.61) дає змогу обчислювати параметри регуляторів для заданого значення кореневого показника коливальності.

Використання цієї методики для конкретних регуляторів розглядатиметься в п.5.3.

Для позиційних систем автоматичного регулювання, що набули поширення в сільськогосподарському виробництві, застосовується *метод аналізу* (для лінійних – *метод синтезу*), оскільки позиційні системи нелінійні і їхні моделі можна подати у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь. Прямих методів (аналітичних) розв’язання нелінійних диференціальних рівнянь не існує. Тому застосовують частинні методи: прямий метод Ляпунова; метод гармонічної лінеаризації; метод припасувань та ін. Проте всі вони дають змогу на підставі параметрів позиційної системи автоматичного керування провести аналіз її функціонування.

Оскільки значна частина сільськогосподарських об’єктів керування низькочастотні (тобто такі, що пропускають лише першу гармоніку) заслуговує на увагу *метод гармонічної лінеаризації*. Його суть полягає в заміні деякого нелінійного елемента лінійним. Властивості цього елемента характеризуватимуться коефіцієнтами гармонічної лінеаризації.

Усяку позиційну систему умовно можна поділити на дві частини: лінійну та нелінійну (рис. 5.17, а). Лінійна система – це здебільшого об’єкт керування, як було зазначено вище, що має пропускати лише першу гармоніку, а тому:

$$y = A \sin(\omega t), \quad (5.62)$$

де A – амплітуда першої гармоніки; ω – її частота.

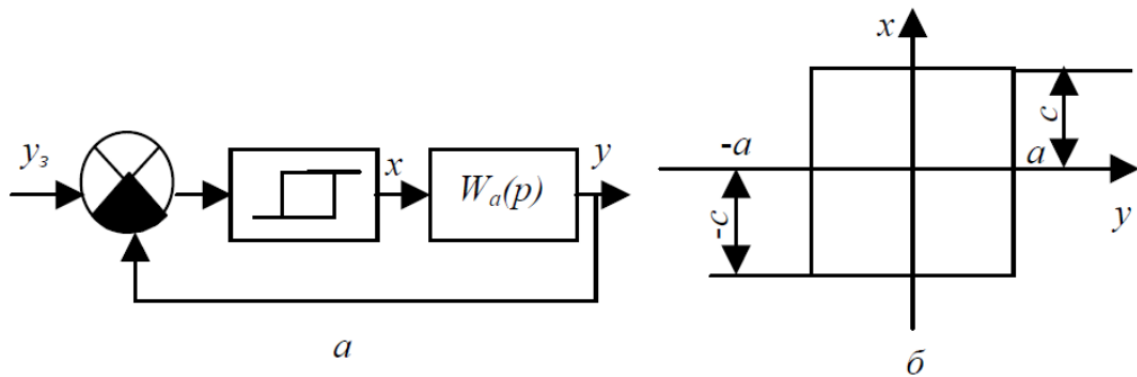


Рис. 5.17. Структурно-алгоритмічна схема узагальненої позиційної системи керування (а) та варіант статичної характеристики узагальненого нелінійного елемента (б)

Для нелінійної частини вихідний сигнал розкладемо на ряд Фур’є, беручи до уваги лише перші гармоніки:

$$x = F(y) \approx a_1 \cdot \sin(\omega t) + b_1 \cdot \cos(\omega t), \quad (5.63)$$

де a_1, b_1 – коефіцієнти ряду Фур’є. З формули (5.62) знаходимо:

$$\sin(\omega t) = (1/A) \pm y; \cos(\omega t) = [(1/A) \cdot \omega] (dy/dt), \quad (5.64)$$

підставляючи вирази (5.64) у (5.63), маємо:

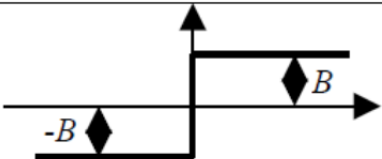
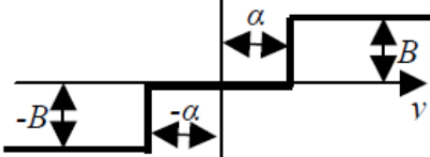
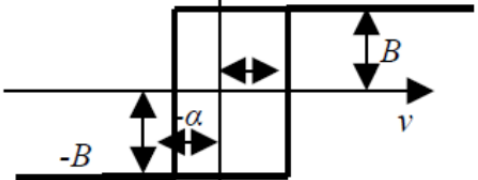
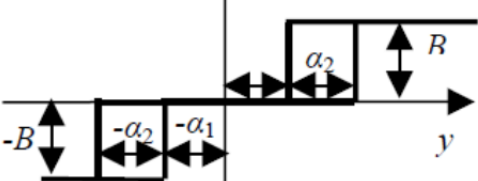
$$x = F(y) \approx \frac{a_1}{A} y + \frac{b_1}{A} \frac{1}{\omega} \frac{dy}{dt} = q_1 y + q_2 \frac{1}{\omega} \frac{dy}{dt}, \quad (5.65)$$

де q_1, q_2 – коефіцієнти гармонічної лінеаризації.

Отже, нелінійна частина позиційної системи замінена на лінійну і є змога скористатись методами аналізу для лінійних систем автоматичного керування.

Коефіцієнти гармонічної лінеаризації для деяких типових нелінійних ланок наведено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Коефіцієнти гармонічної лінеаризації деяких типових нелінійних ланок

Типова ланка	Статична характеристика	Коефіцієнти гармонічної лінеаризації	
		q_1	q_2
1. Ідеальна релейна		$\frac{4B}{\pi A}$	0
2. Релейна із зоною нечутливості		$\frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}$	0
3. Релейна із гістерезисом		$\frac{4B}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a^2}{A^2}}$	$-\frac{4Ba}{\pi A^2}$
4. Релейна із зоною нечутливості та гістерезисом		$\frac{2B}{\pi A} \sqrt{1 - \frac{a_2^2}{A^2}} + \sqrt{1 - \frac{a_1^2}{A^2}}$	$\frac{2B}{\pi A} (a_2 - a_1)$

Примітка. Величина a – зона нечутливості (гістерезис) – параметр настройки регулятора; A – амплітуда автоколивань.

Імпульсні системи автоматичного керування складаються з імпульсного пристрою та безперервної частини системи керування. Як відомо [4,5], створення дискретних сигналів імпульсними пристроями здійснюється на ґрунті амплітудно-імпульсної, широтно- та частотно-імпульсної модуляцій. У цьому разі

здійснюється квантування за часом. Якщо при цьому виконувати квантування за рівнем, то це вже буде характерна риса цифрової системи (квантування за рівнем здійснюється спеціальними пристроями – аналого-цифровими перетворювачами).

Замкнені імпульсні та цифрові системи автоматичного керування можуть бути зведені до структур на рис. 5.18, а, б. У свою чергу, кожний імпульсний елемент можна подати у вигляді послідовного з'єднання найпростішого імпульсного елемента та формуючого ланцюга (рис. 5.18, в).

Найчастіше використовують формуючі ланцюги у вигляді фіксаторів нульового та першого порядків, їхні динамічні властивості описуються передавальними функціями:

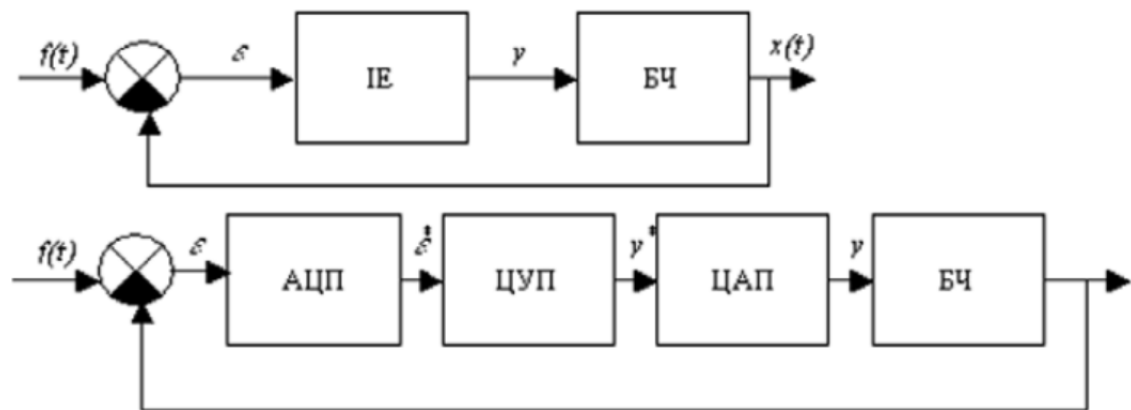
- фіксатор нульового порядку:

$$W_{\phi 0}(p) = \frac{K_i(1 - e^{-Tp})^2}{p}, \quad (5.66)$$

де K_i – коефіцієнт передачі; T – період квантування;

- фіксатор першого порядку:

$$W_{\phi 1}(p) = \frac{K_i(1 - e^{-Tp})^2}{p^2}. \quad (5.67)$$



ІЕ – імпульсний елемент; БЧ – безперервна частина системи (об'єкт керування); АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦУП – цифровий керуючий пристрій; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

Рис. 5.18. Структура імпульсної (а) та цифрової (б) систем автоматичного керування:

Фіксатор нульового порядку перетворює входні імпульси на послідовність прямокутних імпульсів із тривалістю T . Часові процеси при цьому матимуть вигляд як на рис. 5.19.

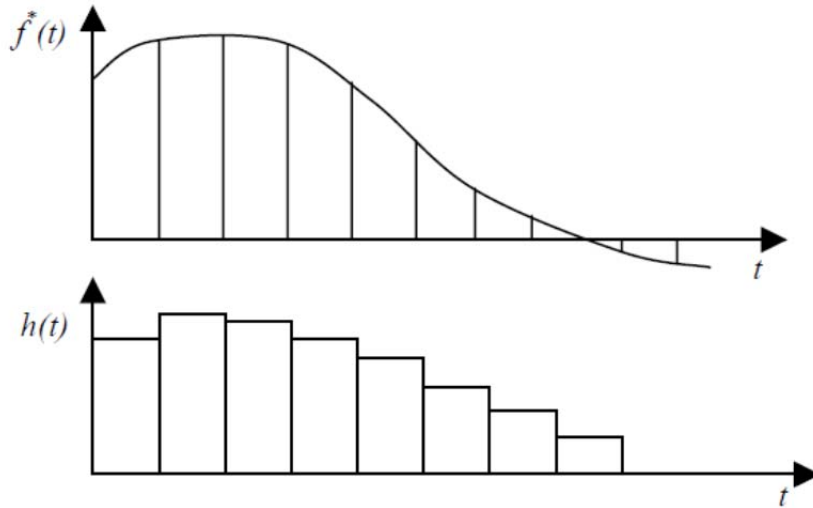


Рис. 5.19. Часові процеси у фіксаторі нульового порядку

Цифрові системи досліджують за ґратчастими функціями, значення яких визначають у дискретні моменти часу:

$$t = nT, \quad (5.68)$$

де n – ціле додатне число.

Заміна безперервної функції на ґратчасту здійснюється у вигляді:

$$f(t) = f[nT] = f(n). \quad (5.69)$$

Аналогом першої похідної безперервної функції для ґратчастої є:

- пряма послідовність:

$$\Delta f(n) = f[n+1] - f[n] \quad (5.70)$$

- обернена послідовність:

$$\Delta f(n) = f[n] - f[n-1]. \quad (5.71)$$

Аналогом другої похідної безперервної функції для ґратчастої є:

- пряма послідовність:

$$\Delta^2 f[n] = \Delta f[n+1] - \Delta f[n] = f[n+2] - 2f[n+1] + f[n]; \quad (5.72)$$

- обернена послідовність:

$$\Delta^2 f[n] = \Delta f[n] - \Delta f[n-1] = f[n] - 2f[n-1] + f[n-2]. \quad (5.73)$$

Як аналоги диференційних рівнянь можна розглядати різницеві рівняння (рівняння в кінцевих різницях). За умов використання обернених послідовностей лінійні неоднорідні різницеві рівняння мають вигляд:

$$b_0 \Delta^m y[n] + b_1 \Delta^{m-1} y[n] + \dots + b_m y[n] = f[n], \quad (5.74)$$

де $f[n]$ – задана ґратчаста функція; $y[n]$ – ґратчаста функція, яку потрібно знайти.

Якщо від формул (5.70) та (5.74) перейти до дискретних, то можна дістати різницеве рівняння в іншому вигляді:

$$a_0 y[n] + a_1 y[n-1] + \dots + a_m y[n-m] = f[n]. \quad (5.75)$$

Різницеве рівняння (5.75) можна розглядати як рекурентне співвідношення, що дає змогу визначити значення $y[n]$ для $n=0, 1, 2, \dots$ за умов, що значення функції в правій частині рівняння (5.75) та початкові умови $y[n-1], \dots, y[n-m]$ відомі.

Приклад 5.5. Маємо диференційне рівняння, що описує динамічні властивості об'єкта керування: $T_0(dy/dt) + y = k_0x$. Записати різницевий його аналог розв'язання та рішення для умов:

$T_0 = 1\text{с}$, $k_0 = 1$; $y[n-1] = 0$, $x[n] = 1$. З виразу (5.71) маємо:

$$T_0\Delta y[n] + y[n] = k_0x[n];$$

$$T_0(y[n] - y[n-1])/T + y[n] = k_0x[n]; \quad (5.76)$$

$$y[n] = (k_0x[n])\Delta[+ T_0y[n-1])/(T_0 + T).$$

Якщо час квантування $T = 1\text{с}$, то розв'язання можна записати для зазначених умов в табл. 5.5 (графічне зображення представлено на рис. 5.20).

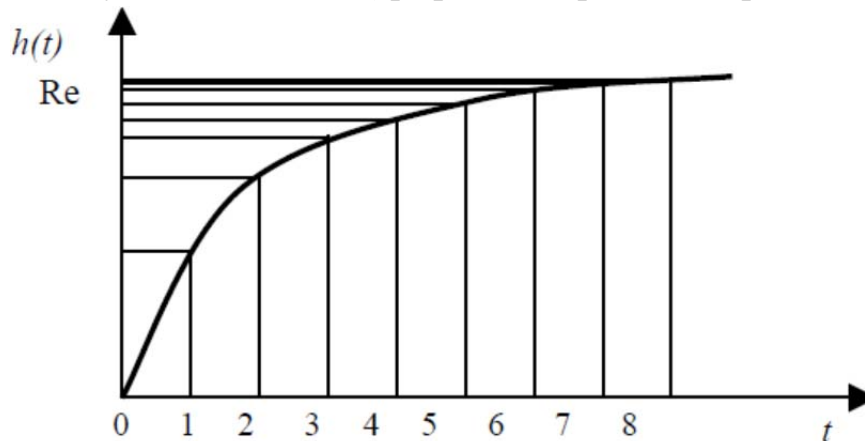


Рис. 5.20. Графічне зображення до прикладу 5.5

Таблиця 5.5 – Розв'язання до прикладу 5.5

n	0	1	2	3	4
$y[n]$	0,5	0,75	0,85	0,938	0,969

Графічне зображення до прикладу 5.5 наведено на рис. 5.20.

Для розрахунку цифрових систем використовують також дискретне перетворення Лапласа. Так, для незміщеної ґратчастої функції:

$$F^*(p) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n]e^{-pnT}. \quad (5.77)$$

Для дослідження цифрових систем широко застосовують також Z -перетворення, згідно з яким:

$$F^*(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n]Z^{-n}, \quad (5.78)$$

де $Z = e^{pT}$.

Отже, Z -перетворення практично збігається з дискретним перетворенням Лапласа і відрізняється лише аргументом зображення.

Основні правила та теореми Z -перетворення наведені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Основні правила та теореми Z -перетворення

Правила перетворення	Формалізація
1	2
1 .Властивість лінійності	$Z = \left\{ \sum_{\gamma=1}^N C_{\gamma} f_{\gamma}[n] \right\} = \sum_{\gamma=1}^N C_{\gamma} F_{\gamma}[z]$
2. Теорема: запізнення	$Z = \{f[n-m]\} = \sum_{r=-m}^{\infty} f[r]Z^{-(m+r)} =$ $= Z^{-m} \left[\sum_{r=0}^{\infty} f[r]Z^{-r} + \sum_{r=-m}^{\infty} f[r]Z^{-r} \right] =$ $= Z^{-m} \left[F(Z) + \sum_{r=1}^m f[r]Z^r \right]$ $r = n - m$
випередження	$Z\{f[n+m]\} = Z^m \left[F(Z) - \sum_{k=0}^{m-1} f[k]Z^{-k} \right]$
3. Зображення різниць	$Z\{\Delta f[n]\} = Z\{f[n-1]\} = (Z-1)/ZF(Z) + Z^{-1}f[-1];$ $Z\{\Delta^k[n]\} = (Z-1)^k F(Z)$
4.Зображення сум	$Z\{\sigma[n]\} = F(Z)/(Z-1);$ $Z\{\sigma^k[n]\} = F(Z)/(Z-1)^k$
5. Розкладання на ряд Лорана	$F(Z) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n]Z^{-1} = f[0] + f[1]Z^{-1} + f[2]Z^{-2} + \dots$

3. Розрахунки і вибір технічних засобів автоматизації

Комплекс технічних засобів системи автоматичного керування складається із регулятора, що реалізує один із відомих алгоритмів керування, та допоміжних приладів, з допомогою яких здійснюється вимірювання, контроль, реєстрація параметрів, що регулюються.

Вибираючи комплекс технічних засобів, потрібно враховувати параметри навколишнього середовища (температура, тиск, склад середовища, вологість, наявність вібрації, запиленість тощо), розміри та характер об'єкта керування. Крім того, мають бути витримані вимоги до засобів автоматизації за точністю, чутливістю, інертністю, а також за умовами безпеки праці. Бажано застосовувати уніфіковану апаратуру, що полегшує обслуговування системи та дає можливість скоротити кількість запасних приладів і засобів автоматизації.

Комплекс технічних засобів (перш за все контрольно-вимірювальних приладів) потрібно вибирати за такими *метрологічними показниками*:

- для контролю та регулювання виробничих процесів з високою точністю слід застосовувати прилади з класом точності 0,1 зі стандартною шириною поля запису 250 мм;

- для вимірювання, реєстрації та регулювання технологічних процесів, що допускають застосування приладів середньої точності вимірювання та запису, необхідно використовувати прилади з класом точності 0,5 (похибка $\pm 0,5\%$) зі стандартною шириною поля запису 160 мм;

- для мнемосхем, пультів, а також контролю та сигналізації в системах автоматичного регулювання, що не потребує високої точності, рекомендуються прилади з класом точності 1 (похибка $\pm 1\%$) зі стандартною шириною поля запису 100 мм;

- шкали показуючих і самописних приладів вибирають, щоб характерні значення вимірюваних величин уклались у другу половину або останню третину шкали; в деяких випадках слід використовувати кілька приладів із різними шкалами для контролю однієї й тієї самої величини при різних режимах роботи (наприклад, температура теплоносія в сушарках при різних режимах сушки продуктів).

Вибираючи контрольні-вимірювальні прилади необхідно враховувати їх інерційність, яка має бути значно менша, ніж інерційність об'єкта керування. Якщо динамічні властивості об'єкта характеризуються передавальною функцією:

$$W_0(p) = \frac{K_0 e^{-\tau_0 p}}{T_0 p + 1}; \quad (5.79)$$

а динамічні властивості вимірювальної системи:

$$W_{\varepsilon}(p) = \frac{K_{\varepsilon} e^{-\tau_{\varepsilon} p}}{T_{\varepsilon} p + 1}; \quad (5.80)$$

то при виборі метода та засобів вимірювання контрольованої та регульованої величини потрібно виходити із умов, що:

$$\tau_{\varepsilon} \leq (0,2 \dots 0,3) \tau_0; \quad T_{\varepsilon} \leq (0,2 \dots 0,3) T_0. \quad (5.81)$$

Передавальні функції вторинних приладів (електронних мостів, потенціометрів, засобів для вимірювання тиску, витрати та ін.) можна подати у вигляді інерційної ланки першого порядку без запізнювання:

$$W_{\varepsilon}(p) = k_{\varepsilon.m.} / (T_{\varepsilon.m.} p + 1), \quad (5.82)$$

де $T_{\varepsilon.m.} \approx 0,1 t_{\text{в.с.}}$, $t_{\text{в.с.}}$ – час проходження показником 100 % шкали при повному навантаженні.

Для визначення числового значення параметра використовують показуючі прилади, які поділяють на прилади з рухомою стрілкою, рухомою шкалою та цифрові. Вид відлікового пристрою вибирають за функціональним призначенням всього приладу (табл. 5.7).

Таблиця 5.7 – Рекомендації щодо вибору показуючих пристроїв

Призначення приладу	Вид відлікового пристрою		
	з рухомою стрілкою	рухомою шкалою	цифрові
1. Відлік числового значення параметра	Допустимо	Допустимо	Рекомендується
2. Контроль надходження параметра до зони "норма"	Рекомендується	Не рекомендується	Не рекомендується
3. Установка та дотримання заданого параметра (стабілізувальні автоматичні системи)	Те саме	Допустимо	Допустимо
4. Слідування	Те саме	Те саме	Не рекомендується

При виборі комплексу технічних засобів перевагу слід віддавати тим, що входять до Державної системи приладів та засобів автоматизації (ДСП). ДСП за видом енергії, що використовується, складається з *електричної, пневматичної та гідравлічної* гілок.

Електрична гілка поділяється на *аналогову та дискретну*.

Електрична аналогова гілка має елементи з уніфікованими вихідними сигналами: 0–5 і 0–20 мА постійного струму; 0–10 і 0–100 мВ, 0–1 і 0–10 В постійного струму; 0–0,25, 0–0,5, 0–1 і 0–2 В змінного струму частотою 50 і 400 Гц та ін.

У системах із елементами ДСП можливе застосування пристроїв із нестандартним виходом, проте в цьому разі система має комплектуватись додатковими пристроями-перетворювачами (нормувальні перетворювачі), що перетворюють нестандартний сигнал на уніфікований. Вони зв'язуються датчиками із вторинними пристроями (регуляторами, сигналізаторами, обчислювальною технікою).

Електрична дискретна вітка ДСП складається із релейних, імпульсних і цифрових датчиків (із релейним і цифровим виходом), аналого-цифрових перетворювачів, цифрових регуляторів, цифрової обчислювальної техніки, дискретних та кодових виконавчих механізмів. Ця вітка ще недостатньо розвинута.

Пневматична вітка ДСП базується на використанні пневматичних приладів і пристроїв, для яких джерелом енергії є стиснуте повітря, а носієм інформації – пневмосигнал. До таких пристроїв і приладів належать датчики, вимірювальні перетворювачі, виконавчі механізми з вихідним пневмосигналом. Уніфікований пневмосигнал змінюється в діапазоні 0,02–0,1 МПа. Перевага пневматичних пристроїв полягає в простоті схем та апаратури, надійності їх в роботі, вибухо- та пожежобезпечності.

Гідравлічна вітка ДСП побудована на використанні води як робочої рідини. До її складу входять датчики тиску та розрідження, перепаду тиску, гідравлічні регулятори та гідравлічні виконавчі механізми. Ця вітка також недостатньо розвинута.

3.1. Вибір комплексу технічних засобів лінійних систем автоматичного регулювання

Кожна система автоматичного регулювання (див. рис. 5.8) складається із регулятора та об'єкта керування. До складу регулятора входять: підсилювач; ланка місцевого зворотного зв'язку (формульний пристрій); виконавчий механізм; регулювальний орган; первинний перетворювач. Враховуючи, що властивості об'єктів керування надзвичайно різноманітні, регулятори, що випускаються нашою промисловістю, здебільшого не комплектуються виконавчими механізмами, регулювальними органами та датчиками. Їх на стадії проектування системи автоматики потрібно вибирати окремо. Тому вживають такий термін, як “промисловий регулятор” – це сукупність пристроїв в одному корпусі, які формують певний алгоритм керування. До того ж під час формування алгоритму керування головну роль відіграє місцевий зворотний зв'язок. Це можна показати у вигляді (рис. 5.21):

$$W_p(p) = W_n(p) / (1 + W_m(p)W_n(p)) = K_n / [1 + W_m(p)K_n], \quad (5.83)$$

де $W_p(p)$ – передаточна функція промислового регулятора; $W_n(p) = K_n$ – передавальна функція підсилювача в прямій вітці; $W_m(p)$ – передаточна функція ланки місцевого зворотного зв'язку.

Поділивши чисельник і знаменник (5.83) на K_n , матимемо:

$$W_p(p) = 1 / [1/K_n + W_m(p)] \approx 1/W_m(p). \quad (5.84)$$

Вираз (5.84) справедливий, якщо $K_n \gg 1$.

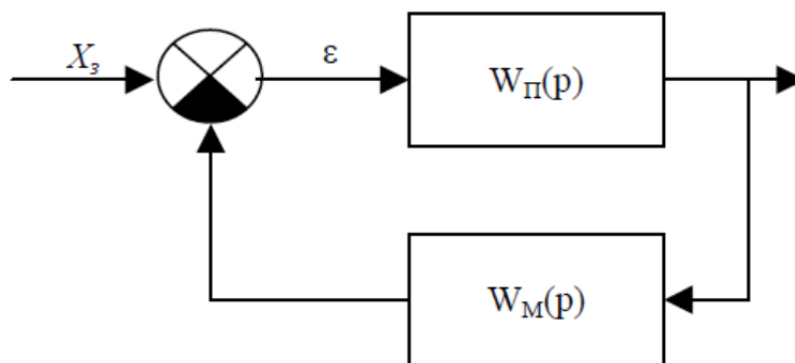
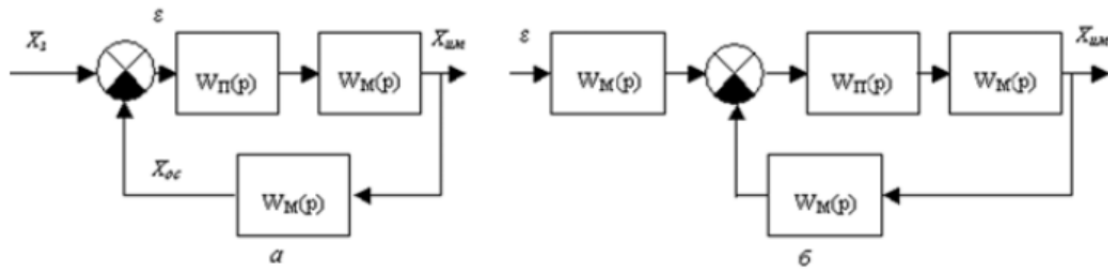


Рис. 5.21. Структурно-алгоритмічна схема узагальненого промислового регулятора

Отже, динамічні властивості промислового регулятора визначаються динамічними властивостями ланки місцевого зворотного зв'язку.

Вибір промислових регуляторів. Пропорційний (П) промисловий регулятор має лише одну структурну схему його реалізації (рис. 5.22).



а – без додаткового підсилювача; б – з додатковим підсилювачем

Рис.5.22. Структурно-алгоритмічна схема П-регулятора:

Як видно, підсилювач та виконавчий механізм охоплені жорстким зворотнім зв'язком, який вводиться за положенням виконавчого механізму (рідше – регульовального органа). В електричних П-регуляторах виконавчий механізм – це, здебільшого, одно-обертовий електродвигун із редуктором типу МЭО. Його динамічні властивості описуються передаточною функцією:

$$W_{\text{в.м.}}(p) = 1/(T_{\text{в.м.}}p), \quad (5.85)$$

де $T_{\text{в.м.}}$ – стала часу виконавчого механізму.

Промисловий П-регулятор реалізує пропорційний алгоритм з деякою похибкою. Це можна показати (рис. 5.22, а) у вигляді:

$$\begin{aligned} W_n(p) &= \frac{K_n W_{\text{в.м.}}(p)}{1 + K_n W_M(p)_3} = \frac{K_n \frac{1}{T_{\text{в.м.}}p}}{1 + \frac{K_n K_3}{T_{\text{в.м.}}p}} = \frac{K_n}{T_{\text{в.м.}}p + K_n K_3} = \\ &= \frac{1}{K_3} \cdot \frac{1}{\frac{T_{\text{в.м.}}}{K_n K_3} p + 1} = K_p \frac{1}{T_\delta p + 1} = K_p W_\delta(p), \end{aligned} \quad (5.86)$$

де K_3 – коефіцієнт передачі ланки зворотного зв'язку; $T = \frac{T_{\text{в.м.}}}{K_3 K_n}$ – стала часу баластної ланки, що спотворює ідеальний пропорційний алгоритм керування; K_p – коефіцієнт передачі пропорційного регулятора; $W_\delta(p) = 1/(T_\delta p + 1)$ – передавальна функція баластної ланки.

Аналіз виразу (5.86) дає змогу встановити, що чим більший коефіцієнт передачі підсилювача в прямому каналі, тим точніше реалізується пропорційний алгоритм керування. Похибка буде також зменшуватись і за рахунок збільшення K_3 . Проте це призводить до зменшення коефіцієнта передачі регулятора, що не бажано. Для зменшення такого недоліку в промисловому П-регуляторі часто передбачають додатковий підсилювальний пристрій величини непогодження, який не охоплюється місцевим зворотним зв'язком. У цьому разі коефіцієнт передачі регулятора:

$$K_p = K_\varepsilon / K_3, \quad (5.87)$$

де K_ε – коефіцієнт передачі додаткового підсилювального пристрою.

За такої структури промислового П-регулятора (рис. 5.22, б) коефіцієнт передачі встановлюється так: змінюючи K_z , забезпечують потрібну точність реалізації П-алгоритму керування; змінюючи K_e , забезпечують потрібне значення K_p .

За термінологією заводів-виготовлювачів параметром настройки П-регуляторів є межа пропорційності або діапазон дроселювання – це величина, обернена до коефіцієнта передачі регулятора, %:

$$\sigma = (1/K_p) \cdot 100, \quad (5.88)$$

де σ – межа пропорційності (діапазон дроселювання).

На стадії проектування відповідний тип П-регулятора вибирають на підставі розрахованого параметра його настройки – коефіцієнта передачі K_p . При цьому застосовують одну з трьох методик (див. п. 5.2.2).

На заданий запас стійкості за амплітудою розраховують коефіцієнт передачі П-регулятора, маючи передаточну функцію об'єкта керування, за якою будують його АФХ (рис. 5.23).

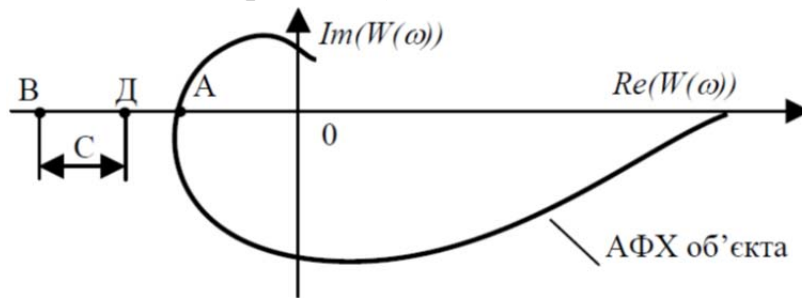


Рис. 5.23. Розрахунок коефіцієнта передачі П-регулятора на заданий запас стійкості системи за амплітудою

Згідно з цим рисунком можна стверджувати, що для забезпечення потрібного запасу стійкості C годограф АФХ розімкненої системи має пройти через точку D . Тому можемо записати:

$$W_{роз}(j\omega) = \overline{OD} = W_n(j\omega)W_o(j\omega) = K_p \overline{OA_\pi} \quad (5.89)$$

$$K_p = \frac{\overline{OD}}{\overline{OA_\pi}} = \frac{OB - C}{OA_\pi} = \frac{1 - C}{OA_\pi}.$$

Векторна рівність перетворюється на скалярну тому, що згідно з рис. 5.23 маємо лише одну частоту ω_π (частоту, за якої точка годографа міститься на від'ємній дійсній півосі). На практиці часто беруть запас стійкості за амплітудою $C = 0,56$, тому:

$$K_p = (1 - 0,56) / OA_\pi = 0,44 / OA_\pi \quad (5.90)$$

Приклад 5.6. Розрахувати коефіцієнт передачі П-регулятора, який має забезпечити запас стійкості системи за амплітудою $C = 0,5$ за умови, що $W_o(j\omega_\pi) = 0,5$:

$$K_p = (1 - C) / W_o(j\omega_\pi) = 1 - 0,5 / 0,5 = 1.$$

На заданий частотний показник коливальності M проводять розрахунок коефіцієнта передачі П-регулятора, маючи передаточну функцію об'єкта, за якою можна побудувати його АФХ. Послідовність розрахунків при цьому така:

- беруть коефіцієнт передачі регулятора $K_p=1$ (при цьому АФХ розімкненої системи автоматичного регулювання збігається з АФХ об'єкта керування);
- проводять промінь під кутом β до від'ємної дійсної півосі; кут $\beta = \arcsin(1/M)$;
- підбираючи радіус, проводять коло так, щоб його центр містився на від'ємній дійсній півосі, а коло дотикалось до АФХ розімкненої системи та променя; це коло буде забороненою зоною, куди не має заходити АФХ розімкненої частини; при цьому забезпечують певну якість (вона визначається M) замкнутої системи;
- визначають дійсний коефіцієнт передачі регулятора $K_p = M / (M_2 - 1) 1 / r$, де r – радіус кола; слід пам'ятати, що масштаби, за якими будують годограф на комплексній площині, мають бути однаковими для дійсної та уявної осей.

Приклад 5.7. Обчислити параметри настройки П-регулятора, якщо частотний показник коливальності $M = 1,6$, а передаточна функція об'єкта:

$$W_o(p) = \frac{0,15e^{-40p}}{150p + 1}.$$

Будуємо АФХ об'єкта. Для цього робимо заміну p на $j\omega$, де $j = \sqrt{-1}$:

$$W(\omega) = \frac{0,15 \cdot e^{-40 \cdot \omega \cdot j}}{150 \cdot \omega \cdot j + 1}.$$

Змінюючи частоту ω від 0 до ∞ , знаходимо дійсну $\text{Re}(W(\omega))$ та уявну $\text{Im}(W(\omega))$ складові АФХ об'єкта керування.

Визначаємо кут $\beta = \arcsin \frac{1}{1,6} = 38,68^\circ$. Результати побудови наведено на рис. 5.24. Радіус кола із урахуванням масштабу $r=0,038$. Отже, коефіцієнт передачі П-регулятора:

$$K_p = (1,6/1,62 - 1)(1/0,038) = 26,9.$$

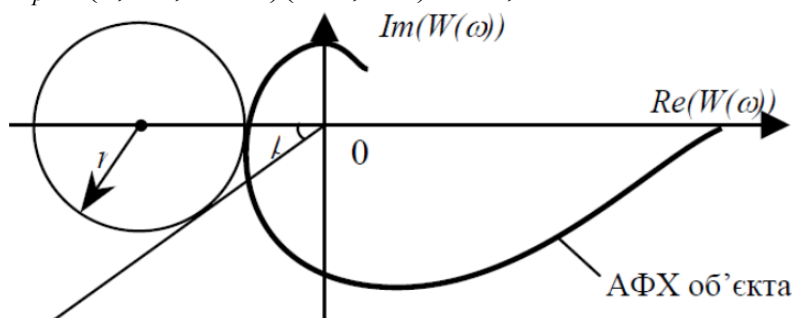


Рис. 5.24. Графічні побудови до прикладу 5.7 (розрахунок коефіцієнта передачі П-регулятора за умов обмеження частотного показника коливальної системи)

На заданий кореневий показник коливальності m можна розрахувати параметр настройки П-регулятора, якщо задана передаточна функція об'єкта керування. Скориставшись системою рівнянь (5.61) стосовно указанного регулятора, можна записати:

$$\begin{aligned} Re_p(m, \omega) &= -Re_p^{(-1)}(m, \omega); \\ 0 &= -Im^{(-1)}(m, \omega). \end{aligned} \quad (5.91)$$

У другому рівнянні системи (5.91) ліва частина містить 0, оскільки уявна складова розширеної АФХ регулятора дорівнює 0.

Приклад 5.8. Розрахувати коефіцієнт передачі П-регулятора, якщо $m = 0,3$,

а передаточна функція об'єкта $W_o(p) = \frac{1}{10p+1} e^{-2p}$.

Розширена АФХ об'єкта:

$$W(\omega) = \frac{1 \cdot e^{-2 \cdot [(-m+j)\omega]}}{10 \cdot (-m+j) \cdot 1};$$

Обернена розширена АФХ об'єкта матиме вигляд:

$$W(\omega) = \left[\frac{1 \cdot e^{-2 \cdot [(-m+j)\omega]}}{10 \cdot (-m+j) \cdot \omega + 1} \right]^{-1}$$

Розв'язавши систему рівнянь:

$w:=0,7$

Given

$$Im[(W(w))^{-1}] = 0$$

$w:=Find(w) \quad w=0,707$

$Kr:=1$

Given

$$Re[(W(w) \cdot Kr)^{-1}] = -1$$

$Kr:=find(Kr) \quad Kr=4,683$

Отримаємо: $K_p = 4,683$.

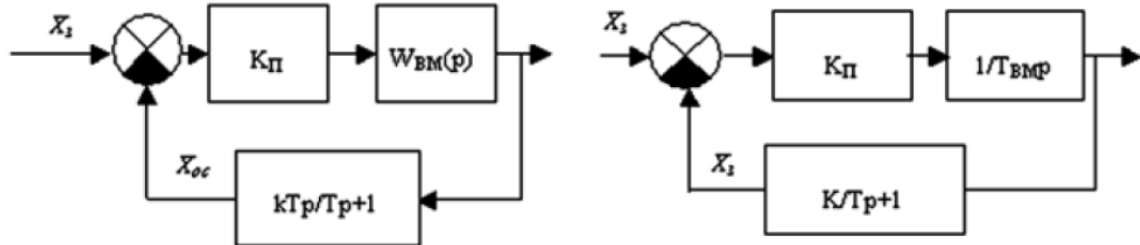
Пропорційно-інтегральний (ізодромний) промисловий регулятор має дві структурні схеми його реалізації. У першій схемі виконавчий механізм охоплюється гнучким місцевим зворотнім зв'язком (рис. 5.25, а). У цьому разі динамічні властивості виконавчого механізму не впливають на формування П-алгоритму керування. Передаточна функція цього регулятора матиме вигляд:

$$\begin{aligned} W_p(p) &= \frac{K_n W_{e.m.}(p)}{1 + \frac{KT_p}{Tp+1} K_n W_{e.m.}(p)} = \frac{1}{K} \left(1 + \frac{1}{Tp} \right) \times \\ &\times \frac{K K_n W_{e.m.}(p) Tp}{Tp [W_{e.m.}(p) K K_n + 1] + 1} = K_p \left(1 + \frac{1}{Tp} \right) W_{\sigma}(p), \end{aligned} \quad (5.92)$$

де $K_p = 1/K$ – коефіцієнт передачі промислового ПІ-регулятора;

K – коефіцієнт передачі ланки місцевого зворотного зв'язку;

$$W_\sigma(p) = \frac{K K_n W_{\text{в.м.}}(p) T_p}{T_p [W_{\text{в.м.}}(p) K K_n + 1] + 1}$$
 – передаточна функція баластного пристрою, що вносить зміни в ідеальний ПІ-алгоритм керування.



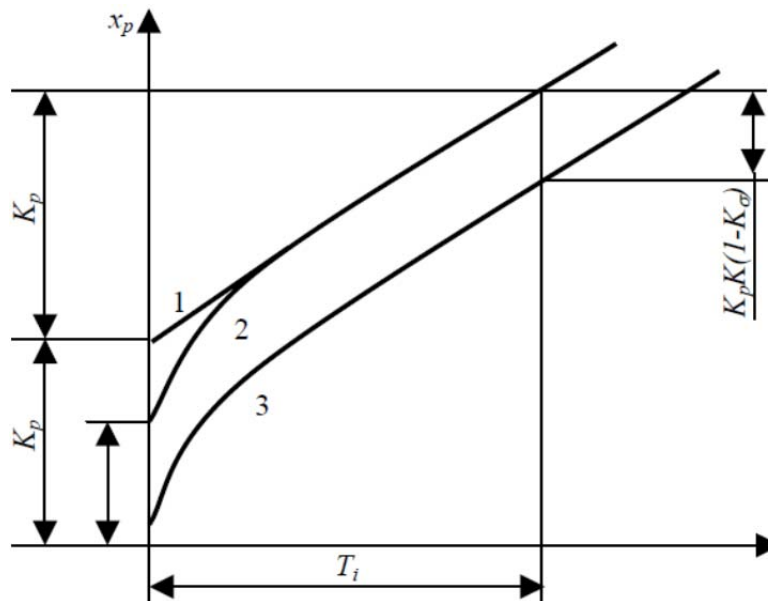
а – виконавчий механізм не бере участі у формуванні алгоритму керування; *б* – виконавчий механізм бере участь у формуванні алгоритму керування

Рис. 5.25. Структури реалізації ПІ-регулятора:

Як видно з виразу (5.92), коефіцієнт передачі регулятора та його час ізодрому визначається параметрами ланки зворотного зв'язку:

$$K_p = 1/K; T_i = T. \quad (5.93)$$

Якщо $K_n \gg 1$, то регулятор ідеально реалізує ПІ-алгоритм, оскільки $W_\sigma(p) \approx 1$ (це крива розгону, 1 на рис. 5.26).



1 – за умов, коли коефіцієнт передачі регулятора набагато переважає 1; 2 – за умов, коли виконавчий механізм не володіє інтегруючими властивостями; 3 – за умов, коли виконавчий механізм зображено володіє інтегруючими властивостями

Рис. 5.26. Криві розгону промислових ПІ-регуляторів:

За першою структурою реалізації ПІ-алгоритм керування (рис. 5.25, *а*) виконавчий механізм може бути безінерційною ланкою; у цьому разі його передаточна функція $W_{\text{в.м.}}(p) = K_{\text{в.м.}}$, а передаточна функція промислового ПІ-регулятора матиме вигляд:

$$W_p(p) = K_p (1 + 1/T_i p) (K_\delta T_\delta p) / (T_\delta p + 1), \quad (5.94)$$

де $W_\delta(p) = (K_\delta T_\delta p)/(T_\delta p + 1)$ – передаточна функція баластного пристрою;

- коефіцієнт передачі баластного пристрою:

$$K_\delta = \frac{KK_n K_{\text{в.м.}}}{KK_n K_{\text{в.м.}} + 1}, \quad (5.95)$$

- постійна часу баластного пристрою:

$$T_\delta = T(K K_n K_{\text{в.м.}} + 1). \quad (5.96)$$

Криву розгону 2 цього регулятора зображено на рис. 5.26 інтегруючою

ланкою; у цьому разі його передаточна функція $W_{\text{в.м.}}(p) = \frac{1}{T_{\text{в.м.}} p}$, а передаточна функція самого регулятора:

$$W_p(p) = K_p (1 + 1/T_p) K_\sigma / (T_\sigma p + 1), \quad (5.97)$$

де $K_p = 1/K$ – передаточний коефіцієнт регулятора; $T T_i = -$ час ізодрому; $W_\delta(p) = K_\delta / (T_\delta p + 1)$ – передаточна функція баластного пристрою, що вносить спотворення в ідеальний ПІ-алгоритм керування; $K_\delta = K_n K T_{\text{в.м.}} / (K_n K T + T_{\text{в.м.}})$ – коефіцієнт передачі баластного пристрою; $T_\delta = T T_{\text{в.м.}} / (K_n K T + T_{\text{в.м.}})$ – стала часу баластного пристрою.

Крива розгону промислового ПІ-регулятора зображена на рис. 5.25 б. Як видно, виконавчий механізм повинен мати інтегруючі властивості $W_{\text{в.м.}}(p) = 1/(T_{\text{в.м.}} p)$ і брати участь у формуванні ПІ-алгоритму керування. У цьому разі передаточна функція регулятора матиме структури виразу (5.97), проте параметри цієї структури будуть іншими. Коефіцієнт передачі регулятора та час ізодрому:

$$K_p = T/(K T_{\text{в.м.}}); T_i = T. \quad (5.98)$$

Параметри баластного пристрою одержують за формулами:

$$K_\delta = (K_n K)/(K_n K + 1); T_\delta = T/(K_n K + 1) \quad (5.99)$$

Крива розгону цього регулятора наведена на рис. 5.26. Найбільшого поширення в практиці використання набули промислові ПІ-регулятори, що реалізовані за другою структурною схемою (інтегруючі властивості виконавчого механізму використовуються для формування ПІ-алгоритму керування). До них належать регулятори Р.25, РС27, РС29.

На стадії проектування розрахунок параметрів настройки ПІ-регуляторів, за якими їх вибирають, ведуть здебільшого за трьома інженерними методиками.

На заданий запас стійкості за амплітудою. За рис. 5.8 для розімкненої системи з ПІ-регулятором можна записати:

$$W_{\text{роз}}(j\omega) = K_p [1 - (j/T_i \omega) W_o(j\omega)] = K_p W_o(j\omega) - j[K_p W_o(j\omega)]/(T_i \omega). \quad (5.100)$$

Отже, у разі вмикання ПІ-регулятора до об'єкта, кожний вектор цього об'єкта збільшуватиметься в K_p раз і до нього ще додаватиметься вектор $[K_p W_o(j\omega)]/(T_i \omega)$ (рис. 5.27а).

Для забезпечення заданого запасу стійкості системи за модулем C при різних співвідношеннях K_p і T_i необхідно, щоб АФХ розімкненої системи проходила через точку D з координатами $(1-C), j0$, тобто вектор \vec{OE}_i має описати

у третьому квадранті комплексної площини геометричне місце точок – півколо, радіус якого становить $(1-C)/2$, а центр міститься в точці з координатами $(-(1-C)/2, j0)$ (рис. 5.27, б).

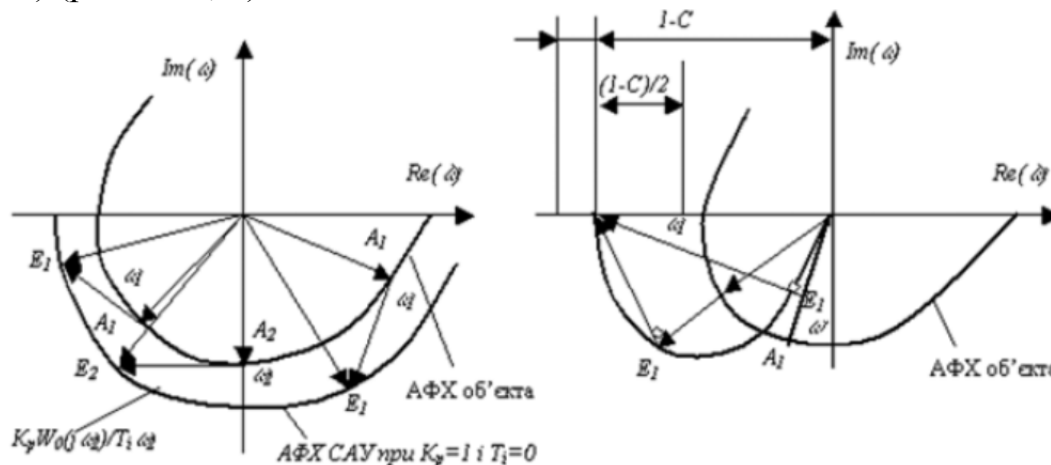


Рис. 5.27. Графічні побудови до методики розрахунку параметрів ПІ-регулятора за умов обмеження системи на заданий запас стійкості за амплітудою

Значення параметрів K_p і T_i , що забезпечують потрібний запас стійкості за амплітудою C , знаходять за виразами:

$$\begin{aligned} \overline{OD} &= W(j\omega_i) = \overline{OE_i} + \overline{E_iD} = \\ &= K_p W_o(j\omega_i) - \frac{K_p W_o(j\omega_i)}{T_i \omega_i} = K_p \overline{OA_i} - j \frac{K_p \overline{OA_i}}{T_i \omega_i} \end{aligned} \quad (5.101)$$

Звідси:

$$\overline{OE_i} = K_p \overline{OA_i} \quad i \quad K_p = \frac{\overline{OE_i}}{\overline{OA_i}}; \quad (5.102)$$

$$\overline{E_iD} = \frac{K_p W_o(j\omega_i)}{T_i \omega_i} = \frac{\overline{OE_i}}{T_i \omega_i}; \quad T_i = \frac{\overline{OE_i}}{\omega_i \overline{E_iD}}. \quad (5.103)$$

Для конкретної частоти вищенаведені векторні співвідношення перетворюються на скалярні.

Оскільки потрібний запас стійкості C може бути забезпечений при різних співвідношеннях K_p та T_i , то постає задача щодо вибору найоптимальнішого співвідношення. Якщо за критерій оптимальності слід вибрати мінімальне значення лінійного інтегрального показника якості перехідного процесу, вважаючи, що об'єкт керування низькочастотний, то оптимальними будуть такі параметри, для яких $K_p/T_i = \max$. Ці параметри можуть бути знайдені у разі проведення дотичної з початку координат до лінії межових співвідношень (осями координат є K_p та T_i на рис. 5.28).

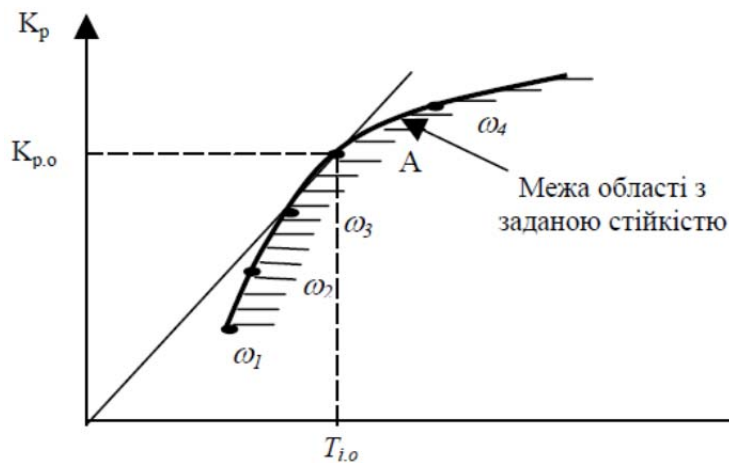


Рис. 5.28. Визначення оптимальних параметрів настройки ПІ-регулятора

Приклад 5.9. Для об'єкта, передаточна функція якого наведена в прикладі 5.6, визначити параметри настройки ПІ-регулятора, які забезпечили б запас стійкості системи за амплітудою $C = 0,6$. АФХ об'єкта керування та допоміжні побудови зображено на рис. 5.29. Результати розрахунку наведені в табл. 5.11 (для розрахунків слід використовувати вирази (5.88) та (5.89)).

Лінія межових співвідношень наведена на рис. 5.30. Як бачимо, оптимальними параметрами настройки ПІ-регулятора є $K_{p.o.}=8,5$; $T_{i.o.}=47,5$.

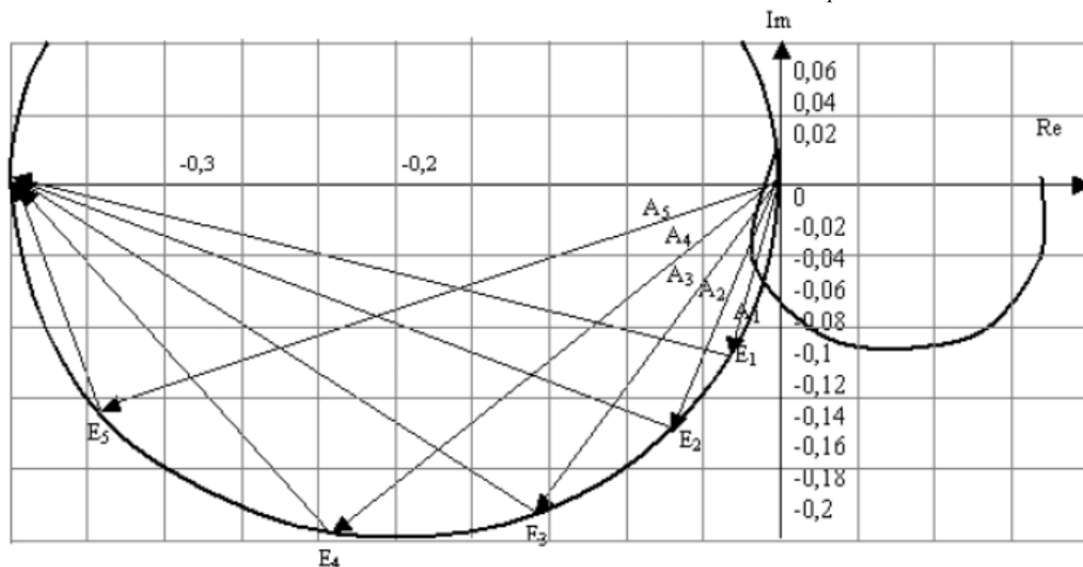


Рис. 5.29. Розрахунок параметрів ПІ-регулятора на заданий запас стійкості системи за амплітудою

Таблиця 5.8 – Результати розрахунків параметрів настройки ПІ-регулятора

ω_i	OE_i	OA_i	$E_i D$	K_p	T_i
0,016	0,96	0,58	3,88	1,66	17,46
0,019	1,56	0,49	3,68	3,18	22,3
0,023	2,4	0,41	3,2	5,85	32,6
0,027	3,04	0,36	1,62	8,44	44,97
0,035	3,62	0,3	1,5	12,1	68,95

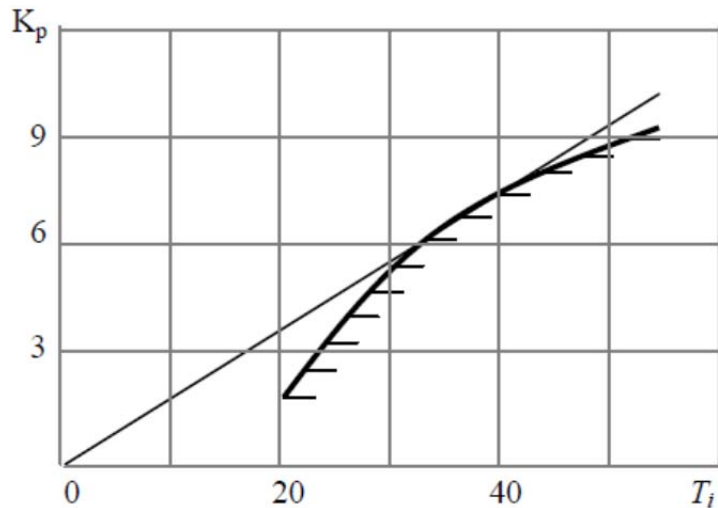


Рис. 5.30. Визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора (до прикладу 5.9)

На заданий частотний показник коливальності. ПІ-регулятор має два параметра настройки. Цей факт зумовлює деякі відмінності застосування такої методики порівняно з П-регулятором. Ці відмінності полягають у побудові АФХ розімкненої системи з ПІ-регулятором. Її будують для кількох значень часу ізодрому T_i та $K_p = 1$:

$$\begin{aligned} W_{роз}(j\omega_i) &= W_p(j\omega_i) W_o(j\omega_i) = K_p (1 + 1/(T_i j\omega_i)) W_o(j\omega_i) = \\ &= 1 \cdot W_o(j\omega_i) - j \cdot (1 \cdot W_o(j\omega_i)) / (T_i \omega_i), \end{aligned} \quad (5.104)$$

тобто до кожного вектора АФХ об'єкта (для частоти ω_i) потрібно додати вектор (додавання здійснюється у від'ємному напрямі – за годинниковою стрілкою), модуль якого дорівнює $[W_o(j\omega_i) / (T_i \omega_i)]$.

Усі інші пункти методики зберігаються.

Отже, знаходять кілька співвідношень між коефіцієнтом передачі регулятора та часом ізодрому, які забезпечують необхідний частотний показник коливальності M . Вибирають оптимальне значення на підставі лінійного інтегрального показника оптимальності за умов, що об'єкт керування є низькочастотним. Для цього будують лінію межових співвідношень і проводять дотичну з початку координат. Точка дотику дає змогу визначити параметри, що забезпечуватимуть $K_p / T_i = \max$.

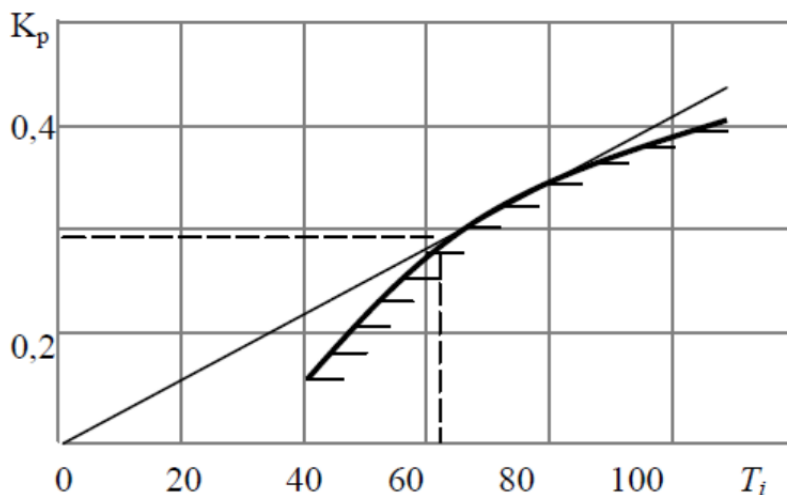
Приклад 5.10. Визначити параметри настройки ПІ-регулятора для об'єкта,

передаточна функція якого $W_o(w) = \frac{3 \cdot e^{-4p}}{15p+1}$, якщо частотний показник коливальності має бути $M=1,6$.

Беремо послідовно значення часу ізодрому T_i , с: 40; 70; 100; 120; 150 (для орієнтування перше значення часу ізодрому слід брати одного порядку з часом чистого запізнення об'єкта керування). За виразом:

$$W_z(w) = W_o(w) \cdot K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot w \cdot j} \right)$$

Знайдені коефіцієнти передачі регулятора та вибрані раніше значення часу ізодрому дають змогу побудувати лінію межових співвідношень, внаслідок чого можна визначити оптимальні значення K_r та T_i (рис. 5.32). Як бачимо, це 0,28 та 62 с відповідно.



Настроювання на заданий кореневий показник коливальності. Для того, щоб скористатись системою рівнянь (5.61), потрібно записати вираз для розширеної АФХ ПІ-регулятора:

$$W_p[(-m+j) \cdot \omega] = K_p[1 + (1/(-m+j) \cdot \omega \cdot T_i)] =$$

$$= K_p[(1 - (m/(m^2+1) \cdot T_i \cdot \omega) - j(1/(m^2+1) \cdot T_i \cdot \omega)], \quad (5.105)$$

де $Re_p(m, \omega) = K_p [1 - (m/(m^2+1) \omega T_i)]$ – дійсна складова розширеної АФХ ПІ – регулятора; $Im_p(m, \omega) = K_p / (m^2 + 1) T_i \omega$ – уявна складова розширеної АФХ ПІ-регулятора. Отже, щодо ПІ-регулятора система рівнянь (5.61) матиме вигляд:

$$\left. \begin{aligned} K_p \left[1 - \frac{m}{(m^2+1) T_i \omega} \right] &= -Re_o^{(-1)}(m, \omega); \\ -K_p \left(\frac{1}{m^2+1} \right) &= -Im_o^{(-1)}(m, \omega). \end{aligned} \right\} \quad (5.106)$$

Розв'язок цієї системи дає змогу одержати вирази:

$$K_p = m Im_o^{(-1)}(m, \omega) - Re_o^{(-1)}(m, \omega); \quad (5.107)$$

$$T_i = \frac{K_p}{(m^2+1) \omega \cdot Im_o^{(-1)}(m, \omega)}$$

Існують кілька варіантів пошуку оптимальних параметрів настройки ПІ-регулятора:

- перший – *аналітичний*, за яким на підставі формул (5.107) та (5.108), задавши значення частоти можна побудувати лінію межових співвідношень;
- другий – *графоаналітичний*, суть якого полягає в побудові розширених АФХ ПІ-регулятора та оберненої з від'ємним знаком об'єкта керування [вираз (5.60)].

Розширена АФХ регулятора проводиться як промінь під кутом α до дійсної осі:

- на комплексній площині [$\alpha = \arcsin(1/m)$] ; це видно на рис. 5.33; по осі абсцис цей промінь відсікає відрізок, довжина якого дорівнює величині коефіцієнта передачі ПІ-регулятора; розширені АФХ регулятора проводять через точки, які були використані;

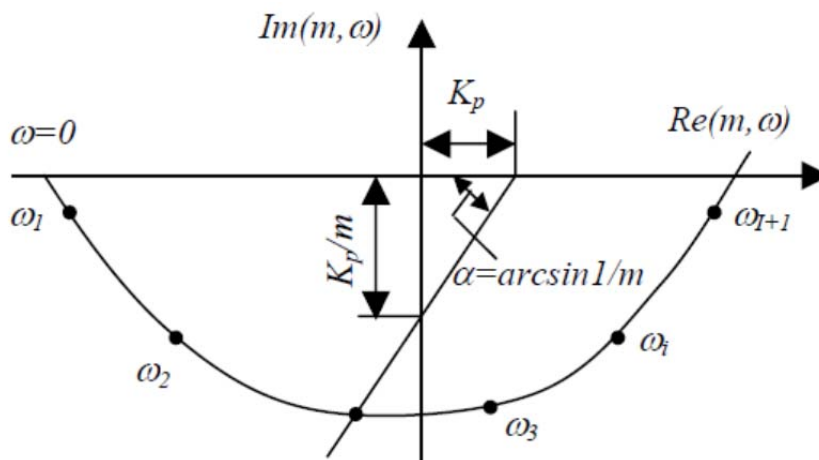


Рис. 5.33. Розширені АФХ об'єкта (обернена) та ПІ-регулятора

- для побудови оберненої з від'ємним знаком розширеної АФХ об'єкта керування (тобто, у цьому випадку їх частоти для точки перетину збігаються, що видно з рис. 5.33); точка перетину вказаних годографів дає можливість визначити

$Im_o^{(-1)}(m, \omega)$, $Im_o^{(-1)} 1(m, \omega)$, – що, у свою чергу, час ізодрому за виразом (5.108); сукупність здобутих K_p і T_i дає змогу побудувати лінію межових співвідношень, а це – оптимальні параметри настройки регулятора;

- третій – *аналітичний*, який дає змогу одразу знайти оптимальні параметри настройки ПІ-регулятора. Для цього слід скористатися виразом (5.108):

$$K_p/T_i = (m^2 + 1)\omega Im_o^{(-1)}(m, \omega). \quad (5.109)$$

Далі потрібно визначити частоту, яка б забезпечила $K_p/T_i = \max$; для цього досліджують вираз (5.95) на екстремум, беручи похідну по ω та прирівнюючи її до нуля:

$$d(K_p/T_i)/d\omega = d[(m^2 + 1)\omega Im_o^{(-1)}(m, \omega)]/d\omega = 0. \quad (5.110)$$

Здобута за формулою (5.110) частота дає змогу знайти єдину на комплексній площині точку для $1/W_o [(-m + j)\omega]$, через яку проводять годограф розширеної АФХ ПІ-регулятора, внаслідок чого можна дістати значення K_p та T_i , для яких $K_p/T_i = \max$.

Приклад 5.11. Визначити параметри настройки ПІ-регулятора для об'єкта, передаточна функція якого наведена в прикладі 5.5, якщо кореневий показник коливальності $m=0,55$.

Скористаємося другим варіантом пошуку оптимальних параметрів настройки – графоаналітичним. Для цього побудуємо розширену з від'ємним знаком обернену АФХ об'єкта керування:

$$-1/W_o [(-m + j)\omega] = [-T(-m + j)\omega + 1]/(Ke^{-(j+m)\omega\tau}). \quad (5.111)$$

Кут нахилу розширеної АФХ ПІ-регулятора до дійсної осі $\alpha = \arcsin(1/0,55) \approx 61^\circ$.

Годографи побудовано на рис. 5.34. Результати розрахунків за виразом (5.108) (коефіцієнт передачі визначається з рис. 5.34).

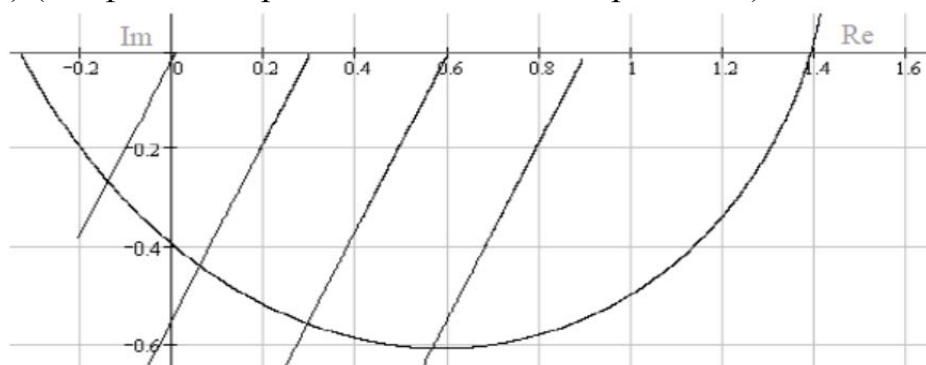


Рис. 5.34. Розширені АФХ (обернені) об'єкта та ПІ-регулятора

Розрахунки дають можливість побудувати лінію межових співвідношень (рис. 5.35) і далі визначити оптимальні параметри настройки ПІ-регулятора: $K_p = 14,5$; $T_i = 80,3$ с.

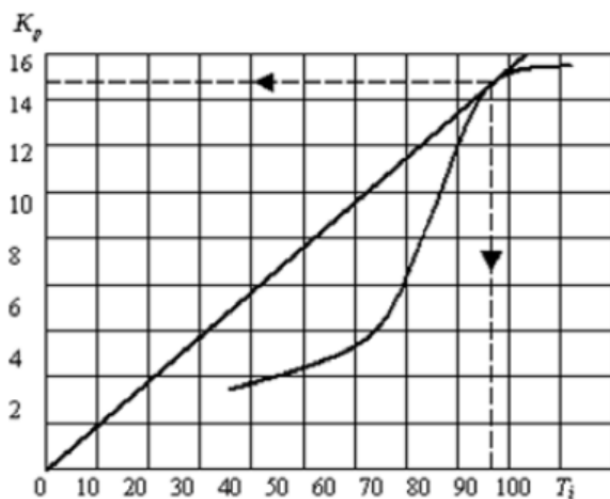
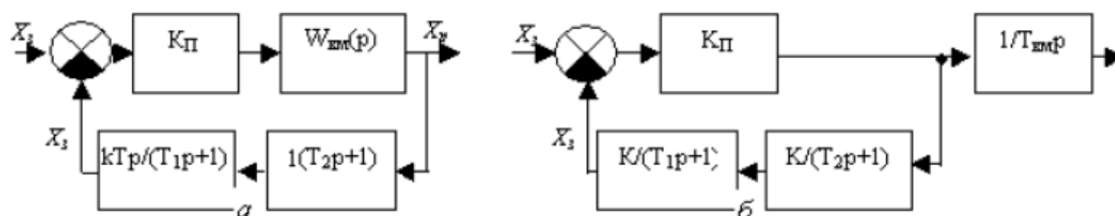


Рис. 5.35. Визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора

Пропорційно-інтегрально-диференціальний промисловий регулятор має дві структурні схеми його реалізації. У першій із них виконавчий механізм не бере участі у формуванні ПІД-алгоритму керування, а у другій – бере (рис. 5.36).



а – за умов, коли виконавчий механізм не бере участі у формуванні алгоритму керування; б – за умов, коли інтегруючі властивості виконавчого механізму використовуються у формуванні алгоритму керування

Рис. 5.36. Структурно-алгоритмічні схеми реалізації ПІД-регулятора:

Для першої схеми, як видно, послідовно з'єднані ланки місцевого зворотного зв'язку – це реальна диференціююча ланка та інерційна першого порядку. Параметри настройки регулятора у цьому разі визначають за формулами:

$$K_p = \frac{T_2 + T_1}{K \cdot T_1}; \quad (5.112)$$

$$T_i = T_1 + T_2; \quad (5.113)$$

$$T = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2}. \quad (5.114)$$

Позначення до виразів (5.112), (5.113) і (5.114) зрозумілі з рис. 5.36 і з виразу (5.50).

Для другої схеми (рис. 5.36, б) виконавчий механізм бере участь у формуванні ПІД-алгоритму керування. Він обов'язково повинен мати інтегруючі властивості (як і для ПІ-регулятора). Два параметри настройки (час ізодрому та час передування) визначаються за виразами (5.113) та (5.114) відповідно (рис. 5.36, б), а коефіцієнт передачі за виразом:

$$K_p = \frac{T_1 + T_2}{KT_{\text{в.м.}}}, \quad (5.115)$$

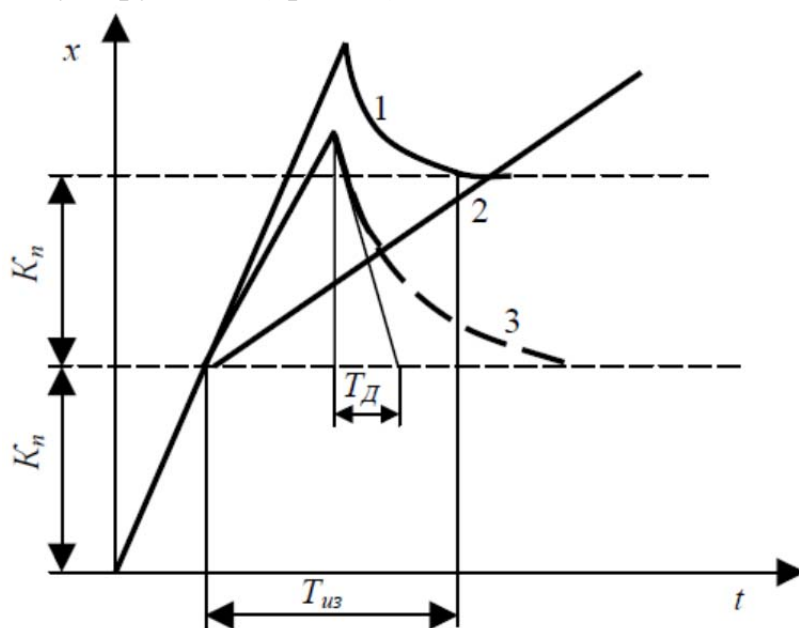
де $T_{\text{в.м.}}$ – стала часу виконавчого механізму.

Дуже часто на практиці для реалізації ПІД-алгоритму керування використовуються ПІ-регулятори зі спеціальними диференціаторами типу ДЛ-Т та ДЛ-П. Передаточні функції цього пристрою мають вигляд:

$$W_p(p) = K_p(1 + 1/T_i p) + K_d T_d p / (T_d p + 1), \quad (5.116)$$

де K_d та T_d – відповідно коефіцієнт передачі та стала часу диференціатора.

На рис. 5.37 зображена крива розгону об'єднаного регулятора за умов, коли виконавчим механізмом є електродвигун із постійною частотою обертання. Параметри регулятора, що настраюються, можемо отримати, якщо від кривої розгону відняти інтегральну складову 2. У результаті знайдемо складову ПД - алгоритму керування (крива 3).



1 – ПІД-регулятора, який складається з промислового ПІ-регулятора та диференціюючої приставки; 2 – крива розгону промислового ПІ-регулятора; 3 – крива розгону ПД-регулятора

Рис. 5.37. Криві розгону:

Як і для попереднього регулятора, для ПІД-розрахунку настрювальних параметрів ведуть за трьома основними методиками.

На заданий запас стійкості за амплітудою. Як відомо, ПІД-промисловий регулятор має три параметри настройки: K_p , T_i , та T_n . Згідно з теорією автоматичного керування найкраща якість перехідного процесу спостерігається за умов, коли $T_n/T_i = 0,5$. Ця обставина й використовується для ПІД-регулятора. Розрахунки будемо вести за рис. 5.37, як для ПІ-регулятора.

Можемо записати, що:

$$W_p(p) = K_p(1 + 1/(T_i p) + 0,5T_i p). \quad (5.117)$$

Для розімкненої системи (як і за умов використання ПІ- промислового регулятора):

$$W_{роз}(j\omega) = K_p \left[1 - j \left(\frac{1}{T_i \omega} - 0,5 T_i \omega \right) \right] W_o(j\omega) =$$

$$= K_p W_o(j\omega) - j K_p W_o(j\omega) \left(\frac{1}{T_i \omega} - 0,5 T_i \omega \right) = \overline{OE_i} + \overline{E_i D} = \overline{OD}. \quad (5.118)$$

Векторне рівняння (5.118) дає змогу записати, що:

$$K_p = \frac{\overline{OE_i}}{\overline{OA_i}}.$$

Для конкретної частоти векторний вираз (5.119) перетворюється на скалярний:

$$\overline{E_i D} = K_p W_o(j\omega) \left(\frac{1}{T_i \omega} - 0,5 T_i \omega \right) = \overline{OE_i} \left(\frac{1}{T_i \omega} - 0,5 T_i \omega \right). \quad (5.120)$$

Спрощення виразу (5.106) дає змогу записати остаточно:

$$0,5 \cdot \omega^2 \cdot \overline{OE_i} \cdot T_i^2 + \overline{E_i D} \cdot \omega \cdot T_i - \overline{OE_i} = 0. \quad (5.121)$$

Для конкретної частоти рівняння (5.121) стає скалярним. Його розв'язання відносно T_i дає змогу визначити час ізодрому (значення береться додатне).

За здобутими параметрами K_p та T_i можна побудувати лінію межових співвідношень та знайти оптимальне їх значення. Оптимальне значення часу передування визначається як половина оптимального значення часу ізодрому.

Приклад 5.12. Визначити параметри настройки ПІД-регулятора для об'єкта, передаточна функція якого наведена в прикладі 5.6, запас стійкості системи за амплітудою має становити $C = 0,6$.

Для рівняння (5.121) введемо позначення:

$$-0,5 \overline{OE_i} \omega_i^2 = a; \quad -\left| \overline{E_i D} \right| \omega = b; \quad -\left| \overline{OE_i} \right| \omega = d.$$

Тоді можна записати, що:

$$a T_i^2 + b T_i - d = 0. \quad (5.122)$$

Скориставшись рис. 5.29, проведемо розрахунки параметрів настройки ПІД-регулятора. Результати розрахунків зведено в табл. 5.9. Знайдені співвідношення K_{II} та T_i дають змогу побудувати лінію межових співвідношень та визначити оптимальні значення K_{II} і T_i (рис. 5.38).

Таблиця 5.9 – Результати розрахунків параметрів настройки ПІД-регулятора

ω_i	a	b	d	K_p	T_i
0,016	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,062	0,96	1,66	16,7
0,019	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,069	1,36	3,18	20,75
0,023	$6,3 \cdot 10^{-4}$	0,074	2,4	5,85	28,2
0,027	-	-	-	8,44	41,5
0,035	-	-	-	12,1	65,32

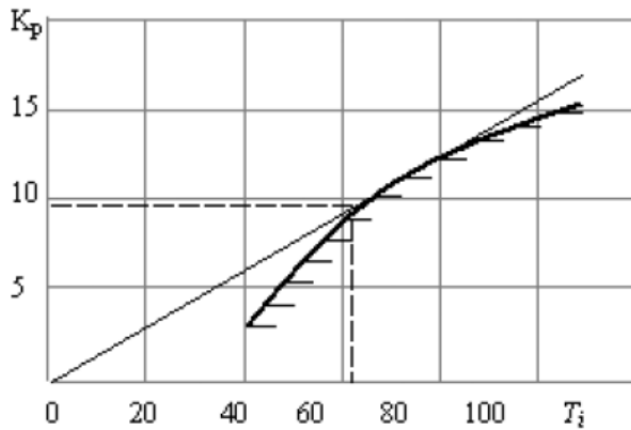


Рис. 5.38. Визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора на заданий запас стійкості системи за амплітудою

Таким чином, оптимальне значення коефіцієнта передачі регулятора $K_{po} = 8,6$, часу ізодрому $T_{io} = 42$, часу передування $T_{no} = T_{io}/2 = 21$.

На заданий частотний показник коливальності. За умов використання ПІД-регулятора АФХ розімкненої системи матиме вигляд:

$$\begin{aligned} W_{poz}(j\omega) &= W_p(j\omega)W_o(j\omega) = K_p(1 - j(1/T_i\omega - T_n\omega))W_o(j\omega) = \\ &= K_pW(j\omega) - j(1/T_i\omega - T_n\omega)K_pW_o(j\omega). \end{aligned} \quad (5.123)$$

Знак уявної складової виразу (5.109) умов залежить від значення частоти. Якщо значення велике, то це буде “–”, якщо мале, то “+”. Цей знак впливає на напрям векторного додавання. В іншому вказана методика, що подібна до методики розрахунку ПІ-регулятора.

Приклад 5.13. Визначити параметри настройки ПІД-регулятора для об’єкта, передаточна функція якого наведена в прикладі 5.5, а частотний показник коливальності має становити $M = 1,6$. Результати розрахунків за виразом (5.123) наведено в табл. 5.10. Розрахунок коефіцієнта передачі, значення якого наведені в табл. 5.10, проводились із використанням рисунка 5.39.

Таблиця 5.10 – Результати розрахунків параметрів настройки ПІД-регулятора

ω	0,003	0,006	0,01	0,021	0,025	0,03	0,043	
$W_o(j\omega_i) \times$ $\times (1/T_i\omega_i - 0,5T_i\omega_i)$	1563	472	216	65	39	19	8	$T_{i1}=20c$ $r_1=9,3$ $K_{p1}=0,18$
	70	55	44	30	22	14	1,1	$T_{i2}=30c$ $r_2=3,8$ $K_{p2}=0,27$
	264	94,2	44,5	-14	-6,4	-8	-13	$T_{i3}=70c$ $r_3=1,8$ $K_{p3}=0,54$

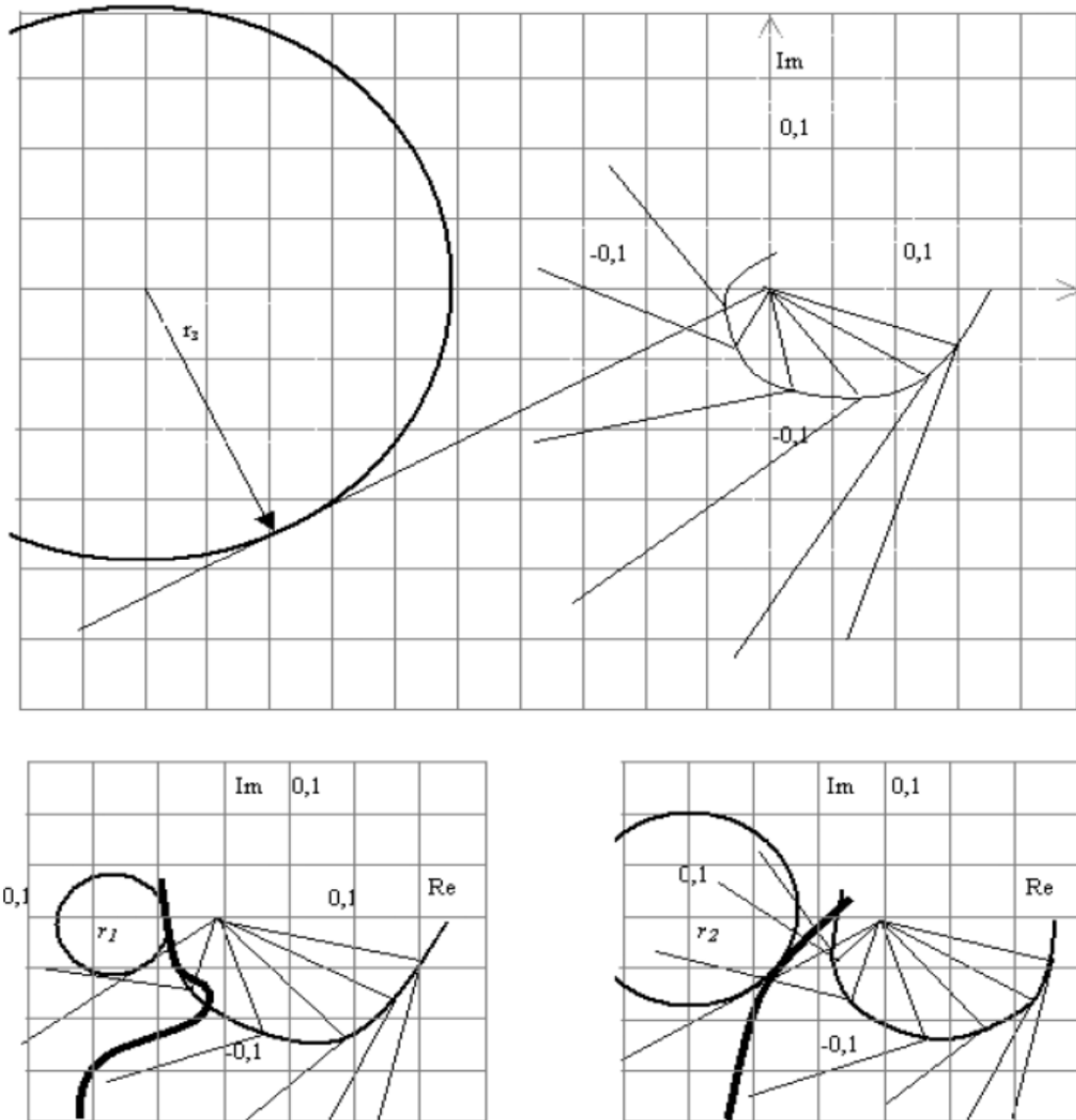


Рис. 5.39. Розрахунок параметрів ПІД-регулятора за умов обмеження системи на заданий частотний показник коливальності

Співвідношення K_p та T_i дали змогу побудувати лінію межових співвідношень (рис. 5.40), та визначити оптимальні параметри настройки ПІД-регулятора.

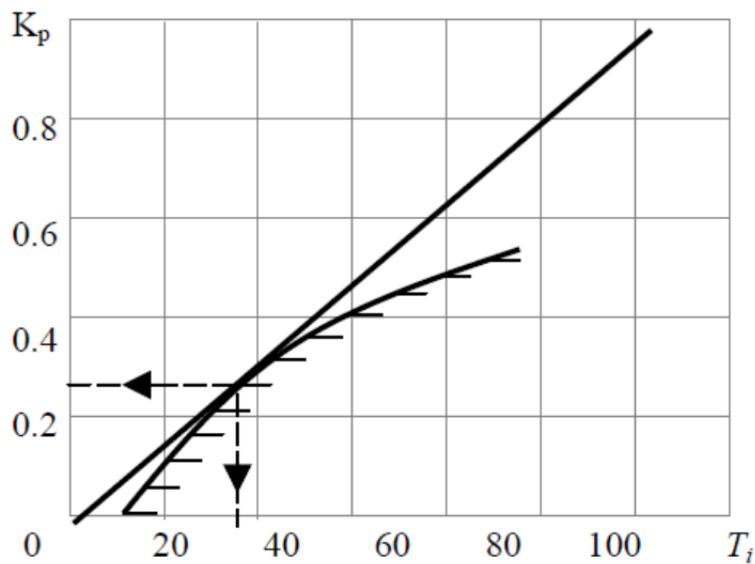


Рис. 5.40. Визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора за умов обмеження системи на заданий частотний показник коливальності

Отже, оптимальними будуть такі значення: $K_{p.o.}=0,32$; $T_{i.o}=34$; $T_{n.o}=17$.

На заданий кореневий показник коливальності. Щоб скористатись системою рівнянь (5.61), потрібно мати розширену АФХ ПІД-регулятора:

$$\begin{aligned} W_p[(-m+j)\omega] &= K_p \left[1 + \frac{1}{(-m+j)\omega T_i} + (-m+j)\omega T_n \right] = \\ &= K_p \left[1 + \frac{(-m+j)}{(m^2+1)\omega T_i} - T_n m \omega + j T_n \omega \right] = \\ &= K_p \left\{ \left[1 - \frac{m}{(m^2+1)\omega T_i} - T_n m \omega \right] - j \left[\frac{1}{(m^2+1)\omega T_i} + T_n \omega \right] \right\} \end{aligned} \quad (5.124)$$

Пам'ятаючи, що найкраща якість перехідного процесу спостерігається за умов, коли $T_n = 0,5 T_i$, можна записати:

$$W_p[(-m+j)\omega] = Re_p(m, \omega) - j Im_p(m, \omega), \quad (5.125)$$

$$Re_p(m, \omega) = K_p \left[1 - \frac{m}{(m^2+1)\omega T_i} - 0,5 T_i m \omega \right]; \quad (5.126)$$

де

$$Im_p(m, \omega) = K_p \left[\frac{1}{(m^2+1)\omega T_i} + 0,5 T_i \omega \right].$$

Щодо ПІД-регулятора система рівнянь (5.61) набере вигляду:

$$\left. \begin{aligned} K_p \left[1 - \frac{m}{(m^2+1)\omega T_i} - 0,5 T_i m \omega \right] &= -Re_o^{(-1)}(m, \omega); \\ K_p \left[\frac{1}{(m^2+1)\omega T_i} + 0,5 T_i \omega \right] &= Im_o^{(-1)}(m, \omega) \end{aligned} \right\} \quad (5.127)$$

Розв'язання цієї системи рівнянь забезпечуватиметься аналітичним і графоаналітичним варіантами (див. для ПІ-регулятора).

Вибір регулювальних органів. Регулювальний орган – це ланка системи автоматичного керування, що призначена змінювати витрату певного середовища. Найпоширенішими є дросельні регулювальні органи, які являють собою змінний гідравлічний опір (змінюючи гідравлічний опір, досягають зміни витрати середовища зі зміною прохідного отвору). До дросельних регулювальних органів належать: шибери; регулювальні клапани; поворотні заслінки; крани.

Крім дросельних регулювальних органів, широкого розповсюдження набули засоби, що регулюють витрату шляхом зміни натиску: приводи з обертами, що регулюються; гідромуфти; напрямні апарати центrorушійних машин.

Для регулювання витрати сипучих матеріалів використовують різноманітні живильники: дискові; шнекові; стрічкові; скребкові; лопатні та ін. Для регулюючих органів характерні такі параметри:

- пропускна здатність K_γ – витрата рідини з густиною 1000 кг/м^3 , що пропускається регулювальним органом при перепаді тиску на ньому 1 кгс/см^2 ; пропускна здатність вимірюється в кубічних метрах за годину ($\text{м}^3/\text{год}$);

- умовний прохід D_y – номінальний діаметр проходу в приєднувальних патрубках вимірюється в міліметрах;

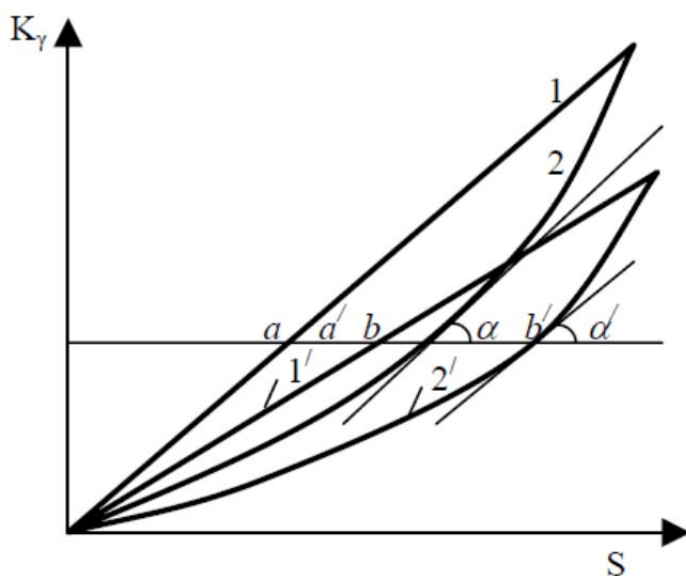
- пропускна характеристика (внутрішня або ідеальна) встановлює залежність пропускної здатності від переміщення затвора $K_\gamma = f(s)$ за умов постійного перепаду тиску; дросельні пристрої, що серійно випускаються, профілюються з лінійною або рівнопроцентною пропускною характеристикою. При лінійній пропускній характеристиці (рис. 5.41), крива 1) приріст пропускної здатності пропорційний переміщенню затвора:

$$dK_\gamma = cds, \quad (5.128)$$

де c – стала величина; s – переміщення затвору.

За умов рівновідсоткової пропускної характеристики, приріст пропускної здатності пропорційний значенню пропускної здатності (рис. 5.41, крива 2):

$$\frac{dK_\gamma}{ds} = cK_\gamma, \quad (5.129)$$



1 – лінійна; 2 – рівновідсоткова

Рис. 5.41. Пропускні характеристики регулювальних органів:

Лінійну пропускну характеристику для регулювального органа слід вибирати тоді, коли збурення на об'єкт керування носять зовнішній характер та пов'язані із зміною витрат рідини, що регулюється споживачем; рівновідсоткову пропускну характеристику слід вибирати, якщо характер збурень – внутрішній, тобто вони пов'язані із зміною тиску в технологічних трубопроводах; указані

обставини дають змогу за різних умов зберегти постійним коефіцієнт передачі регулювального органа (рис. 5.41);

- витратна характеристика – за робочих умов вигляд пропускної характеристики змінюється, що пояснюється зміною перепаду тиску на регулювальному органі; тому регулювальний орган і характеризується витратною характеристикою – це залежність відносної витрати середовища від ступеня відкриття затвора регулювального органа:

$$\mu = f(s), \quad (5.130)$$

де $\mu = \frac{Q}{Q_{\max}}$ – відносна витрата середовища; Q – поточне значення витрати; Q_{\max} – максимальне значення витрати (у разі повного відкриття затвора);

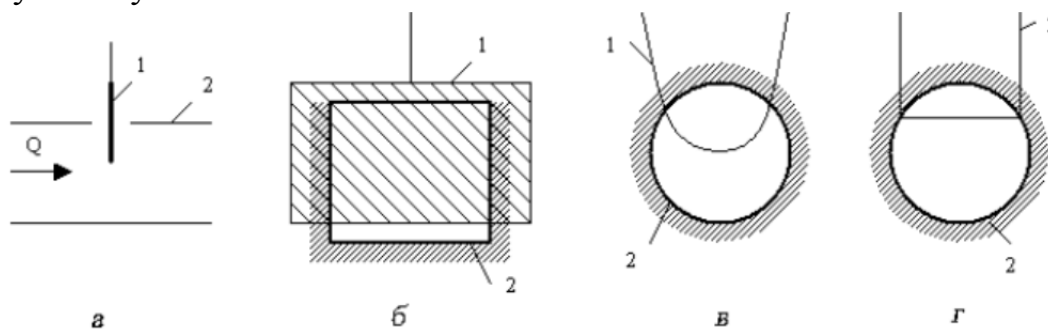
- негерметичність затвора – пропускна здатність у разі повного закриття проходу.

Як уже зазначалось, усі вищенаведені регулювальні органи мають рухомий пристрій, під час переміщення якого змінюється прохідний отвір регулювального органа, а отже, його гідравлічний опір.

Шибери мають затвор, що виготовлюється у вигляді полотна, що переміщується перпендикулярно до напрямку потоку Q (рис. 5.42). Шибери застосовуються для регулювання витрат повітря, газів за незначних статичних тисків (до 1000 кгс/м²). Здебільшого шибери встановлюють на трубопроводах і каналах прямокутного та круглого перерізів. У прямокутних каналах шибери мають, як правило, лінійну конструктивну характеристику (вона встановлює залежність зміни відносного прохідного отвору регулювального отвору від ступеня його відкриття):

$$\frac{F_k}{F_{k\max}} = f(s), \quad (5.131)$$

де F_k – поточне значення площі перерізу каналу; $F_{k\max}$ – найбільше значення площі перерізу каналу.



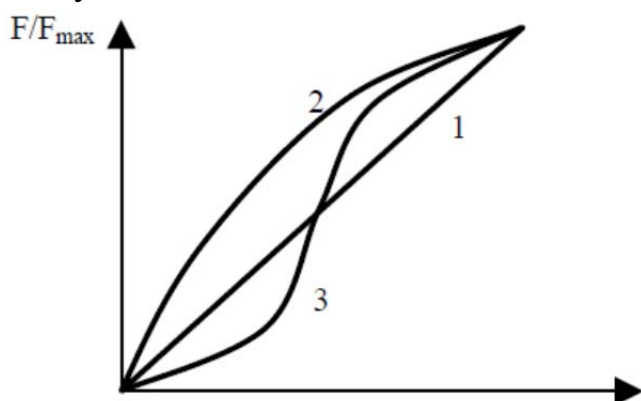
а – загальна схема; *б* – канал (або трубопровід) (2) та рухома частина шиберу (1) прямокутного перерізу; *в* – канал (або трубопровід) та рухома частина шиберу круглого перерізу; *г* – канал (або трубопровід) круглого перерізу та рухома частина шиберу прямокутного перерізу

Рис. 5.42. Конструкції шиберів:

Змінюючи профіль перерізу каналу або профіль дросельного органа, можна здобути конструктивну характеристику шиберу будь-якої форми. Шибери, що встановлюються на трубопроводах круглого перерізу, мають нелінійні конструктивні характеристики (рис. 5.43).

Поворотні заслінки можуть застосовуватись на трубопроводах круглого і прямокутного перерізу, для регулювання витрат рідини, пару, газів при середніх і високих тисках. Профіль перерізу заслінки змінюватиметься у разі її повертання навколо осі, що розташована перпендикулярно до напрямку потоку.

Поворотні заслінки перед шиберами мають ряд переваг. Одна із них полягає в тому, що затвор шиберу значною мірою розвантажений, оскільки сили, які створюються тиском середовища на обидві його половини, частково врівноважуються.



1 — для шиберу та каналу (або трубопроводу) прямокутного перерізу; 2, 3 — канали (або трубопроводи) круглого перерізу

Рис. 5.43. Конструктивні характеристики шиберів:

Конструктивна характеристика поворотних заслінок для прямокутних та круглих трубопроводів визначається рівнянням:

$$F_{з.с.} = F_c \cos \alpha \quad (5.132)$$

де $F_{з.с.}$ — площа проходу між затвором і сідлом; F_c — площа переходу в сідлі; α — кут повороту затвора від положення, при якому прохід закритий.

За конструкцією поворотні заслінки можуть бути: з одним затвором — однолопатні; кількома — багато-лопатні; без-упорні; упорні.

Затвор без-упорних поворотних заслінок має форму кола і при закритому проході перебуває у вертикальному положенні (діаметр кола затвора менший за діаметр проходу в корпусі, тому прохід повністю не закривається). В упорних заслінках затвор має еліптичну форму та закриває прохід із меншим зазором (у закритому положенні затвор перебуває під кутом 10–15° щодо вертикалі).

Регулювальні клапани — це один із найпоширеніших видів дросельних регулювальних органів. Вони використовуються для регулювання витрат рідин, пару та газів за будь-яких параметрів середовища.

За кількістю упорних поверхонь регулювальні клапани бувають одно- та дво-сідлоподібними. За конструкцією затвора їх поділяють на тарільчаті, пробкові

та поршневі. Одно-сідлоподібні клапани використовують для малих розмірів проходів (до 15 мм), забезпечуючи герметичність закриття проходу. Дво-сідлоподібні – для великих проходів, за умов, коли середовище має велику в'язкість або вміщує тверді частинки.

Регулювальні крани використовуються для регулювання витрат рідин та газів у трубопроводах невеликого перерізу. Прохідний переріз у них змінюється за рахунок зміщення отвору в затворі під час його повороту відносно перерізу корпусу. Для безперервного регулювання крани використовуються відносно рідко (здебільшого – для двопозиційного).

За конструкцією затвора крани бувають конічними, шаровими та циліндричними (інколи крани з циліндричними затворами можуть бути використані для безперервного регулювання).

Вибираючи регулювальні органи, слід пам'ятати, що їх властивості суттєво впливають на якість перехідного процесу. Як відомо коефіцієнт передачі розімкненої системи визначається за виразом:

$$K_{роз} = K_o K_{p.o.} K', \quad (5.133)$$

де K_o – коефіцієнт передачі об'єкта керування; $K_{p.o.}$ – те саме для регулювального органа; K' – те саме для інших елементів системи.

Отже, значення $K_{p.o.}$ впливає на $K_{роз}$.

У свою чергу $K_{роз}$ впливає на якість перехідного процесу. Тому надзвичайно важливо, щоб $K_{p.o.} = const$. Це можливо лише за умов лінійності витратної характеристики.

Під час вибору регулювальних органів є певна послідовність розрахунків (рис. 5.44):

- обчислюють максимальну пропускну здатність регулювального органа та його умовний діаметр;
- визначають робочий відрізок витратної характеристики;
- знаходять теоретичну витратну характеристику (для клапанів);
- визначають для рідини робочу ділянку кривої зміни перепаду тиску (для газу та пару знаходять лише максимальний та мінімальний перепади тиску).

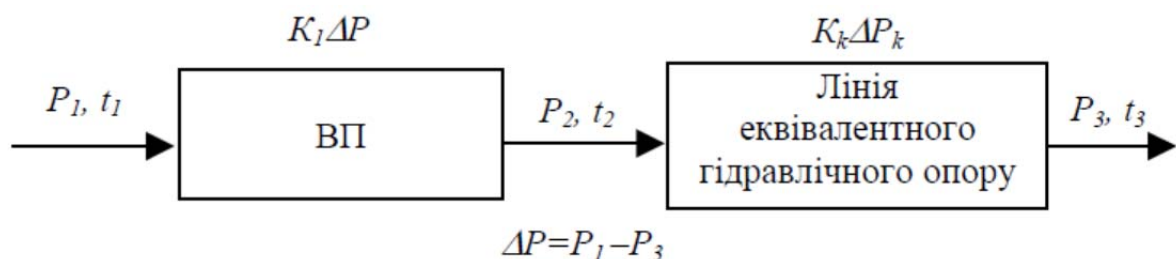


Рис. 5.44. Схема для розрахунку регулювальних органів

Слід зазначити, що за умов регулювання потоку в'язких рідин з індексом в'язкості $Z < 1000$, розрахунок проводять лише за першими двома переліченими пунктами. Індекс в'язкості при цьому визначається за формулою:

$$Z = 420 \frac{Q}{\gamma \sqrt{K_\gamma}}, \quad (5.134)$$

де Q – об’ємна витрата рідини; γ – в’язкість рідини.

Під час розрахунків слід користуватися формулами, наведеними в табл. 5.11.

Таблиця 5.11 – Формули для розрахунку пропускної здатності

Вид гідрравлічного опору	Перепад тиску	Витрата		
		рідини Q , м ³ /год	газу G , кг/год	пари G , кг/год
ВП	$\Delta P < P_1/2$	$K_\gamma = Q \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P}}$	$K_\gamma = \frac{G}{514} \sqrt{\frac{T_1}{\Delta P P_2 \gamma_n}}$	$K_\gamma = \frac{G}{31,6} \sqrt{\frac{V_2}{\Delta P}}$
	$\Delta P \geq P_1/2$		$K_\gamma = \frac{G}{257 P_1} \sqrt{\frac{T_1}{\gamma_n}}$	$K_\gamma = \frac{G}{22,4} \sqrt{\frac{V}{\Delta P}}$
Лінія	$\Delta P_n < P_2/2$	$K_{\gamma n} = Q \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_n}}$	$K_{\gamma n} = \frac{G}{514} \sqrt{\frac{T_2}{\Delta P_n P_3 \gamma_n}}$	$K_{\gamma n} = \frac{G}{31,6} \sqrt{\frac{V_3}{\Delta P_n}}$
	$\Delta P_n \geq P_2/2$		$K_{\gamma n} = \frac{G}{257 P_2} \sqrt{\frac{T_2}{\gamma_n}}$	$K_\gamma = \frac{G}{22,4} \sqrt{\frac{V_1}{P_2}}$

Примітка:

K_γ , $K_{\gamma n}$ – пропускна здатність виконавчого пристрою та лінії відповідно;

P_1, P_2, P_3 – абсолютний тиск до ВП, після нього та після лінії відповідно;

$\Delta P = P_1 - P_2$; $\Delta P_n = P_2 - P_3$; $\Delta P_c = P_1 - P_3$ – перепади тиску на ВП, на лінії та в системі;

γ, γ_n – об’ємна маса рідини і газу відповідно при 760 мм рт.ст. та 0 °С;

$T_1 = 273 + t_1$;

$T_2 = 273 + t_2$; t_1, t_2 – температура середовища до і після ВП відповідно;

V, V_1, V_2, V_3 – питомий об’єм пари відповідно при $0,5P_1$ і t_1 , $0,5P_2$ і t_2 , $0,5P_3$ і

t_3 .

Вищерозглянута методика передбачає таку послідовність розрахунків:

- максимальну пропускну здатність одержують за формулою:

$$K_\gamma = Q_{\max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{\min}}} = \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_c - \Delta P_{l \min}}}, \quad (5.135)$$

де Q_{\max} – максимальна витрата;

- регулювальний орган вибирають за даними каталогів за умови, що:

$$K_\gamma \geq 1,2 K_{\gamma \max}; \quad (5.136)$$

за розрахунковою пропускною здатністю регулювального органа вибирають необхідний його типорозмір (і за умовним діаметром також); вибраний регулювальний орган матиме певну технічну характеристику (для деяких регулювальних органів вона наведена в табл. 5.12).

Таблиця 5.12 – Технічна характеристика деяких регулювальних органів

D_v мм	K_v т/год	D_v мм	K_v т/год	Примітка
1	2	3	4	5
Регулювальні заслінки				
50	20	200	800	Регулювальні заслінки випускають двох типів, легкі – $p_v=6$ кг/см ² , температура до 225°C; важкі – $p_v=6,10$ і 25 кг/см ² , температура 225; 450 і 600°C
	50	250	500	
			1250	
	32	300	800	
65	80		2000	
	50		1250	
80	125	400	3200	
	80		2000	
100	200	500	5000	
	25		3200	
		600	8000	Для обох типів допустимий перепад тиску p , кг/см ² : 0,16; 0,25; 0,43; 0,63; 1,0; 1 6; 2,5; 4,0; 6,3; 10 і 16
150	500	700	5000	
	320		10000	
			8000	
Регулювальні клапани				
25	4	150	160	Двосідлоподібні регулювальні клапани СИУ випускають з лінійними і логарифмічними характеристиками, і з сальниковими або сильфонними ущільненнями штока, регулювальні і запірно-регулювальні. Клапани із сальником $p_v=16, 40, 64, 100$ і 160 кг/ см ² , температура 120; 225 і 450°C. Клапани із сильфоном – $p_v=16; 40$ і 64 кг/см ² , температура 120 і 225°C
	6,3		250	
	10		400	
50	25		630	
	40	200	400	
80	63		630	
	100	250	630	
100	63		1000	
	100	300	630	
	160		1000	
125	100		1600	
	160			Односідлоподібні регулювальні клапани СИУ випускають з лінійними і логарифмічними характеристиками, з сальниковими або сильфонними ущільненнями штока, регулювальні і запірно-регулювальні. Клапани із сальниками – $p_v = 10; 16; 40$ і 64 кг/см ² , із сильфоном – $p_v = 16; 40$ і 64 кг/см ² . Максимально допустима температура для клапанів 120; 225 та 450°C
25	250			
	3,2	125	80	
	5		125	
	8		200	
	12	150	125	
50	20		200	
	32			
	50	200	320	
	80			
100	50			
	80			
	125			

Подальші розрахунки регулювальних органів пов'язані з перевіркою можливості витримувати реальні перепади тиску в процесі їхньої експлуатації;

- знаходять пропускну здатність лінії еквівалентного гідравлічного опору за формулою:

$$K_{\gamma л} = Q_{max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{л max}}}, \quad (5.137)$$

де $K_{\gamma л}$ – пропускна здатність лінії еквівалентного гідравлічного опору; $\Delta P_{л max}$ – максимальний перепад тиску в лінії еквівалентного гідравлічного опору;

- дістають відношення перепаду тиску на регулювальному органі при максимальній витраті до перепаду тиску в лінії:

$$n = K_{\gamma в.н} / K_{\gamma л}, \quad (5.138)$$

- уточнюють перепад тиску на виконавчому пристрої:

$$\Delta P_{в.н} = \Delta P_c / (1 + n^2); \quad (5.139)$$

- визначають витрату рідини через ВП у разі перепаду тиску на ньому $\Delta P_{вн}$:

$$Q_{в.н} = K_{\gamma в.в.} \sqrt{\frac{\Delta P_{в.н}}{\gamma}}; \quad (5.140)$$

- знаходять відносну витрату рідини (максимальну та мінімальну):

$$\mu_{max} = Q_{max} / Q_{в.н}; \mu_{min} = Q_{min} / Q_{в.н}; \quad (5.141)$$

- за вибраною пропускною характеристикою (лінійною або рівновідсотковою) здобувають відповідну витрату (для знайденого значення n);

- визначають хід затвора регулювального органа, використовуючи для цього витратні характеристики (рис. 5.45);

- знаходять відносні значення перепадів тиску, використовуючи для регулювальних клапанів залежності переходу тиску від ходу затвора для регулювальних клапанів та поворотних заслінок (рис. 5.46) і пам'ятаючи, що відносні перепади тиску розраховуються у вигляді:

$$\beta = \Delta P / \Delta P_c, \quad (5.142)$$

де β – відносний перепад тиску;

- розраховують реальне максимальне значення перепаду тиску, порівнюють його з технічними можливостями регулювального органа та роблять висновки щодо доцільності його експлуатації. Пропускна здатність: $\gamma = 1$ г/см³; $\nu = 0,2$ с; $Q_{max} = 440$ м³/год; $Q_{min} = 220$ м³/год; $t_i = t_2 = 30$ °С; $p_1 = 15$ кгс/см²; $\Delta p_c = 10$ кгс/см²; $\Delta p_{max} = 4$ кгс/см².

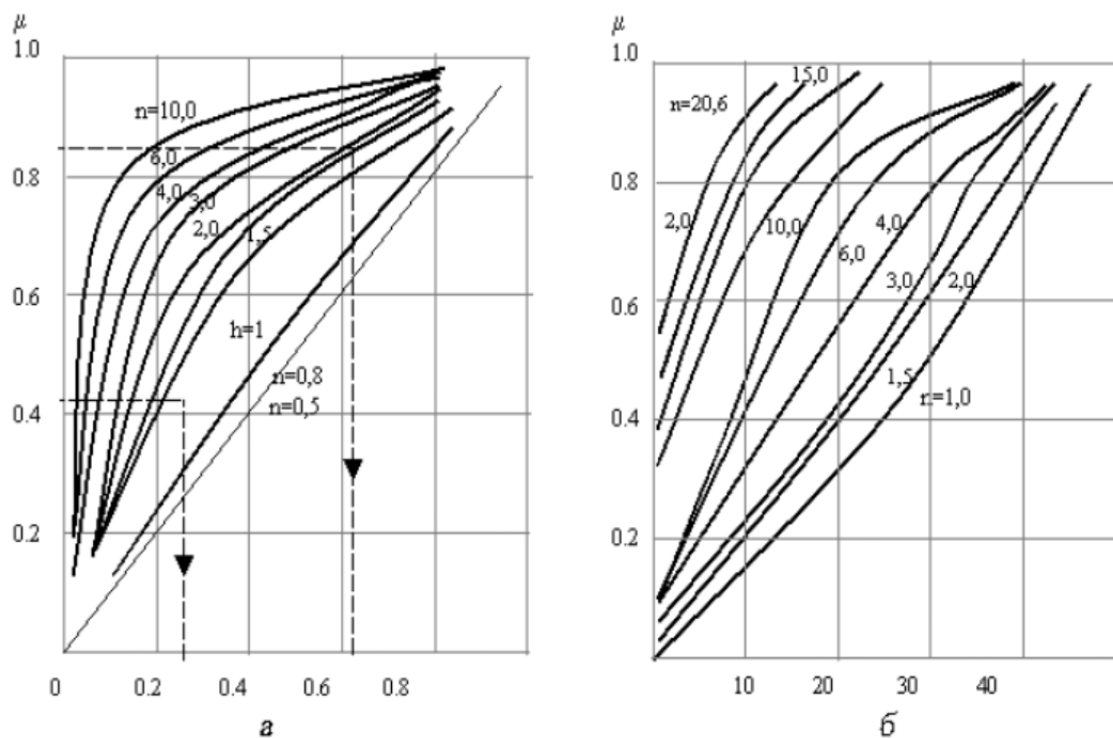


Рис. 5.45. Витратні характеристики для регулювальних клапанів (а) та поворотних заслінок (б)

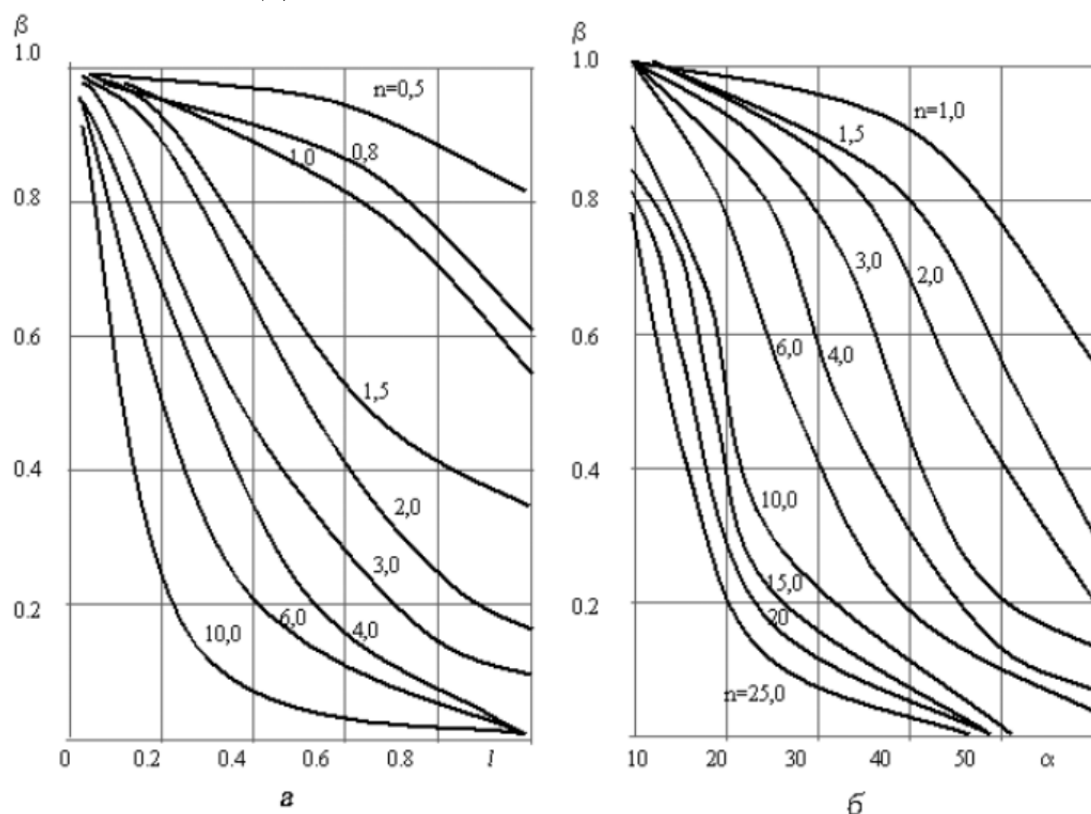


Рис. 5.46. Залежність перепаду тиску від ходу затвора для регулювальних клапанів (а) та поворотних заслінок (б)

Приклад 5.14. Вибрати регулювальний орган для таких умов:
середовище, що регулюється, – вода:

$$K_{\gamma_{\max}} = Q_{\max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta p_{\max}}} = Q_{\max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta p_c - \Delta p_{\max}}} = 440 \sqrt{\frac{1}{10 - 4}} = 180 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Поправку на в'язкість не вводимо, оскільки індекс в'язкості:

$$Z = 420Q/\nu\sqrt{K_y} = 420 \cdot 440/0,2\sqrt{180} > 1000.$$

За табл. 5.12 вибираємо дво-сідлоподібний регулювальний клапан з умовним діаметром $D_y = 125$ мм та пропускною здатністю $K_{yв.н.} = 250 \text{ м}^3/\text{год.}$ (умова $K_{yв.н.} > 1,2 K_{yв.мах} = 1,2 \cdot 180 = 216$ виконується, оскільки $250 > 216$).

Далі знаходимо робочу ділянку витратної характеристики. Для цього проведемо розрахунки:

$$K_{yл} = Q_{max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{лmax}}} = 440 \sqrt{\frac{1}{4}} = 220 \text{ м}^3/\text{год.}$$

$$n = K_{yвв.н.}/K_{yл} = 250/220 = 1,14;$$

$$\Delta p_{в.н.} = \Delta p_c/(1+n^2) = 10/(1+1,14^2) = 4,35 \text{ кгс/см}^2;$$

$$Q_{в.н.} = K_{yвв.н.} \sqrt{\frac{\Delta p_{в.н.}}{\gamma}} = 250 \sqrt{\frac{4,35}{1}} = 521 \text{ м}^3/\text{год.}$$

$$\mu_{max} = Q_{max}/Q_{в.н.} = 440/521 = 0,84;$$

$$\mu_{min} = Q_{min}/Q_{в.н.} = 220/521 = 0,422.$$

За графіком рис. 5.45 вибираємо витратну характеристику ВП, згідно з якою відносний хід затвора регулювального органа:

$$l_{min} = 0,29; l_{max} = 0,73,$$

де $l = S/S_{max}$; S – хід затвора регулювального органа; S_{max} – його максимальне переміщення.

За графіком рис. 5.46 здобуваємо перепад тиску (його відносне значення):

$$\beta_{max} = 0,9; \beta_{min} = 0,6.$$

Абсолютне значення перепаду тиску визначаємо за виразом (5.142):

$$\Delta p_{max} = \beta_{max} \Delta p_c = 0,9 \cdot 10 = 9,0 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\Delta p_{min} = \beta_{min} \Delta p_c = 0,6 \cdot 10 = 6,0 \text{ кгс/см}^2.$$

Отже, вибраний регулювальний орган зможе витримати реальні перепади тиску, які виникають під час його експлуатації.

Вибір виконавчих механізмів. Виконавчі механізми з'єднуються безпосередньо з регулювальними органами, переміщують ці органи відповідно до сигналу, що надходить від пристрою, який формує алгоритм керування.

За видом енергії, що споживається, виконавчі механізми поділяють на *електричні*, *пневматичні* та *гідравлічні*. У сільськогосподарському виробництві значного поширення набули електричні виконавчі механізми, які, в свою чергу поділяють на електромагнітні (соленоїдні приводи) та електродвигунні. Вибираючи їх, потрібно вміти розраховувати переставне зусилля або переставний момент, який вони мають розвинути.

Якщо шибер використовують як регулювальний орган, то для переміщення його затвора потрібне зусилля:

$$F = k\Delta p \cdot s + m, \quad (5.143)$$

де F – зусилля для переміщення затвора шиберу: k – коефіцієнт тертя (для чавуна по чавуні – 0,15; чавун по сталі – 0,18; сталь по чавуну – 0,14); Δp – перепад тиску на шибері (розраховується за методикою, що наведена вище); s , m – відповідно площа та маса рухомої частини шиберу.

Потужність приводу вибирають із великим запасом, оскільки коефіцієнт тертя значно зростає через забрудненість опорної поверхні в процесі експлуатації.

Вибираючи виконавчі механізми до поворотних заслінок, слід враховувати реактивний повертальний момент, що виникає внаслідок неоднакової швидкості потоку через верхню та нижню щілини, а також момент сил тертя в підшипниках. У разі відкриття проходу ці моменти додаються, у разі закриття – віднімаються. Реактивний повертальний момент:

$$M_{нов} = a\Delta p D^3, \quad (5.144)$$

де a – коефіцієнт, що залежить від кута повороту диска (рис. 5.47); Δp – перепад тиску на поворотній заслінці; D – діаметр диска.

Враховуючи, що момент сил тертя важко визначити, переставний момент вибирають у два рази більший за реактивний. Отже,

$$M_{в.м.} = 2M_{нов}, \quad (5.145)$$

де $M_{в.м.}$ – переставний момент виконавчого механізму.

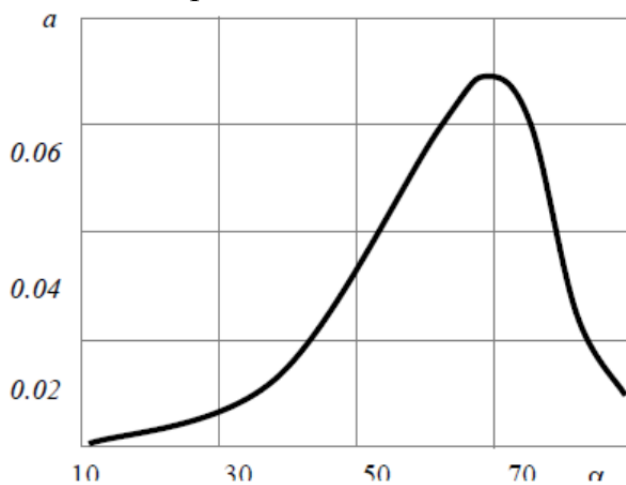


Рис. 5.47. Залежність коефіцієнта a від кута повороту диска заслінки α

Переставне зусилля, що потрібне для перестановки регулювального клапана складатиметься з сили незрівноваженості статичного тиску середовища на затвор, сили тиску середовища на шток, сили тертя штока по сальниковій набивці. Сила статичної незрівноваженості затвора визначають за формулою:

$$F_3 = \Delta p_{max} \Delta S_c, \quad (5.146)$$

де F_3 – сила статичної незрівноваженості; Δp_{max} – максимальний перепад тиску; ΔS_c – різниця в площах верхнього та нижнього сідел (визначається за табл. 5.13).

Таблиця 5.13 – Технічна характеристика регулюючих клапанів

$D_v, \text{ мм}$	$\Delta S_c, \text{ см}^2$	$d_{\text{шт}}, \text{ мм}$
15; 20; 25	0,7	8
32; 40; 50	1,2	10
65; 80	2	12
100; 125; 150	5	14
200; 250; 300	20	16

Сила тиску середовища на шток:

$$F_{\text{шт}} = 0,785 d_{\text{шт}}^2 P_{\text{кл}}, \quad F_{\text{шт}} = 0,785 d_{\text{шт}}^2 P_{\text{кл}} \quad (5.147)$$

де $d_{\text{шт}}$ – діаметр штока (визначається за табл. 5.11); $P_{\text{кл}}$ – максимальний тиск за клапаном.

Силу тертя штока визначити важко, тому переставне зусилля виконавчого механізму знаходять за виразом:

$$F_{\text{в.м.}} = 2(F_3 + F_{\text{шт}}), \quad (5.148)$$

де $F_{\text{в.м.}}$ – переставне зусилля виконавчого механізму.

Виконавчий механізм у системі автоматичного керування має так переміщувати регулювальний орган, щоб при цьому зміни в алгоритмі керування вносились мінімальні. Здебільшого це визначається способом з'єднання виконавчого механізму з регулювальним органом. Розрізняють безпосереднє, жорстке та тросове з'єднання.

Безпосереднє з'єднання найбільш просте, переміщення і швидкості виконавчого механізму та регулювального органу однакові. Цей спосіб набув поширення під час використання електромагнітних та багато-обертових виконавчих механізмів, що приводять у дію запірну трубопровідну арматуру.

Жорстке з'єднання здійснюється з допомогою важелів, рейкових передач. Жорсткі з'єднання бувають лінійними та нелінійними. У разі лінійного способу з'єднання значення переміщення вихідного вала виконавчого механізму та затвора регулювального органу відрізняються лише масштабами. У разі нелінійного – створюються нерівні переміщення затвора регулювального органу $h_{\text{р.о.}}$ за відносно рівних переміщень вихідного елемента виконавчого механізму $\varphi_{\text{в.м.}}$, що дає змогу за потребою змінити витратні характеристики. Розглянемо варіанти жорсткого з'єднання.

Кулачкове з'єднання наведено на рис. 5.48, а. Як видно, воно здебільшого використовується для лінеаризації витратної характеристики. Профілювання кулачка здійснюється на підставі матеріалів рис. 5.48, б.

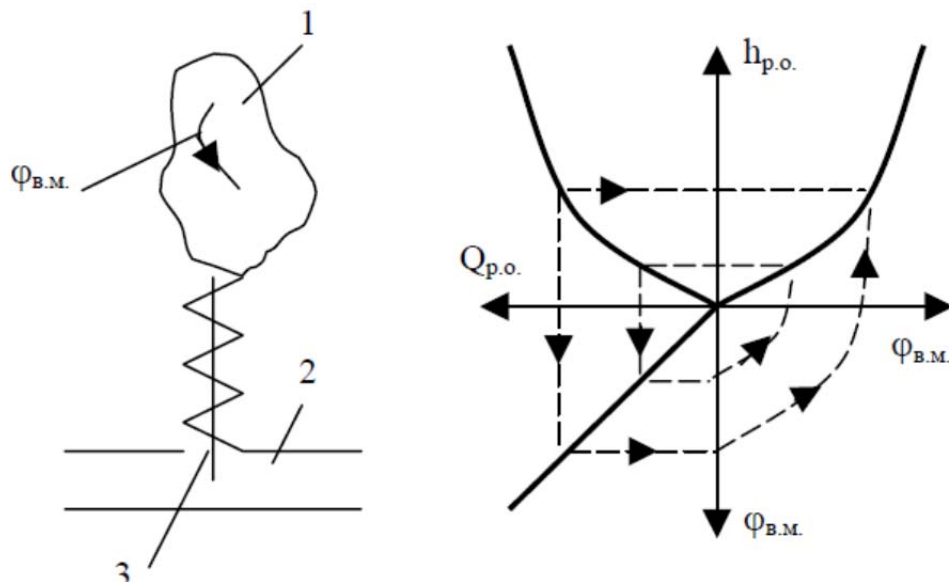


Рис. 5.48. Схема кулачкового з'єднання (а) та графічне пояснення до профілювання кулачкового з'єднання (б)

Більш складне з'єднання зображено на рис. 5.49. Воно може бути прямим (рис. 5.49, а) і зворотним (рис. 5.49, б). При зворотному кривошип та важіль рухаються у зворотних напрямках.

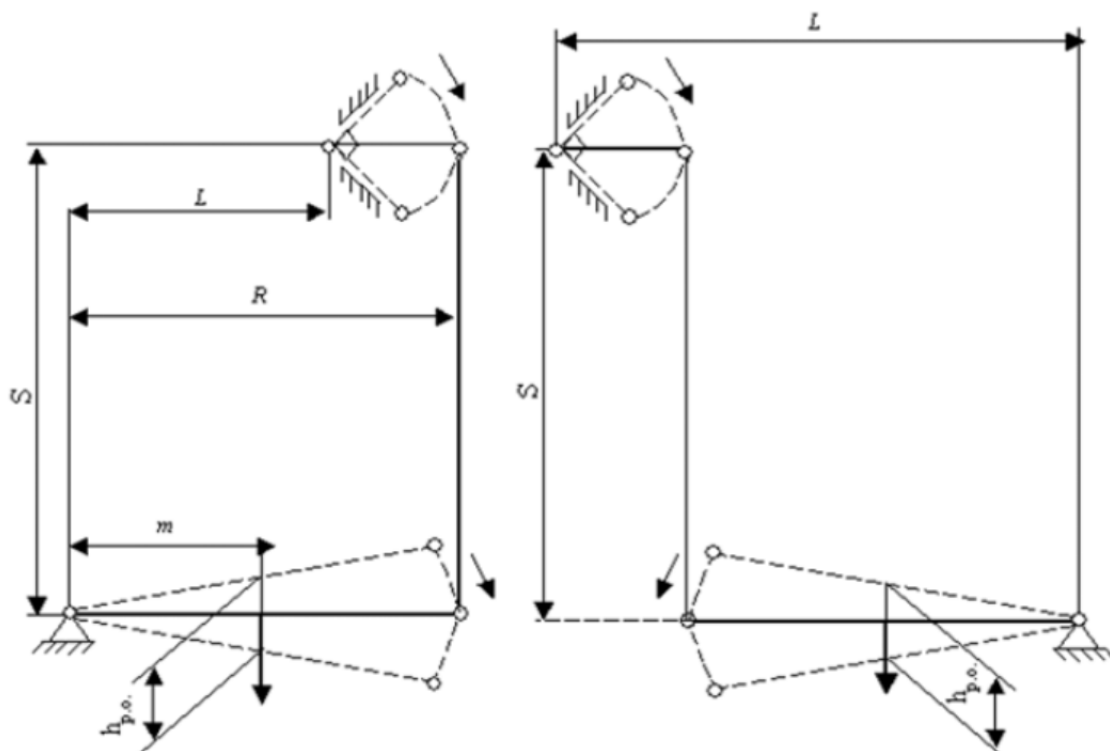


Рис. 5.49. Кінематика прямого (а) і непрямого (б) з'єднань виконавчого механізму та регулювального органа

За умов використання регулювального органа з лінійною витратною характеристикою або близькою до лінійної встановлені розміри з'єднання становитимуть:

$$S = (3 \dots 5)r, \quad (5.149)$$

- для прямого з'єднання:

$$L = R - r, \quad (5.150)$$

- для зворотного з'єднання:

$$L = R + r, \quad (5.151)$$

де r – розмір кривошипа (поставляється з виконавчим механізмом); R – розмір важеля.

Довжина важеля:

$$R = \frac{A \cdot m \cdot r}{S_{p.o.}}, \quad (5.152)$$

де $A = 1,4$ – коефіцієнт; m – відстань від шарніра до місця кріплення штока регулювального органа; $S_{p.o.}$ – хід затвора регулювального органа (із технічної характеристики).

Якщо витратна характеристика регулювального органа нелінійна, то для її лінеаризації беруть такі встановлені розміри з'єднання:

$$S = (3 \dots 5)r; \quad (5.149)$$

- для прямого з'єднання:

$$L = R - 0,6r; \quad (5.150)$$

- для зворотного з'єднання:

$$L = R + 0,6r. \quad (5.151)$$

Довжину важеля розраховують за виразом (5.152), беручи $A=1,2$.

Здебільшого використовуються одно-обертові виконавчі механізми, їх технічна характеристика наведена в табл. 5.14.

Таблиця 5.14 – Технічна характеристика одно-обертових виконавчих механізмів

Тип	Номинальний момент на валу, Н·м	Пусковий момент, Н·м	Часового оберту, с	Максимальний кут повороту вих. валу, град.	Напруга живлення, В	Споживана потужність, В·А	Габаритні розміри, мм
1	2	3	4	5	6	7	8
ПР-М	9,8	-	10;30	180	220	50	230x122x285
ПР-1М	9,8	-	60; 90; 120	-	-	-	230x122x180
ИМ-2/120	19,6	29,4	120	120	220	30	246x230x210
МЭО-1,6/40	15,7	23,5	40	120	220	40	234x234x213
МЭО-4/100	39,2	58,8	100	90; 240	220	64	260x330x300
МЭО-10/100	98	166,6	100	90; 240	220	64	260x330x300
МЭО-63/250	617,4	1048,6	250	90; 240	220	585	425x455x550
ИМТ-4/35	39,2	58,5	2,5	350	220/380	270	455x210x220

МЭК-10К/120	98	147	120	90; 270	127/220	180	326x313x435
МЭК-25К/40М	245	411,6	40	90; 240	220/380	115	491x523x392
БИМ-2,5/120	24,5	34,3	120	120	127	30	246x230x210
БИМ-25/100	245	303,8	100	90; 270	220	150	313x374x480

Багато-обертові виконавчі механізми використовують значно рідше і вибирають їх за умов, що:

$$M_{\partial.н.}/M_{екв} \geq 0,8...1,0, \quad (5.156)$$

де $M_{\partial.н.}$ – номінальне значення моменту на валу двигуна; $M_{екв}$ – еквівалентний момент. Еквівалентний момент можна визначити за таких умов:

$$M_{екв} = \sqrt{\left(M_{зр} + \frac{M_{\partial.н.}}{\eta \cdot i}\right)^2 + \left(\frac{J_{\partial} + J_n}{\eta} + \frac{J_n}{\eta^2 i^2}\right) \frac{a_n^2 i^2}{2}}, \quad (5.157)$$

де $M_{зр}$ – момент зрушення; J_{∂} – момент інерції двигуна; J_n – момент інерції, що створюється навантаженням; η – ККД редуктора; i – передавальне відношення редуктора;

$$i = \omega_{\partial.н.}/\omega_n = (\pi n_n / 30) / \omega_n, \quad (5.158)$$

де $\omega_{\partial.н.}$, ω_n – колова частота обертання двигуна та робочої машини (навантаження) відповідно.

Потужність виконавчого механізму при цьому вибирають за стандартною залежністю:

$$P = (1,2...1,5)(M_n \omega_n + J_n \omega_n a_n). \quad (5.159)$$

Приклад 5.15. Вибрати виконавчий механізм для слідкуючої системи за умов: статичний момент навантаження $M_n = 0,03724$ Н·м, максимальна швидкість об'єкта керування $\omega_n = 2$ с⁻¹, максимальне його прискорення $a_n = 6$ с⁻², момент інерції $J_n = 0,02058$ Н·м/с², ККД редуктора $\eta = 0,7$.

Потужність двигуна (багатообертового) вибирається за залежністю:

$$P = 1,5(0,03724 \cdot 2 + 0,02058 \cdot 2 \cdot 6) = 4,8 \text{ Вт.}$$

За матеріалами [1] вибираємо двигун типу АДП-123. Його параметри: номінальна потужність $P_{\partial.н.} = 4,1$ Вт; номінальний момент обертання $M_{\partial.н.} = 9,8$ – 10 – 3 Н·м; момент зрушення $M_{зр} = 29,4$ – 10^{-5} Н·м; номінальна частота обертання $n_n = 4000$ хв.⁻¹; момент інерції $J_{\partial.н.} = 7,84$ – 10^{-6} Н·м/с².

Для вибраного двигуна потрібен редуктор з передавальним відношенням:

$$i = \omega_{\partial.н.}/\omega_n = (\pi n_n / 30) / \omega_n = 400\pi / 2 \cdot 30 = 210.$$

Оскільки номінальна потужність вибраного двигуна дещо менша за потрібну потужність, перевіримо умову (5.156). Для цього розрахуємо еквівалентний момент:

$$M_{екв} = \sqrt{\left(29,4 \cdot 10^{-5} + \frac{0,03724}{0,7 \cdot 210}\right)^2 + \left(\frac{7,84 \cdot 10^{-6}}{0,7} + \frac{0,02058}{0,7^2 \cdot 210^2}\right) \frac{6^2 \cdot 210^2}{2}} = 140,14 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Так як:

$$M_{д.н.}/M_n = 9,8 \cdot 10^{-3} / 1,4 \cdot 10^{-3} \approx 7 > 0,8 \dots 1,0, \quad M_{д.н.}/M_n = 9,8 \cdot 10^{-3} / 1,4 \cdot 10^{-3} \approx 7 > 0,8 \dots 1,0,$$

то двигун АДП-123 може бути використаний як виконавчий механізм.

3.2. Вибір комплексу технічних засобів позиційних систем автоматичного регулювання

Основу позиційних систем автоматичного керування складають позиційні регулятори: дво-, три- та багатопозиційні. У сільськогосподарському виробництві найпоширенішими є двопозиційні регулятори. Вибір їх на стадії проектування розглянемо детальніше.

Метод Гольдфарба, ґрунтуючись на методі гармонічної лінеаризації, широко використовують для вибору позиційних регуляторів. Суть його полягає в пошуку параметрів настройки (у першу чергу це зона нечутливості), які забезпечуватимуть задані технологіями параметри автоколивань у системі. Пошук необхідних параметрів настройки, як правило, ведуть за кілька етапів: за умов незадовільних автоколивань зону нечутливості змінюють, що спричинює зміну амплітуди та частоти (вони визначають якість перехідного процесу).

Згідно з критерієм Найквіста (він використовується в методі Гольдфарба) маємо:

$$W_{роз}(j\omega) = W_{л.ч.}(j\omega)W_{н.ч.}(j\omega) = -1, \quad (5.160)$$

де $W_{л.ч.}(j\omega)$ – амплітудно-фазова характеристика лінійної частини системи автоматичного регулювання; $W_{н.ч.}(j\omega) = -1$ – амплітудно-фазова характеристика нелінійної частини системи автоматичного регулювання (статичні характеристики типових нелінійних елементів див. в табл. 5.4).

Амплітудно-фазова характеристика нелінійної частини системи може бути здобута на основі перетворення Лапласа з виразу (5.65):

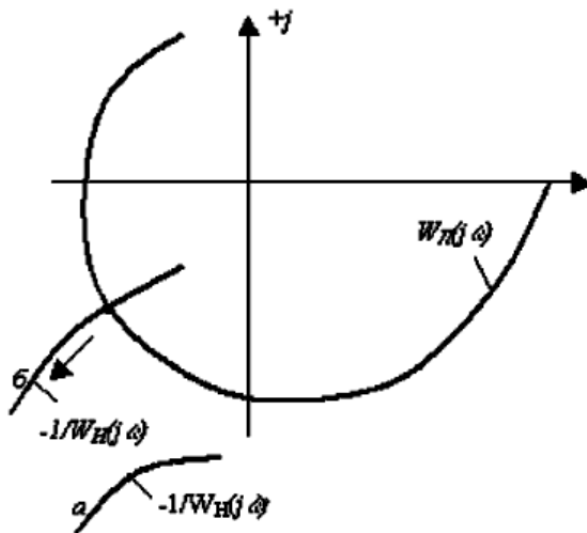
$$W_{н.ч.}(j\omega) = q_1 + q_2(j\omega/\omega) = q_1 + jq_2, \quad (5.161)$$

звідки видно, що $W_{н.ч.}(j\omega)$ не залежить від частоти. Отже,

$$W_{л.ч.}(j\omega) = -1/(q_1 + jq_2) = -(q_1^2 + jq_2^2) = Re_{н.ч.}^{(-1)}(A) + jIm_{н.ч.}^{(-1)}(A). \quad (5.162)$$

де $Re_{н.ч.}^{(-1)}(A)$ – дійсна обернена складова амплітудно-фазової характеристики нелінійної частини системи автоматичного регулювання; $Im_{н.ч.}^{(-1)}(A)$ – уявна обернена складова амплітудно-фазової характеристики нелінійної частини системи автоматичного регулювання.

Розв'язання рівняння (5.160) дає можливість знайти частоту ω^* та період T^* автоколивань (якщо вони існують).



a – для умов, коли в системі не виникають стійкі автоколивання; *б* – для умов, коли в системі стійкі автоколивання виникають

Рис. 5.50. Розташування годографів на комплексній площині:

Пошуки ω^* та T^* здійснюють у такій послідовності. На комплексній площині будують годограф амплітудно-фазової характеристики лінійної частини та годограф оберненої амплітудно-фазової характеристики нелінійної частини. Побудова останнього здійснюється із зміною амплітуди автоколивань A від 0 до ∞ (цей параметр входить до складу коефіцієнтів гармонічної лінеаризації q_1 та q_2). За взаємним розміщенням указаних годографів доводять висновок про наявність автоколивань у системі:

- якщо годографи не перетинаються (рис. 5.50, *а*), то в системі не існує автоколивань;
- якщо годографи мають точку перетину (рис. 5.50, *б*), то в системі існують стійкі автоколивання.

Параметри автоколивань ω^* та T^* знаходять, маючи координати точки D (рис. 5.50, *б*).

Приклад 5.16. Визначити параметри автоколивань в системі, якщо

$W_{л.ч.}(j\omega) = \frac{0,15e^{-40p}}{150p+1}$, пам'ятаючи, що розмірність коефіцієнта передачі лінійної частини $[\text{°C/V}]$; постійної часу $[с]$; часу запізнювання $[с]$; статична характеристика нелінійної частини наведена в табл. 5.4 поз. 3 з параметрами $a = 4 \text{ °C}$; $B = 190 \text{ В}$.

Побудова годографу амплітудно-фазової характеристики лінійної частини здійснювалась неодноразово для попередніх прикладів. Для нелінійної частини проведемо деякі перетворення, користуючись виразом (5.161) та матеріалами табл. 5.4.

$$W_{н.ч.}^{(-1)}(j\omega) = -\frac{\frac{4B}{\pi A^2} \sqrt{A^2 - a^2} - j \left(\frac{4Ba}{\pi A^2} \right)}{\left(\frac{4B}{\pi A^2} \right)^2 \left[(A^2 - a^2) + a^2 \right]} = -\frac{\pi \left(\sqrt{A^2 - a^2} + ja \right)}{4B}, \quad (5.163)$$

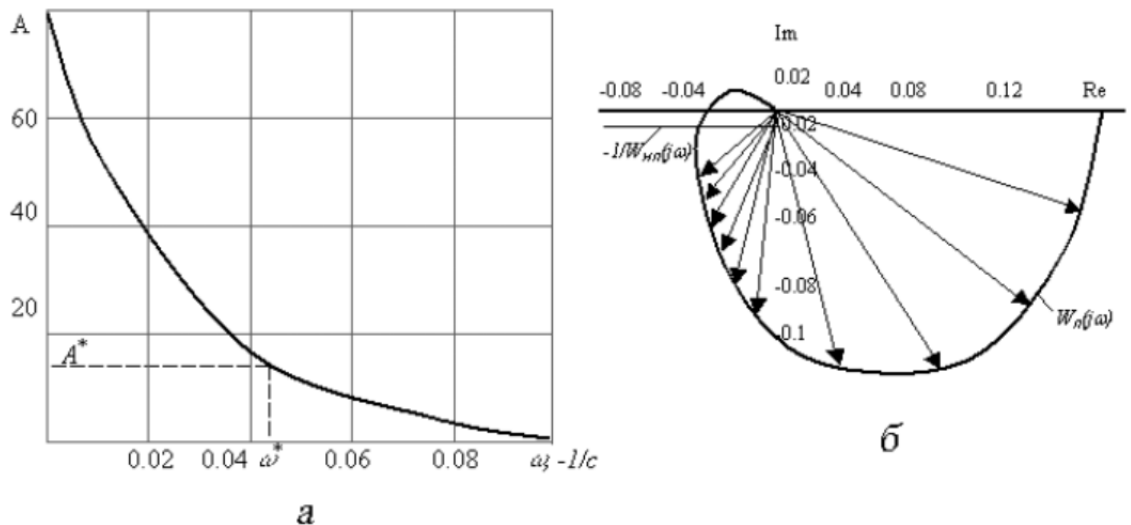
де

$$-Re_{н.ч.}(A) = -\frac{\pi}{4B} \sqrt{A^2 - a^2}; \quad (5.164)$$

$$-Im_{н.ч.}^{(-1)}(A) = -\frac{\pi a}{4B}. \quad (5.165)$$

Із виразу (5.165) видно, що $-Im_{н.ч.}^{(-1)}(A) = const$, тобто годограф $W_{н.ч.}^{(-1)}(j\omega)$ – це лінія, що паралельна дійсній осі комплексної площини.

Указані годографи зображені на рис. 5.51, а. Видно, що вони мають точку перетину, до того ж їхні напрями переміщення із зміною частоти ω та амплітуди A відповідають умовам Гольдфарба (напрями зображені стрілками), тобто в системі є стійкі автоколивання.



а – амплітудно-частотна характеристика лінійної частини системи; б – розташування годографів на комплексній площині

Рис. 5.51. Розрахунок параметрів автоколивань:

З виразу (5.164), умов задачі та координат точки матимемо:

$$-\frac{\pi}{4 \cdot 190} \sqrt{A^2 - 4^2} = -0,023; \quad A^* = 6,9^\circ \text{C}.$$

Для лінійної частини системи за формулою Ейлера:

$$[0,15 / (2250 + 1)] [\cos(40\omega^*) 150\omega^* \sin(40\omega^*)] = 0,023; \quad \omega^* = 0,042 \text{ с}^{-1}.$$

Отже, параметри автоколивань становлять: амплітуда $6,9^\circ \text{C}$; частота $0,042 \text{ с}^{-1}$. Якщо вказані параметри відповідають вимогам технологів, то залишається перевірити можливість використання метода Гольдфарба. Для цього побудуємо амплітудно-частотну характеристику лінійної частини системи:

$$A(\omega) = |W_n(j\omega)| = \sqrt{Re_n^2(\omega) Im_n^2(\omega)}. \quad (5.166)$$

Ця характеристика наведена на рис. 5.51, б де видно, що:

$$A(\omega^*) / A(3\omega^*) = 6,9 / 0,82 < 10.$$

Звідси висновок, що метод Гольдфарба не може бути використаний, оскільки лінійна частина системи не є фільтром нижчих частот.

Значна кількість сільськогосподарських об'єктів, (а об'єкт – це визначальна частина лінійної частини системи) не відповідає вимогам використання методу гармонічної лінеаризації, а тому доцільно познайомитись із методом припасувань, точніше його прикладною частиною.

Залежно від властивості об'єкта, параметрів статичної характеристики нелінійного елемента є розрахункові залежності для побудови перехідного процесу, що виникає в системі [5]. Наведемо їх для випадку використання двопозиційного регулятора як найбільш поширеного (табл. 5.15).

Використовуючи матеріали табл. 5.13, слід пам'ятати, що B , B_1 і B_2 – параметри статичної характеристики нелінійного елемента (за умов $B_1 = B_2$ ця характеристика симетрична; за умов $B_1 \neq B_2$ – несиметрична); A , A_1 , A_2 – амплітуда автоколивань ($A = A_1 + A_2$); t_1 , t_2 – час, коли на виході нелінійного елемента є сигнал B_1 та B_2 відповідно; T – період автоколивань ($T = t_1 + t_2$); η – кількість перемикань за одиницю часу.

У разі несиметричної статичної характеристики нелінійного елемента слід забезпечити згідно з вимогами технологів симетричність відхилень параметра, що регулюється, відносно заданого значення.

Для цього корегують завдання регулятору на величину:

- для астатичних об'єктів:

$$\varepsilon_0^{(a)} = \kappa_0(B_1 - B_2)\tau; \quad (5.167)$$

- для статичних об'єктів:

$$\varepsilon_0^{(c)} = \kappa_0(B_1 - B_2)(1 - e^{-\tau/T}). \quad (5.168)$$

Знак $\varepsilon_0^{(a)}$ та $\varepsilon_0^{(c)}$ вказує, в якій бік потрібно проводити корегування (“–” – у бік зменшення; “+” – у бік збільшення).

Таблиця 5.15 Розрахункові залежності для двопозиційного регулятора

Параметри статичної характеристики	Переда-точна функція об'єкта	Розрахункові залежності
1	2	3
1. $B_1 = B_2 = B$ $a \neq 0$	K_0/p	$t_1 = t_2 = \frac{2a}{K_0B}; T = \frac{4a}{K_0B}; \eta = \frac{K_0B}{2a}$ $A_1 = A_2 = a; \Delta A = 2a$
2. $B_1 \neq B_2$ $a \neq 0$		$t_1 = \frac{2a}{K_0B_1}; t_2 = \frac{2a}{K_0B_2}; T = \frac{2a}{K_0B} \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right); \eta = \frac{K_0B_1B_2}{a(B_1 + B_2)}$ $A_1 = A_2 = a; \Delta A = 2a$

3. $B_1 = B_2 = B$ $a \neq 0$	$\frac{K_0}{T_0 p + 1}$	$t_1 = t_2 = T_0 \ln \frac{K_0 B + a}{K_0 B - a}; T = 2T_0 \ln \frac{K_0 B + a}{K_0 B - a}; \eta = \frac{2}{T};$ $A_1 = A_2 = a; A = 2a = (K_0 B + a)(1 - e^{-t_1/T})$ $t_1 = T_0 \ln \frac{K_0 B_1 + a}{K_0 B_1 - a}; t_2 = T_0 \ln \frac{K_0 B_2 + a}{K_0 B_2 - a}; \eta = \frac{2}{T};$ $T = T_0 \ln \frac{(K_0 B_1 + a)(K_0 B_2 + a)}{(K_0 B_1 - a)(K_0 B_2 - a)}; A_1 = A_2 = a; \Delta A = 2a$
4. $B_1 \neq B_2$ $a \neq 0$		
5. $B_1 = B_2 = B$ $a \neq 0$	$\frac{K_0}{p} e^{-p\tau}$	$t_1 = t_2 = 2 \left[\tau + \frac{a}{K_0 B} \right]; T = 4 \left[\tau + \frac{a}{K_0 B} \right]; \eta = \frac{K_0 B}{2(a + K_0 B \tau)};$ $A_1 = A_2 = a + K_0 B \tau; \Delta A = 2(a + K_0 B \tau);$
6. $B_1 = B_2 = B$ $a = 0$		$t_1 = t_2 = 2\tau; T = 4\tau; \eta = \frac{1}{2\tau};$ $A_1 = A_2 = K_0 B \tau; \Delta A = 2K_0 B \tau$
7. $B_1 \neq B_2$ $a \neq 0$		$t_1 = \tau \left(1 + \frac{B_2}{B_1} \right) + \frac{2a}{K_0 B_1}; t_2 = \tau \left(1 + \frac{B_1}{B_2} \right) + \frac{2a}{K_0 B_2};$ $T = \tau \left(2 + \frac{B_1}{B_2} + \frac{B_2}{B_1} + \frac{2a}{K_0} \right) \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right);$ $\eta = \frac{2K_0 B_1 B_2}{(B_1 + B_2)(2a + K_0(B_1 + B_2))};$
8. $B_1 \neq B_2$ $a = 0$		$A_1 = a + K_0 B_1 \tau; \Delta A_2 = a + K_0 B_2 \tau; \Delta A = 2a + K_0 \tau(B_1 + B_2)$ $t_1 = \tau \left(1 + \frac{B_2}{B_1} \right); t_2 = \tau \left(1 + \frac{B_1}{B_2} \right); T = \tau \left(2 + \frac{B_1}{B_2} + \frac{B_2}{B_1} \right);$ $\eta = \frac{2B_1 B_2}{\tau(B_1 + B_2)^2};$ $A_1 = K_0 B_1 \tau; A_2 = K_0 B_2 \tau; \Delta A = K_0 \tau(B_1 + B_2)$
9. $B_1 = B_2 = B$ $a \neq 0$	$\frac{K_0}{T_0 p + 1} e^{-p\tau}$	$t_1 = t_2 = \tau + T_0 \ln \frac{2K_0 B}{K_0 B - a - e^{-\tau/T}}; T = 2t_1; \eta = \frac{2}{T};$ $A_1 = A_2 = K_0 B(1 - e^{-\tau/T}) + a e^{-\tau/T}; \Delta A = 2A_1;$

10. $B_1 = B_2 = B$ $a = 0$	$t_1 = t_2 = \tau + T_0 \ln(2 - e^{-\tau/T}); T = 2(\tau + T_0 \ln(2 - e^{-\tau/T}));$ $\eta = \frac{2}{T};$ $A_1 = A_2 = K_0 B(1 - e^{-\tau/T}); \Delta A = 2K_0 B(1 - e^{-\tau/T}).$
11. $B_1 \neq B_2$ $a \neq 0$	$t_1 = \tau + T_0 \ln \frac{(K_0(B_1 + B_2) - (K_0 B_2 - a)e^{-\tau/T})}{K_0 B_1 - a}; T = t_1 + t_2;$ $A_1 = K_0 B_1(1 - e^{-\tau/T}) + a e^{-\tau/T};$ $A_2 = K_0 B_2(1 - e^{-\tau/T}) + a e^{-\tau/T};$
12. $B_1 \neq B_2$ $a = 0$	$\Delta A = K_0(B_1 + B_2)(1 - e^{-\tau/T}) + 2a e^{\tau/T};$ $t_1 = \tau + T_0 \ln(1 + B_1/B_2)(1 - e^{-\tau/T});$ $t_2 = \tau + \ln(1 + B_1/B_2)(1 - e^{-\tau/T});$ $\eta = 2/T; T = t_1 + t_2;$ $A_1 = K_0 B_1(1 - e^{-\tau/T}); A_2 = K_0 B_2(1 - e^{-\tau/T});$ $\Delta A = K_0(B_1 + B_2)(1 - e^{-\tau/T}).$

Приклад 5.17. Для умов прикладу 5.16 знайти параметри автоколивань у системі.

Потрібні показники визначатимемо за формулами, наведеними в табл. 5.15, п. 9 (статична характеристика нелінійного елемента симетрична):

$$t_1 = t_2 = 40 + 150 \ln \left(\frac{2 \cdot 0,15 \cdot 190}{0,15 \cdot 190 - 4} \right) - e^{-\frac{40}{150}} = 106,8 \text{ с};$$

$$T = 2 \cdot 106,8 = 213,6 \text{ с};$$

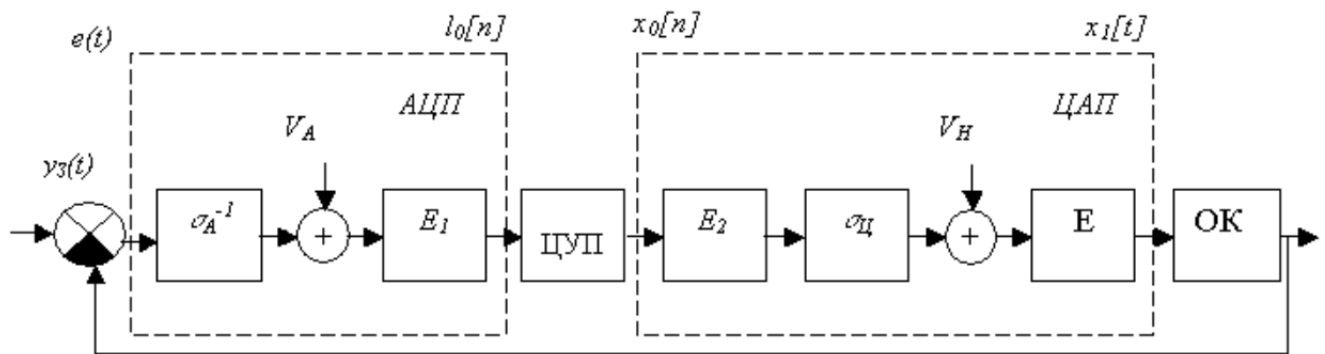
$$A_1 = A_2 = 0,15 \cdot 190(1 - e^{-40/150}) + 4e^{-40/150} = 9,7^\circ \text{C};$$

$n = 2/213,6 = 0,0094$ перемикань на секунду або 33,7 перемикань на годину.

Отже, остаточно $T^* = 213,6 \text{ с}$, $\omega^* = 0,029 \text{ с}^{-1}$, $A^* = 9,7^\circ \text{C}$.

3.3. Вибір комплексу технічних засобів імпульсних систем автоматичного керування

Останнім часом широкого застосування набули мікропроцесорні комплекти, які використовуються для формування відповідних алгоритмів керування. При цьому передбачається використання аналого-цифрових та цифро-аналогових перетворювачів. Ці пристрої забезпечують квантування за рівнем, тобто подібні системи є цифровими. Їх типова структура наведена на рис. 5.52. Центральним елементом цієї структури є цифровий керуючий пристрій, який може бути реалізований на мікро-ЕОМ і програмуючому контролері. Алгоритми керування при цьому реалізуються програмно.



АЦП – аналого-цифровий перетворювач; δ_A^{-1} – коефіцієнт передачі лінеаризованої частини вхідного перетворювача; V_A – джерело шуму квантування; IE_1 – імпульсний елемент першого роду; ЦУП – цифровий керуючий пристрій; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; IE_2 – імпульсний елемент другого роду, $\delta_{\text{Ц}}$ – коефіцієнт передачі лінеаризованої частини вихідного перетворювача, $V_{\text{Ц}}$ – джерело шуму квантування, E – екстраполятор; ОК – об’єкт керування (безперервна частина системи); $e(t)$ – похибка системи; $l_0[n]$ – гратчаста функція; $x_0[n]$ – дискретна послідовність; $x_1[t]$ – сталі протягом такту значення

Рис. 5.52. Типова структура цифрових систем автоматичного керування:

Програмну реалізацію алгоритмів керування можна подати у вигляді дискретної передаточної функції [5]:

$$D(z) = \frac{e(z)}{x(z)} = \frac{\sum_{i=1}^k b_i z^{-i}}{\sum_{i=1}^s a_i z^{-i}}, \quad (5.169)$$

де $e(z) = Z\{e[n]\}$; $x(z) = Z\{x[n]\}$; $e[n]$, $x[n]$ – гратчасті функції на вході та виході цифрового керуючого пристрою.

Дискретній передаточній функції (5.169) відповідає різницеве рівняння:

$$x[n] = b_0 e[n] + b_1 e[n-1] + \dots + b_k e[n-k] - a_1 x[n-1] - a_2 x[n-2] - \dots - a_s x[n-s] \quad (5.170)$$

Структурна схема програмної реалізації алгоритму (5.170) зображена на рис. 5.53.

Розглянемо на прикладі деяких типових алгоритмів цифровий варіант їхньої програмної реалізації.

Якщо в рівнянні (5.169) покласти $k = 2$, $s = 4$, $a_1 = 1$, то дістанемо ПІД-алгоритм керування:

$$D_{\text{pid}}(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}. \quad (5.171)$$

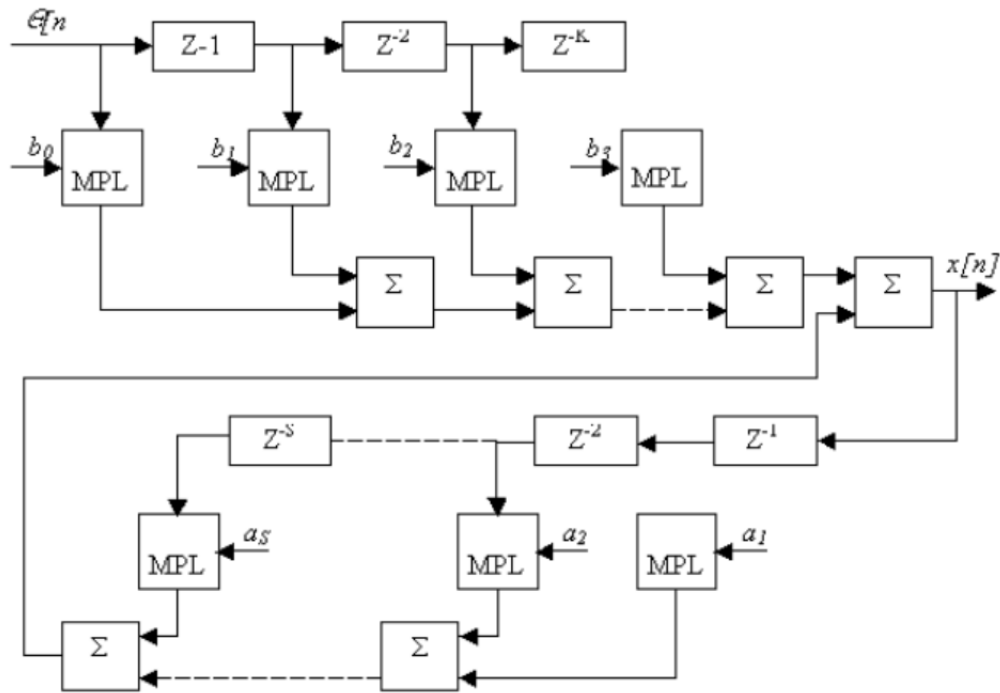


Рис. 5.53. Структурна схема програмної реалізації алгоритму (5.170)

Різницеве рівняння цього алгоритму має вигляд:

$$\begin{aligned} x[n] &= b_0 e[n] + b_1 e[n-1] + b_2 e[n-2] + x[n-1] = \\ &= x[n-1] + b_0 e[n] + b_1 e[n-1] + b_2 e[n-2]. \end{aligned} \quad (5.172)$$

Структурну схему програмної реалізації ПІД-алгоритму наведено на рис. 5.54. Вираз (5.173) – це цифровий варіант реалізації ПІД-алгоритму керування, для якого:

$$x(t) = e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + t_n \frac{de}{dt}. \quad (5.173)$$

Для малих періодів квантування T та за умов реалізації алгоритмів інтегрування методом прямокутників та алгоритмів, а диференціювання – методом простої різниці, рівняння (5.173) можна записувати у вигляді різницевого:

- для такту $x[n]$:

$$x[n] = e[n] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^n e[i-1] + \frac{T_n}{T} (e[n] - e[n-1]), \quad (5.174)$$

- для такту $x[n-1]$

$$x[n-1] = e[n-1] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^n e[i-1] + \frac{T_n}{T} (e[n-1] - e[n-2]). \quad (5.175)$$

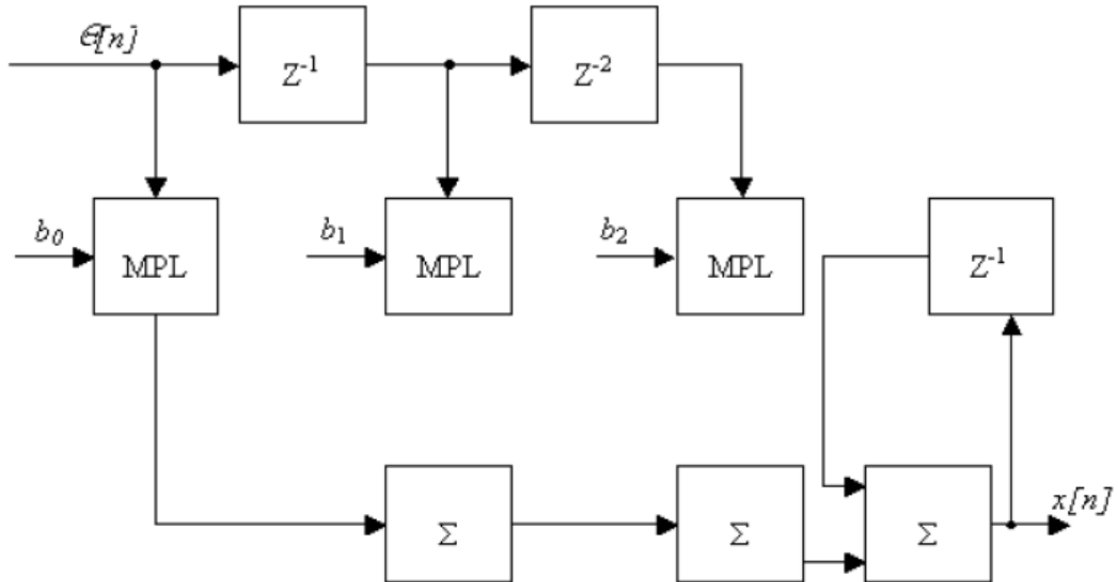


Рис. 5.54. Структурна схема програмної реалізації ПІД-алгоритму керування

Щоб дістати рекурентне рівняння, потрібно від виразу (5.174) відняти рівняння (5.175):

$$x[n] - x[n-1] = \left(1 + \frac{T_n}{T}\right)e[n] - \left(1 + \frac{2T_n}{T} - \frac{T}{T_i}\right)e[n-1] + \frac{T_n}{T}e[n-2]. \quad (5.176)$$

$$b_0 = 1 - \frac{T_n}{T}; \quad b_1 = -\left(1 + \frac{2T_n}{T} - \frac{T}{T_i}\right); \quad b_2 = \frac{T_n}{T}.$$

Позначимо тоді:

$$x[n] = x[n-1] + b_0e[n] + b_1e[n-1] + b_2[n-2]. \quad (5.177)$$

Як видно, вирази (5.177) та (5.173) ідентичні. Значення коефіцієнтів b_0 , b_1 та b_2 вибирають за умов реалізації значень T_i , T_n та періоду квантування T .

Якщо для виразу (5.169) взяти $k = 1$, $s = 2$, $a_1 = 1$, то здобудемо ПІ-алгоритм керування, дискретна передаточна функція якого матиме вигляд:

$$D_{pi}(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (5.178)$$

Відповідне їй різницеве рівняння:

$$x[n] = x[n-1] + b_0e[n] + b_1[n-1]. \quad (5.179)$$

Структурну схему програмної реалізації різницевого рівняння (5.178) наведено на рис. 5.55.

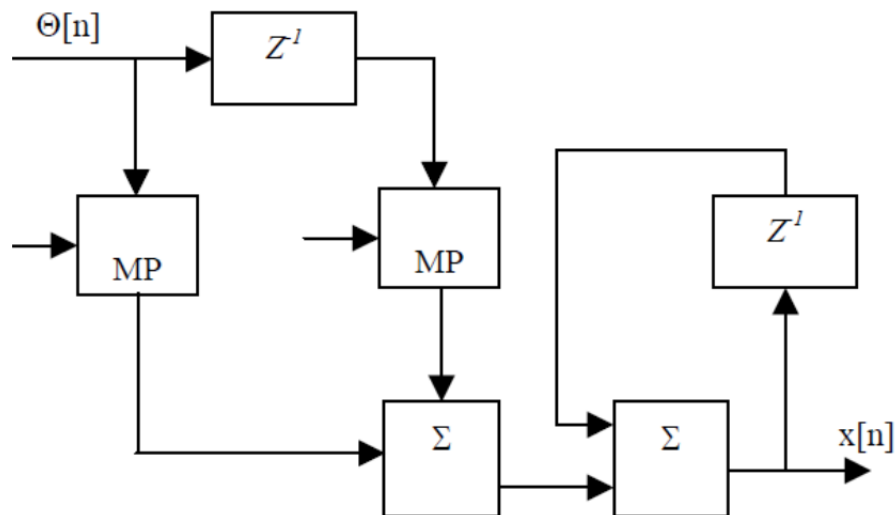


Рис. 5.55. Структурна схема програмної реалізації ПІ-алгоритму керування

Для малих періодів квантування T та при реалізації алгоритму інтегрування методом прямокутників інтегральне рівняння (5.180) набере вигляду різницевого.

Доведемо, що рівняння (5.179) дійсно відповідає ПІ-алгоритму керування, аналоговий варіант якого має вигляд:

$$x(t) = e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (5.180)$$

- для такту $x[n]$:

$$x[n] = e[n] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^n e[i-1]; \quad (5.181)$$

- для такту $x[n-1]$:

$$x[n-1] = e[n-1] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{n-1} e[n-1]; \quad (5.182)$$

Щоб здобути рекурентне рівняння, потрібно від виразу (5.181) відняти вираз (5.182):

$$x[n] - x[n-1] = e[n] - e[n-1] + (T/T_i - 1)e[n-1]. \quad (5.183)$$

Беручи $b_0 = 1$; $b_1 = T/T_i - 1$, матимемо:

$$x[n] - x[n-1] = b_0 e[n] + b_1 e[n-1]. \quad (5.184, \text{ а})$$

Як бачимо, рівняння (5.179) і (5.184) ідентичні.

Для ПІ-алгоритму керування дискретна передавальна функція має вигляд:

$$D_n(z) = b_0. \quad (5.184, \text{ б})$$

Її різницевий оригінал:

$$x[n] = b_0 e[n]. \quad (5.185, \text{ а})$$

Значення $b_0 = 1$ відповідає одиничному коефіцієнту передачі цифрового керуючого пристрою. Якщо $b_0 > 1$, то сигнал підсилюється, а якщо $b_0 < 1$, то послаблюється.

Показники точності обов'язково враховуються під час проектування цифрових систем автоматичного керування. Це може бути середньоквадратичне

або максимальне значення похибки. Найпоширенішим є варіант проектування, який обмежує максимальну похибку при відтворенні дії, що задається. Оскільки точність відтворення такої дії визначається низькочастотною ділянкою логарифмічної частотної характеристики розімкненої цифрової системи автоматичного керування, для якої виконується умова $\omega < 2/T$, то всі основні положення методики розрахунку аналогових систем керування можна поширити і на цифрові системи. При цьому типовою дією вибирають гармонічну:

$$\alpha(t) = \alpha_m \sin(\omega_k t), \quad (5.185, б)$$

де α_m , ω_k – відповідно амплітуда та колова робоча частота.

Похибка відтворення вхідного сигналу (5.185):

$$\theta(t) = \theta_0 + \dot{\theta}_\alpha + \ddot{\theta}_\alpha + \dots \quad (5.186)$$

де θ_0 – статична похибка; $\dot{\theta}_\alpha$ – швидкісна похибка; $\ddot{\theta}_\alpha$ – похибка, що визначається прискоренням вхідного сигналу.

Для аналогової системи максимальна похибка:

$$\theta_m = \frac{\alpha_m}{|1 + W(j\omega_k)|} = \alpha_m |H_\theta(j\omega_k)|, \quad (5.187)$$

де $W(j\omega_k)$ – частотна передаточна функція розімкненої системи при $\omega = \omega_k$.

Враховуючи, що ω_k міститься в низькочастотній ділянці, для якої справедливе співвідношення:

$$|H_\theta(j\omega_k)| \approx \frac{1}{W(j\omega_k)}, \quad (5.188)$$

можна записати:

- для аналогової системи:

$$\theta_m \approx \alpha_m / W(j\omega_k), \quad (5.189)$$

- для дискретної:

$$\theta_m[n] \approx \alpha_m[n] / W(j\lambda_k), \quad (5.190)$$

де $j\lambda_k$ – псевдочастота.

Якщо похибка $\theta_m[n]$ не повинна перевищувати за модулем заданого значення θ_{om} , при гармонічному вхідному сигналу, то частотна передаточна функція системи, що проектується, $W(j\lambda_k)$ має задовольнити вимогу:

$$|W(j\lambda_k)| > \frac{\alpha_m[n]}{\theta_m[n]}. \quad (5.191)$$

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика розімкненої цифрової системи має вигляд:

$$L(\lambda_k) = 20 \lg W(j\omega_k) > 20 \lg(\alpha_m[n] / \theta_m[n]). \quad (5.192)$$

Нерівність (5.192) накладає обмеження на низькочастотну частину логарифмічної амплітудно-частотної характеристики цифрової системи, яке полягає в тому, що для виконання умови $\theta_m[n] \leq \theta_{om}[n]$ ця характеристика повинна проходити вище точки A_k з координатами $\lambda = \lambda_k$, $L(\lambda_k) = 20 \lg(\alpha_m[n] / \theta_{om}[n])$ (рис. 5.56, а).

Часто вхідна дія не задається, а лише визначається її максимальна швидкість $\dot{\alpha}_m(t)$ і прискорення $\ddot{\alpha}_m(t)$, які мають бути відпрацьованими цифровою системою із похибкою, що не перевищує θ_{om} . У цьому разі розглядається еквівалентна гармонічна дія $\alpha_e(t)$, що характеризується максимальним значенням першої:

$$\dot{\alpha}_m = \omega_e \alpha_{e.m.}, \quad (5.193)$$

та другої похідних:

$$\ddot{\alpha}_m = \omega_m^2 \alpha_{e.m.}, \quad (5.194)$$

$$\omega_e = \dot{\alpha}_m / \alpha_m = \ddot{\alpha}_m / \dot{\alpha}_m, \quad (5.195)$$

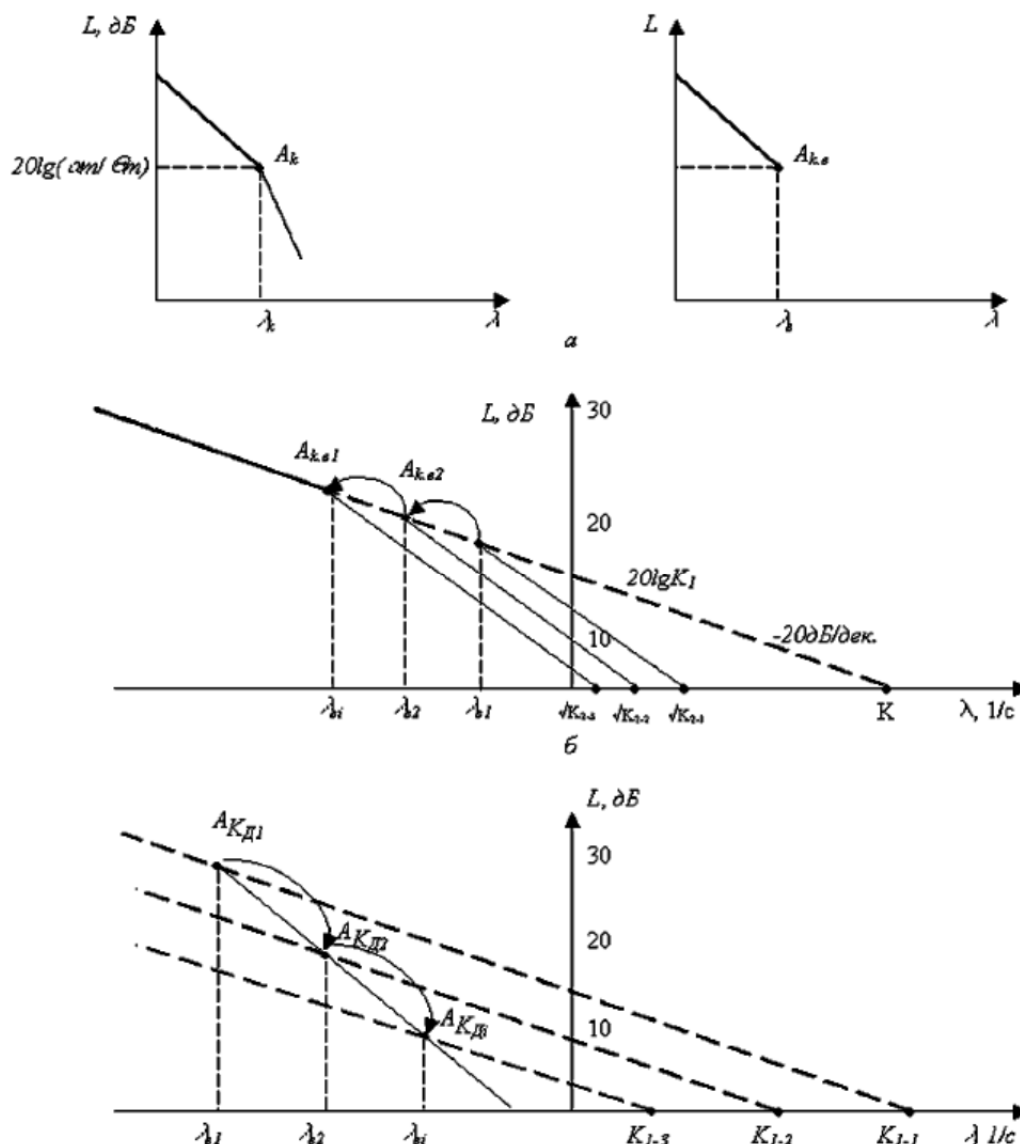
і еквівалентна амплітуда

$$\alpha_{e.m.} = \alpha_m / \omega_e = \alpha_m^2 / \ddot{\alpha}_m. \quad (5.196)$$

Із виразів (5.193) і (5.194) визначається еквівалентна частота гармонічної дії.

Використовуючи вирази (5.195) та (5.196), визначають координати точки A_κ нижче якої не повинна проходити логарифмічна амплітудно-частотна характеристика цифрової системи. Оскільки для низькочастотної ділянки $\lambda_e \approx \omega_e$, то координатами цієї точки будуть такі:

$$\lambda_e = \ddot{\alpha}_m / \dot{\alpha}_m; \quad L(\lambda_e) = 20 \lg |W(j\lambda_e)| = 20 \lg |\alpha_m^2 / (\theta_{om} \ddot{\alpha}_m)|. \quad (5.197)$$



а, б – розташування точки A_k та логарифмічної амплітудно-частотної характеристики системи за умов зниження вимог до максимальної швидкості вхідної координати та збереження її прискорення; в – логарифмічні амплітудно-частотної характеристики для різних добротностей системи

Рис. 5.56. Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики цифрових систем:

За умов зниження вимог до максимального прискорення вхідної дії α_m та збереження її швидкості α_m частота λ_e зменшується пропорційно α_m , а амплітуда $\alpha_{e.m.}$ при цьому зростає згідно з виразом:

$$\alpha_{e.m.} = \alpha_m / \lambda_e. \quad (5.198)$$

Це відповідає переміщенню контрольної точки A_k вгору по прямій із нахилом -20 дБ/дек. (рис. 5.56, б). Якщо амплітуда другої похідної прямує до нуля, то частота λ_e також прямує до нуля. Цей випадок відповідає режиму роботи цифрової системи зі сталою швидкістю вхідної дії $\alpha(t) = \alpha_m / \lambda_e$.

Для систем з астатизмом першого порядку похибка

$$\theta_\alpha = \dot{\alpha}_m / k_1, \quad (5.199)$$

де k_l – добротність за швидкістю, що визначається в точці перетину осі $\lambda_e = 1$ з логарифмічною амплітудно-частотною характеристикою (рис. 5.56, б).

Значення коефіцієнта k_l можна знайти, продовжуючи пряму з нахилом -20 дБ/дек. до перетину з віссю частот.

За умов зниження вимог до максимальної швидкості вхідної дії a_m та збереженні її прискорення \ddot{a}_m контрольна точка A_k переміщуватиметься в область більш високих частот, прямуючи по характеристиці з нахилом -40 дБ/дек. (рис. 5.56, в). Якщо амплітуда першої похідної прямує до нуля, то частота – до безкінечності. Цей випадок відповідає режиму роботи цифрової системи зі сталим прискоренням вхідного сигналу $a(t) = \ddot{a}_m t^2 / 2$. Для цього випадку встановлена похибка в системі з астатизмом другого порядку:

$$\theta_{\ddot{a}_m} = \ddot{a}_m / k_2, \quad (5.200)$$

де k_2 – добротність за прискоренням системи з астатизмом другого порядку; значення її дорівнює квадрату частоти в точці перетину прямої з нахилом -40 дБ/дек., проведеної із контрольної точки A_k з віссю абсцис.

З обмеженням значень першої і другої похідних від вхідної дії a та \dot{a} логарифмічна амплітудно-частотна характеристика системи, що проектується, не повинна потрапляти в заборонену зону, яка розміщена нижче двох прямих, що перетинаються, із нахилами -20 та -40 дБ/дек.

Отже, цифрові системи можна проектувати, будуючи бажані частотні характеристики.

Побудова бажаних частотних характеристик здійснюється за таких умов [6]:

- порядок астатизму цифрових систем не повинен перевищувати 2;
- логарифмічна амплітудно-частотна характеристика стійкої розімкненої цифрової системи перетинає вісь $L(\lambda)=0$ з нахилом -20 дБ/дек.;
- високочастотна асимптота логарифмічної амплітудно-частотної характеристики має нахил 0 дБ/дек.

Для систем з астатизмом першого порядку за умов, що задані a_m – максимальна швидкість вхідного сигналу, \dot{a}_m – максимальне його прискорення, θ_{am} – максимальна динамічна похибка, M – показник коливальності, T – період дискретності, послідовність побудови бажаної характеристики така:

1) за формулами (5.197) і (5.198) знаходять еквівалентну частоту λ_e та амплітуду; здобувають контрольну точку з координатами $(\lambda_e, 20 \lg(\alpha_{e.m}/\theta_{om}))$;

2) проводять першу низькочастотну асимптоту бажаної характеристики із спряженою частотою $\lambda_1 = \lambda_e$; бажану асимптоту характеристики в низькочастотній ділянці формують так, щоб її точка злому була вище контрольної A_k на 3 дБ, тобто необхідне значення добротності за швидкістю:

$$k_1 = \sqrt{2} \cdot \alpha_m / \theta_{om}; \quad (5.201)$$

3) визначають базову частоту для забороненої області:

$$\lambda_0 = \sqrt{K_2} = \sqrt{\frac{\alpha_m}{\theta_{om}}}, \quad (5.202)$$

враховуючи, що бажана характеристика має проходити на 3 дБ вище від забороненої зони, вираз (5.201) набере вигляду:

$$\lambda_0 = \sqrt{\sqrt{2} \cdot \ddot{\alpha}_m / \theta_{om}};$$

4) за вибраним показником коливальності визначають другу спряжену частоту для бажаної частотної характеристики:

$$\lambda_z = \lambda_0 \sqrt{(M-1)/M}, \quad (5.203)$$

при цьому мають забезпечуватись умови:

$$\lambda_{зр} < 2/T; \quad \mu_m \geq \arcsin(1/M), \quad (5.204)$$

де $\lambda_{зр}$ – частота зрізу; μ_m – запас стійкості за фазою; запас стійкості за фазою μ та амплітудно-частотна характеристика пов'язані між собою виразом:

$$\mu \geq \arccos[(A^2 + C)/2AC], \quad (5.205)$$

де A – значення амплітуди; C – координати центра кола на комплексній площині (коло – це заборонена зона для амплітудно-фазової характеристики):

$$C = M^2 / (M^2 - 1); \quad (5.206)$$

5) проводять другу асимптоту бажаної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики під нахилом -40 дБ/дек. до спряженої частоти λ_2 , третю – під нахилом -20 дБ/дек. від спряженої частоти λ_2 ;

6) вибирають третю спряжену частоту $\lambda_3 = 2/T$ так як передаточна функція цифрової системи з екстраполятором нульового порядку завжди в чисельнику має множник $(1 - T\lambda/2)$;

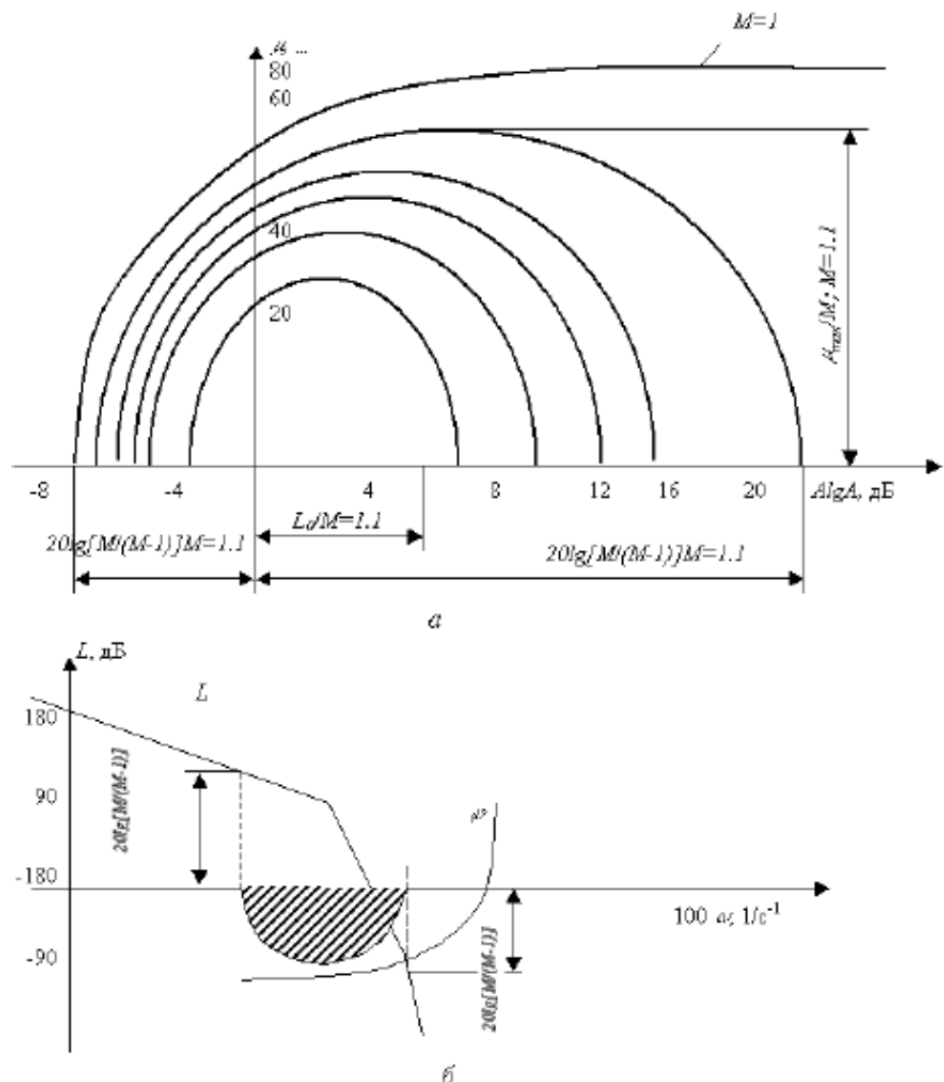
7) будують заборонену зону для фазової характеристики бажаної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики, перевіряючи, щоб фазова частотна характеристика $\phi(\lambda)$ не заходила в цю зону; заборонена зона будується на підставі виразу (5.205) для заданого показника коливальності та бажаної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (рис. 5.57, а, б).

Якщо не вдається виконати умову, що вказана в п.7, то синтез цифрової системи із заданими показниками неможливий.

Загальний вигляд частотних характеристик, їх розміщення дає змогу знайти дискретну, частотну та передавальну функції розімкненої цифрової системи $W(j\lambda)$.

Виконавши підстановку $\lambda = \frac{2\omega}{t}$, отримують вираз у вигляді ω – перетворення $W(\omega)$. Підставивши $\omega = \frac{z-1}{z+1}$, одержують дискретну передаточну

функцію. При цьому степінь чисельника не повинен бути більшим за степінь знаменника.



а – для заданого показника коливальності; б – бажана логарифмічна амплітудно-частотна характеристика

Рис. 5.57. Бажані логарифмічні амплітудно-частотні характеристики цифрових систем:

4. Типові комплекти технічних засобів автоматизації

Промисловість забезпечує випуск різноманітних засобів керування, регулювання, що входять до складу Державної системи приладів (ДСП) і які, у свою чергу, є частиною Універсальної системи приладів автоматичного контролю, регулювання та керування (УСП).

ДСП будується за блочно-модульним принципом. Вона також передбачає: єдину класифікацію засобів автоматизації; уніфікацію вхідних і вихідних сигналів та живлення; єдині вимоги до точності технічних засобів, їх надійності та умов експлуатації; єдиний ряд габаритних розмірів. Усе це дає змогу створювати потрібну структуру та забезпечує незалежну зміну окремих вузлів і модулів.

За функціональними ознаками всі вироби ДСП поділяють на пристрої для здобуття нормованої інформації про стан процесу; приймання, перетворення, зберігання, обробки інформації та формування команд керування; використання командної інформації під час технологічного процесу або передачі її оператору.

Враховуючи різноманітність задач, які слід розв'язувати для різних об'єктів керування, в ДСП розробляються різні комплекси технічних засобів автоматизації, найпоширенішими серед яких є такі:

- електрична агрегатна уніфікована система приладів та засобів автоматизації (ЕАУС);
- універсальна система елементів промислової пневмоавтоматики (УСЕППА);
- агрегатна система засобів телемеханіки (АСЗТ);
- агрегатований комплекс технічних засобів для локальних інформаційно-керуючих систем (КТЗ ЛІКС);
- агрегатна система засобів обчислювальної техніки (АСЗТ-М, АСЗТ-ПС) та ін.

Під час остаточного вирішення питання щодо вибору технічних засобів для проектованої системи, перевагу слід віддавати засобам, що входять до ДСП. Проте одночасно широко застосовують також засоби автоматизації, які не входять до ДСП, але погоджені з нею за параметрами вхідних та вихідних сигналів.

Запитання для самоперевірки

1. Як можна класифікувати системи автоматичного керування?
2. Які ви знаєте методи дослідження об'єктів?
3. Що вибираємо за допомогою динамічного коефіцієнта регулювання?
4. Розрахунок параметрів регуляторів на заданий запас стійкості системи?
5. Розрахунок параметрів регуляторів на заданий частотний показник коливальності?
6. Розрахунок параметрів регуляторів на заданий кореневий показник коливальності?
7. З чого складаються імпульсні системи автоматичного керування?
8. Як розрахувати коефіцієнт передачі П-регулятора на заданий запас стійкості за амплітудою?
9. Як розрахувати коефіцієнт передачі П-регулятора на заданий частотний показник коливальності M ?
10. Як розрахувати коефіцієнт передачі П-регулятора на заданий кореневий показник коливальності m ?
11. Які параметри характерні для регулюючих органів?
12. За яких умов здійснюється побудова бажаних частотних характеристик?

Лекція № 5

Розрахунок і вибір проводок та пускозахисної апаратури

План:

1. *Визначення розрахункових навантажень;*
2. *Розрахунок проводок і способи їх прокладання:*
 - 2.1. *Способи виконання проводок;*
 - 2.2. *Розрахунок внутрішніх і зовнішніх проводок;*
3. *Вибір пускозахисної апаратури та розподільних пристроїв;*
4. *Перевірка захисних апаратів на спрацювання під час короткого замикання;*
5. *Заходи щодо компенсації реактивної потужності;*

1. Визначення розрахункових навантажень

Потужність, що споживає електроустановка здебільшого є змінною. Вибір елементів системи електропостачання (проводів, джерел живлення, розподільних пристроїв, апаратури керування та захисту тощо) проводять за тривалим постійним навантаженням. Тому *розрахункове* – це тривале постійне навантаження, яке за тепловою дією (максимальна температура нагрівання провідника і теплове зношування його ізоляції) еквівалентне змінному навантаженню, що очікують при розрахунку.

Правильний розрахунок електричного навантаження забезпечує раціональне використання провідникових матеріалів і джерел живлення. Завищення або заниження розрахункового навантаження призводить до зниження ефективності роботи сільськогосподарських підприємств.

Розрахункове навантаження може бути *активним* (P , кВт), *реактивним* (Q , квар), *повним* (S , кВ·А) або *струмовим* (I , кА).

Провідник нагрівається внаслідок дії на нього навантаження (сили струму у ньому) за певний інтервал часу. Середнє навантаження за певний інтервал часу більш точно характеризує нагрівання провідника, ніж найбільше миттєве навантаження в цьому інтервалі. Величина і положення інтервалу усереднення на графіку електричного навантаження повинні бути вибрані такими, за яких здобуте при цьому усереднене навантаження було максимальним. Тривалість інтервалу усереднення не повинна бути дуже малою, бо не зможе встановитись режим нагрівання провідника. Проте вона не повинна бути й великою, оскільки в цьому разі всередині інтервалу можливий пік графіка, який спричинить значне перегрівання провідника.

Зв'язок між значеннями середнього навантаження і найбільшим перегріванням провідника в даному інтервалі буде найбільшим за таких умов:

- навантаження, яке передує даному інтервалу усереднення, не впливає суттєво на найбільше перегрівання в ньому елементів системи електропостачання;

- найбільше перегрівання досягається в кінці інтервалу усереднення.

Виходячи з цих умов, оптимальну тривалість усереднення ($T_{o.c}$) беруть рівною трьом сталим часу нагрівання провідника (T_H), тобто $T_{o.c}=3T_H$, оскільки за цей час перегрівання провідника при незмінному навантаженні досягає приблизно 95 % усталеного значення. Отже, в основу визначення розрахункового навантаження покладено принцип максимуму середнього навантаження за інтервал $T_{o.c}=3T_H$.

Провідники і кабелі найпоширеніших перерізів до 35 мм² і звичайних конструкцій мають сталу часу нагрівання близьку до 10 хв. Тому за інтервал усереднення беруть час, рівний 30 хв., а за рахункове навантаження – півгодинний максимум навантаження.

Для ділянок електричних мереж з перерізом проводів більшим за 35 мм² розрахункове навантаження слід визначати за період усереднення більший за 30 хв. Силові трансформатори мають сталу часу нагрівання (T_H), рівну 2–3 год. Це відповідає інтервалу усереднення $T_{o.c}$, рівному 6–9 год.

Розрахункові навантаження визначаються на підставі установленної потужності електроспоживачів. До установленної потужності споживачів належать:

- для електродвигунів тривалого режиму роботи – номінальна потужність на валу;
- для електродвигунів із повторно-короткочасним режимом роботи – номінальна потужність на валу, зведена до відносної тривалості вмикання, що дорівнює одиниці

$$P_{вст} = P_{нв} \sqrt{ПВ}, \quad (6.1)$$

де $P_{нв}$, $ПВ$ – відповідно паспортні дані про номінальну потужність і відносну тривалість вмикання;

- для зварювальних трансформаторів:

$$P_{вст} = S_{ном} \sqrt{ПВ} \cdot \cos\phi_{ном}, \quad (6.2)$$

де $S_{ном}$, $ПВ$ – відповідно паспортні значення повної потужності та повторності вмикання; $\cos\phi_{ном}$ – коефіцієнт потужності, який відповідає номінальному тривалому режиму роботи;

- для теплових установок – паспортна потужність;
- для газорозрядних ламп – сумарна номінальна потужність лампи і баласту (потужність баласту беруть 20 % від потужності люмінесцентних ламп зі стартерними схемами вмикання і 30 % – при безстартерних схемах вмикання, 10 % від потужності газорозрядних ламп високого тиску).

Електроустановки бувають три- і однофазні. Однофазні споживачі необхідно рівномірно розподіляти між фазами. Якщо це зробити неможливо, то еквівалентну трифазну потужність ($P_{екв}$) визначають залежно від кількості та схеми вмикання однофазних споживачів у трифазну мережу.

У разі вмикання однофазних споживачів на фазну напругу:

$$P_{екв} = 3P_{вст.ф}, \quad (6.3)$$

де $P_{вст.ф}$ – сумарна встановлена потужність однофазних споживачів максимально завантаженої фази.

У разі вмикання однофазних споживачів на лінійну напругу:

$$P_{екв} = 3P_{вст.л}, \quad (6.4)$$

де $P_{вст.л}$ – сумарна встановлена потужність однофазних споживачів максимально завантаженої лінійної пари проводів.

У разі вмикання однофазного споживача на лінійну напругу:

$$P_{екв} = 3P_{вст.}, \quad (6.5)$$

де $P_{вст.}$ – встановлена потужність однофазного споживача.

Розрахункові навантаження сільськогосподарських споживачів електроенергії обчислюють за такими методами: побудови графіка електричних навантажень, упорядкованих діаграм (ефективного числа електроспоживачів), коефіцієнта попиту, статистичним, коефіцієнта одночасності.

Метод побудови графіка електричних навантажень. Цей метод використовують за умови, що електроспоживачі працюють у тривалому режимі та відомий розпорядок їх роботи.

Спочатку складають технологічний графік роботи електроспоживачів за найбільш завантажену зміну (добу) у вигляді таблиці, в якій вказують: найменування технологічної операції, марку машини, установлену потужність, ККД, коефіцієнт завантаження за активною потужністю і час її використання; час роботи споживачів протягом зміни (добы).

Споживана електродвигуном потужність, кВт:

$$P_{сп} = \frac{P_{ном} K_3}{\eta}, \quad (6.6)$$

де $P_{ном}$ – номінальна потужність електродвигуна; η – коефіцієнт корисної дії електродвигуна, K_3 – середній коефіцієнт завантаження електродвигуна за активною потужністю (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Середні значення коефіцієнтів завантаження за активною потужністю основних видів електроспоживачів тваринницьких комплексів

Електроспоживачі	K_3
Машини для подрібнення кормів:	
зернових	0,8
соковитих	0,6
грубих	0,5
Конвеєри:	
скребкові	0,7
шнекові	0,4
для прибирання гною	0,5
Змішувачі кормів	0,6

Кормороздавачі	0,5
Доїльні установки	0,8
Вентилятори	0,6–0,8
Насоси, компресори	0,7
Електроустановки: нагрівальні	1
освітлювальні	1

За даними технологічного графіка роботи електроспоживачів будують графік електричних навантажень. У напрямі осі ординат відкладають значення споживаної потужності, а у напрямі абсцис - тривалості роботи електроспоживачів. Потужності, що збігаються у часі, нарошують одна на одну. Півгодинний максимум навантаження $P_{роз}$ визначають на ділянці, де протягом півгодини споживана потужність найбільша. Якщо максимум навантаження триває менше півгодини, то знаходять еквівалентну потужність за найбільш завантажений півгодинний інтервал:

$$P_{роз} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}, \quad (6.7)$$

де P_1, P_2, \dots, P_n – потужності окремих ділянок півгодинного піка навантажень; t_1, t_2, \dots, t_n – час дії цих потужностей.

Для електроустановок, які потрапляють у максимум активного навантаження, визначають сумарну споживану реактивну потужність $Q_{роз}$.

У разі номінального навантаження, квар, споживана електродвигуном реактивна потужність:

$$Q_{ном} = \frac{P_{ном}}{\eta} \operatorname{tg} \varphi. \quad (6.8)$$

У разі часткового навантаження:

$$Q_4 = Q_0 + \Delta Q \beta_2, \quad (6.9)$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ – тангенс кута, що відповідає номінальному значенню коефіцієнта потужності електродвигуна; Q_0 – реактивна потужність холостого ходу електродвигуна; $\beta = M/M_{ном}$ – коефіцієнт завантаження електродвигуна за моментом на валу.

Споживана асинхронним електродвигуном реактивна потужність мало залежить від його завантаження, бо при холостому ході вона становить 60–85 % $Q_{ном}$ [3]. Тому для спрощення розрахунків можна використовувати формулу (6.8).

Метод упорядкованих діаграм (ефективного числа споживачів). Цей метод широко застосовують у промисловості. Він рекомендований і для сільського господарства. Його застосовують при визначенні розрахункових навантажень на вводах у майстерні, переробні підприємства тощо.

Упорядкована діаграма – це графік електричних навантажень, що побудований за спадними ординатами.

За цим методом:

$$P_{роз} = K_{макс} P_{сер.зм}, \quad (6.10)$$

де $K_{макс}$ – коефіцієнт максимуму; $P_{сер.зм}$ – середнє навантаження за максимально завантаженою зміну.

За максимально завантаженою зміну середнє активне навантаження, кВт,

$$P_{сер.зм} = W_{зм} / T_{зм}, \quad (6.11)$$

де $W_{зм}$ – електроенергія, спожита за максимально завантаженою зміну, кВт·год; $T_{зм}$ – тривалість зміни, год.

Формулу (6.10) можна подати у вигляді:

$$P_{роз} = K_{макс} K_{\phi} \sum_{i=1}^{i=n} P_{вст i}, \quad (6.12)$$

де $\sum_{i=1}^{i=n} P_{вст i}$ – сумарна встановлена потужність електроспоживачів, кВт; K_{ϕ} – коефіцієнт використання встановленої потужності; $P_{вст i}$ – встановлена потужність i -го споживача.

Коефіцієнт максимуму знаходять за його залежністю від ефективного числа електроспоживачів і коефіцієнта використання встановленої потужності:

$$k_{макс} = f(n_{еф}, k_{\phi}). \quad (6.13)$$

Ефективне число електроспоживачів – це таке число електроспоживачів, рівних за потужністю і однорідних за режимом роботи, які зумовлюють ту саму величину розрахункового навантаження, що й група такої ж сумарної потужності споживачів, проте різних за потужністю і режимом роботи:

$$n_{еф} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{i=n} P_{вст i} \right)^2}{\sum_{i=1}^{i=n} P_{вст i}^2}. \quad (6.14)$$

Якщо всі споживачі однакові за потужністю, то їх ефективне число дорівнюватиме реальному числу:

$$n_{еф} = \frac{n^2 P_{вст i}^2}{n \cdot P_{вст i}^2} = n.$$

У таблиці 6.2 наведено значення коефіцієнта $K_{м}$ залежно від ефективного числа електроспоживачів $n_{еф}$ та коефіцієнта використання встановлювальної потужності K_{ϕ} . Якщо кількість споживачів менша за чотири, то цей метод не застосовують.

Таблиця 6.2 – Визначення $K_{макс}$ за $n_{еф}$ і K_{ϕ}

n_{ef}	Значення K_{\max} при K_B								
	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
4	3,43	3,11	2,64	2,14	1,87	1,65	1,46	1,29	1,14
5	3,23	2,87	2,42	2,00	1,76	1,57	1,41	1,26	1,12
6	3,04	2,64	2,24	1,88	1,66	1,51	1,37	1,23	1,10
7	2,88	2,48	2,10	1,80	1,58	1,45	1,33	1,21	1,09
8	2,72	2,31	1,99	1,72	1,52	1,40	1,30	1,20	1,08
9	2,56	2,20	1,90	1,65	1,47	1,37	1,28	1,18	1,08
10	2,42	2,10	1,84	1,60	1,43	1,34	1,26	1,16	1,07
12	2,24	1,96	1,75	1,52	1,36	1,28	1,23	1,15	1,07
14	2,10	1,85	1,67	1,45	1,32	1,25	1,20	1,13	1,07
16	1,99	1,77	1,61	1,41	1,28	1,23	1,18	1,12	1,07
18	1,91	1,70	1,55	1,37	1,26	1,21	1,16	1,11	1,06
20	1,84	1,65	1,50	1,34	1,24	1,20	1,15	1,11	1,06
25	1,71	1,55	1,40	1,28	1,21	1,17	1,14	1,10	1,06
30	1,62	1,46	1,34	1,24	1,19	1,16	1,13	1,10	1,05
35	1,56	1,41	1,30	1,21	1,17	1,15	1,12	1,09	1,05
40	1,50	1,37	1,27	1,19	1,15	1,13	1,12	1,09	1,05
45	1,45	1,33	1,25	1,17	1,14	1,12	1,11	1,08	1,04
50	1,40	1,30	1,23	1,16	1,13	1,11	1,10	1,08	1,04
60	1,32	1,25	1,19	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,03
70	1,27	1,22	1,17	1,12	1,10	1,10	1,09	1,06	1,03
80	1,25	1,20	1,15	1,11	1,10	1,10	1,08	1,06	1,03
90	1,23	1,18	1,13	1,10	1,09	1,09	1,08	1,05	1,02
100	1,21	1,17	1,12	1,10	1,08	1,08	1,07	1,05	1,02
120	1,19	1,16	1,12	1,09	1,07	1,07	1,07	1,05	1,02
140	1,17	1,15	1,11	1,08	1,06	1,06	1,06	1,05	1,02
160	1,16	1,13	1,10	1,08	1,05	1,05	1,05	1,04	1,02
180	1,16	1,12	1,10	1,08	1,05	1,05	1,05	1,04	1,01
200	1,15	1,12	1,09	1,07	1,05	1,05	1,05	1,04	1,01

Для ділянок електричних мереж, виконаних проводами перерізом понад 35 мм², розрахункові навантаження слід визначати не за тридцяти хвилинним максимумом, а за максимумом більшої тривалості. У таких випадках проводять перерахунок коефіцієнта максимуму на більшу тривалість $t = 3T_H$ (хв):

$$k_{\max t} = 1 + \frac{k_{\max} - 1}{\sqrt{\alpha}}, \quad (6.15)$$

де $\alpha = t/30$.

Значення сталої часу нагрівання T_0 для проводів і кабелів різних перерізів наведено в довідковій літературі. Під час прокладання на ізоляторах ізольованих проводів з перерізом 35; 50; 70; 95; 120; 150 мм² сталі часу нагрівання відповідно

становлять 12; 15; 18,4; 21,4; 24,3; 27,5 хв.; а під час прокладання трьох таких проводів у сталевій трубі – 19,5; 23,5; 27,5; 32;35,8; 41 хв.

Статистичний метод. Суть цього методу полягає в тому, що на діючих підприємствах протягом кількох діб у періоди максимальних навантажень дослідним шляхом знаходять тридцяти хвилинні максимуми. Потім здобувають генеральну середню (математичне сподівання) навантаження:

$$\bar{P} = P_{сер} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n}; \quad (6.16)$$

та середньозважене відхилення:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{n.сер} = \sqrt{\frac{(P_1 - \bar{P})^2 + (P_2 - \bar{P})^2 + \dots + (P_n - \bar{P})^2}{n}}, \quad (6.17)$$

де $P_1 + P_2 + \dots + P_n$ – сума тридцяти хвилинних максимумів, визначених дослідним шляхом.

Розрахункове навантаження, кВт:

$$P_{роз} = P_{сер} + \beta \sigma n_{сер},$$

де β – коефіцієнт надійності (беруть рівним 2,5).

Дані досліджень ($P_{роз}$) використовують при проектуванні електрифікації підприємств, що аналогічні досліджуваним.

Метод коефіцієнта одночасності. Його використовують для визначення розрахункових навантажень електричних ліній 0,38 кВ та трансформаторних підстанцій 6-35/0,4 кВ [17].

Розрахункові денні P_d і вечірні P_v максимуми навантаження здобувають за формулами:

$$P_d = \sum_{i=1}^{i=n} P_{di} K_o, \quad (6.18)$$

$$P_v = \sum_{i=1}^{i=n} P_{vi} K_o, \quad (6.19)$$

де P_{di} , P_{vi} – відповідно денне і вечірнє розрахункове навантаження 2-ої ділянки лінії чи на вводі i -ого споживача; K_o – коефіцієнт одночасності (відношення суміщеного максимуму навантаження до суми максимумів навантаження окремих споживачів чи їх груп).

За розрахункове навантаження $P_{роз}$ беруть більше з P_d і P_v . Розрахункові навантаження однорідних споживачів, які за потужністю різняться не більш ніж у чотири рази, підсумовують, враховуючи такі коефіцієнти одночасності, що наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Значення коефіцієнта одночасності від кількості споживачів

Кількість споживачів	2	3	4...5	6...7	8...10	11...15	16...20	21...40	41...70	71...150	Понад 150
K_o	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,36

Розрахункові навантаження на вводах у виробничі, громадські та комунальні підприємства і приміщення наведено у довідковій літературі [17]. Рекомендується також їх визначати методом побудови графіка електричних навантажень або за формулою:

$$P_{роз} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{P_{встn} K_3}{\eta} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{P_{встm} t K_3}{0,5\eta}, \quad (6.20)$$

де $P_{встn}$ – встановлена потужність кожного з n електроспоживачів, що беруть участь у формуванні максимального навантаження і працюють під час максимуму навантаження більше, ніж 0,5 год., кВт; K_3 – середній коефіцієнт завантаження кожного електроспоживача за активною потужністю; η – ККД кожного електроспоживача; $P_{встm}$ – встановлена потужність кожного з m електроспоживачів, що беруть участь у формуванні максимального навантаження і працюють під час максимуму навантаження менше ніж 0,5 год., кВт; t – тривалість безперервної роботи кожного з електроспоживачів з потужністю – $P_{встm}$, год ($< 0,5$ год).

Електроспоживачів, що беруть участь у створенні максимуму електричного навантаження, визначають, детально аналізуючи технологічний процес з урахуванням організації робіт і послідовності виконання всіх операцій.

Повну розрахункову потужність, кВт·А, дістають за формулою:

$$S_{роз} = P_{роз} / \cos\phi. \quad (6.21)$$

Значення коефіцієнтів потужності з максимумом навантаження на вводах окремих споживачів (без урахування компенсації) подано в табл. 6.4.

Навантаження вуличного освітлення в сільських населених пунктах визначають за нормами, поданими у табл. 6.5. Навантаження зовнішнього освітлення території господарських центрів беруть у розрахунку 150 В·А на одне приміщення.

Таблиця 6.4 – Значення коефіцієнтів потужності на вводах споживачів

Споживачі	Коефіцієнт потужності	
	денний	вечірній
Тваринницькі і птахівницькі приміщення	0,75	0,85
Те саме з електрообігріванням	0,92	0,96
Кормоцех	0,75	0,85
Майстерні	0,65	0,70
Зерноочисний тік	0,70	0,75
Млин, олійниця	0,85	0,86
Зрошувальна система	0,80	0,80
Електротеплові установки	1,00	1,00
Громадські та комунальні підприємства	0,92	0,95
Житлові будинки	0,96	0,98

Таблиця 6.5 – Норми вуличного освітлення сільських населених пунктів

Характеристика вулиці	Розрахункове навантаження, В·А	
	на 1 пог. м довжини вулиці	на 1 будинок
Центральні вулиці завширшки понад 20 м з багатоповерховою забудовою	5,0	200
Центральні вулиці завширшки понад 20 м з одноповерховою забудовою і проїзною частиною завширшки близько 10 м	3,5	140
Інші вулиці	2,0	80

Розрахункові навантаження майстерень та інших виробничих споруд з електрообладнанням, що аналогічні за складом і режимами роботи промисловим установкам, можна дістати методом упорядкованих діаграм.

Розрахункове навантаження споживчої трансформаторної підстанції здобувають, підсумовуючи навантаження ліній, які від неї відходять, за допомогою таблиці, поданої в [17].

Величину $\cos\phi$ для визначення повної потужності вибирають залежно від співвідношення між сумою встановлених потужностей електродвигунів $P_{вст.дв.}$ і сумарною потужністю всіх електроспоживачів $P_{заг}$ (табл. 6.6).

Таблиця 6.6 – Значення величини $\cos\phi$ від співвідношення між сумою $P_{вст. дв.}$ та сумарною $P_{заг}$.

$P_{вст.дв.}/P_{заг}$	$\cos\phi$	$P_{вст.дв.}/P_{заг}$	$\cos\phi$
0,98	0,73	0,73	0,81
0,93	0,75	0,68	0,83
0,88	0,77	0,63	0,84
0,83	0,79	0,58	0,85
0,78	0,80	0,53	0,86

Якщо понад 60 % встановленої потужності припадає на електронагрівальні прилади, то $\cos\phi$ визначають залежно від співвідношення між сумою встановлених потужностей нагрівальних установок $P_{наг}$ та сумарною встановленою потужністю всіх електроспоживачів $P_{заг}$ (табл. 6.7).

Таблиця 6.7 – Значення величини $\cos\phi$ від співвідношення між сумою $P_{наг}$ та сумарною $P_{заг}$

$P_{наг}/P_{заг}$	$\cos\phi$	$P_{наг}/P_{заг}$	$\cos\phi$
0,63	0,93	0,78	0,87
0,68	0,94	0,85	0,98
0,73	0,96	0,95	0,99

Кількість і тип трансформаторів і трансформаторних підстанцій вибирають на підставі техніко-економічного порівняння різних варіантів. Радіус охоплення електроспоживачів однією підстанцією рекомендується брати не більшим за 400 м, а переріз проводів повітряних ліній: мінімальний – 16 мм², максимальний – 120 мм².

Для визначення центра ваги електричних навантажень на план ділянки зони дії трансформаторної підстанції довільно наносять осі x і y . Координати центра ваги знаходять за формулами:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (S_{poz\ i} x_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} S_{poz\ i}}; \quad y = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (S_{poz\ i} y_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} S_{poz\ i}}; \quad (6.22)$$

де x_i, y_i – координати центрів ваги окремих споживачів; потужності на вводі споживачів, $S_{poz\ i}$ – розрахункові потужності на вводі споживачів.

2. Розрахунок проводок і способи їх прокладання

2.1. Способи виконання проводок

Електропроводка – це сукупність проводів і кабелів з усіма належними до них кріпленнями та підтримуючими захисними конструкціями.

Електричні проводки поділяють на внутрішні, зовнішні та вводи від повітряних ліній.

Внутрішньою називають електропроводку, яка прокладена всередині будівлі.

Зовнішньою називають електропроводку, яка прокладена по зовнішніх стінах будівель і споруд, під навісом, а також між будівлями на опорах (не більше чотирьох прогонів завдовжки до 25 м кожний) поза вулицями і дорогами.

Вводом від повітряної лінії називають електропроводку від ізоляторів, установлених на стіні або покрівлі споруди, до ввідного пристрою.

Залежно від способу виконання електропроводки бувають відкриті та сховані.

Відкрита електропроводка прокладається на поверхні стін і стелі, будівельних конструкцій тощо. Вона може бути стаціонарною, переносною або пересувною.

За способом прокладання проводів відкриті стаціонарні електропроводки поділяють електропроводки на ізоляційних опорах (роliках, ізоляторах, клицях), електропроводки у сталевих або ізоляційних трубах, тросові проводки тощо.

Схована електропроводка прокладається у стінах, перегородках і стелях (під штукатуркою), підлозі та інших конструктивних елементах будівель і споруд.

Внутрішні проводки повинні відповідати умовам навколишнього середовища і архітектурним особливостям приміщень, в яких їх прокладають. При цьому беруть до уваги такі чинники: безпеку людей і тварин, пожежо- і вибухобезпеку, надійність, зручність експлуатації та економічність.

Для сільськогосподарських приміщень рекомендовано такі способи виконання електропроводок:

- відкрито проводом – безпосередньо на стінах, на роликах (ізоляторах, клицях), у трубах (сталевих або вінілпластових), тросовим проводом;
- сховані – під штукатуркою безпосередньо та у трубах, у замкнених каналах будівельних конструкцій;
- кабелем – безпосередньо на стінах, на тросах.

Проводи напругою вище як 42 В, у нормальних приміщеннях без підвищеної небезпеки прокладають відкрито на висоті 2 м від рівня підлоги чи площадки обслуговування, а нижче 2 м – захищають.

У приміщеннях з підвищеною небезпекою і особливо небезпечних проводки, напругою вище як 42 В, прокладають на висоті 2,5 м від рівня підлоги чи площадки обслуговування. Спуски до пускової апаратури мають бути захищені до висоти 1,5 м.

Зовнішні проводки прокладають на висоті не менш як 2,5 м від поверхні землі.

Електричні проводки при паралельному прокладанні з трубопроводами повинні мати відстань від них не менше: для трубопроводів з гарячою та легкозаймистою рідиною – 40 см, для інших – 10 см. У разі пересічення їх з трубопроводами відстань від них має бути не менше: для трубопроводів з гарячою та легкозаймистою рідиною – 10 см, для інших – 5 см.

Відстань від проводів перед вводом у споруду і проводів вводу до поверхні землі повинна бути не меншою за 2,75 м.

Перерізи струмопровідних жил проводів і кабелів електропроводок мають бути не менші від указаних у табл. 6.8. Для виконання схованих проводок у тваринницьких приміщеннях використовують проводи марок АПВ та АППВ, для відкритих – кабелі АВВГ, АВРГ, тросові проводи АВТВ, АВТВУ, АВТ, АРТ та проводи марок АПВ та АППВ, підвішені на тросах. Для виконання електропроводок у вибухонебезпечних зонах використовують проводи та кабелі з мідними жилами – проводи марки ПВ, кабелі – марок ВВГ і НРГ.

Рекомендовані марки проводів та кабелів для різних способів прокладання у сільськогосподарських приміщеннях наведені у довідковій літературі [4, 11].

Таблиця 6.8 – Найменші допустимі перерізи струмопровідних жил, проводів і кабелів

Провідники	Найменший переріз жил, мм ²	
	мідних	алюмінієвих
1	2	3
Шнури для приєднання побутових електроспоживачів	0,35	-
Кабелі для приєднання переносних і пересувних електроприймачів у промислових установках	0,75	-
Скручені двожильні проводи з багатодротовими жилами для стаціонарної проводки на роликах	1	-
Незахищені ізольовані проводи для стаціонарної проводки всередині приміщень: безпосередньо на основах, на роликах, клицях і тросах;	1	2,5
для жил, приєднаних до гвинтових затискачів	1	2
Незахищені ізольовані проводи в зовнішніх електроустановках:		
по стінах, конструкціях або опорах на ізоляторах;	2,5	4
під навісом на роликах	1,5	2,5
Ізольовані проводи і кабелі в трубах, металевих рукавах та глухих коробах	1	2
Кабелі і захищені ізольовані проводи для стаціонарної електропроводки (без труб, рукавів і глухих коробів): для жил, які приєднують до гвинтових затискачів	1	2
Захищені і незахищені проводи і кабелі, які прокладають у замкнених каналах і замонолічено (в будівельних конструкціях або під штукатуркою)	1	2

Відповідно до правил техніки безпеки у тваринницьких приміщеннях внутрішню проводку виконують трифазною чотири-провідною з використанням триполюсних рубильників і автоматичних вимикачів. Однополюсні вимикачі допускаються для груп потужністю 0,6 кВт з фазною напругою і 1,3 кВт з лінійною напругою. Однополюсні вимикачі встановлюють у розсічення фазного, а не нульового проводу. Штепсельні розетки в електричних мережах 380/220 В використовують без запобіжників.

2.2. Розрахунок внутрішніх і зовнішніх проводок

Для стаціонарних електропроводок застосовують переважно проводи і кабелі з алюмінієвими жилами (проводи АПВ, АППВ, АВТУ, АВТВ; кабелі АВВГ, АПВГ). Для приєднання до електротехнічних пристроїв, встановлених безпосередньо на віброізолюючих опорах, а також внутрішнього монтажу щитових пристроїв, зарядки освітлювальної арматури та в електропроводках вибухонебезпечних зон застосовують проводи та кабелі з мідними жилами. Для

живлення переносних і пересувних електроспоживачів застосовують шнури та гнучкі кабелі з мідними жилами.

Внутрішні проводки повинні мати мінімальну протяжність, тому важливе значення надають вибору схеми проводки.

Переріз струмопровідної жили проводу, шнура або кабелю вибирають, виходячи з умов гранично допустимого його нагрівання та достатньої механічної міцності. Під час визначення кількості проводів, які прокладають в одній трубі (або жил багатожильного провідника), нульовий робочий провід чотири-провідної системи трифазного струму (або заземлюючу жилу) не враховують.

Площу поперечного перерізу жил проводів, шнурів і кабелів вибирають за тривало допустимим струмом:

$$I_{тр.доп} \geq I_{роз}, \quad (6.23)$$

де $I_{роз}$ – розрахунковий струм ділянки електричної мережі, А.

Таблиці тривало допустимих струмів для різних проводів і кабелів залежно від їх поперечного перерізу і способу прокладання наведено в ПВЕ [14], з алюмінієвими і мідними жилами значення тривало допустимої сили струму наведені в табл. 6.9 і 6.10.

Для відгалужень до окремих електроспоживачів за максимальні тривалі робочі струми беруть їх номінальні струми, які визначають за формулами:

а) для однофазних споживачів:

$$I_{ном} = \frac{10^3 P_{ном}}{U_{ном} \cos \varphi_{ном}}, \quad (6.24)$$

б) для трифазних споживачів:

$$I_{ном} = \frac{10^3 P_{ном}}{\sqrt{3} U_{ном} \cos \varphi_{ном}}, \quad (6.25)$$

в) для трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором:

$$I_{ном} = \frac{10^3 P_{ном}}{\sqrt{3} U_{ном} \eta_{ном} \cos \varphi_{ном}}. \quad (6.26)$$

Таблиця 6.9 – Тривало допустимі сили струму для проводів і шнурів з гумовою та полівінілхлоридною ізоляцією

Площі поперечного перерізу струмопровідних жил, мм ²	Сила струму, А, для проводів у трубі					
		двох одножильних	трьох одножильних	чотирьох одножильних	одного двожильного	одного трижильного
1	2	3	4	5	6	7
з мідними жилами						
0,5	11	-	-	-	-	-

0,75	15	-	-	-	-	-
1	17	16	15	14	15	14
1,2	20	18	16	15	16	14,5
1,5	23	19	17	16	18	15
2	26	24	22	20	23	19
2,5	30	27	25	25	25	21
3	34	32	28	26	28	24
4	41	38	35	30	32	27
5	46	42	39	34	37	31
6	50	46	42	40	40	34
8	62	54	51	46	48	43
10	80	70	60	50	55	50
16	100	85	80	75	80	70
25	140	115	100	90	100	85
35	170	135	125	115	125	100
50	215	185	170	150	160	135
70	270	225	210	185	195	175
95	330	275	225	225	245	215
120	385	315	290	260	295	250
з алюмінієвими жилами						
2	21	19	18	15	17	14
2,5	24	20	19	19	19	16
3	27	24	22	21	22	18
4	32	28	28	23	25	21
5	36	32	30	27	28	24
6	39	36	32	30	31	26
8	46	43	40	37	38	32
10	60	50	47	39	42	38-
16	75	60	60	55	60	55
25	105	85	80	70	75	65
35	130	100	95	85	95	75
50	165	140	130	120	125	105
70	210	175	165	140	150	135
95	255	215	200	175	190	165
120	295	245	220	200	230	190

Розрахунковий струм магістралей, від яких живиться кілька споживачів, здобувають за формулою:

$$I_{м.роз.} = K_o \sum I_{ном(роз)}, \quad (6.27)$$

де K_o – коефіцієнт одночасності роботи споживачів електроенергії; $\sum I_{ном(роз)}$ – сума номінальних (розрахункових) сил струму всіх, А.

Всі електричні мережі повинні мати захист від струмів короткого замикання. Від перевантажень мають бути захищені:

- мережі всередині приміщень, прокладені відкрито і виконані провідниками з горючою зовнішньою оболонкою або ізоляцією;
- освітлювальні електромережі в житлових і громадських будинках, службово-побутових приміщеннях промислових підприємств, зокрема електромережі для побутових і переносних електроприймачів;

Таблиця 6.10 – Тривало допустимі сили струму для проводів і шнурів* та різних видів кабелів**

Площі поперечного перерізу струмо- ведучих жил, мм ²	Сили струму, А, для проводів і кабелів				
	одножильних	двожильних	трижильних		
	при прокладанні				
	відкрито	відкрито	в землі	відкрито	в землі
з мідними жилами					
1,5	23	19	33	19	27
2,5	30	27	44	25	38
4	41	38	55	35	49
6	50	50	70	42	60
10	80	70	105	55	90
16	100	90	135	75	115
25	140	115	175	95	150
35	170	140	210	120	180
50	215	175	265	145	225
70	270	215	320	180	275
95	325	260	385	220	330
120	385	300	445	260	385
з алюмінієвими жилами					
2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
4	4	4	4	4	4
6	6	6	6	6	6
10	10	10	10	10	10
16	16	16	16	16	16
25	25	25	25	25	25
35	35	35	35	35	35
50	50	50	50	50	50
70	70	70	70	70	70
95	95	95	95	95	95
120	120	120	120	120	120
150	150	150	150	150	150
185	185	185	185	185	185

*з мідними жилами і гумовою ізоляцією в свинцевій, полівінілхлоридній, нейритовій або гумовій оболонці, броньованих і неброньованих.

**з алюмінієвими жилами і гумовою або пластмасовою ізоляцією в свинцевій, полівінілхлоридній та гумовій оболонках, броньованих і неброньованих.

- освітлювальні мережі в пожежонебезпечних зонах;
- електромережі всіх видів у вибухонебезпечних зонах;
- силові мережі – лише в тих випадках, коли за умовами технологічного процесу чи режиму роботи в них можуть виникати тривалі перевантаження провідників.

В електромережах, які захищають від струмів перевантажень щодо тривало допустимих струмів проводів захисні апарати повинні мати кратність не більшу:

- 80 % для номінального струму плавкої вставки або струму вставки автоматичного вимикача, що має лише максимальний миттєво-діючий розчеплювач (відсічку), а для провідників з полівінілхлоридною, гумовою і аналогічною за тепловими характеристиками ізоляцією та для провідників, які прокладаються у вибухобезпечних виробничих приміщеннях промислових підприємств, допускається 100 %;

- 100 % для номінального струму плавкої вставки чи струму вставки автоматичного вимикача лише з максимальним миттєводіючим розчеплювачем (відсічкою) та для кабелів з паперовою ізоляцією;

- 100 % для номінального струму розчеплювача автоматичного вимикача з нерегульованою обернено залежною від струму характеристикою, незалежно від наявності або відсутності відсічки, – для провідників усіх марок;

- 100 % для струму зрушення розчеплювача автоматичного вимикача з нерегульованою обернено залежною від струму характеристикою – для провідників з полівінілхлоридною, гумовою та аналогічною за тепловими характеристиками ізоляцією;

- 125 % для струму зрушення розчеплювача автоматичного вимикача з нерегульованою обернено залежною від струму характеристикою – для кабелів з паперовою ізоляцією та ізоляцією з вулканізованого поліетилену.

Тривало допустиме навантаження струмом провідників відгалужень до асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором має бути не менше: номінальної сили струму електродвигуна у вибухобезпечних зонах і 1,25 номінальної сили струму електродвигуна у вибухонебезпечних зонах.

Для проведення робіт з монтажу проводок у трубах готують таку проектну документацію:

- креслення прокладання труб з нанесенням відміток глибини закладання труб та кутів вигину;
- трубозаготівельні відомості;
- креслення кріплення труб і кріпильних конструкцій;
- специфікації матеріалів, виробів та електрообладнання;
- схеми з'єднання, на яких вказують марки і поперечні перерізи проводів.

Проводи одного електричного кола, в тому числі і нульовий провід, прокладають в одній трубі.

Для визначення внутрішнього діаметра труби використовують спеціальні таблиці [4]. Наближено внутрішній діаметр труби можна дістати за формулою:

$$d_{mp} = d_{np} \sqrt{\frac{n}{K_{зан}}}, \quad (6.28)$$

де d_{np} – діаметр проводу з ізоляцією; n – кількість проводів; $K_{зан}$ – коефіцієнт заповнення (беруть рівним 0,45–0,55).

Для внутрішніх проводок, виконаних без застосування сталевих труб, індуктивним опором лінії можна знехтувати. Тоді втрати напруги в лінії в загальному вигляді можна здобути за формулою:

$$\Delta U_n = IR, \quad (6.29)$$

де I – розрахунковий струм лінії, А; R – активний опір лінії, Ом.

У практичних розрахунках втрату напруги, %, в лінії визначають за формулами:

а) для всієї лінії:

$$\Delta U_n = \frac{\sum (P_{роз} l)}{CS}; \quad (6.30)$$

б) для однієї ділянки лінії:

$$\Delta U_n = \frac{P_{роз} l}{CS}, \quad (6.31)$$

де $P_{роз}$ – розрахункова потужність ділянки електричного кола, кВт; l – довжина ділянки, м; S – поперечний переріз проводу, мм²; C – коефіцієнт, значення якого залежить від напруги, числа фаз і матеріалу проводу.

Коефіцієнт C дістають за такими формулами:

а) для трифазної лінії змінного струму:

$$C = \frac{\gamma U_n^2}{10^5}; \quad (6.32)$$

б) для двофазної лінії змінного струму з нульовим проводом:

$$C = \frac{\gamma U_n^2}{2,25 \cdot 10^5}; \quad (6.33)$$

в) для двопровідної лінії змінного чи постійного струму:

$$C = \frac{\gamma U^2}{2 \cdot 10^5}, \quad (6.34)$$

де γ – питома провідність, м/(Ом·мм²); U_n – номінальна лінійна напруга, В; U – напруга двопровідної лінії, В.

Детальну характеристику внутрішніх проводок наводять на планах приміщень з нанесенням силових і освітлювальних мереж. Якщо цю характеристику проводки вказати на плані проводки немає можливості, то поруч розміщують схему (табл. 6.11).

Таблиця 6.11 – Розрахункова схема розподільної мережі

Ввід		Розподільний пристрій				Ділянка мережі 1	Провід, кабель	
марка, кількість, переріз (мм ²) і спосіб прокладки проводів	довжина, м	апарат на вводі	тип	номер групи	апарат захисту лінії		марка, кількість і спосіб прокладки	довжина, м

Продовження таблиці 6.11

Пристрій керування		Ділянка мережі 2	Провід, кабель		Електроспоживач				Робоча машина
тип	пускова та захисна апаратура		марка, кількість і спосіб прокладки	довжина, м	номер на плані	тип	$P_{ном}$, кВт	$I_{ном}$, А	

3. Вибір пускозахисної апаратури та розподільних пристроїв

Електричні апарати пуску, керування та захисту – це електротехнічні пристрої та механізми, що призначені для вмикання і вимикання, забезпечення певного режиму роботи і для захисту електроспоживачів і електричних кіл. Апарат може виконувати одну або кілька з вказаних функцій.

Для вмикання і вимикання електроспоживачів та електричних кіл і керування ними призначені рубильники, пакетні вимикачі, кнопки керування, пакетно-кулачкові перемикачі, контактори, електромагнітні пускачі та автоматичні вимикачі. Автоматичні вимикачі та електромагнітні пускачі за наявності в них теплових реле виконують також функції захисту електроустановок і електричних кіл. Апаратами захисту є також запобіжники (див. додаток 2).

Електричні апарати вибирають за родом струму, напругою, потужністю, числом полюсів, вимогами до електричного захисту від ненормальних режимів роботи електроспоживачів і електричних кіл та за виконання залежно від умов навколишнього середовища.

Всі електроустановки повинні мати захист від струмів короткого замикання (к.з.). Апарати захисту мають практично миттєво вимикати струми к.з. і не спрацьовувати під час пускового струму нормальної тривалості. Електродвигуни потребують також захисту від струмів перевантаження, надмірного спаду напруги та довільного спрацювання.

Струмом перевантаження називають усякий струм, що більший від номінального. Відомо, що певне перевантаження електричних кіл і електродвигунів допустиме і чим менше перевантаження, тим більше може бути його тривалість. Тому для захисту від перевантаження слід використовувати апарати, які мають обернено залежну від струму характеристику, тобто час спрацювання яких зменшуватиметься у разі збільшення перевантаження. Ці

умови задовольняють автоматичні вимикачі з тепловими розчеплювачами та теплові реле електромагнітних пускачів. Плавкі запобіжники використовують здебільшого для захисту електричних кіл, теплових і освітлювальних електроустановок. Від струмів к.з. електродвигуни захищають автоматичними вимикачами з електромагнітними розчіплювачами.

Електричні кола захищають від струмів к.з. і перевантаження, крім силових кіл, в яких за умовами технологічного процесу і за режимом роботи не виникають тривалі перевантаження проводів, які у вибухобезпечних зонах можна не захищати від струмів перевантаження.

Захищають електричні кола автоматичними вимикачами або запобіжниками. Автоматичні вимикачі з тепловими розчеплювачами можуть захищати від струмів к.з. і струмів перевантаження.

Рубильники і перемикачі встановлюють на вертикальній площині з горизонтальним розміщенням вала. Вони призначені для нечастих (не більше 6 на 1 год.) неавтоматичних вмикань і вимикань електричних кіл постійного струму з напругою до 440 В і змінного струму з частотою 50 Гц і напругою до 600 В. Рубильники і перемикачі із центральною рукояткою використовують лише для роз'єднання електричних кіл без струму.

Максимальний струм, який може розмикати рубильник чи перемикач з бічною рукояткою, з бічним або центральним важільним проводом без дугогасних камер становить $0,3 I_{ном}$ апарата, з дугогасною камерою – $I_{ном}$ при напрузі 380 В змінного струму, в колах постійного струму відповідно $0,2 I_{ном}$ і $I_{ном}$ при напрузі 220 В.

Пакетні вимикачі та перемикачі призначені для нечастих вмикань і вимикань електричних кіл з напругою 380 В змінного і 220 В постійного струму і використовуються для керування силовими та освітлювальними установками невеликої потужності, вмикання і вимикання кіл керування, сигналізації та вимірювальних. Максимальна комутаційна здатність пакетних вимикачів і перемикачів дорівнює їх номінальному струму.

Пакетно-кулачкові вимикачі та перемикачі використовують для ручного керування асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором та для комутації кіл керування, вимірювальних і сигналізації змінного струму напругою 380 В і частотою 50; 60 і 100 Гц. Вибирають їх за номінальним струмом, гранична ж комутаційна здатність їх залежить від типу і становить у межах $(3,5-9) I_{ном}$.

Електромагнітні пускачі є основними апаратами автоматизованого та автоматичного керування електроустановками. Вони призначені для дистанційного пуску безпосереднім вмиканням у мережу, зупинки і реверсування трифазних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором. За наявності теплового реле пускачі також захищають електродвигуни від

перевантажень. Для сільського господарства рекомендовані електромагнітні пускачі серій ПМЛ і ПМА (див. додаток 3).

Електромагнітні пускачі вибирають за напругою ($U_n > U_m$), за струмом ($I_{ном.п} \geq I_{ном.ел.дв}$), за струмом теплового реле ($I_{ном.т.р.} \geq I_{ном.ел.дв}$), за струмом не-спрацювання теплового реле ($I_{неспр.} \geq I_{ном.ел.д}$) з подальшим регулюванням струму не-спрацювання на $I_{ном.ел.дв}$, за напругою котушки, за конструкцією і виконанням. Технічні характеристики теплових реле серії РТЛ наведено в додатку 4.

Кнопки керування (серії КЕ) та *кнопкові пости* (серії ПКЕ) призначені для комутації електричних кіл керування з напругою змінного струму до 500 В і частотою 50 Гц та постійного струму до 220 В.

Плавкі запобіжники – це найбільш дешеві та прості апарати захисту електричних мереж і електроустановок від струмів к.з. і надмірних струмів перевантаження. У сільськогосподарському виробництві рекомендується використовувати плавкі запобіжники з наповнювачем таких типів: різьбові ПРС, не-різьбові НПН і розбірні ПН-2 (додаток 2).

Автоматичні вимикачі призначені для захисту електричних установок від струмів перевантаження і к.з., а також для нечастих оперативних вмикань і вимикань електричних кіл. Під час проектування сільськогосподарських підприємств рекомендується використовувати автоматичні вимикачі серій ВА51 та ВА52 (додаток 5).

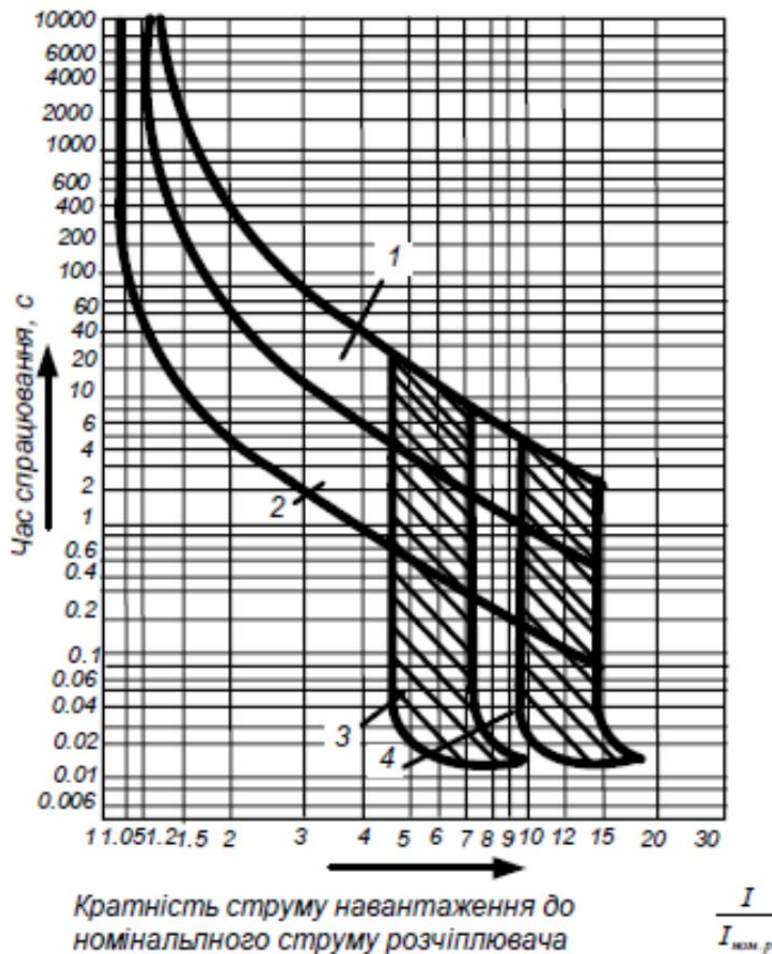
Кожний захисний апарат має свою захисну характеристику, яка є залежністю часу спрацювання від струму навантаження. Ця характеристика є основою для вибору захисного апарата. На рис. 6.1 наведено захисну характеристику автоматичного вимикача ВА51-35. Всі струми нормальної роботи електроустановки мають перебувати в зоні ліворуч від захисної характеристики, струми к.з. – у зоні праворуч від характеристики.

Вибираючи автоматичний вимикач для захисту електродвигуна, слід дотримуватися таких умов:

- номінальна напруга автоматичного вимикача має дорівнювати напрузі електричної мережі або перевищувати її ($U_{ав} \geq U_m$);
- номінальний струм автоматичного вимикача має дорівнювати номінальному струму електродвигуна або трохи перевищувати його ($I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}$);
- номінальний струм теплового й електромагнітного розчеплювачів має дорівнювати номінальному струму електродвигуна або трохи перевищувати його ($I_{ном.розч.} \geq I_{ном.ел.дв}$) з подальшим регулюванням струму не-спрацювання теплового розчеплювача на номінальний струм електродвигуна;
- струм відсічки електромагнітного розчеплювача має становити не менш як 1,5–1,6 від пускового струму електродвигуна ($I_{від.розч.} \geq (1,5–1,6) I_{пус.}$);

- гранична вимикаюча здатність автоматичного вимикача має бути більшою або дорівнювати струму трифазного к.з. безпосередньо за місцем установки автоматичного вимикача ($I_{гр.вим.ав.} \geq I_{к.з.}$).

Автоматичні вимикачі вибирають також за виконанням і наявністю додаткових розчеплювачів.



1 – захисна характеристика, знята з холодного стану; 2 – захисна характеристика, знята з нагрітого стану; 3 – зона роботи електромагнітного розчеплювача струму під час постійного струму; 4 – зона роботи електромагнітного розчеплювача струму під час змінного струму

Рис. 6.1. Захисна часо-струмова характеристика автоматичного вимикача ВА51-35:

Вибираючи автоматичний вимикач для захисту електричної лінії, яка живить декілька електродвигунів, номінальний струм автоматичного вимикача і номінальний струм розчеплювача мають дорівнювати сумі номінальних струмів одночасно працюючих електродвигунів або трохи перевищувати її. У даному випадку струм відсічки електромагнітного розчіплювача:

$$I_{від.роз.} \geq 1,8 \cdot \left(\sum_{i=1}^{i=n-1} I_{ном i} + I_{пуск.найб.} \right) \quad (6.35)$$

де $I_{номі}$ – номінальний струм i -го електродвигуна, А; $I_{пуск.найб.}$ – пусковий струм найбільшого за пусковим струмом електродвигуна, А.

Від перевантаження кожен електродвигун необхідно захищати окремо.

Для електричних мереж, які живлять електронагрівальні установки, струми плавких вставок запобіжників і номінальні струми теплових розчеплювачів вибирають за розрахунковим струмом з урахуванням коефіцієнта запасу, що становить 1,1–1,2.

Електричні двигуни, як правило, захищають автоматичними вимикачами і тепловим реле електромагнітних пускачів. Вибираючи запобіжники для захисту електродвигуна від струмів к.з., дотримуються таких умов:

- номінальний струм запобіжника має дорівнювати номінальному струму електродвигуна або трохи перевищувати його ($I_{ном.з} \geq I_{ном.ел.дв.}$);
- номінальна напруга запобіжника має дорівнювати або бути вищою за напругу мережі ($U_z \geq U_m$);
- гранична вимикаюча здатність запобіжника повинна бути рівною або вищою за струм трифазного короткого замикання безпосередньо за запобіжником ($I_{гр.вим.} \geq I_{к.з.}$);
- струм плавкої вставки:

$$I_{пл.вст} = \frac{I_{пуск}}{\alpha} = \frac{I_{номі} K_i}{\alpha}, \quad (6.36)$$

де $I_{пл.вст}$ – струм плавкої вставки, А; $I_{пуск}$, $I_{номі}$ – відповідно пусковий і номінальний струми електродвигуна, А; α – коефіцієнт, значення якого залежить від умов роботи електродвигуна (нечасті пуски з тривалістю 5–10 с, $\alpha = 2,5$; часті пуски з тривалістю 10–40 с, $\alpha = 1,6$ –2).

Номінальний струм запобіжника для захисту групи електродвигунів має дорівнювати сумі номінальних струмів електродвигунів або перевищувати її. Струм плавкої вставки визначають за формулою:

$$I_{пл.вст} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-1} I_{номі} + I_{пуск.найб.}}{\alpha}, \quad (6.37)$$

де $\sum_{i=1}^{i=n-1} I_{номі}$ – сума номінальних струмів одночасно працюючих електродвигунів без струму двигуна з найбільшим пусковим струмом, А; $I_{пуск.найб.}$ – пусковий струм електродвигуна з найбільшим пусковим струмом, А.

Якщо кількість електродвигунів становить більше ніж п'ять, то струм плавкої вставки:

$$I_{пл.вст} = \sum_{i=1}^{i=n-1} I_{номі} + \frac{I_{пуск.найб.}}{\alpha}. \quad (6.38)$$

Стандартну плавку вставку вибирають рівною або трохи більшою за струм, визначений за наведеними вище формулами.

Плавкі вставки запобіжників та теплові розчеплювачі автоматичних вимикачів для захисту освітлювальних мереж, які живлять лампи розжарювання та люмінесцентні лампи, вибирають за розрахунковим струмом. Для захисту мереж, які живлять газорозрядні лампи високого тиску під час вибору запобіжників розрахунковий струм множать на коефіцієнт запасу, що становить 1,2, а під час вибору розчеплювача теплових реле – на коефіцієнт запасу, що становить 1,4.

Деякі апарати керування електроприводами здатні виконувати лише окремі функції керування і захисту. У сучасному електроприводі сільськогосподарських машин і агрегатів широко використовуються комплектні пристрої керування – блоки, шафи, ящики, пульти, станції тощо. Для потреб промисловості й сільського господарства випускається велика номенклатура комплектних пристроїв керування, які відрізняються між собою за видом керованого електродвигуна, функціями, кількістю двигунів, призначенням, ступенем автоматизації та іншими ознаками.

Для розподілу електроенергії всередині приміщення використовують розподільні пристрої серій ПР8501 та ПР8701 (див. додаток 6) або серії ПР11. Це шафи з ізольованими від корпусу шино-проводами і з'єднаною з корпусом шафи нульовою шиною і лінійними та ввідним (або без нього) автоматичними вимикачами (рис. 6.2).

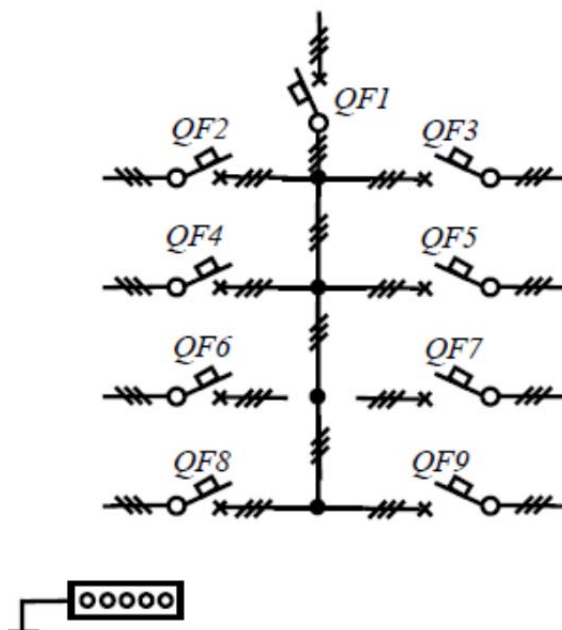


Рис. 6.2. Принципова електрична схема розподільної шафи ПР8501-091:
 $QF1, QF2, \dots, QF9$ – автоматичні вимикачі

Вибирають розподільні пристрої за напругою ($U_{ш} \geq U_{м}$); струмом ($I_{ном.ш} \geq I_{розр}$), конструкцією та схемою.

Шафи серії ПР8501 використовують для розподілу електроенергії з напругою до 660 В змінного струму частотою 50 і 60 Гц, а шафи серії ПР 8701 – до 220 В постійного струму та захисту електричних мереж від струмів к.з. і перевантаження.

Шафи ПР8501 і ПР8701 укомплектовані однополюсними лінійними не струмообмежувальними вимикачами ВА51-29 з розчеплювачами на струми 6,3...63 А і триполюсними ВА51-31 та ВА51-35 з розчеплювачами на струми 6,3...100 А і 100...250 А відповідно (додаток 6).

Живлення сільськогосподарських споживачів здійснюється здебільшого від трансформаторних підстанцій через автоматичні вимикачі або запобіжники, повітряну лінію, розподільний пристрій, внутрішню електропроводку, комплектний пристрій керування з апаратами захисту та керування.

Для перевірки ефективності роботи захисних апаратів будують в одній системі координат їхні захисні характеристики, наведені до нижчого ступеня напруги. Селективність роботи захисних апаратів забезпечується, якщо час спрацювання кожного наступного апарата в напрямі від споживача до джерела живлення більше ніж у попереднього на всьому можливому діапазоні струмів їхньої спільної роботи.

4. Перевірка захисних апаратів на спрацювання під час короткого замикання

Коротке замикання – безпосереднє з'єднання між будь-якими точками різних фаз, фази і нульового проводу або фази із землею, яке не передбачене нормальними умовами роботи електроустановки.

Електричні мережі з напругою 0,38 кВ виконують з глухо-заземленою нейтраллю, тому в них можуть виникати три-, дво- і однофазні к.з.

Під час трифазного к.з. усі три фази замикаються між собою. Під час двофазного к.з. відбувається замикання двох фаз між собою. При цьому струм к.з.:

$$I_{к.з.}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{к.з.}^{(3)} \approx 0,87 I_{к.з.}^{(3)}. \quad (6.39)$$

Під час однофазного к.з. відбувається замикання одної фази на нульовий провід або землю.

Аварійний режим, що виникає під час струмів к.з., може нанести виробництву значні збитки, а також може призвести до ураження людей і тварин. Тому захисні апарати повинні надійно і швидко вимикати струми к.з.

Вибираючи захисні апарати звичайно обмежуються розглядом три- і однофазних к.з., оскільки ці випадки відповідають найбільшому та найменшому струмам к.з. у мережах 0,38 кВ з короткозамкненою нейтраллю.

Перевірка захисних апаратів на спрацювання під час однофазного к.з. Мета перевірки – забезпечити надійне вимикання аварійної ділянки за найменшого значення струму к.з. Точка к.з. береться найбільш віддаленою в зоні дії захисного апарата, який перевіряють.

В електромережах до 1 кВ з глухо-заземленою нейтраллю, згідно з ПУЕ, з метою забезпечення автоматичного вимикання аварійної ділянки провідність фазних і нульових провідників має бути такою, щоб під час замикання на корпус або на нульовий провідник струм однофазного к.з. перевищував не менше, ніж:

- у три рази номінальний струм плавкого елемента найближчого запобіжника;

- у три рази номінальний струм нерегульованого розчеплювача автоматичного вимикача з обернено залежною від струму характеристикою.

У разі захисту електричних мереж автоматичними вимикачами, що мають лише електромагнітний розчеплювач (відсічку) провідність вищевказаних провідників повинна забезпечувати струм не менший від струму відсічки, помноженому на коефіцієнт розкиду струмів спрацювання електромагнітного розчеплювача K_p (за заводськими даними) і на коефіцієнт запасу 1,1:

$$I_{к.з.}^{(1)} \geq I_{від.роз.} K_p K_z. \quad (6.40)$$

Коли немає заводських даних, то K_p беруть для автоматичних вимикачів з номінальним струмом до 100 А рівним 1,4, для автоматичних вимикачів з номінальним струмом більшим за 100 А – не менше 1,25. Повна провідність нульового провідника в усіх випадках має бути не менш як 50 % провідності фазного провідника.

З метою забезпечення вищенаведених вимог нульовий провідник рекомендують прокладати разом з фазними.

Струм однофазного к.з. можна визначити за наближеною формулою:

$$I_{к.з.}^{(1)} = \frac{U_\phi}{Z_{mo} + Z_n}, \quad (6.41)$$

де U_ϕ – фазна напруга, В; Z_{mo} – опір трансформатора струму замикання на корпус, Ом; Z_n – повний опір петлі фазний провід – нульовий провід, Ом.

Опір трансформатора струму замикання на корпус залежить від конструкції трансформатора та насичення осердя і може бути найбільш точно визначений лише дослідним шляхом. З достатньою для практичних розрахунків точністю він може бути обчислений для трансформаторів з'єднанням обмоток Y/Y_o за формулою:

$$Z_{mo} = 26/S, \quad (6.42)$$

де S – номінальна потужність трансформатора, кВ·А.

Опір петлі, Ом, фазний провід – нульовий провід дістають за формулою:

$$Z_n = \sqrt{\left(\sum R_n\right)^2 + \left(\sum X_n + X_n\right)^2}, \quad (6.43)$$

де $\sum R_n$ – сума активних опорів окремих елементів петлі фаза-нуль, Ом; $\sum X_n$ – сума реактивних опорів окремих елементів петлі фаза-нуль, Ом; X_c – реактивний опір системи, Ом.

Опір трансформатора враховують, якщо потужність більша або дорівнює 630 кВ·А та є з'єднання 0 Y/Y.

Сума активних опорів окремих елементів петлі фаза-нуль:

$$\sum R_n = R_\phi + R_n + R_{\text{кон}} + R_{\text{кот}}, \quad (6.44)$$

де R_ϕ , R_n , $R_{\text{кон}}$ і $R_{\text{кот}}$ – відповідно активні опори фазного і нульового проводів, контактів і котушок комутаційних і захисних апаратів, Ом.

Опір котушок і контактів беруть з довідників або з ГОСТ 28249-93 “Короткі замикання в електроустановках. Методи розрахунку в електроустановках змінного струму напругою до 1 кВ”.

Наприклад, для автоматичного вимикача з номінальним струмом 50 А опір контактів $R_{\text{кон}} = 1,3$ мОм і опір котушок $R_{\text{кот}} = 7$ мОм.

Якщо даних про $R_{\text{кон}}$ і $R_{\text{кот}}$ немає, то можна враховувати наближено лише опори контактів, приймаючи їх рівними: для підстанцій – 0,01 Ом, для цехових розподільних пристроїв – 0,015 Ом і для апаратів у споживача – 0,03 Ом.

При визначенні суми реактивних опорів окремих елементів петлі фаза-нуль враховують лише зовнішні індуктивні опори фазного і нульового проводів повітряної лінії $2X'_{\phi-n}$, зумовлені взаємоіндукцією між фазними і нульовим проводами, та внутрішні індуктивні опори фазного і нульового проводів X''_ϕ і X''_n , які залежать від ступеня поверхневого ефекту:

$$\sum X_n 2X'_{\phi-i} + X''_{\phi} + X''_i \quad (6.45)$$

Значення індуктивного опору системи, Ом, згідно з ГОСТ 28249-93 визначається за формулою:

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.н.н}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{вим.ном}} U_{\text{ср.в.н.}}}, \quad (6.46)$$

де $U_{\text{ср.н.н}}$ – середня номінальна напруга мережі, приєднана до обмотки низької напруги трансформатора, В; $U_{\text{ср.в.н.}}$ – середнє номінальне значення напруги мережі, до якої приєднана обмотка вищої напруги трансформатора, В; $I_{\text{вим.ном}}$ – номінальний струм вимикання вимикача, установленного в електричній мережі, до якої приєднано знижувальний трансформатор, А.

Активний опір, Ом, проводів для внутрішніх проводок при температурі 20°C дістають за формулою:

$$R_{20} = \rho \frac{l}{S}, \quad (6.47)$$

де ρ – питомий опір металу при постійному струмі і температурі 20°C (беруть рівним 17,8 Ом·мм²/км для міді і 29,94 Ом·мм²/км для алюмінію); l – довжина проводу, км; S – поперечний переріз проводу, мм².

Активні опори проводів внутрішніх проводок до розрахункової (максимально допустимої для проводів) температури знаходять за формулою:

$$R_t = R_{20} K_t = R_{20} \left[1 + \frac{\alpha}{\rho} (t - t_{20}) \right], \quad (6.48)$$

де α – температурний коефіцієнт електричного опору (приймають рівним 0,004 для міді та алюмінію, 0,005...0,006 – для сталі); ρ – коефіцієнт, який враховує залежність між проявленням поверхневого ефекту і температурою (приймають рівним 2 для масивних сталевих провідників і 1 – для провідників із кольорових металів); t – розрахункова температура металу, °C (беруть рівною 65 °C для проводів з гумовою і пластмасовою ізоляцією і 40 °C – для сталевих труб, в яких прокладені проводи); t_{20} – початкова температура (20°C).

Визначаючи опір сталевих проводів за розрахунковий беруть трикратний струм апарата, бо опір сталевих провідників залежить від струму, що по них протікає.

Зовнішні та внутрішні індуктивні опори, Ом/км, одинарного проводу можна наближено здобути за формулами:

$$X'_{\phi-n} = 0,145 l g l_{\phi-n}; \quad (6.49)$$

$$X''_{\phi-n} = \pi f \mu 10^{-4}, \quad (6.50)$$

де $l_{\phi-n}$ – відстань між фазним і нульовим проводами, мм; μ – магнітна проникність металу, Гн/км (для кольорових металів можна прийняти $\mu = 1$, тоді, якщо частота змінного струму $f = 50$ Гц, то $X'' = 0,0157$ Ом/км).

Внаслідок несталості магнітної проникності сталі визначити X'' для сталевих провідників за формулою (6.50) складно. У наближених розрахунках беруть:

$$X'' = 0,6 R_{20}. \quad (6.51)$$

Опір петлі фаза-нуль визначають за формулами:

- для чотири-провідної повітряної лінії і відкритих шино-проводів із алюмінію і міді:

$$Z_n = \sqrt{(R_{\phi} + R_n)^2 + (2X'_{\phi-n})^2}; \quad (6.52)$$

- для чотири-провідних повітряних ліній із сталевими проводами:

$$Z_n = \sqrt{(R_{\phi} + R_n)^2 + (2X'_{\phi-n} + X''_{\phi} + X''_n)^2}; \quad (6.53)$$

- для чотири-провідних кабельних ліній із алюмінієвими або мідними жилами:

$$Z_n = R_{\phi} + R_n; \quad (6.54)$$

- для три-провідних ліній, прокладених у сталевій трубі:

$$Z_n = \sqrt{(R_\phi + R_m)^2 + (X''_m)^2}, \quad (6.55)$$

де R_x і X''_m – відповідно активний і внутрішній індуктивний опір труби;

- для чотири-провідних проводок у сталевій трубі:

$$R_n = \sqrt{R_\phi + \left(\frac{R_n R_m}{R_n + R_m} \right)^2 + (X''_m)^2}. \quad (6.55)$$

Захисні апарати в мережах 0,38 кВ перевіряють за гранично вимикаючою здатністю:

$$I_{гр.вим} \geq I_{к.з.}^{(3)} \quad (6.57)$$

де $I_{гр.вим}$ – гранично вимикаюча здатність апарата, А (у каталогах наводять його ефективне або амплітудне значення); $I_{к.з.}$ – струм трифазного електричного к.з. безпосередньо за апаратом, А (напругу у точці к.з. беруть рівною нулю).

Струм трифазного к.з.:

$$I_{к.з.}^{(3)} = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3} \sqrt{(\sum R_k)^2 + (\sum X_k)^2}}, \quad (6.58)$$

де U_λ – лінійна напруга (у розрахунках беруть рівною 400 В); $\sum R_k$, $\sum X_k$ – відповідно суми активних і реактивних складових повного опору трифазного к.з., Ом. У загальному вигляді маємо:

$$\sum R_k = R_m + R_\phi; \quad (6.59)$$

$$\sum X_k = X_m + X_\phi, \quad (6.60)$$

де R_m , X_m – відповідно активна і реактивна складові повного опору Z_m трансформатора під час симетричного трифазного к.з., Ом; R_ϕ , X_ϕ – відповідно активний і реактивний опори фазного проводу до точки к.з., Ом.

Значення параметрів Z_m , R_m , X_m дістають за формулами:

$$Z_m = \frac{U_{к.з.} U_\lambda^2}{100 S_{ном}} = \frac{U_{к.з.} U_\lambda}{100 \sqrt{3} I_{ном}}; \quad (6.61)$$

$$R_m = \frac{\Delta P_M U_\lambda^2}{S_{ном}^2}; \quad (6.62)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 + R_m^2}, \quad (6.63)$$

де $S_{ном}$, $I_{ном}$ – відповідно номінальні потужність і номінальний струм трансформатора; $U_{к.з.}$ – напруги к.з. трансформатора; ΔP_M – втрати к.з. трансформатора.

Струм к.з. на шинах 0,4 кВ трансформатора:

$$I_{к.з.}^{(3)} = \frac{U_\lambda}{\sqrt{3} Z_m} = \frac{100}{U_\lambda} I_{ном}. \quad (6.64)$$

Ударний струм трифазного к.з. беруть рівним його амплітудному значенню I_a (у мережах 0,38/0,22 кВ ударний коефіцієнт $K_{y0} = 1$):

$$i_{y\partial} = I_a = \sqrt{2}I_{\kappa.з.}^{(3)}. \quad (6.65)$$

Якщо умови перевірки на спрацювання захисних апаратів під час однофазного к.з. не виконуються, то беруть нульовий провід з більшим поперечним перерізом. Якщо не виконуються умови перевірки за струмом трифазного к.з., то вибирають захисний апарат з більшою вимикаючою здатністю.

5. Заходи щодо компенсації реактивної потужності

У сільській місцевості на споживаючих трансформаторних підстанціях з переважно виробничим навантаженням значення коефіцієнта потужності в денний максимум становлять 0,73–0,79, ввечері – 0,78–0,86. Споживаючі трансформаторні підстанції з переважно комунально-побутовим навантаженням (до 80 %) мають коефіцієнт потужності в денний максимум 0,89–0,97, ввечері – 0,94–0,98. На тваринницьких фермах значення коефіцієнта потужності становить: вдень – 0,65–0,8, ввечері – 0,75–0,85.

Сільські розподільні мережі мають велику протяжність і дуже розгалужені. Тому для них, як правило, економічно вигідна повна компенсація реактивної потужності. Проектування електроустановок із компенсації реактивної потужності ведуть згідно з ПВЕ і “Інструкцією з системного розрахунку компенсації реактивної потужності електричних мереж” [6].

Проектуючи електроустановки, слід вибирати варіанти з мінімальним споживанням реактивної потужності. Для цього на стадії проектування електрифікації сільськогосподарських підприємств впроваджують заходи щодо зниження споживання реактивної потужності. Це такі заходи:

- правильний вибір електродвигунів і трансформаторів за потужністю і типом;
- вдосконалення технології виробництва з метою підвищення завантаження електродвигунів (не менш як 70 % їхньої номінальної потужності) і повного використання обладнання;
- використання синхронних електродвигунів для нерегульованих електроприводів із постійним режимом роботи там, де це можливо;
- обмеження холостих режимів роботи електродвигунів і електрозварювальних установок;
- раціоналізація графіків роботи трансформаторних підстанцій і перетворювачів.

Впровадження цих та інших заходів веде лише до зниження споживання реактивної потужності.

Джерелами реактивної потужності є повітряні і кабельні лінії електричних мереж, генератори електростанцій, синхронні двигуни і компенсатори, батареї

конденсаторів поперечного вмикання, вентиляльні установки з спеціальним регулюванням тощо.

Реактивну потужність, яку генерують повітряні лінії, струмо-проводи та кабельні лінії, квар, визначають за формулою:

$$Q = 2\pi fCU^2 = \omega CU^2, \quad (6.66)$$

де C – ємність лінії, Ф; U – напруга лінії, кВ; ω – кутова частота, с^{-1} .

Рекомендується враховувати реактивну потужність, яку генерують повітряні і кабельні лінії з номінальною напругою вище 20 кВ, а для кабельних значної протяжності – також і лініями 6–20 кВ.

Максимальне значення реактивної потужності, квар, яку генерує синхронний двигун, дістають за формулою:

$$Q_{\text{дв}} = \frac{a_{\text{макс}} P_{\text{ном}} \text{tg} \alpha}{\eta}, \quad (6.67)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність, кВт; $\text{tg} \varphi$ – тангенс кута φ , який відповідає номінальному значенню коефіцієнта потужності; η – номінальний ККД електродвигуна; $a_{\text{макс}}$ – найбільше допустиме перевантаження синхронного електродвигуна за реактивною потужністю, яке залежить від типу двигуна, відносної напруги і коефіцієнта завантаження за активною потужністю (табл. 6.12).

Таблиця 6.12 – Середнє значення $a_{\text{макс}}$ для синхронних електродвигунів серій СД і СДЗ під час напруги 380 В для всіх частот обертання

Відносна напруга на затискачах	Значення $a_{\text{макс}}$ при коефіцієнті завантаження за активною потужністю		
	0,9	0,8	0,7
0,95	1,16	1,26	1,36
1,0	1,15	1,24	1,32
1,05	1,1	1,18	1,25
1,1	0,9	1,06	1,15

Реактивну потужність, яку генерують конденсатори, знаходять за формулами:

- для одного конденсатора

$$Q = U^2 \omega C 10^{-3}; \quad (6.68)$$

- для з'єднання в трикутник

$$\Delta Q = 3U^2 \omega C 10^{-3}; \quad (6.69)$$

- для з'єднання в зірку

$$Q_Y = 3 \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \omega C 10^{-3} = U^2 \omega C 10^{-3}. \quad (6.70)$$

Найефективнішими компенсувальними пристроями в сільськогосподарських установках є статичні конденсатори, технічні дані яких наведено в додатку 7.

Компенсація може бути індивідуальною (конденсатори встановлюють безпосередньо біля споживача), груповою (конденсатори встановлюють біля розподільних щитів або на трансформаторних підстанціях) і змішаною. В мережах до 1000 В конденсатори рекомендується розміщувати біля групових розподільних пунктів.

Якщо маємо рівномірний графік споживання реактивної потужності, то потужність компенсувального пристрою:

$$Q_K = P(tg\phi_1 - tg\phi_2), \quad (6.71)$$

де P – середнє значення споживаної активної потужності, кВт; $tg\phi_1$ – тангенс кута зсуву фаз, що відповідає середньозваженому значенню коефіцієнта потужності за найбільш завантажену добу; $tg\phi_2$ – те саме, планове нормативне розрахункове значення.

Якщо маємо змінний графік реактивних навантажень, то компенсувальний пристрій можна вибрати за півгодинним максимумом на графіку навантажень за найбільш завантажену добу. Для побудови цього графіка споживану реактивну потужність, кВар, електродвигунами, повітряними лініями і трансформаторами визначають за формулами:

$$Q_d = \frac{P_{ном}}{\eta} tg\varphi; \quad (6.72)$$

$$Q_L = 3I^2 \frac{X_L}{1000}; \quad (6.73)$$

$$Q_T = \frac{S_{ном}}{1000} (I_K + \beta^2 U_p), \quad (6.74)$$

де $P_{ном}$ – номінальна потужність електродвигуна, кВт; $tg\varphi$ – тангенс кута φ , що відповідає номінальному значенню коефіцієнта потужності електродвигуна; I – струм в лінії, А; X_L – індуктивний опір лінії, Ом; $S_{ном}$ – номінальна потужність трансформатора, кВ·А; I_K – струм холостого ходу щодо номінального, %.

Активну (U_a , %) і реактивну (U_p , %) складові напруги к.з. трансформатора ($U_{к.з.}$, %) і коефіцієнт завантаження трансформатора за струмом (β) визначають за формулами:

$$U_p = \sqrt{(U_{\hat{e}})^2 - (U_a)^2}; \quad (6.75)$$

$$U_a = \frac{\Delta P_M}{S_{ном}} 100; \quad (6.76)$$

$$\beta = \frac{I_{сер}}{I_{ном}} = \frac{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}}{S_{ном} T_p}, \quad (6.77)$$

де ΔP_M – втрати к.з. трансформатора, кВт; $I_{сер}$ – середнє значення струму завантаження трансформатора за час T_p , А; W_a , W_p – відповідно спожита активна (кВт·год) і реактивна (квар·год) електроенергія за час T_p , год., роботи трансформатора, А.

Згідно з [6] для споживачів із загальноустановленою потужністю $S < 750$ кВ·А економічну потужність конденсаторної установки рекомендують здобувати за формулою:

$$Q_{p.ек} = (0,2 + 0,5d)S, \quad (6.78)$$

де S – приєднана потужність, кВ·А; d – частка встановленої потужності асинхронних електродвигунів і зварювальних трансформаторів у загальній встановленій потужності споживачів, приєднаних до шин низької напруги трансформатора.

Значення потужності Q , яку енергопостачальна організація доводить споживачам, визначається за даними, що наведені в табл. 6.13.

Таблиця 6.13 – Значення потужності, яку енергопостачальна організація доводить споживачам

$Q_{p.ек}$, квар	до 50	50–120	120–190	190–260	260–380	380 і більше
Q , квар	0	75	150	225	300	450

Потужність конденсаторної установки необхідно регулювати згідно з графіком споживання реактивної потужності. Найефективнішим є автоматичне регулювання за допомогою регулятора реактивного навантаження, який складається із задавальної, підсилювальної і виконавчої ланок. Задавальна ланка має реагувати на споживану реактивну потужність або реактивну складову струму. Підсилювальна ланка приймає сигнал і з певною витримкою часу подає команду виконавчій ланці, яка вмикає чи вимикає окремі секції конденсаторної батареї.

Приміщення, де встановлюють конденсаторні установки, відносяться до вибухонебезпечних.

Під час вмикання конденсаторної батареї на її затискачах довго зберігається напруга. Щоб не допустити вмикання заряджених конденсаторів та забезпечити безпечне обслуговування конденсаторних батарей, потрібно застосовувати розрядні резистори. При напрузі до 1000 В замість резисторів використовують лампи розжарення, які вмикають на затискачі конденсаторної батареї.

Потужність компенсувальних пристроїв вибирають у такій послідовності:

- будують графік споживання реактивної потужності або визначають споживану реактивну потужність іншим способом;
- вибирають спосіб компенсації і місце встановлення компенсувального пристрою на підставі техніко-економічного порівняння кількох варіантів;
- визначають потужність компенсуючого пристрою;
- складають проект компенсувальної установки.

Приклад. Приєднана до трансформаторної підстанції потужність споживачів $S = 200$ кВ·А, $d = 0,6$.

Якщо $Q_{p.ек} = (0,2 + 0,5 \cdot 0,6) \cdot 200 = 100$ квар., то $Q = 75$ квар. Вибираємо три конденсатори серії КМ2-0,38 (див. додаток 7).

Запитання для самоперевірки

1. За яких умов використовують метод побудови графіка електричних навантажень?
2. Чому у промисловості широко застосовують метод упорядкованих діаграм (ефективного числа споживачів)?
3. У чому полягає суть статистичного методу?
4. Метод коефіцієнта одночасності.
5. Призначення електропроводки?
6. Які способи виконання електропроводок рекомендовано для сільськогосподарських приміщень?
7. Дайте визначення терміну “Струм перевантаження”?
8. Дайте визначення терміну “Коротке замикання”?
9. Призначення електричних апаратів пуску, керування та захисту?
10. Як здійснюється вибір пускозахисної апаратури та розподільних пристроїв?
11. Мета перевірки захисних апаратів на спрацювання під час однофазного к. з.?
12. Які існують заходи щодо компенсації реактивної потужності?

Лекція № 6

ЩИТИ І ПУЛЬТИ В ПРОЕКТАХ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

План:

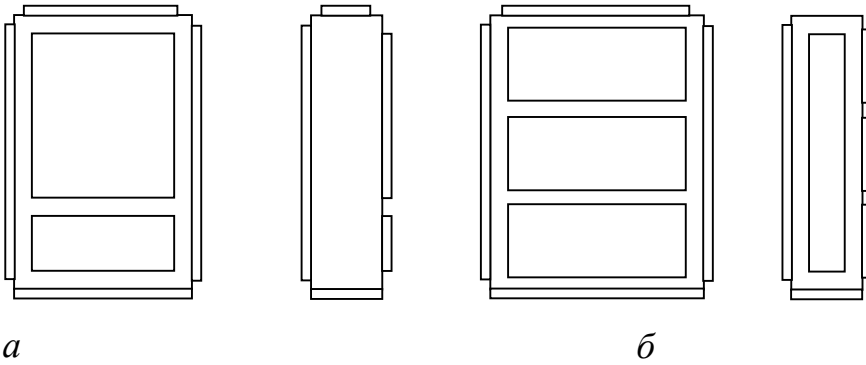
1. Класифікація щитів і пультів, вимоги до розробки їх креслень;
2. Комплектування щитів і пультів апаратурою керування та захисту;
- 3 Розробка мнемосхем;

1. Класифікація щитів і пультів, вимоги до розробки їх креслень

Щити і пульти – це пости керування, контролю, сигналізації електрифікованих і автоматизованих об'єктів. На них розміщують апаратуру керування, контрольні-вимірні прилади, засоби сигналізації та захисту. На фасадних сторонах щитів і пультів можуть бути нанесені мнемонічні схеми, накладні надписи (пояснюючі), освітлювальні пристрої тощо.

Щити поділяють:

- за виконанням на: *відкриті* (панельні) та *захищені* (шафові);
- за призначенням на: *оперативні* (з них ведеться керування і контроль технологічними процесами); *неоперативні* (на них розміщується апаратура та прилади, що безпосередньо оператором не використовується для керування та за спостереження за ходом технологічного процесу);
- за місцем розташування та об'ємом інформації, що надходить, на: *місцеві* (розташовують поряд з електрифікованим та автоматизованим устаткуванням); *агрегатні* (розташовують апаратуру керування, контролю та сигналізації для одного агрегату); *блочні* (розташовують засоби електрифікації та автоматизації кількох агрегатів, що зблоковані в єдину комплексну установку); *центральні* (розміщують апаратуру електрифікації та автоматизації, що відноситься до всього технологічного процесу або комплексу технологічно пов'язаних виробництв); *допоміжні* (розміщують реєструвальні прилади та лічильники, релейні щити, щити живлення тощо);
- за виконанням на: *виконання* (із двома фасадними панелями (рис. 7.1, а); *II виконання* (із трьома фасадними панелями (рис. 7.1,б).



а – I виконання; б – II виконання

Рис. 7.1 - Виконання шаф керування:

Шафові малогабаритні щити також мають два виконання: I – призначене для підлогового розміщення; II – для навісного.

Щити і пульти на стадії проектування вибирають на підставі таких нормативних документів: ГОСТ 20504-81 “Система уніфікованих типових конструкцій агрегатних комплексів ГСП. Типи і основні розміри”, ДСТУ 3288-95 (ГОСТ 26032-96) “Система уніфікованих типових конструкцій агрегатних комплексів. Загальні технічні умови”. ОСТ 36.13-76 “Щити і пульти систем автоматизації технологічних процесів”. На додаток до ОСТ 36.13-76 розроблені інструкції РМ4-107-82.

Згідно з вищезазначеними нормативними документами щити і пульти розраховано, на розміщення їх у закритих приміщеннях із температурою навколишнього середовища від -30 до $+50^{\circ}\text{C}$ за відносної вологості не більше як 80%. Промисловість випускає також щити та пульти спеціального призначення, які розраховані на більш високі або низькі температури, підвищену вологість, наявність агресивного середовища тощо. Щити та пульти умовно позначають згідно з вимогами ОСТ 36.13-76 (табл. 7.1).

Шафові щити використовують:

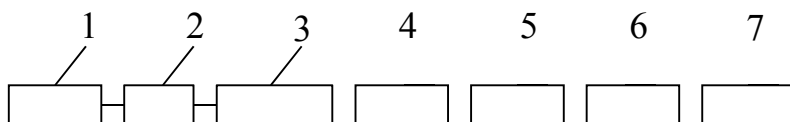
- у виробничих приміщеннях, що характеризуються запиленістю, великою вологістю та можливістю механічного пошкодження апаратури й внутрішньо-щитових проводів;
- для розміщення допоміжної апаратури (реле, джерел живлення) всередині щита;
- для захисту обслуговуючого персоналу від дотиків до відкритих

струмоведучих частин апаратури та затискачів.

Панельні щити з каркасом розміщують здебільшого в спеціальних приміщеннях (диспетчерських, центральних та операторських пультах керування).

Пульти використовують для розташування на них апаратури керування, сигналізації та перемикачів вимірювальних кіл. Допоміжні елементи (табл. 7.1) призначені для забезпечення єдиної конфігурації щитів або пультів, що розробляються.

Згідно з ОСТ 36.13-76 передбачено умовний запис щитової продукції за певною схемою, структура якої зображена на рис. 7.2.



1 – найменування виробу; 2 – умовне позначення; 3 – виконання; 4 – розміри шафи керування; 5 – кліматичне виконання та категорія розташування; 6 – ступінь захищеності; 7 – галузевий стандарт

Рис. 7.2. Структура умовного запису шафи керування

Слід зазначити, що ступінь захисту шафових щитів від дотику до струмопровідних частин, попадання сторонніх предметів і води має бути не нижче як IP30 (забезпечує захист струмопровідних частин від сторонніх предметів, розміри яких перевищує 2,5 мм; захист від попадання води відсутній), ступінь захисту панельних щитів – IP00. Наприклад, запис модифікації: щит – ЩПК-3-ЗЛ-1 (1000+800+600) У4IP00 ОСТ 36.13-76 означає, що щит панельний із каркасом, трисекційний, закритий з лівого боку. І виконання, габаритні розміри 1000x800x600, кліматичне виконання V, категорія розміщення 4, ступінь захисту IP00.

Таблиця 7.1 – Позначення щитів і пультів

Найменування	Умовне позначення
1. Шафний щит:	
із задніми дверима	ЩШ-3Д
із задніми дверима, відкритими з двох боків	ЩШ-3Д-02
із задніми дверима, відкритими з правого боку із	ЩШ-3Д-ОП
задніми дверима, відкритими з лівого боку	ЩШ-3Д-ОЛ
із задніми і передніми дверима	ЩШ-3ПД
двосекційний тощо малогабаритний	ЩШ-2 ЩШМ

2. Щит панельний для диспетчерських пультів: з каркасом з каркасом, закритий з правої сторони з каркасом, закритий з лівої сторони з каркасом двосекційний тощо з каркасом трисекційний тощо	ЩПК ЩПК-3П ЩПК-3Л ЩПК-2 ЩПК-3
3. Штатив: Односекційний двосекційний трисекційний плоский	С С-2 С-3 СП
4. Допоміжні елементи для щитів диспетчерських і операторських пунктів: панель панель з дверима кутова вставка декоративна панель торцева декоративна панель кутова вставка для декоративних панелей	ПнВ ПнВД ВУ ПнД-ЩПК ПнТД-ЩПК ВУ-Д-ЩПК
5. Пульти: закритий правий лівий середній з нахилоною приставкою для приладів: а) правий б) лівий в) середній	П П-П П-Л П-С ПНП ПНП-П ПНП-Л ПНП-С
6. Допоміжні елементи до пультів: кутова вставка кутова вставка до пультів нахилоною приставкою для приладів	ВУ-П ВУ-ПНП

У проектах з електрифікації та автоматизації технологічних процесів сільського господарства немає потреби детально розробляти весь комплекс технічної документації на щити та пульти, оскільки вона повною мірою є на заводах-виготовлювачах. Тому в проектах наводять лише креслення загального вигляду, переліку приладів та апаратури, що розміщується на щиті, характеру з'єднань, надписи в таблицях до приладів та ін. (повний склад документації визначається інструкцією РМ4-107-82 “Щити і пульти систем автоматизації технологічних процесів. Вимоги до виконання, технічної документації, що пред'являється заводу-виробнику”).

Креслення загального вигляду щитів і пультів розробляються на одинарний та

складений щити. *Одиничний* – це щит, штатив, пульт за номенклатурою, що передбачено ОСТ 36.13-76 (крім допоміжних елементів). *Складений* щит виконують із кількох одинарних та інколи доповнюють допоміжними елементами.

Креслення загального вигляду одинарного щита має складатись із таких частин:

- вигляду спереду (фронтальна площина) із координацією апаратури, що необхідно для підготовки місць на фронтальній площині щита під прилади; (координація здійснюється через прив'язку апаратури до основи та осьової лінії щита (рис. 7.3).

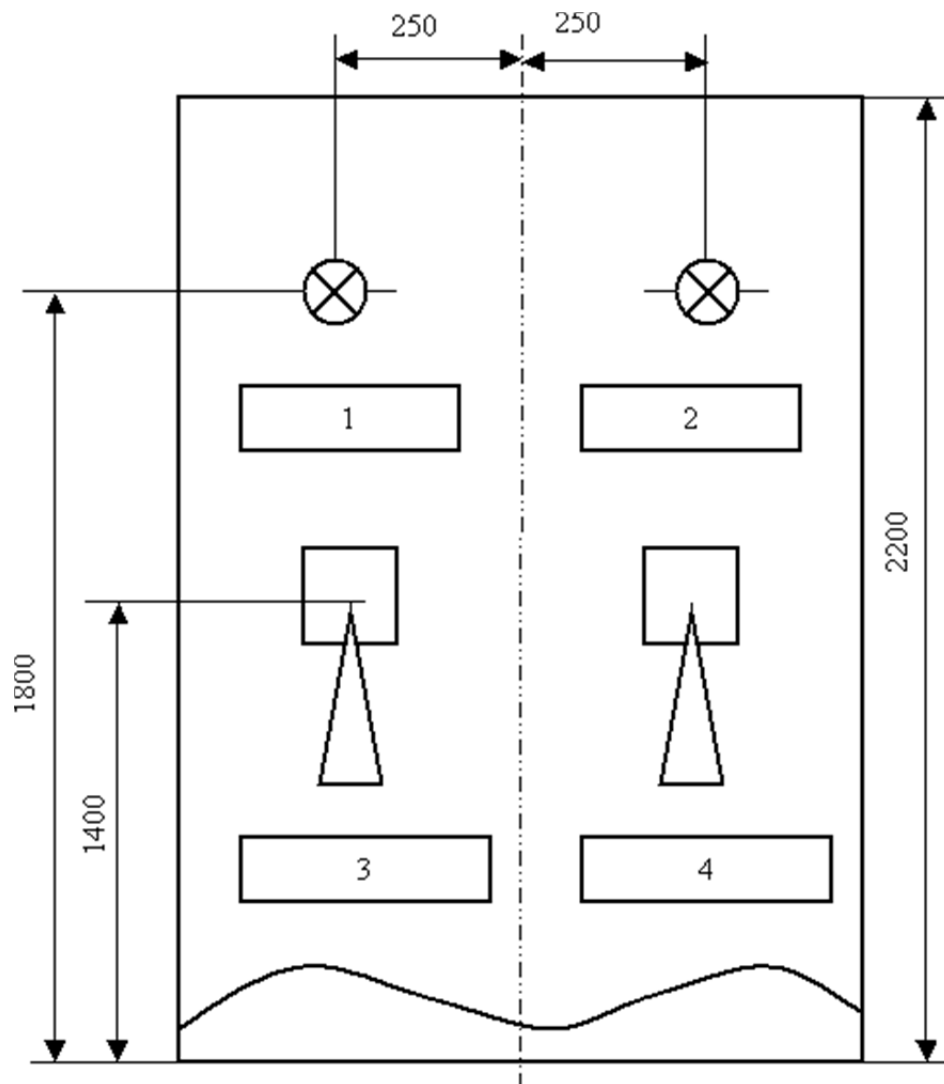


Рис. 7.3. Фрагмент загального вигляду щита керування

- вигляду на внутрішні площини без координації (ця складова, як правило, зображується на окремому листі);

- технічних вимог;

- таблиць “Надписи на табло та в рамках”, “З’єднання прово- док”, “Підключення проводок” (таблиці можуть бути виконані на окремих листах);

- переліку складових частин щита;
- основного надпису;
- додаткових граф.

На кресленнях загального вигляду щити зображують у таких масштабах: 1:10 – для одинарного; 1:25 – для складеного.

Слід пам'ятати, що на кресленнях загального вигляду прилади та засоби автоматизації зображують спрощено у вигляді зовнішніх обрисів.

Найменування креслення загального вигляду, що наводиться в основному надписі, для складених щитів, а також одинарних, які не входять до складеного, починається зі слова “Щит”. Далі зазначають функціональне призначення щита (наприклад, щит диспетчера, оператора тощо) або найменування технологічної установки, яка обслуговується щитом. Потім вказується найменування документації. Наприклад, “Щит диспетчера водопостачання. Загальний вигляд”.

Для одинарного щита, що є компонентом складеного, до найменування креслення включають умовний номер одинарного щита (присвоюється згідно з кресленням загального вигляду складеного щита) та найменування документації. Наприклад, “Щит 1. Загальний вигляд”.

Технічні вимоги розміщують над основним надписом і повинні мати такий текст:

- “Розміри для довідок”,
- “Покриття - варіант... ОСТ 36.13-76”,
- “Таблиці з'єднань та вмикань виконані на підставі схем...” тощо.

Перелік складових частин одинарного щита вміщує такі розділи:

- нетипові деталі для розміщення приладів та апаратів всередині щита;
- стандартні вироби (прилади, апаратура, монтажні пристрої);
- матеріали (електропроводу та труби).

Надписи на табло та в рамках виконують у спеціальних таблицях, які можуть бути наведені на окремих листах. Кожному надпису на кресленні присвоюється номер, починаючи з одиниці зліва направо, який зображують всередині контуру табло або рамки. Форма заголовка надписів на табло та в рамках наведена у вигляді табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Форма заголовка надписів на табло та в рамках

Номер надпису	Надпис	Кількість	Номер надпису	Надпис	Кількість
---------------	--------	-----------	---------------	--------	-----------

6.2 Комплектування щитів і пультів апаратурою керування та захисту

Вимоги до щитових приміщень

Габаритні розміри щитів і пультів визначаються розмірами технічних засобів, що в них розміщуються.

Прилади та апарати на лицьовому боці щитів і пультів розміщуються згідно з прийнятими принципами їх компоновки. При цьому мають забезпечуватись зручність та ефективність роботи оператора, а також безпека обслуговування.

У щитах, що обслуговуються зовні (щити захищені задніми дверима, передніми та задніми дверима, а також боковими дверима, у яких глибина або відстань від дверей до протилежної стінки не перевищує 600 мм), апарати та прилади з струмопровідними частинами можна розташовувати на будь-яких внутрішніх стінках.

У пультах для розташування апаратів і приладів необхідно, як правило, використовувати тільки робочу (верхню) поверхню пульта та передню стінку підставки для приладів. На внутрішніх стінках пульта рекомендується розташовувати лише збірки затискачів.

Апарати та прилади (або блоки з них) всередині щитів і пультів слід групувати за належністю до системи вимірювання, керування, сигналізації та ін., всередині цих груп – за родом струму, значенням напруг, типами апаратів.

При розташуванні приладів та апаратів на щитах і пультах відстань між відкритими струмопровідними елементами різних фаз (полярності), а також між елементами і неізолюваними металевими частинами (корпусом) має бути не менше як 20 мм по поверхні ізоляції та 12 мм – по повітрю.

Апарати та прилади, що розміщуються всередині щитів, рекомендується розміщувати на таких відстанях від основи щита:

- трансформатори та інші джерела живлення невеликої потужності – 1700–2000 мм;
- панелі з вимикачами, запобіжниками, автоматами – 700–1700 мм;
- реле – 600–1900 мм;
- збірки затискачів у разі горизонтального розташування з урахуванням розбору кабелю – 350–800 мм;
- збірки затискачів у разі вертикального розташування з врахуванням підводу

кабелю знизу та зверху: нижній край збірки – 350 мм; верхній край збірки – 1900 мм; стояк для закріплення кабелів – 150 мм.

За умов розташування двох і більше горизонтальних збірок відстань між ними має бути не менше як 200 мм.

Апаратуру, що виділяє під час роботи велику кількість теплоти (резистори, лампи тощо), необхідно, як правило, розташовувати у верхній частині щита. Апарати та прилади, характеристики яких суттєво залежать від температури навколишнього середовища, розташовують в місцях, віддалених від пристроїв, що виділяють теплоту.

Апарати з рухомими струмопровідними частинами (рубильники, автомати, магнітні пускачі, реле тощо) слід розташовувати так, щоб вони не могли самовільно замкнути коло під час дії сили тяжіння. Рухомі струмоведучі частини апаратів у вимкненому стані не повинні бути під напругою.

Не допускається розташовувати на одній панелі щита електричні апарати та прилади, до яких підводяться трубопроводи з горючою рідиною.

Особливо слід зазначити вимоги, із врахуванням яких у щитах та пультах прокладається проводка.

Електричні проводки в щитах та пультах слід виконувати в закритих негорючих або важко-горючих коробах (металеві, поліхлорвінілові тощо) або відкритими джгутами. Для електропроводки щитів і пультів застосовують мідні ізольовані проводи, мінімальні перерізи яких відповідають мінімальним перерізам електропроводок. Для електропроводок приладів і апаратів, що встановлюються, на рухомих елементах щитів (дверях, поворотних рамах тощо), використовують гнучкі мідні проводи.

Джгути проводів, що прокладаються горизонтально або вертикально за найкоротшою відстанню з мінімальною кількістю згинів та перехрещень, потрібно скріплювати бандажами із поліхлорвінілової стрічки з кроком, що не перевищує 200 мм. Джгути не повинні закривати доступу до контактів або закріплювальних пристроїв приладів і апаратів та ускладнювати їх ревізію або демонтаж. Допускається прокладати джгути проводів по металевих, захищених від корозії, поверхнях щитів, штативів, пультів. Проте у разі обгинання ребер, кутів, бортів та ін. проводи не повинні їх торкатися. Джгути кріпляться до уніфікованих конструкцій щитів та пультів і під час

переходу з нерухомої частини щита на рухому (раму, двері тощо) повинні мати компенсатор, що працює на крутіння.

Збірки затискачів і затискач в межах однієї збірки рекомендується групувати за належністю:

- до агрегатів, установок;
- систем керування, вимірювання, сигналізації;
- напруги кіл.

При цьому доцільно виділяти в окремі групи затискачі кіл:

- вимірювання;
- живлення електроінструментів і переносного освітлення напругою до 36 В;
- постійного та змінного струмів;
- іскробезпечних;
- екранувальних.

Групи затискачів мають розділятися маркувальною колодкою або вільним затискачем.

Вибираючи щитове приміщення, слід враховувати, що щитові приміщення не повинні розміщуватись:

- поблизу джерел сигнального шуму з частотою понад 4 кГц;
- у підвальних і цокольних приміщеннях;
- над приміщеннями з пожежонебезпечним виробництвом, а також виробництвом, що супроводжується виділенням великої кількості теплоти (понад 23 Вт/м³) або шкідливих газів, парів, пилу;

- у місцях, в яких діють сильні магнітні поля промислового електрообладнання;
- під приміщенням із сирим технологічним процесом;
- під та над камерами систем вентиляції та установками кондиціонування повітря;

- під душовими та санвузлами.

В операторських (диспетчерських) пунктах не повинно бути:

- вібрацій від технологічного обладнання понад встановлених меж (табл. 7.3);
- шуму понад тих меж, що вказано в табл. 7.4;
- дії магнітного поля від електрообладнання та електропроводок з напруженістю

понад 400 В/м.

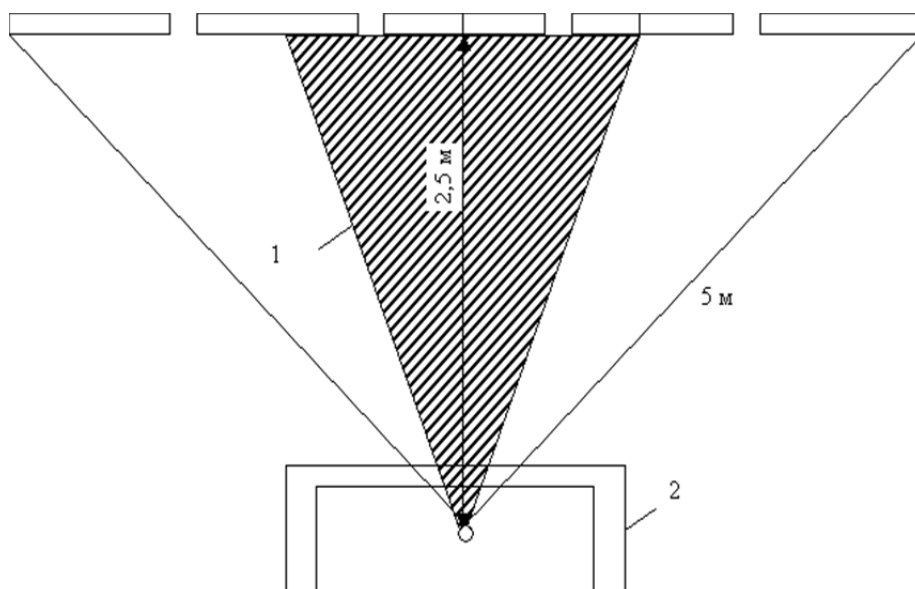
Таблиця 7.3 – Межі допустимих значень вібрації

Частота, Гц	Амплітуда, мм	Швидкість коливних рухів, см/с	Прискорення коливних рухів, см/с ²
8...15	0,05...0,03	0,25...0,20	13...27
15...25	0,03...0,009	0,20...0,17	27...52

Таблиця 7.4 – Допустимі значення рівнів шумів в приміщеннях пунктів керування

Частота, Гц	Рівень шуму в приміщенні, дБ		
	максимально допустимі межі без шкідливого впливу на слух		максимальна межа розрахункових
	випадкова дія (одна година і менше)	постійна дія (один місяць)	комфортних умов для людини
38...75	125	115	100
75...150	120	110	95
150...300	120	110	90
300...600	120	105	85
600...1200	115	100	75
1200...2400	110	95	65
2400...4800	105	90	60

Щодо планування щитового приміщення слід зазначити, що добре планувальне вирішення – це таке, коли всі панелі оперативного щита розташовані впродовж однієї стіни, а місце оператора – у вершині кута 120°, який створюється лініями, що напрямлені від крайніх точок щита. Відстань від постійного місця розміщення оператора до щита рекомендується обмежувати 5 м (рис. 7.4). Дрібна шкала приладів має бути видною з відстані не більш як 1–2 м; шкала, що повинна чітко розрізнятись, – не більш як 2–4 м; мнемосхеми – 4–5 м.



1 – сектор найкращого огляд; 2 – стіл оператора

Рис. 7.4. Розташування стола оператора в щитовому приміщенні:

На стан оператора та його працездатність впливає багато чинників навколишнього середовища: температура; вологість; тиск; освітлення; колір деталей приміщення та обладнання; шум; вібрація; наявність парів, газів тощо.

Комфортні умови за температурою і вологістю для більшості людей складають відповідно 21°C і 30–70 % (табл. 7.5).

Таблиця 7.5 – Норми на мікроклімат в щитових приміщеннях

Оптимальні			Допустимі		
$t, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$	$v^*, \text{м/с}$, не більше	$t, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$	$v^*, \text{м/с}$, не більше
холодний і перехідний пори року ($t_{\text{зовн.пов}} \leq 10^\circ\text{C}$)					
18–21	60–40	0,2	17–20	80	0,3
Тепла пора року ($t_{\text{зовн.пов}} > 10^\circ\text{C}$)					
22–25	60–40	0,3	23	80	0,5
			24	75	
			25	70	
			26	65	
			27	60	
			28	55	

v^* – швидкість руху повітря.

Підлоги в щитових приміщеннях мають бути не електро- провідними; опалення слід передбачити повітряне (допускається водяне за умов використання утеплених із решітками радіаторів). Опалення та вентиляція розраховуються, виходячи із забезпечення комфортних умов для операторів (вентиляційні системи при цьому мають бути розташовані за межами щитових).

У щитових приміщеннях потрібно створити надмір тиску в 20–30 Па. Вміст пилу в повітрі не повинен перевищувати 2 мг/м^3 .

Освітлення в щитовій має бути, як правило, природним. Співвідношення площі вікон та площі підлоги повинно становити 1:5 за умов роботи з дрібними деталями; в інших випадках – 1:10. Штучне освітлення в щитових має становити 550–1100 Лк за умов знімання показів приладів, 220–250 Лк за умов ведення записів та керування, 100 Лк – під час огляду та ремонту, 20–50 Лк – у проходах.

Крім робочого освітлення, у щитових передбачається аварійне, світильники якого

мають бути під'єднані до незалежного джерела живлення.

За умов використання відкритих щитів слід виконувати такі *правила*:

- відстань між найбільш виступаючими відкритими струмопровідними частинами апаратів, що розташовуються на протилежно встановлених щитах, допускається не менш як 1,5 м, до того ж ширина проходу має бути не менша як 0,8 м;
- відстань від найбільш виступаючих відкритих струмопровідних частин апаратів і приладів, що розташовані на внутрішніх стінках щитів, до стіни приміщення має бути не менш як 1 м, з шириною проходу не менш як 0,8 м;
- ширина проходу для обслуговування перед щитом має бути не менш як 0,8 м;
- не допускається використовувати проходи перед щитами, між ними та ззаду як основний або запасний прохід в інші приміщення, а також для транспортування різного обладнання.

6.3 Розробка мнемосхем

Мнемосхема – це графічне зображення технологічного процесу, за допомогою якого оператор швидко оцінює технологічну ситуацію.

На мнемосхемі відображаються всі основні контури керування, проте одночасно на ній не показують другорядні деталі технологічного процесу, що лише відволікають увагу оператора.

Мнемосхеми розробляються за такими *правилами*:

- окремі технологічні апарати, машини, трубопроводи, лінії зв'язку зображуються символами, контури яких мають бути подібні контурам відповідних машин і агрегатів; масштаб при цьому не дотримується; символами більших розмірів зображують більш відповідальне обладнання;
- символи технологічного обладнання, що відносяться до тієї самої виробничої дільниці, зображують на полі мнемосхеми загальної групи. У межах цієї групи символи розміщують приблизно рівномірно, а групу від групи відділяють;
- щільність розміщення символів має допускати невеликі зміни в схемі за умов удосконалення технології;
- напрям основного технологічного обладнання береться зліва направо;

- символи розміщують так, щоб звести до мінімуму кількість перетинів ліній зв'язку;

- на лініях технологічних потоків (як правило, біля машин) напрям потоків зображують стрілками; на лініях, що не завершаються символами, в кінці зображують стрілки та наносять пояснювальні надписи;

- мінімально допустимі розміри символів визначають за формулою:

$$S = 2l \operatorname{tg} \alpha, \quad (7.1)$$

де S – розмір символу; l – відстань від символу до лінії зору; α – кут зору (для символів нескладної форми беруть $\alpha = 25^\circ$; для символів складної конфігурації з деталями всередині $\alpha = 35^\circ$; для найменших деталей складних символів $\alpha = 60^\circ$; оптимальний розмір символу, які забезпечує швидке зчитування, відповідає $\alpha = 40^\circ$);

- відстань між середніми символами має відповідати куту в 40° ;
- символи та лінії технологічних потоків на мнемосхемах бувають накладними та накресленими (накладні виготовляють із листового дюралюмінію, пластмаси завтовшки 1–2 мм);

- ширину полос ліній технологічних потоків, імпульсних і командних ліній приладів і регуляторів беруть 4; 6; 8; 10 або 12 мм; лінії технологічних потоків мають бути в два і більше разів ширшими за імпульсні і командні лінії; лінії завширшки 4 мм наносять фарбою;

- колір символів має збігатися з кольором технологічного обладнання.

Завдання на виконання креслення мнемосхеми – це частина креслення загального вигляду щита (пульту) керування і є виконаним на міліметровому папері ескізом мнемосхеми в масштабі креслення, що вимагається. Як правило, використовують масштаб 1:2.

Завдання (ескіз) мнемосхеми має вміщувати:

- габаритні розміри мнемосхеми та місце її розташування на щиті; органи керування, що вмонтовуються в мнемосхему, бажано встановлювати не нижче як 800 і не вище як 1600 мм від рівня підлоги приміщення;

- координати розміщення основних символів мнемосхеми;
- кольори всіх символів, ліній технологічних потоків, вимірювальних і командних ліній приладів і регуляторів;

- необхідні вказівки щодо розміщення пояснювальних написів, стрілок “напрямок потоків” та за потребою літерні позначення параметрів, що контролюються та сигналізуються.

Запитання для самоперевірки

1. Призначення щитів і пультів?
2. Де використовують шафові щити?
3. Призначення креслення загального вигляду?
4. З яких частин має складатись креслення загального вигляду одинарного щита?
5. На якій відстані рекомендується розміщувати апарати та прилади, що знаходяться всередині щитів від основи щита?
6. Що необхідно враховувати при виборі щитового приміщення?
7. Які правила слід виконувати при використанні відкритих щитів?
8. За якими правилами розробляються мнемосхеми?
9. Що мають вміщувати мнемосхеми?