

**І.І. МАРТИНЕНКО, В.П.ЛИСЕНКО, Л.П.ТИЩЕНКО,
І.М.БОЛБОТ, П.В.ОЛІЙНИК**

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ АПК

**Схвалено Міністерством аграрної політики України
для використання в навчально-виховному процесі
як підручник під час підготовки магістрів спеціальності
”Електрифікація і автоматизація сільського господарства”
у вищих навчальних закладах III–IV рівнів акредитації
Міністерства аграрної політики України**

2008

УДК 621.3:63 (075.8)

*Гриф надано Міністерством
аграрної політики України
(лист № 11-128-13/1111 від 10.07.08)*

Рецензенти: Федорейко В.С., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинознавства та комп'ютерної інженерії Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка;
Червінський Л.С., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електрифікованих технологій аграрного виробництва ім. С.П. Бондаренка Національного аграрного університету

І.І. Мартиненко, **В.П. Лисенко**, **Л.П. Тищенко**, **І.М. Болбот**,
П.В. Олійник Проектування систем електрифікації та автоматизації
АПК: Підручник. – К., 2008. – 330 с.

ISBN 966-7906-34-5

Висвітлено загальні питання проектування об'єктів агропромислового комплексу. Описано методи матеріально-енергетичних розрахунків, схеми, що застосовуються в проектах електрифікації та автоматизації. Розглянуто принципи і методи розрахунків та вибору засобів електротехніки та автоматики, проводок, пускозахисної апаратури, щитів і пультів, а також методи аналізу якості систем електрифікації та автоматизації.

ISBN 966-7906-34-5

© **І.І. Мартиненко**, В.П. Лисенко,
Л.П. Тищенко, І.М. Болбот,
П.В. Олійник, 2008

ВСТУП

Стан і розвиток сільського господарства значною мірою залежить від енергетичної бази, яка складається з мобільної (здебільшого двигуни внутрішнього згоряння) і стаціонарної (в основному електротехнічної) енергетики. Електроенергетика – це є найважливіша і найперспективніша складова частина загальної енергетики сільського господарства.

За даними Державного комітету статистики України, виробництво електроенергії в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України в 2006 році становило 192,2 млрд. кВт·год, що на 3,8% більше, ніж у 2005 році. Частка АЕС у структурі виробництва електроенергії в 2006 році становила 49,1%, ТЕС – 40,9%, ГЕС – 5,7%, комунальних ТЕЦ і блок-станцій – 4,3%.

Сучасне сільське господарство України споживає електроенергію переважно від державних джерел через електропідстанції, яких налічується тільки напругою 6–20 кВ близько 150 тис. загальною потужністю понад 21 тис. МВ·А. Протяжність електромереж сільськогосподарського призначення перевищує 700 тис. км, зокрема низьковольтних напругою 0,38 кВ – 360 тис. км.

Нині електродвигунів у сільському господарстві працює близько 4,4 млн. загальною потужністю 22 млн. кВт та інших електроустановок понад 760 тис. потужністю 5,5 млн. кВт.

Сільськогосподарське виробництво в 1998 р. для виробничих потреб спожило 8,8 млрд. кВт·год, в 2006 р. – 2,520 млрд. кВт·год, що становило відповідно близько 6,9% та 2,6% загального споживання електроенергії в Україні. Основним споживачем зараз є електропривід, на який припадає 60% виробничого електроспоживання. 25% електроенергії споживають електронагрівні та електротехнологічні установки, решта йде на виробниче освітлення і опромінення. На майбутнє передбачається дальший істотний розвиток електротехнології, внаслідок чого значно зростатиме виробниче електроспоживання.

Сільське населення України в 2006 році спожило понад 12 млрд. кВт·год, тобто на одного мешканця села припадало більш ніж 600 кВт·год електроенергії.

Електрифікація сільськогосподарського виробництва створила умови для розвитку автоматизації технологічних процесів. Відомо, що автоматизація дає можливість в 1,5–2 рази зменшити трудомісткість продукції, істотно поліпшити умови праці сільських трудівників,

зеконотити до 20% електроенергії. Широке застосування засобів і систем автоматизації в майбутньому сприятиме докорінному удосконаленню технологій і техніки сільського господарства, зменшенню трудо- і енерговитрат на одиницю продукції.

Із збільшенням оснащення сільського господарства електротехнічним обладнанням і засобами автоматизації сільського господарства інженер-електрик має бути добре обізнаний з методами і способами проектування систем електрифікації та автоматизації.

У процесі вивчення дисципліни з проектування систем електрифікації та автоматизації студент повинен опанувати методи розрахунків та вибору електрообладнання, засобів автоматизації, пускозахисної апаратури, різного виду електропроводок та оволодіти принципами і способами зображення різних схем, що застосовуються в проектах електрифікації та автоматизації, методами матеріально-енергетичних розрахунків, визначення надійності та ефективності використання систем електрифікації та автоматизації.

Пропонований підручник повинен допомогти студентам оволодіти певними знаннями та навичками щодо засвоєння основних положень цієї дисципліни. Майбутні спеціалісти зможуть вільно користуватися спеціальною літературою з проектування, довідниками, державними і міждержавними стандартами, типовими й індивідуальними проектами об'єктів сільської електрифікації та автоматизації. Питання проектування систем електропостачання в цій книзі не розглядаються.

1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

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, поточкових 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 систем (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 сполучення 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 будівництво 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 (СН), 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 суперечать 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 бути виконані 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 21.508-93) “Правила виконання робочої документації генеральних планів підприємств, споруд та житлових будівельних об'єктів” та ДСТУ 3008-95 “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 ЄСКД – 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
1	2
ПЗ	ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. ГОСТ 2.106-68 ЕСКД. Текстовые документы. ГОСТ 19.106-78 ЕСКД. Требования к программным документам, выполненным печатным способом. ГОСТ 19.404-79 ЕСКД. Пояснительная записка. Требования к содержанию и оформлению

Продовження таблиці 1.2

1	2
Специфікація	ГОСТ 2.108-69. Спецификация. ГОСТ 19.202-78 ЕСКД. Спецификация. Требования к содержанию и оформлению. ДСТУ Б А 2.4-10-95 СПДБ. Правила виконання специфікацій обладнання, виробів і матеріалів
Креслення	ГОСТ 2.109-73 ЕСКД. Основные требования к чертежам. ГОСТ 2.119-73 ЕСКД. Эскизный проект. ГОСТ 2.120-73 ЕСКД. Технический проект. ГОСТ 2.417-78 ЕСКД. Правила выполнения чертежей печатных плат
Схеми	ГОСТ 2.701-84 ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. ГОСТ 2.702-75 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем. ГОСТ 2.708-81 ЕСКД. Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники. ГОСТ 2.710-81 ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. ГОСТ 2.711-82 ЕСКД. Схемы деления изделия на основные части. ГОСТ 19.701-90 ЕСКД. Схема алгоритмов и программ. Обозначения условно- графические
Програми і програмні документи	ГОСТ 19.101-77 ЕСКД. Виды программ и программных документов. ГОСТ 19.105-78 ЕСКД. Общие требования к программным документам. ГОСТ 19.401-78 ЕСКД. Текст программы. ГОСТ 19.402-78 ЕСКД. Описание программы

Під час проектування використовують також допоміжну літературу: довідники, рекомендації та вказівки щодо проектування різних об'єктів, методики, поради, 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 сільсько-господарського виробництва проектують в одну або дві стадії згідно з ГОСТ 2.103-68 “Стадії разработки” та ДБН А 2.2-3-2004 “Склад, порядок розроблення, погодження та затвердження проектною документації для будівництва”. За двостадійного проектування в першій стадії виконується технічний проект (ТП), а в другій – робочі креслення (РК). За одностадійного проектування виконується техноробочий 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.

Двостадійне 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 монтажні-налагоджувальні роботи під час реалізації проекту.

Комплект робочих креслень містить такі частини:

- креслення енергетичних, водорозподільних і каналізаційних комунікацій;
- функціональні схеми автоматизації, принципи 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 одностадійного 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 на електронно-променеу трубку, який називається дисплеєм. 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. Дисплеї бувають чорно-білими або кольоровими.

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 настройок 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 дані повинно 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?

2. МАТЕРІАЛЬНО-ТЕХНІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ ВИРОБНИЦТВА

Під час проектування 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.

2.1. Визначення розмірів виробничих приміщень

До сільськогосподарських виробничих приміщень відносяться будівлі для утримання тварин і птиці, кормоцехи, комбикормові цехи і заводи, споруди захищеного ґрунту, зернообробні пункти, сховища сільськогосподарської продукції, водокачки, цехи з переробки сільськогосподарської продукції (консервні, ковбасні, сироварні, маслобойні, крупорушні, 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 молодняка – 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.

2.2. Електропостачання об'єктів сільського господарства

У найбільш сприятливому 1991 р. електроспоживання 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 безперервного 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 електропривід; використовувати децентралізовані схеми електротеплопостачання; передбачити установлення електронагрівників замість нагрівників на більш дефіцитному органічному паливі; використовувати люмінесцентні та газорозрядні 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 і газорозрядні, 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 проєктах 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 проєкти дає можливість зекономити до 10% споживаної електроенергії, а для цього треба в проєктах передбачити установку електролічильників на кожній окремій в господарському відношенні ділянці (теплиця, молочна ферма ВРХ, пташник, кормоцех, овочесховище тощо).

В окремих випадках можна проєктувати 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 багатотарифних електролічильників. Електротехнічна промисловість України випускає дво- і тритарифні 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 позапікового навантаження електромереж забезпечує зниження втрат електроенергії в мережах та істотно зменшує платню споживачів електроенергії. Вартість 1 кВтгод в позапікові 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 електроводонагрівних установок дає можливість децентралізувати систему тепlopостачання, 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.

2.3. Визначення витрат електроенергії в сільському господарстві

2.3.1. 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.

Іноколи 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:

$$W_i = P_{\Pi} S_{\text{ЗОВ}} T_B = P_{B_i} T_{B_i} = P_{\text{МАКС}_i} T_{\text{МАКС}_i}, \quad (2.2)$$

де P_{Π} – питома потужність електроосвітлення, кВт/м²; $S_{\text{зов}}$ – площа приміщення за зовнішнім обміром, м²; T_B , T_{B_i} – тривалість використання встановленої потужності, год; P_{B_i} – встановлена потужність електроосвітлення в i -му приміщенні, кВт; $P_{\text{МАКС}_i}$ – максимальна потужність освітлювальної установки, кВт; $T_{\text{МАКС}_i}$ – 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 уо господарстві на освітлення визначаються як сума по всіх об'єктах.

2.3.2. Розрахунки електроспоживання 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 ($n_{\text{ед}}$), каталожної неузгодженості ($K_{\text{к.н}}$) і ступеня завантаження робочої машини (K_3):

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

Для електронагрівних і електротехнологічних 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 електротехнологічні установки визначають як суму витрат всіх таких споживачів у господарстві.

2.3.3. Розрахунки електроспоживання на побутові потреби

Під час проектування потужності електроспоживачів 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 сільсько-господарських 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 водонагрівниками 7,5 кВт. Під час використання побутових кондиціонерів розрахункова потужність збільшується ще на 1 кВт.

Під часи розрахунків електроспоживання 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:

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

2.4. Визначення потужності системи опалення

Для визначення потужності системи опалення сільсько-господарського 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 теплонадходження 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 (птаховничного) приміщення має вигляд, Вт:

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

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

З рівняння теплового балансу потужність системи опалення дорівнює:

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

Для будь-якого іншого приміщення потужність системи опалення визначається:

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

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

2.5. 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:

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

де n – кількість птиці; g – середня маса птиці; t – 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; $\gamma_{\bar{n}}$ – маса 1м³ сухого повітря, кг.

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

Орієнтовано повітрообмін можна визначити за формулою:

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

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

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

Вид тварин (птиці)	Повітрообмін, м ³ /(кг год)		
	взимку	у перехідний період	влітку (не менш)
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

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.

За однакової швидкості руху повітря на всіх ділянках повітропроводної 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 (табл. 2.2).

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:

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

Таблиця 2.2 – Коефіцієнти місцевих опорів

Місцевий опір	Коефіцієнт B
1	2
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

Продовження таблиці 2.2

1	2
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:	0,25
$d/D = 0,3$	0,21
$d/D = 0,4$	0,18
$d/D = 0,5$	
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

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).

2.6. 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, м³:

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

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.

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.

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.

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 m^3 , у молочному комплексі на 1200 корів – 460 m^3 .

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?

3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ОФОРМЛЕННЯ ПОЯСНОВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ ТА ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ В ПРОЕКТАХ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

3.1. Оформлення пояснювальної записки

Основні положення установлюють форму, розміри, розміщення та порядок заповнення основних документів конструкторської документації відповідно до вимог діючих стандартів.

Пояснювальна записка та графічна частина проекту, як і будь-яка конструкторська документація, до якої можуть входити текстові, схемні, програмні та інші документи, оформляються на аркушах білого паперу певних розмірів, які носять назву формати.

Міждержавний стандарт ГОСТ 2.301-68 встановлює такі основні формати, які можуть бути використані під час оформлення пояснювальної записки та інших документів:

- A1 = 841×594 мм ± 3,0 мм;
- A2 = 420 × 594 мм ± 2,0 мм;
- A3 = 420 × 297 мм ± 2,0 мм;
- A4 = 210 × 297 мм ± 2,0 мм.

Пояснювальна записка виконується на листах формату A4 за формами 5 і 5а (ГОСТ 2.106-68) і відповідно до вимог ГОСТ 2.105-79 та ДСТУ 3008-95.

Графічна частина виконується лініями, які мають відповідну товщину і форму (міждержавний стандарт ГОСТ 2.303-68). Всі надписи на схемах, графіках та інших документах, якщо вони виконуються вручну, повинні виконуватись креслярським шрифтом чорним кольором згідно з міждержавним стандартом ГОСТ 2.304-85.

На документах всіх форматів, незалежно від їх орієнтації, повинна бути рамка робочого поля документа, яку виконують суцільною товстою лінією, відступаючи від лівого краю аркуша – 20 мм, від інших – 5 мм.

Всі документи повинні мати основний напис і додаткові графи до нього, за винятком титульного листа, індивідуального завдання та окремих додатків.

Форма, розміри, зміст і порядок заповнення основного напису і додаткових граф до нього викладені в міждержавному стандарті ГОСТ 2.104-68.

Стандартом встановлено три форми основного напису:

- форма 1 (55 × 185 мм) – для перших аркушів схем;
- форма 2 (40×185 мм) – для перших аркушів текстових документів;
- форма 2а (15×185 мм) – для наступних аркушів схем і текстових документів.

Розміщують основний напис унизу справа рамки робочого поля. Для форматів A4 і більших, розміщених горизонтально, цю графу повертають на 180° та розміщують у лівому верхньому куті рамки. Для форматів більше A4 і розміщених вертикально графу повертають на 90° проти годинникової стрілки і розміщують у правому верхньому куті рамки.

Пояснювальна записка та інші текстові документи проекту виконуються за вимогами міждержавного стандарту ГОСТ 2.105-95

“Общие требования к текстовым документам” на одній стороні листа та одним із таких способів:

- рукописним, основним креслярським шрифтом за ГОСТ 2.304-81 з висотою букв і цифр не менше 2,5 мм; букви і цифри потрібно писати чітко, чорною тушшю (чорним чорнилом або кульковою ручкою з чорною пастою);

- машинописним, шрифтом Times New Roman (розмір – 14, 1,5 інтервали), стрічка (тонер, чорнило) чорного кольору;

- з застосуванням друкуючих і графічних пристроїв виводу ЕОМ;

- на магнітних носіях даних.

Пояснювальна записка повинна починатися з титульного аркуша встановленого зразка, далі розміщують завдання на проектування, анотацію, список скорочень (за необхідністю), зміст, технічне завдання, основний текст, список літератури, використаної під час виконання проекту, та додатки.

Нумерацію листів пояснювальної записки починають із титульного аркуша, на якому номер не проставляється. Лист, розміщений після завдання на проектування, нумерується цифрою 3.

Специфікації, що входять у додатки до пояснювальної записки, виконуються за формами 1, 1а ГОСТ 2.108-68.

Інші конструкторські документи, що входять у додатки (відомість купованих виробів, методика та програма випробувань та ін.), виконуються за формами, вказаними у відповідних стандартах.

Написання формул, цифр, заголовків розділів і підрозділів, заповнення таблиць виконується тільки шрифтом згідно з ГОСТ 2.304-81.

Помилки і графічні неточності допускається виправляти заклеюванням, підчисткою або замальовуванням білою фарбою з наступним внесенням виправленого тексту (графіки). Пошкодження листів текстових документів, забруднення, неповністю знищені сліди попереднього тексту – не допускаються.

Повна назва проектного пристрою або системи на титульному аркуші, в основному надпису, і при першому згадуванні у тексті пояснювальної записки повинна бути така ж, як і в основному конструкторському документі.

Структурними елементами основної частини пояснювальної записки є розділи, підрозділи, пункти, підпункти, переліки та примітки.

Розділ – головна ступінь поділу тексту, позначена номером і має заголовок.

Підрозділ – частина розділу, позначена номером і має заголовок.
Пункт – частина розділу чи підрозділу, позначена номером і може мати заголовок.

Підпункт – частина пункту, позначена номером і може мати заголовок.

Заголовки структурних елементів необхідно нумерувати тільки арабськими цифрами. Допускається розміщувати текст між заголовками розділу і підрозділу, підрозділу і пункту. Кожен розділ рекомендується починати з нової сторінки.

Заголовки розділів, підрозділів, пунктів і підпунктів (за наявності заголовка) записують з абзацу малими буквами починаючи з великої.

Назви розділів повинні бути короткими і записуватись у вигляді заголовків великими буквами посередині рядка. Назви підрозділів записують у вигляді заголовків меншими буквами (перша велика). Переноси слів у заголовках не допускаються. Крапка в кінці заголовка не проставляється. Між назвами розділів, підрозділів і основним текстом повинен бути пропущений рядок.

Розділи нумерують порядковими номерами в межах всього документа (1, 2 та ін.). Після номера крапку не ставлять, а пропускають один знак.

Підрозділи повинні мати нумерацію в межах розділу: номер підрозділу складається з номера розділу і підрозділу, розділених крапкою, наприклад, 5.3. Це означає: третій підрозділ п'ятого розділу. В кінці порядкового номера розділу, підрозділу тощо крапки не ставиться.

Номер пункту вміщує номер розділу, підрозділу і пункту, які розділені крапками, наприклад: 4.2.1 – перший пункт другого підрозділу четвертого розділу.

У тексті документа може наводитись перелік, який рекомендується нумерувати малими буквами українського алфавіту з дужкою або виділяти дефісом перед текстом. Для подальшої деталізації переліку використовують арабські цифри з дужкою.

Кожну частину переліку записують з абзацу, починаючи з малої букви і закінчуючи крапкою з комою, в кінці останньої ставлять крапку.

Приклад:

а) текст переліку та його продовження;

б) текст переліку:

1) текст переліку подальшої деталізації та його продовження;

2)....;

в) останній перелік.

Під час написання тексту за вимогами ГОСТ 2.105-95 “Общие требования к текстовым документам” слід дотримуватися таких правил:

а) текст необхідно викладати в лаконічному технічному стилі;

б) умовні буквені позначення фізичних величин і умовні графічні позначення компонентів повинні відповідати установленим у стандартах. Перед буквеним позначенням фізичної величини повинно бути її пояснення (*резистор R, конденсатор C*);

в) числа з розмірністю слід записувати цифрами, а без розмірності словами (*відстань – 2 мм, відміряти три рази*);

г) позначення одиниць слід писати в рядок з числовим значенням без перенесення в наступний рядок. Між останньою цифрою числа і позначенням одиниці слід робити пропуск (*100 Вт, 2 А*);

д) якщо наводиться ряд числових значень однієї і тієї ж фізичної величини, то одиницю фізичної величини вказують тільки після останнього числового значення (*1,5; 1,75; 2 мм*);

е) позначення величин з граничними відхиленнями слід записувати так: *100 ± 5 мм*;

є) буквені позначення одиниць, які входять в добуток, розділяють крапкою на середній лінії (·); знак ділення замінюють косою рисою (/);

ж) порядкові числівники слід записувати цифрами з відмінковими закінченнями (*9-й день, 4-а лінія*); при кількох порядкових числівниках відмінкове закінчення записують після останнього (*3,4,5-й графіки*); кількісні числівники записують без відмінкових закінчень (*на 20 аркушах*); не пишуть закінчення в датах (*21 жовтня*) та при римських числах (*XXI століття*);

з) скорочення слів у тексті не допускаються, крім загальноприйнятих в українській мові і установлених в стандарті ГОСТ 2.316-68, а також скорочень, які прийняті для надписів на виробі (в тексті вони повинні бути виділені великим шрифтом: ON, OFF), а якщо надпис складається з цифр або знаків, то в лапках. Лапками також виділяють найменування команд, режимів, сигналів (“*Запуск*”);

и) дозволяється виконувати записи математичних виразів, наприклад:

$$\frac{ABC}{DE} = ABC/DE;$$

знак множення “×” замінювати зірочкою “*”;

$$\sqrt{z} = z^{**}1/2 = z^{**}0,5;$$

$$2^{-3}=2^{**}-3;$$

$$A_1 = A1 = A(1);$$

$$\pm 20^{\circ}\text{C} = +\text{--} 20^{\circ}\text{C} = +\text{--} 20 \text{ ЦЕЛ};$$

$$200 = 200 (+20; -30);$$

і) не дозволяється:

- допускати професійних або місцевих слів і виразів (техніцизмів);

- використовувати позначення одиниць фізичних величин без цифр, необхідно писати повністю: “кілька кілограмів” (за виключенням оформлення таблиць і формул);

- з’єднувати текст з умовним позначенням фізичних величин за допомогою математичних знаків (не “швидкість = 5 км/год.”, а “швидкість дорівнює 5 км/год”, не “температура дорівнює – 5° С”, а “температура дорівнює мінус 5 °С”);

- використовувати математичні знаки <, >, o, №, %, sin, cos, tg, log та ін. без цифрових або буквених позначень. У тексті слід писати словами “нуль”, “номер”, “логарифм” і т.д.;

- використовувати індекси стандартів (ДСТУ, СТД) без реєстраційного номера.

Кожну формулу записують з нового рядка, симетрично до тексту. Між формулою і текстом пропускають один рядок.

Умовні буквені позначення (символи) в формулі повинні підповідати установленим у міждержавному стандарті ГОСТ 1494-77. Їх пояснення наводять в тексті або зразу ж під формулою. Для цього після формули ставлять кому і записують пояснення до кожного символу з нового рядка в тій послідовності, в якій вони наведені у формулі, розділяючи крапкою з комою. Перший рядок повинен починатися з абзацу з слова “де” і без будь-якого знака після нього.

Всі формули нумерують у межах розділу арабськими числами. Номер вказують в круглих дужках з правої сторони, в кінці рядка, на рівні закінчення формули. Номер формули складається з номера розділу і порядкового номера формули в розділі, розділених крапкою. Дозволяється виконувати нумерацію в межах всього документа.

Приклад.

Таким чином, момент тертя в кернових опорах

$$M_m = -\kappa G^{1,5}, \quad (1.1)$$

де κ – коефіцієнт пропорційності; G – вага рухомої частини

вимірювального механізму.

Одиницю виміру, за необхідності, беруть у квадратні дужки

$$I = \frac{U}{R} [A]. \quad (1.2)$$

Числову підстановку і розрахунок виконують з нового рядка не нумеруючи. Одиницю виміру беруть у круглі дужки. Наприклад,

$$I = \frac{220}{100} = 2,2 (A).$$

Розмірність одного й того ж параметра в межах документа повинна бути однаковою.

Якщо формула велика, то її можна переносити в наступні рядки. Перенесення виконують тільки математичними знаками, повторюючи знак на початку наступного рядка. При цьому знак множення “·” замінюють знаком “×”.

Формула є членом речення, тому до неї застосовують такі ж правила граматики, як і до інших членів речення. Якщо формула знаходиться в кінці речення, то після неї ставлять крапку. Формули, які слідує одна за другою і не розділені текстом, розділяють комою.

Посилання на формули в тексті дають в круглих дужках за формою: “... в формулі (5.2)”;

“... в формулах (5.7, ..., 5.10)”.

Для пояснення викладеного тексту рекомендується його ілюструвати графіками, кресленнями, фрагментами схем та ін., які можна виконувати чорною тушшю, простим олівцем середньої твердості та комп’ютерною графікою. Розміщують ілюстрації в тексті або в додатках.

Графічний матеріал у тексті пояснювальної записки (схеми, ескізи, графіки, рисунки) виконують тушшю або олівцем. Кількість ілюстрацій повинна бути достатньою для пояснення тексту, що викладається. У тексті ілюстрацію розміщують симетрично до тексту після першого посилання на неї або на наступній сторінці, якщо на даній вона не уміщується без повороту.

Всі розміщені в пояснювальній записці ілюстрації нумеруються арабськими цифрами в межах одного розділу, наприклад, Рисунок 1.3 – розділ 1, рисунок 3.

Посилання на ілюстрації подаються за типом: “на рис.1.3”, повторно – “див. рис.1.3”. Посилання виконують за формою: “...показано на рисунку 3.1.” або в дужках за текстом (рисунок 3.1), на частину ілюстрації: “... показані на рисинку 3.2, б”. Посилання на раніше наведені ілюстрації дають з скороченим словом *дивись* (див. рисунок 1.3).

Між ілюстрацією і текстом пропускають один рядок (3 інт.).

Всі ілюстрації в ПЗ називають рисунками і позначають під ілюстрацією симетрично до неї за такою формою: “*Рисунок 3.5 – Найменування рисунка*”. Крапку в кінці не ставлять, знак переносу не використовують. Якщо найменування рисунка довге, то його продовжують у наступному рядку починаючи від найменування.

Нумерують ілюстрації в межах розділів, вказуючи номер розділу і порядковий номер ілюстрації в розділі розділяючи крапкою. Дозволяється нумерувати в межах всього документа.

Пояснючі дані розміщують під ілюстрацією над її позначенням.

У випадку, коли ілюстрація складається з частин, їх позначають малими буквами українського алфавіту з дужкою (*а*), (*б*)) під відповідною частиною. У такому випадку після найменування ілюстрації ставлять двокрапку і дають найменування кожної частини за формою:

а – найменування першої частини; б – найменування другої частини або за ходом найменування ілюстрації, беручи букви в дужки:

Рисунок 3.2 – Структурна схема (а) і часові діаграми (б) роботи агрегату

Якщо частини ілюстрації не вміщуються на одній сторінці, то їх переносять на наступні сторінки. У цьому випадку під початком ілюстрації вказують повне її позначення, а під її продовженнями позначають “*Рисунок 3.2 (продовження)*”. Пояснючі дані розміщують під кожною частиною ілюстрації.

Якщо в тексті є посилання на складові частини зображеного засобу, то на відповідній ілюстрації вказують їх порядкові номери в межах ілюстрації. Якщо ілюстрація є фрагментом повної розробленої схеми, то для всіх компонентів вказують ті позиційні позначення, які вказані на схемі. Якщо ілюстраціями є фотографії, то останні повинні бути наклеєні на стандартні аркуші білого паперу і позначені як рисунки.

Цифровий матеріал, як правило, оформляють у вигляді таблиць. Усі таблиці (якщо їх більше однієї) нумерують арабськими цифрами, наприклад, Таблиця 4.2 – таблиця 2 розділу 4. Таблицю розміщують симетрично до тексту після першого посилання на даній сторінці або наступній, якщо на даній вона не уміщується і таким чином, щоб зручно було її розглядати без повороту або з поворотом на кут 90°.

На всі таблиці мають бути посилання за формою: “*наведено в таблиці 3.1*”; “*... в таблицях 3.1 – 3.5*” або в дужках по тексту (*таблиця 3.6*). Посилання на раніше наведену таблицю дають з словом

дивись (див. таблицю 2.4) за ходом чи в кінці речення.

Таблицю розділяють на графи (колонки) і рядки. У верхній частині розміщують шапку таблиці, в якій вказують найменування граф. Діагональне ділення шапки таблиці не допускається. Ліву графу (бокову) часто використовують для найменування рядків. Допускається не розділяти рядки горизонтальними лініями. Мінімальна відстань між основами рядків – 8 мм. Розміри таблиці визначаються об'ємом матеріалу.

Найменування граф може складатися з заголовків і підзаголовків, які записують в однині, симетрично до тексту графи малими буквами, починаючи з великої. Якщо підзаголовок складає одне речення з заголовком, то в цьому випадку його починають з малої букви. В кінці заголовків і підзаголовків граф таблиці крапку не ставлять. Дозволяється заголовки і підзаголовки граф таблиці виконувати через один інтервал.

Якщо всі параметри величин, які наведені в таблиці, мають одну й ту саму одиницю фізичної величини, то над таблицею розміщують її скорочене позначення (*мм*). Якщо ж параметри мають різні одиниці фізичних величин, то позначення одиниць записують у заголовках граф після коми (*Довжина, мм*).

Текст заголовків і підзаголовків граф може бути замінений буквеними позначеннями, якщо тільки вони пояснені в попередньому тексті чи на ілюстраціях (*D – діаметр, H – висота і т.д.*). Однакові буквени позначення групують послідовно в порядку зростання їх індексів, наприклад: (*L₁, L₂, ...*).

Найменування рядків записують у правому стовпчику таблиці у вигляді заголовків в називному відмінку однини, малими буквами, починаючи з великої і з однієї позиції. У кінці заголовків крапку не ставлять. Позначення одиниць фізичних величин вказують у заголовках після коми.

Для опису визначеного інтервалу значень у найменуваннях граф і рядків таблиці можна використовувати слова: “*більше*”, “*менше*”, “*не більше*”, “*не менше*”, “*в межах*”. Ці слова розміщують після одиниці фізичної величини:

(*Напруга, В, не більше*),

а також використовують слова “*від*”, “*більше*”, “*до*”:

(*Від 10 до 15; більше 15; до 20*)

Дані, що наводяться в таблиці, можуть бути словесними і числовими.

Слова записують у графах з однієї позиції. Якщо рядки таблиці

не розділені лініями, то текст, який повторюється і складається з одного слова дозволяється замінювати лапками (,). Якщо текст складається з одного і більше слів, то під час першого повторення його замінюють словами “*так же*”, а далі лапками. Під час розділення таблиці горизонтальними лініями – ніякої заміни не виконують.

Числа записують посередині графі так, щоб їх однакові розряди по всій графі були точно один під одним, за виключенням випадку, коли вказують інтервал. Інтервал вказують від меншого числа до більшого з тире між ними:

12–35
122–450

Дробові числа наводять у вигляді десяткових дробів, з однаковою кількістю знаків після коми в одній графі. Розміри в дюймах можна записувати у вигляді: $1/2$ ", $1/4$ ", $1/8$ ".

Ставити лапки замість цифр, чи математичних символів, які повторюються не можна. Якщо цифрові чи інші дані в таблиці не наводяться, то ставиться прочерк.

Таблиці нумерують у межах розділів і позначають зліва над таблицею за формою: “*Таблиця 4.2 – Найменування таблиці*”. Крапку в кінці не ставлять. Якщо найменування таблиці довге, то продовжують у наступному рядку починаючи від слова “*Таблиця*”. Номер таблиці складається з номера розділу і порядкового номера таблиці в розділі, розділених крапкою. Дозволяється нумерувати в межах всього документа.

Таблиця може бути великою як в горизонтальному, так і вертикальному напрямках, або іншими словами може мати велику кількість граф і рядків. У таких випадках таблицю розділяють на частини і переносять на інші сторінки, або розміщують одну частину під іншою чи поряд.

Якщо в кінці сторінки таблиця переривається і її продовження буде на наступній сторінці, в першій частині таблиці нижню горизонтальну лінію, що обмежує таблицю, не проводять.

При перенесенні частин таблиці на інші сторінки повторюють або продовжують найменування граф. Допускається виконувати нумерацію граф на початку таблиці і при перенесенні частин таблиці на наступні сторінки повторювати тільки нумерацію граф.

У всіх випадках найменування (за його наявності) таблиці розміщують тільки над першою частиною, а над іншими частинами зліва пишуть “*Продовження таблиці 4.2*” без крапки в кінці.

Інші вимоги до виконання таблиць – відповідно до чинних

стандартів на технічну документацію.

Якщо під час вирішення будь-якого питання використовувалось офіційне джерело інформації, то при викладенні цього рішення в пояснювальній записці номери цих джерел повинні бути вказані в кінці речення у квадратних дужках, наприклад, “[3] або [3, с.34]”. Джерела інформації у списку літератури повинні розміщуватись в алфавітному порядку (за прізвищами авторів).

Список літератури оформлюють із заголовком “Список літератури” з нової пронумерованої сторінки, починаючи з абзацу. У списку кожен літературний запис записують з абзацу і нумерують арабськими числами.

Роботи іноземних авторів подаються в списку літератури в оригінальній транскрипції мовою, якою вона видана.

Приклад форми запису:

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Прізвище І. Б. Назва книги. – Місце видання.: Видавництво, Рік. – Кількість сторінок.

(1. Максимович Н.Г. Теорія графів і електричних кіл. – Львів: Вища школа, 1987. –216 с.)

2. Назва книги / І.Б. Прізвище. – Місце видання.: Видавництво, Рік. – Число сторінок.

(2. Вимірювання і комп'ютерно-вимірювальна техніка: Навч. посібник / В.О. Поджаренко, В.В. Кухарчук. – К.: НМК ВО, 1991. – 240 с.)

3. Прізвище І. Б. Назва частини книги // Прізвище І.Б. Назва книги. – Місце видання.: Видавництво, Рік. – С. Інтервал сторінок.

(3. Хоор К. О структурной организации данных // Дал У., Дейкстра Э., Хоор К. Структурное программирование. – М.: Мир, 1975. – С. 98–197.)

4. Прізвище І.Б. Назва частини видання // Назва видання. – Рік. – № Число. – С. Інтервал сторінок.

(4. Dreiheller A. Programming Language Incorporating Units of Measure // Informationstechnik. – 1997. – № 1. – Р. 83–88.)

(4. Еришов А. А. Стабильные методы оценки параметров // Автоматика и телемеханика. – 1978. – №8. – С. 86–91.)

5. Нормативно-технічні та патентні документи.

(5. ГОСТ 7.9-77. Реферат и аннотация. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 6 с.)

(5. Пат. 3818311, США, МКИ НОЗК 17/60. Схема защиты полупроводникового переключателя. – Опубл. 04.05.84.)

Документи, розміщення яких в основному тексті недоцільне (програми розрахунків на ЕОМ, таблиці проводів і т.д.), повинні бути оформлені у вигляді додатків до пояснювальної записки. В основному тексті потрібно вказати посилання на ці додатки.

Всі додатки до пояснювальної записки повинні бути пронумеровані за типом “Додаток А” і т.д. та розміщені у правому верхньому кутку першого листа додатка. Нижче пишеться заголовок додатка. Ілюстрації, таблиці, текст допоміжного характеру, схеми можна оформляти у додатках. Додатки оформлюють як продовження документа на його наступних сторінках, розташовуючи в порядку посилань на них у тексті ПЗ.

Посилання на додатки в тексті ПЗ дають за формою:

“... наведено в додатку А” , „ ... наведено в таблиці В.5 ” або (додаток Б); (додатки К, Л).

Кожен додаток необхідно починати з нової сторінки вказуючи зверху посередині рядка словом “Додаток” і через пропуск його позначення. Додатки позначають послідовно великими українськими буквами, за винятком букв Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Б, наприклад, *Додаток А, Додаток Б* і т.д. Якщо додатків більше ніж букв, то продовжують позначати арабськими цифрами. Дозволяється позначати додатки латинськими буквами, за винятком букв *I* і *O*.

Під позначенням для обов’язкового додатку пишуть у дужках слово (*обов’язковий*), а для інформативного – (*довідниковий*).

Кожен додаток повинен мати тематичний (змістовний) заголовок, який записують посередині рядка малими буквами починаючи з великої. За наявності основного напису – заголовок записують у відповідній графі.

Ілюстрації, таблиці, формули нумерують у межах кожного додатка, вказуючи його позначення: “*Рисунок Б.3 – Найменування*”; “*Таблиця В.5 – Найменування*” і т.п.

Нумерація аркушів документа і додатків, які входять до його складу, повинна бути прохідною. Всі додатки включають у зміст, вказуючи номер, заголовок і сторінки з яких вони починаються.

3.2. Оформлення схеми

Згідно з ГОСТ 2.701-84 “Схеми. Види и типы. Общие требования к выполнению” схеми, що використовуються в проектах електрифікації та автоматизації сільського господарства, поділяють за видами та типами. Вид схеми залежить від виду енергії, що при цьому використовується, а тип визначається основним її призначенням.

Схеми, що входять до складу проектної документації, шифрують. За ГОСТ 2.701-84 (СТ РЕВ 651-77) схеми залежно від вигляду елементів і зв'язків, які входять у склад виробу, поділяють на види, що позначаються буквами. При цьому використовують великі літери російського алфавіту та цифри (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Шифри схем (згідно з ГОСТ 2.701-84)

Вид схеми	Шифр	Тип схеми	Шифр
1. Електрична	Е	1. Структурна	1
2. Гідравлічна	Г	2. Функціональна	2
3. Пневматична	П	3. Принципова	3
4. Кінематична	К	4. З'єднань	4
5. Оптична	Л	5. Підключень	5
6. Вакуумна	В	6. Загальна	6
7. Газова	Х	7. Розміщення	7
8. Автоматизації	А	8. Решта	8
9. Комбінована	С	9. ОБ'єднана	0

Позначення всіх креслень, крім креслень деталей, повинні складатися з позначення основного документа (креслення деталі або специфікації) і коду (шифру) документа. Для креслень встановлені такі шифри (ГОСТ 2.102-68):

- складальне креслення – СК;
- габаритне креслення – ГК;
- монтажне креслення – МК.

За ГОСТ 2.701-84 код схеми повинен складатися з буквенної (визначаючої вид схеми) і цифрової (визначаючої тип схеми) частини. Наприклад, електричну схему з'єднань шифрують як Е4. Слід пам'ятати, що суміщеній схемі присвоюється шифр схеми, тип якої має найменший порядковий номер.

У пояснювальній записці проекту є посилання на креслення і схеми типу: “На кресленні АБВ 22.93.1902.014 ЕЗ наведена схема принципова електрична блоку попередньої обробки сигналу датчика тиску”.

Всі схеми повинні бути відображені в пояснювальній записці. Спочатку потрібно описати схему в статистиці (перерахувати компоненти, зв'язки та їх призначення), після цього описати схему в динаміці, тобто пояснити функціонування схеми (послідовність проходження і перетворення сигналу від входу до виходу). Аналогічно описують креслення загального вигляду, складальні креслення та ін.

Конструктивні і схемні рішення повинні забезпечити виготовлення виробу за заданими експлуатаційними характеристиками при мінімальних сумарних затратах на його проектування, виробництво і експлуатацію.

Враховуючи, що підручник призначений для підготовки інженерів-енергетиків сільського господарства, за видами розглядатимемо лише електричні схеми, типи яких далі аналізуватимемо детальніше.

3.2.1. Структурні схеми

Структурні схеми використовують під час розробки систем автоматизації для відображення зв'язку між окремими структурними підрозділами об'єкта керування, тобто вирішується питання структури керування.

Графічне зображення структури керування і є структурна схема.

Структурна схема визначає основні функціональні частини виробу, їх призначення та взаємозв'язки.

Зображуючи структурні схеми слід використовувати умовні графічні позначення – кола та прямокутники з пояснювальними надписами всередині (рис. 3.1). Як видно, підрозділи об'єкта (цехи) показують прямокутниками, головний диспетчерський пункт – колом, зв'язок – лінією, а його напрям – стрілкою, вид зв'язку позначають великими літерами. Так, К – контроль, С – сигналізація, ДК – дистанційне керування, ДЗ – диспетчерський зв'язок, АТЗ – автоматичний телефонний зв'язок, ТС – телесигналізація, ТК – телекерування, ТВ – телевимірювання тощо.

За умов, коли організаційна структура об'єкта нескладна, допускається описувати її словами, не наводячи структурної схеми.

Електрична структурна схема визначає основні функціональні частини виробу (елементи, пристрої, функціональні групи), їх призначення і зв'язки.

Всі функціональні частини на схемі зображують у вигляді прямокутників або умовних графічних позначень (УГП). При зображенні прямокутниками найменування, умовні позначення або номери функціональних частин вписують у середину прямокутників. Умовні позначення і номери повинні бути розшифровані на вільному полі схеми в таблиці довільної форми. Позиційні позначення записують над УГП або справа від них.

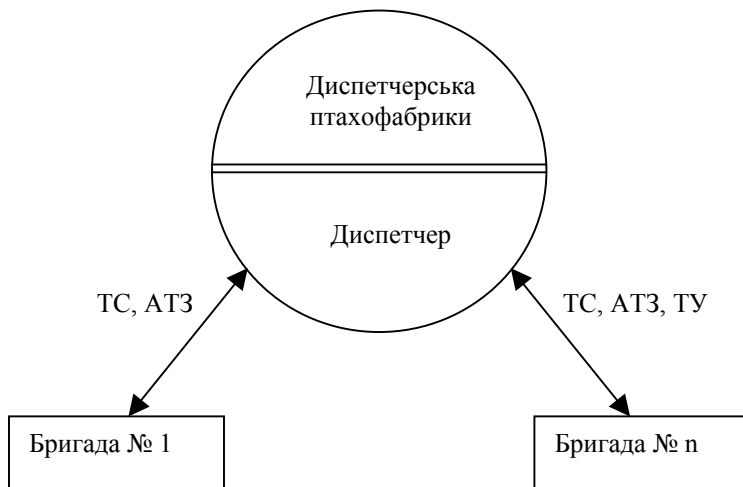


Рис.3.1. Організаційно-структурна схема птахофабрики

Прямокутники чи УГП на схемі з'єднують лініями електричного зв'язку, на яких стрілками вказують напрямок ходу робочого процесу. Структурна схема повинна давати уявлення про хід робочого процесу в напрямку зліва направо, зверху вниз.

Якщо функціональних частин багато, останні замінюють квадратами з сторонами кратними 12 мм. У цьому випадку замість найменувань, типів і позначень проставляють порядкові номери справа від зображення або над ним, як правило, зверху вниз у напрямі зліва направо, і розшифровують у таблиці довільної форми, яку розміщують на вільному полі схеми.

У схемі рекомендують розміщувати пояснювальні надписи, діаграми, таблиці, вказівки параметрів у характерних точках (величини струмів, напруг, форми і величини імпульсів), математичні залежності та ін.

3.2.2. Функціональні схеми автоматизації

Функціональні схеми – це основний проектний документ, що визначає функціонально-блочну структуру окремих вузлів автоматичного контролю, керування та регулювання технологічного процесу, оснащення об'єкта керування приладами та засобами автоматизації.

Функціональна схема пояснює окремі процеси, що протікають в окремих функціональних колах або у виробі в цілому. Ці схеми використовуються при вивченні принципів роботи виробів, при їхній налагодці, контролі та ремонті.

У загальному випадку функціональні схеми є кресленнями, на яких умовними позначеннями показують технологічне обладнання (разом із трубопроводами), контрольно-вимірювальні прилади, засоби автоматизації та зв'язки між ними. Допоміжні пристрої (джерела живлення, реле, автомати, вимикачі, запобіжники) на функціональних схемах не показують.

Технологічне обладнання на функціональних схемах автоматизації зображують спрощено без збереження масштабу, але на підставі дійсної конфігурації. Трубопроводи зображують спрощено (дволінійне зображення) та умовно (однолінійне зображення) (табл. 3.2). При цьому середовище, що передається трубопроводами, може позначатись як цифрами, так і літерами-цифрами, наприклад 1.1 або В.1. Перша цифра або літера вказує вид середовища, що транспортується, наступна – її призначення (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Позначення трубопроводів на функціональних схемах автоматизації

Найменування	Зображення		Примітка (середовище, що передається)
	Спрощення	Умове	
Трубопровід			1.1 – Вода питна
Трубопровід із указаним потоком			2.2 – Пара
Перехід трубопроводів без з'єднання			3.3 – Повітря
Хрестовина			5.5 – Кисень
Вентиль			11.11 – Аміак
Заслінка			14.14 – Масло
			15.15 – Рідке паливо
			18.18 – Фреон
			27.27 – Вакуум

Цифрові або літерно-цифрові позначення проставляють на поличках ліній-виносок, а в необхідних випадках – у розривах ліній

трубопроводів. При цьому вибрані позначення пояснюють на кресленнях або в текстових документах.

Згідно з ГОСТ 21.404-85 “Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах” контрольно-вимірювальні прилади та засоби автоматизації на функціональних схемах автоматизації показуються за допомогою умовних графічних зображень та літерних позначень. Так, усі датчики і вторинні прилади показують на схемах у вигляді кола діаметром 10 мм. Виконавчі механізми зображують колом, діаметр якого становить 5 мм, регулювальні органи – двома трикутниками, що стикаються (рис. 3.2), а прилади, що розміщуються на щиті керування, на відміну від тих, що встановлені безпосередньо на технологічному обладнанні –поличкою (рис. 3.3; а, б).

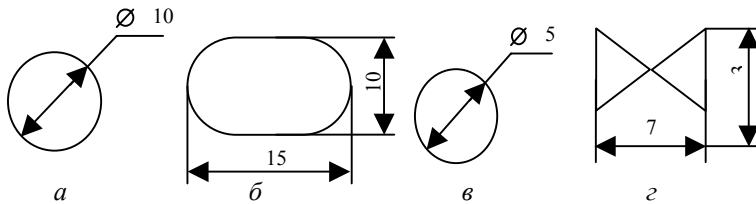


Рис. 3.2. Умовне графічне зображення:

- а – первинних перетворювачів, вторинних приладів (основне зображення);*
- б – вторинних приладів (зображення, що допускається);*
- в – виконавчих механізмів; г – регулювальних органів*

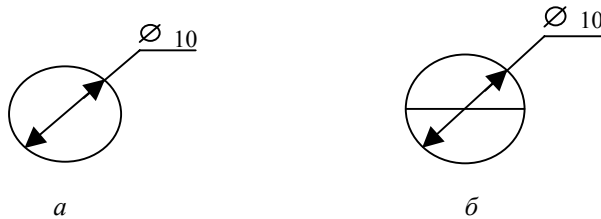






Рис. 3.3. Умовне зображення приладів, встановлених:

- а – безпосередньо на технологічному обладнанні; б – на щиті керування*

Виконавчі механізми як одні з основних елементів системи автоматики характеризуються великою різноманітністю, що має бути показана на схемі автоматизації. Особливості зображення виконавчих механізмів наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Особливість зображення виконавчих механізмів

Зображення виконавчих механізмів	Особливість виконавчого механізму
 	Закриває регулювальний орган у разі припинення подачі енергії або сигналу керування Відкриває регулювальний орган у разі припинення подачі енергії або сигналу керування
 	Залишає регулювальний орган у незмінному стані в разі припинення подачі енергії або сигналу керування З додатковим ручним приводом

Як видно, умовні графічні зображення приладів та засобів автоматизації надзвичайно прості та зручні в користуванні. Проте вони не відображають функціонального призначення відповідних елементів систем автоматики. Тому їх доповнюють умовними літерними позначеннями. З цією метою використовують великі літери латинського алфавіту. Залежно від місця розташування відповідної літери вона має різне змістове навантаження.

Літери проставляють як всередині, так і зовні умовного графічного зображення. Слід пам'ятати, що всередині умовного графічного зображення їх проставляють у верхній частині, по трьох позиціях: на першій літера означає параметр, на який реагує відповідний прилад; на другій уточнюється призначення першої літери; на третій функціональне призначення приладу (рис. 3.4). Отже, одна і та сама літера може бути розмічена за різними позиціями, значення кожної з літер латинського алфавіту наведено в табл. 3.4.

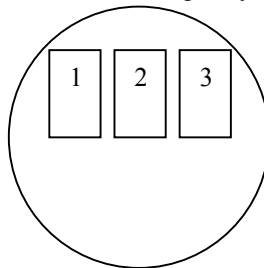


Рис. 3.4. Розміщення літер за позиціями 1, 2, 3

Таблиця 3.4 – Літерне позначення на схемах автоматизації згідно з ГОСТ 21.404-85

Позначення	Величина, що вимірюється		Функції, що виконуються приладом		
	основна ознака першої літери	додаткова ознака першої літери	відображення інформації	формування вихідного сигналу	додаткове значення
1	2	3	4	5	6
<i>A</i>	-	-	Сигналізація	-	-
<i>B</i>	-	-	-	-	-
<i>C</i>	-	-	-	Регулювання, управління	-
<i>D</i>	Густина	Різниця, перепад	-	-	-
<i>E</i>	Будь-яка електрична величина	-	-	-	-
<i>F</i>	Витрата	Співвідношення, частина	-	-	-
<i>G</i>	Розмір, положення, переміщення	-	-	-	-
<i>H</i>	Ручна дія	-	-	-	Верхня межа вимірювальної величини
<i>I</i>	-	-	Показання	-	-
<i>J</i>	-	Автоматичне перемикання, обіг	-	-	-
<i>K</i>	Час, часова програма	-	-	-	-
<i>L</i>	Рівень	-	-	-	Нижня межа вимірювальної величини
<i>M</i>	Вологість	-	-	-	-
<i>N</i>	-	-	-	-	-
<i>O</i>	-	-	-	-	-
<i>P</i>	Тиск, вакуум	-	-	-	-

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5	6
Q	Величина, яка характеризує якість, склад, концентрацію і т.п.	-	-	-	-
R	Радіоактивність	-	Реєстрація	-	-
S	Швидкість, частота	-	-	Вимикання, перемикання	-
T	Температура	-	Дистанційна передача інформації	-	-
U	Кількість різнорідних величин, що вимірюються	-	-	-	-
V	В'язкість	-	-	-	-
W	Маса	-	-	-	-
X	Резервна літера, що не рекомендується до використання	-	-	-	-
Y	-	-	-	-	-
Z	-	-	-	-	-

Аналіз матеріалів, вміщених у табл. 3.4, дає змогу встановити таке:

- при позначенні основної величини, що вимірюється, літери $A, B, C, I, J, N, O, Y, Z$ є резервними і можуть бути використані у випадках, не передбачених держстандартом;
- для уточнення призначення першої літери використовують літери D, F, J та Q , три з них допускають записувати строковими d, f, q ;
- функціональні ознаки приладів на схемах показують літерами A, I, R, C, S, H, L ; якщо один і той самий прилад має кілька функціональних призначень, то літери, що їх означають, записують у такій послідовності $I R C S A$ (показ – реєстрація, регулювання або керування – вмикання, вимикання, перемикання – сигналізація); слід пам'ятати, що в позначенні показують лінією функціональні ознаки

приладу, які використовуються в цій системі; літери HL проставляють за межами умовного графічного позначення (рис. 3.5, а);

- для конкретизації вимірюваної величини праворуч від умовно-графічного позначення вказують найменування або символ величини, що вимірюється (рис. 3.5, б);

- літерою U можна позначити вторинні прилади, що вимірюють кілька різнорідних величин; детальна розшифровка величини, що вимірюється має бути розміщена біля приладу або на полі креслення (рис. 3.5, в); слід пам'ятати, що первинні перетворювачі цього комплексу потрібно вказувати відповідно до вимірюваної величини;

- літерою HS позначають засоби, які виконуються у вигляді окремих блоків, що призначені для ручних операцій (літеру H розміщують на першому місці), наприклад, літерою $Я$ позначають кнопку дистанційного керування, H – перемикач електричних кіл (рис. 3.5, г);

- резервні літери, якими позначають прилади на схемах автоматизації, мають бути розшифровані безпосередньо на кресленні; не допускається в одній і тій самій документації використовувати одну і ту саму резервну літеру для позначення різних величин; літера X може бути використана одноразово в надзвичайних випадках;

- літерою S позначають контактний пристрій приладу для вмикання, вимикання та блокування; її не слід використовувати для позначення функції регулювання.

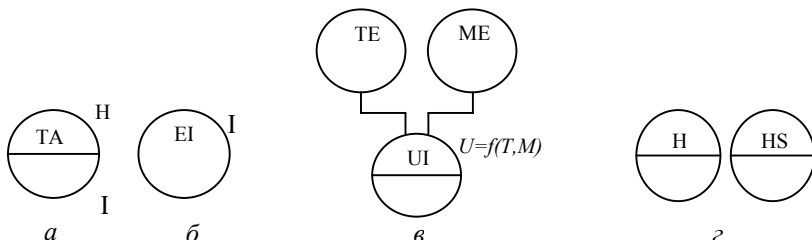


Рис. 3.5. Зображення приладів на схемах автоматизації:

а – прилад, що сигналізує верхню та нижню межі температури;
б – прилад для вимірювання струму (амперметр); *в* – прилад для вимірювання температури та вологості; *г* – прилад ручного керування, дистанційний пост та перемикач

На схемах автоматизації складні прилади, що виконують низку функцій, зображують кількома колами, які прилягають одне до одного.

Дуже часто функціональні ознаки приладів та засобів автоматизації можуть бути показані за допомогою літер *E*, *T*, *K*, *Y*. У цих випадках позначення всього приладу має складатись лише з двох літер, перша з яких означає величину, що вимірюється, а друга – функціональну належність приладу (рис. 3.6, а...г, табл. 3.5).

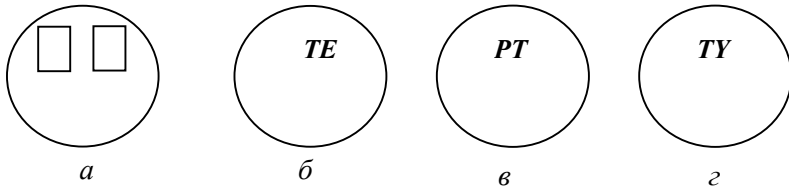


Рис.3.6. Додаткові літерні позначення:

а – позиції для літерного позначення: 1 – літера, що означає вимірювану величину; 2 – літера, що вказує на функціональну ознаку (*E*, *T*, *K*, *Y*);

б – датчик температури; *в* – прилад для дистанційної передачі інформації; *г* – перетворювач

Таблиця 3.5 – Додаткові літерні позначення на схемах автоматизації згідно з ГОСТ 21.404-85

Позначення	<i>E</i>	<i>T</i>	<i>K</i>	<i>Y</i>
Функціональна ознака	Чутливий елемент	Дистанційна передача	Станція керування	Перетворення, обчислювальні функції

Наприклад, *TE* означає, що на схемі наведено первинний перетворювач температури, *PT* – прилад, що реагує на зміну тиску з дистанційною передачею сигналу, *TY* – перетворювач температури.

Як зазначалось вище, додаткові позначення приладів та засобів автоматизації проставляють і за межами умовних графічних (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Додаткові позначення для перетворювачів сигналів та обчислювальних пристроїв

Назва	Позначення
Рід сигналу:	
електричний	E
пневматичний	P
гідралічний	G
Вид сигналу:	
аналоговий	A
дискретний	D
Операції, що виконуються обчислювальним пристроєм:	
додавання	Σ
множення сигналу на постійний коефіцієнт K	K
перемноження двох і більше сигналів	X
ділення сигналів одного на другий	$:$
піднесення сигналу f у степінь n	f^n
добування із значення числа (кореня) в степені n	$\sqrt[n]{f}$
логарифмування	\lg
диференціювання	$dx(dt)$
інтегрування	\int
зміна знаку сигналу	$(x)^{-1}$
обмеження верхнього значення сигналу	\max
обмеження нижнього значення сигналу	\min

Ці позначення належать до перетворювачів сигналів та обчислювальних пристроїв, тобто до таких засобів автоматизації, функціональні особливості яких позначаються літерою Y (двохлітерне позначення), наприклад позначення на рис. 3.7, $a...в$.

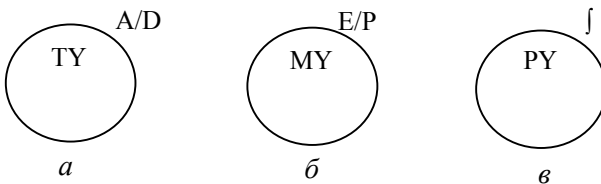


Рис. 3.7. Додаткові літерні позначення на схемах автоматизації:
 a – перетворювач інформації про температуру із аналогового сигналу в дискретний; $б$ – перетворювач інформації про вологість із сигналу електричного в пневматичний; $в$ – прилад, що інтегрує інформацію про тиск

На схемах автоматизації показують також позиційне позначення приладів та засобів автоматизації. Його розміщують у нижній частині умовного графічного (рис. 3.8).

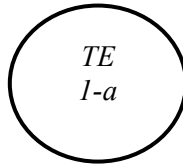


Рис. 3.8. Умовне позначення первинного перетворювача температури (у нижній частині дано позиційне позначення):
I – комплект № 1; a – перше місце в комплекті № 1

Цифра в позиційному позначенні вказує на номер комплекту, а строкова літера – місце цього приладу в повному комплекті обладнання.

Зв'язок між окремими приладами на схемах автоматизації зображують лініями, що можуть відходити до будь-якого місця умовного графічного позначення приладу або засобу автоматизації. Відбірний пристрій для всіх постійно ввімкнених приладів показують суцільною тонкою лінією, що з'єднує технологічний трубопровід чи апарат з первинним вимірювальним перетворювачем або приладом. Якщо потрібно вказати точно місце розташування відбірного пристрою або точки вимірювання, то в кінці тонкої лінії показують коло діаметром 2 мм.

Схеми автоматизації можуть виконуватись спрощено і розгорнуто. У першому випадку не зображують первинні вимірювальні перетворювачі і не вказують усю допоміжну апаратуру. Прилади і засоби автоматизації зі складними функціями, що виконані у вигляді окремих блоків, зображують одним умовним графічним позначенням (рис. 3.9, а). Розгорнутий спосіб (рис. 3.9, б) використовують у тих випадках, коли потрібно конкретизувати функцію кожного приладу і засобів автоматизації, що входить в єдиний вимірювальний, регулюючий чи управляючий комплект.

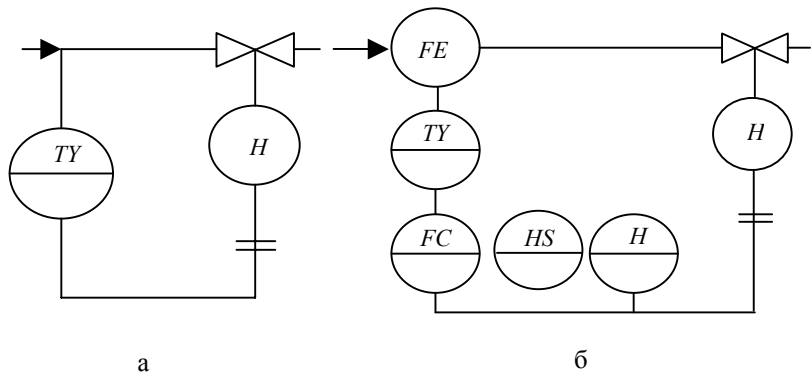


Рис. 3.9. Спрощений (а) та розгорнутий (б) способи виконання схем автоматизації

Схеми автоматизації можуть виконуватись як з умовним зображенням щитів або пультів керування (рис 3.10, а), так і без них (рис 3.10, б). У першому випадку побудова схеми дещо ускладнюється, однак вони більш наглядні, у другому – навпаки, спрощується підготовка схеми, але наочність погіршується.

Якщо схеми автоматизації складні, то лінії зв'язку допускається розривати. При цьому обидва кінці лінії в місцях розриву нумерують однією й тією самою арабською цифрою. Для нижнього ряду (рис. 3.10, а) номери слід розміщувати в міру зростання – зліва направо; для верхнього ряду ця умова не є обов'язковою. На схемах автоматизації розділяють контури технологічного обладнання, лінії зв'язку, графічні зображення приладів і засобів автоматизації та щитів керування. З цією метою користуються лініями різної товщини: 0,6–1,5 мм виконують контури технологічного обладнання, а також прямокутники, що позначають щити та пульти; 0,5–0,6 мм – прилади та засоби автоматизації; 0,2–0,3 мм – лінії зв'язку.

Якщо функціональна схема використовується разом з принциповою, то позиційне позначення елементів та функціональних частин на цих документах повинні бути однаковими. Перелік елементів у цьому випадку для функціональної схеми не розробляють, оскільки користуються даними принципової схеми.

Якщо функціональна схема розробляється самостійно (без принципової), то позиційне позначення елементів і функціональних частин вказують за загальними правилами і розробляють перелік елементів.

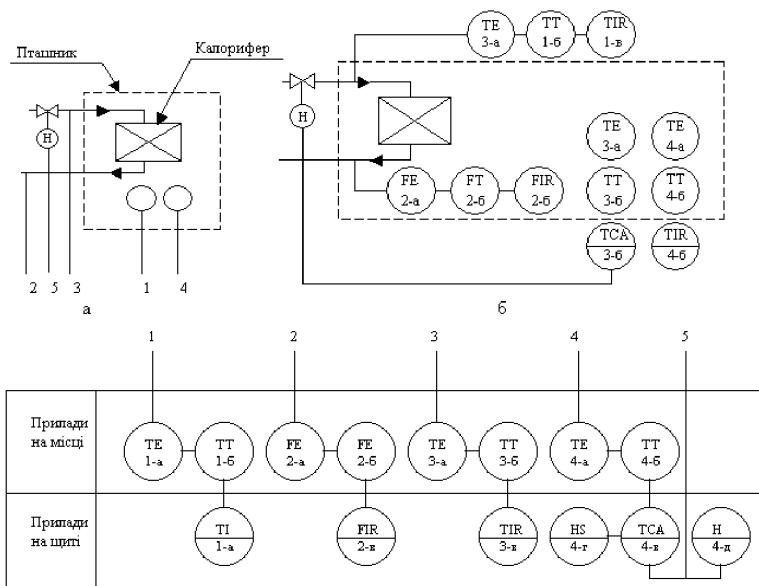


Рис. 3.10. Зображення схем автоматизації:
а – із зображенням щита керування; б – без щита керування

На функціональних схемах рекомендується вказувати поряд з графічним позначенням чи на вільному полі схеми технічні характеристики функціональних частин, діаграми, параметри сигналів тощо.

3.3. Принципові електричні схеми

Принципові електричні схеми – це проектний документ, що визначає повний склад електричних елементів, зв'язків між ними та дає повне уявлення щодо принципів роботи схеми.

Виконуючи принципові електричні схеми, слід керуватися такими нормативними документами:



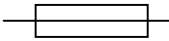

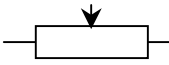
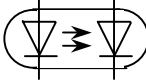
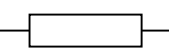
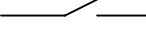
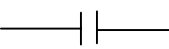
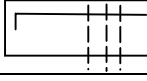
- ГОСТ 2.701-84 “Схемы. Виды и типы. Общие требования к исполнению”;
- ГОСТ 2.702-75 “Правила выполнения электрических схем”;
- ГОСТ 2.708-81 “Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники”.

У загальному випадку принципові електричні схеми вміщують:

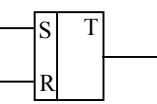
- умовні зображення елементів і зв'язків між ними;
- пояснювальні надписи;
- частини окремих елементів даної схеми, що використовують в інших схемах, а також елементи з інших схем;
- діаграми перемикачів контактів багатопозиційних пристроїв;
- перелік пристроїв, засобів автоматизації та апаратури, що використовується в даній схемі;
- перелік креслень, що відносяться до даної схеми, загальні пояснення та примітки.

Для зображення принципових електричних схем використовують умовні графічні та літерно-цифрові (позиційні) позначення (табл. 3.7). Для доповнення умовного графічного позначення елементів на принципових електричних схемах застосовують літерно-цифрові позначення. Їх ще називають позиційними. При цьому використовують ГОСТ 2.710-81 “Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах”.

Таблиця 3.7 – Умовне графічне зображення деяких елементів на принципових електричних схемах

Найменування елемента	Умовне графічне позначення	Найменування елемента	Умовне графічне позначення
1	2	3	4
1. Обмотка трансформатора, дроселя		11. Транзистор (n-p-n тип)	
2. Плавкий запобіжник		12. Тиристор	
3. Змінний резистор		13. Діодний оптрон	
4. Постійний резистор		14. Замикальний контакт	
5. Конденсатор постійної ємності		15. Перемикач із складною комутацією	

Продовження таблиці 3.7

1	2	3	4
6. Конденсатор змінної ємності		16. Діод	
7. Стабілітрон		17. Котушка електромагнітного пристрою	
8. Світло діод		18. Інвертор	
9. Або-ні		19. Тригер	
10. І		20. Підсилювач	

Позиційне позначення згідно з ГОСТ 2.710-81 складається із трьох частин. У першій частині позиційного позначення записують одну або дві літери латинського алфавіту (вид елемента), у другій – одну або кілька цифр (номер), у третій – одну або кілька латинських літер (функція елемента). Слід пам'ятати, що вид та номер елемента – це обов'язкова частина умовного позначення. Показувати функцію елемента необов'язково.

Як зазначалось вище, умовні літерно-цифрові позначення складаються із літер латинського алфавіту та арабських цифр (табл. 3.8 та 3.9). Наприклад, конденсатор, що використовується як інтегрований на принциповій електричній схемі позначається С4І (4 – його порядковий номер), а цифрова мікросхема, що виконує функцію запам'ятовування, – DS7 (7 – її порядковий номер) і т.д.

Таблиця 3.8 – Літерні коди найбільш розповсюджених видів елементів

Одно-літерний код	Група видів елементів	Приклади видів елементів	Дво-літерний код
1	2	3	4
А	Пристрій (загальне призначення)	-	-
В	Перетворювачі неелектричних величин на електричні або навпаки (крім генераторів та джерел живлення); аналогові або багато-розрядні перетворювачі або датчики, що використовуються для показу або вимірювання	Гучномовці Магнітострокційний елемент Детектор іонізуючого випромінювання Сельсин-приймач Сельсин-датчик Телефон Термопара, тепловий датчик Фотоелемент Мікрофон Датчик тиску П'єзоелемент Датчик швидкості Звукознімач Датчик частоти обертання	ВА ВВ ВД ВЕ ВГ ВР ВК ВL ВМ ВР ВQ ВV ВS ВR
С	Конденсатори	-	-
Д	Логічні елементи, мікросхеми	Пристрої зберігання інформації Пристрої затримки Інтегральна аналогова мікросхема Інтегральна цифрова мікросхема	DS DT DA DD
Е	Елементи різні (освітлювальні, нагрівальні)	Нагрівальний елемент Освітлювальна лампа Піропатрон	ЕК ЕL ЕТ

Продовження таблиці 3.8

1	2	3	4
F	Розрядники, запобіжники, пристрої захисту	Елементи захисту від перенапруги Елементи захисту від струму миттєвої дії Плавкий запобіжник Розрядний елемент	FV FP FU FV
C	Генератори, джерела живлення, кварцові осцилятори	Батарея	GB
H	Індикатори та сигнальні елементи	Прилад звукової сигналізації Символьний індикатор Прилад світлової сигналізації	HA HG HL
K	Реле, контактори, пускатчі	Вказівне реле Струмове реле Електротеплове реле Контактор, магнітний пускатч Поляризоване реле Реле часу Реле напруги	KN KA KK KM KP KT KV
L	Котушки індуктивності, дроселі	Дросель люмінесцентного освітлення	LL
M	Двигуни постійного та змінного струму	-	-
P	Прилади, вимірювальне обладнання Примітка: поєднання PE недопустиме	Амперметр Лічильник імпульсів Частотомір Лічильник реактивної енергії Лічильник активної енергії Омметр Реєструвальний пристрій Годинник, вимірювач часу Вольтметр Ватметр	PA PC PF PK PI PR PS PT PV PW

Продовження таблиці 3.8

1	2	3	4
Q	Вимикачі та роз'єднувачі в силових колах	Автоматичний вимикач Короткозамикач Роз'єднувач	QF QK QS
R	Резистори	Терморезистор Потенціометр Шунт для вимірювання Варистор	RK RP RS RU
S	Комутаційні пристрої в колах керування, сигналізації та замірювання	Вимикач або перемикач Кнопковий вимикач Автоматичний вимикач Вимикачі, що спрацьовують від різних дій: рівня тиску положення (шляховий) кутової швидкості температури	SA SB SF SL SP SQ SR SK
T	Трансформатори, автотрансформатори	Трансформатор струму Трансформатор напруги	TA TV
U	Пристрої зв'язку та перетворювачі електричних величин на електричні	Модулятор Демодулятор Дискримінатор Частотний перетворювач, інвертор, випрямляч	UB UR UI UZ
V	Електровакуумні, напівпровідникові прилади	Діод, стабілітрон Електровакуумний прилад Транзистор	VD VL VT
W	Лінії та елементи ЗВЧ	Антени	WA
X	Контактні з'єднання	Струмознімач, ковзний контакт	XA
Y	Механічні пристрої	Електромагніт Гальма з електромагнітним приводом Муфта з електромагнітним приводом Електромагнітний патрон або плита	YA YB YC YH

Слід виконувати принципові електричні схеми за такими правилами:

1. Лист із схемами заповнюють у такому вигляді: у лівій частині розміщують основну схему, потім графічний матеріал, що пояснює дію схеми (циклограми, діаграми замикань контактів тощо), в правій частині – текстовий матеріал.

Таблиця 3.9 – Літерні коди для показу функціонального призначення елементів

Літерний код	Функціональне призначення	Літерний код	Функціональне призначення
A	Допоміжний	I	Інтегруючий
B	Напряму руху	K	Штовхаючий
C	Зчитуючий	M	Головний
D	Диференціюючий	N	Вимірювальний
F	Захисний	O	Пропорційний
G	Випробовуючий	Q	Стан (стоп, старт, обмеження)
H	Сигнальний	V	Швидкість, прискорення, гальмування
R	Поворот, скидання	W	Додавання
S	Запам'ятовування, запис	X	Перемноження
T	Синхронізація, затримка	Y	Аналоговий
		Z	Цифровий

2. Принципові схеми виконують строковим методом. При цьому графічні позначення елементів або їх складових частин, що входять до одного кола, зображують послідовно один за одним по прямій, окремі кола – поряд, створюючи паралельні (горизонтальні або вертикальні рядки (рис. 3.11).

3. Усі апарати (реле, контакти, кнопки та ключі керування, автоматичні вимикачі, перемикачі кіл та ін.) на електричних схемах потрібно зображувати, як правило, у вимкненому положенні, тобто за відсутності напруги в усіх колах схеми та зовнішніх механічних діях на апарати.

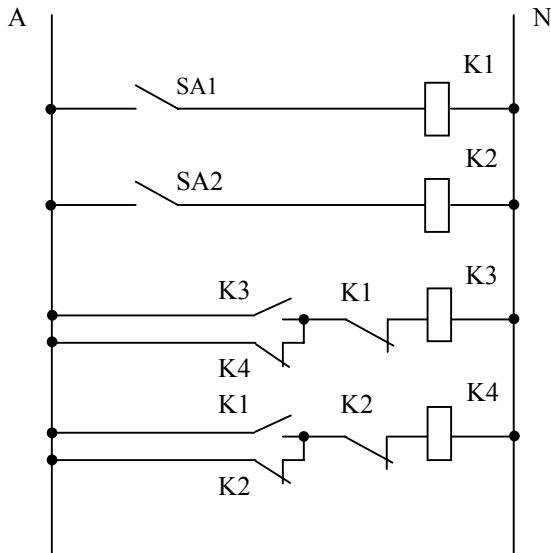


Рис. 3.11. Фрагмент електричної принципової схеми, що виконана рядковим методом

4. Контакти реле, контакторів, кнопкових перемикачів зображують, щоб сила, яка потрібна для спрацювання, діяла на рухомий контакт зверху вниз при горизонтальному зображенні кіл схеми та зліва направо – при вертикальному.

5. Для позиційного позначення елементів рекомендується застосовувати двохлітерні коди (табл. 3.8). Проте залежно від конкретного змісту схеми елемент будь-якого виду можна позначити і однією літерою – загальним кодом виду. Наприклад, якщо в схемі є магнітний пускач і немає інших реле, то цей пускач можна позначити літерою К, хоча він має дволітерний код КМ (рис. 3.11). Позиційне позначення на схемі проставляють біля умовного графічного зображення елементів (пристроїв) з правої сторони або над ними.

6. Щоб поліпшити розуміння принципових електричних схем, їх іноді розбивають на функціональні ділянки і збоку (справа) роблять надписи, що пояснюють функціональне призначення кола або вказують, якій схемі технологічного обладнання належить це коло (рис. 3.12).

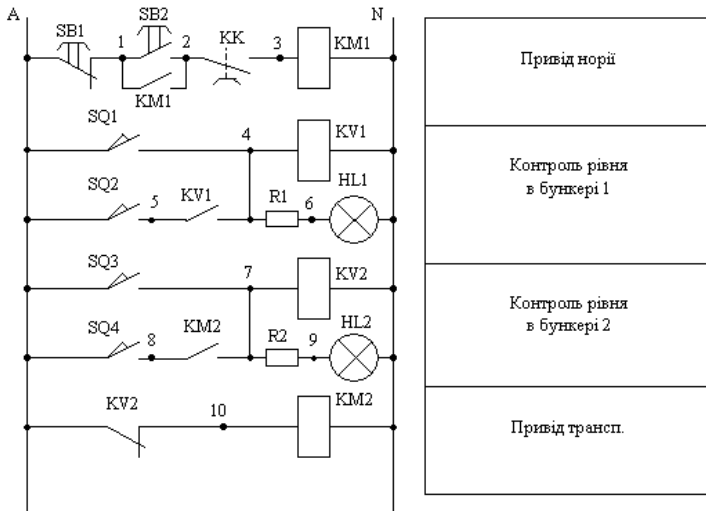


Рис. 3.12. Фрагмент електричної принципової схеми, що виконано рядковим методом з пояснюючими надписами

7. Лінії зв'язку між елементами мають складатися із горизонтальних та вертикальних відрізків і мати найменше число зломів та перетинів. У деяких випадках допускається застосування нахилених ліній зв'язку, довжину яких слід обмежувати.

На принципових електричних схемах лінії зв'язку мають бути зображені, як правило, повністю; якщо це ускладнює читання схем, то їх допускається обривати і обриви слід закінчувати стрілками, біля яких потрібно показувати місце підключення та характеристику кіл (полярність, потенціал); лінії зв'язку, що переходять з одного листа на інший, потрібно обривати за межами зображення схеми.

Товщина ліній зв'язку допускається в межах 0,2–1,0 мм, рекомендується – 0,3–0,4мм. На одній схемі бажано використовувати не більше трьох за товщиною розмірів ліній зв'язку.

На принципових електричних схемах графічні умовні зображення елементів можуть бути виконані двома способами:

- *суміщенням*, коли всі частини кожного приладу, засобу автоматизації або електричного апарата розмішують у безпосередній близькості один від одного та охоплюють їх прямокутником, квадратом або колом; недолік цього способу – недостатня наочність (рис. 3.13, а);

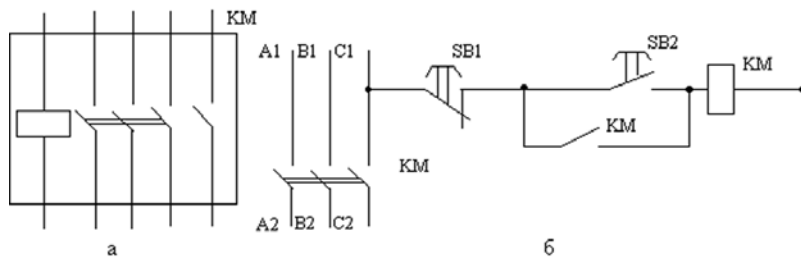


Рис. 3.13. Способи зображення принципних схем:
а – суміщений; б – рознесений

• *рознесеним*, за якого складові частини приладів, апаратів, засобів автоматизації розміщують у різних місцях схеми, проте так, щоб окремі кола були зображені найбільш наочно; належність елементів до одного і того самого пристрою встановлюють за позиційним позначенням (рис. 3.13,б).

Згідно з ГОСТ 2.709-89 “Обозначения условные проводов и контактных соединений электрических элементов” маркування всіх ділянок електричних кіл, розділених контактами апаратів, обмотками реле, резисторами та іншими елементами, має бути різним, а маркування ділянок кіл, що проходять через рознімні, розбірні або нерозбірні контактні з’єднання, – однаковим. Кола маркують відповідно до таких правил:

• силові кола змінного струму маркують $L1, L2, L3, N$ та послідовними числами; так ділянки ланцюга першої фази $L1-L11, L12, L13$ і т.д., ділянки кола другої фази $L2-L21, L22, L23$ і т.д., ділянки кола третьої $L3-L31, L32, L33$ і т.д.; допускається, якщо це не спричинює помилкового тлумачення, позначати фази відповідно літерами A, B, C ;

• силові кола постійного струму маркують непарними числами – ділянки кіл додатної полярності, парними – ділянки кіл негативної полярності; вхідні та вихідні ділянки кіл – з показом полярності “+” та “-”, середній провідник – літерою N чи M ;

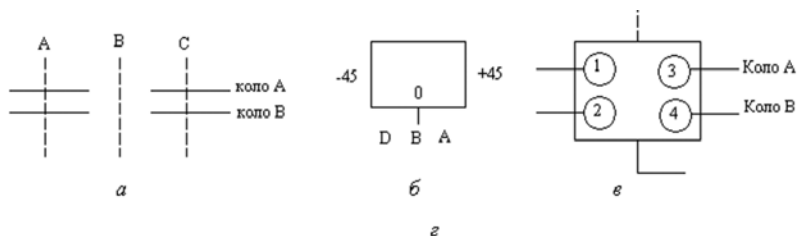
• кола керування, захисту, сигналізації та вимірювання в межах виробу або установки маркують числами, до того ж їх послідовність має бути від джерела живлення до споживача, а розгалуження кіл – зверху вниз і зліва направо. Залежно від функціонального призначення різні кола електричних схем маркують певними групами чисел (табл. 3.10).

Таблиця 3.10 – Групи чисел, що використовуються для маркування кіл

Коло	Група чисел	
	основна	резервна
Керування, регулювання	1–399	1001–1399 2001–2399 і т.д.
Сигналізації	400–799	1400–1799 2400–2799 і т.д.
Живлення	800–999	1800–1999 2800–2999 і т.д.

Приклад маркування кіл наведено у рис. 3.13, б.

Часто для комутації електричних кіл використовують багатопозиційні апарати (ключі, перемикачі, програмні пристрої). У цьому разі на схемі потрібно розміщувати діаграми та таблиці перемикання їхніх контактів. У таблицях слід вміщувати відомості щодо типу апарата, виду рукоятки, номера контактів і режиму роботи (рис. 3.14, а–г).



УП5311С23								
№ секції	№ контакту		-45^0		0^0		$+45^0$	
	л	п	л	п	л	п	л	п
I	1	2						
II	3	4						
Вибір режиму роботи			Дистанційне керування		Вимкнено		Автоматичне керування	
Умовне позначення			Д		В		А	

Рис. 3.14. Технічна характеристика багатопозиційного комутаційного пристрою:

а – кола, що комутуються; *б* – фронтальна площина перемикача; *в* – монтажне зображення перемикача; *г* – діаграма перемикань

Дані про елементи схем, що зображуються на кресленнях принципів електричних схем, мають бути занесені до переліку елементів, які оформляють у вигляді таблиці (рис. 3.15).

Якщо на схемі є умовні графічні позначення мікросхем, на яких не вказані виводи для підключення живлення, то на вільному полі схеми виконують таблицю за формою (див. табл. 3.11).

Допускається зливати в одну лінію декілька електрично незв'язаних ліній зв'язку. При цьому кожен ліній в місці злиття на обох кінцях помічають умовними позначеннями (цифровими або буквено-цифровими).

На схемі дозволяється вказувати характеристики вхідних кіл виробів (частоту, напругу, силу струму, опір та ін.), а також параметри, які підлягають вимірюванню на контрольних контактах. Написи, знаки або графічні позначення, які повинні бути нанесені на виріб, поміщають біля відповідних елементів у лапках.

Позиц. познач.	Найменування	Кількість	Примітка
R1	МЛТ-0,5-300 кОм ± 5%	1	
R5, R6	ОМЛТ-0,5-900 кОм ± 10%	2	

Рис. 3.15. Форма таблиці для елементів принципів електричних схем

Таблиця 3.11 – Підключення мікросхем до шин живлення

<i>Шина живлення</i>	<i>Виводи мікросхем</i>		
	<i>DD1, DD4</i>	<i>DD2</i>	<i>DD3, DD5 ... DD8</i>
<i>+ 5 В</i>	<i>20</i>	<i>16</i>	<i>14</i>
<i>0 В</i>	<i>10</i>	<i>08</i>	<i>07</i>

Допускається вказувати адреси зовнішніх з'єднань вхідних та вихідних кіл даного виробу, якщо вони відомі.

Умовні графічні позначення вхідних та вихідних елементів – з'єднувачів, плат та інших дозволяється замінити таблицями довільних розмірів. Таблицям присвоюють позиційні позначення елементів, які вони замінюють. Порядок розташування контактів у таблиці визначається зручністю побудови схеми.

3.4. Схеми з'єднань

Згідно з ГОСТ 2.702-75 “Правила выполнения электрических схем” схеми з'єднань – це схеми, на яких зображують з'єднання складових частин установки або виробу. Вони розробляються на основі принципових схем живлення та використовуються під час виконання монтажних і налагоджувальних робіт.

Схеми з'єднань виконують на підставі таких загальних правил:

- схеми з'єднань розробляють на один щит, пульт, штатив, станцію керування.
- усі типи апаратів, приладів та арматури, що передбачені принциповою електричною схемою, мають бути повністю відображені на схемі з'єднань;
- позиційне позначення приладів та засобів автоматизації, а також маркування ділянок кіл, що прийняті на принципових схемах, потрібно зберегти на схемі з'єднань.

Застосовують три способи виконання схем з'єднань: адресний, графічний і табличний. Для перших двох, крім зазначених вище правил, слід виконувати ще декілька:

- щит або шафу керування розвертають в одну площину, показуючи лише ті їхні конструкції, на яких розміщуються прилади та засоби автоматизації (див. рис. 3.16); при цьому зберігають взаємне розміщення приладів та засобів автоматизації;

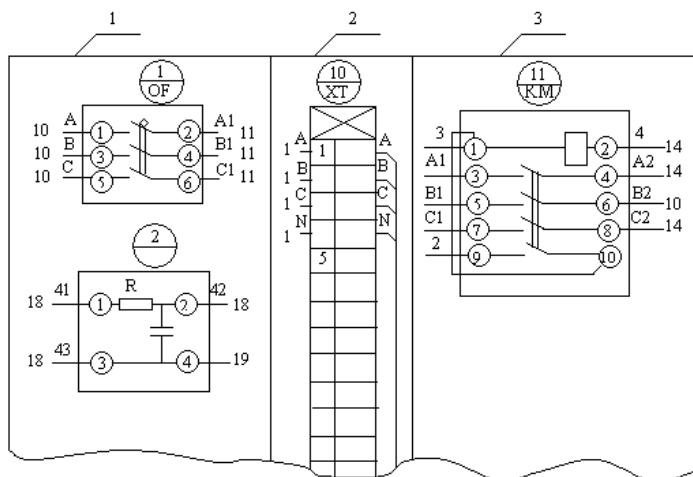


Рис. 3.16. Фрагмент схеми електричної з'єднань (адресний спосіб виконання):

1 – передня панель шафи керування; 2 – ліва бічна стінка; 3 – задня стінка

• прилади та засоби автоматизації показують спрощено без збереження масштабу у вигляді прямокутників, над якими розміщують кола, розподілені рисою навпіл; цифри над рисою вказують порядковий номер виробу (номера присвоюються попанельно зліва направо і зверху вниз), а під рисою – позиційне позначення цього виробу (відповідно до принципової електричної схеми). За потребою показують внутрішню схему апаратів (рис. 3.16).

• для кількох реле, що розміщені в одному ряду, внутрішню схему показують один раз, якщо вона у них одна й та сама.

• вивідні затискачі зображують колами, у середині яких показують їхнє заводське маркування; якщо у вивідних апаратів заводського маркування немає, то їх маркують умовно арабськими цифрами, що зумовлено пояснювальними надписами. Слід зазначити, що маркування проводів і позначення затискачів на схемах з'єднань є незалежними.

• платам, на яких розміщуються резистори, конденсатори та інші елементи, присвоюється лише порядковий номер (проставляється в колі над рисою); позиційне позначення елементів розміщують у безпосередній близькості від їхнього умовного графічного позначення (рис. 3.16).

Адресний спосіб є найбільш поширеним і полягає в тому, що лінії зв'язку між окремими елементами апаратів, які встановлюють на щиті або на пульті, не показують, а замість цього у місці приєднання проводу на кожному апараті або елементі проставляють цифрову або літерно-цифрову адресу того апарата або елемента, з яким він електрично має бути зв'язаний (позиційне позначення згідно з принциповою схемою) або порядковий номер елемента. Це не загромаджує схему лініями зв'язку, що дає змогу її легко читати.

Графічний спосіб полягає в тому, що на кресленні умовними лініями показують усі з'єднання апаратів (рис. 3.17). Цей спосіб застосовують лише для щитів і пультів, відносно мало насичених апаратурою. Схеми трубних проводок виконують лише графічним способом. Якщо в одному пульті труби прокладають із різного матеріалу (сталеві, мідні, пластмасові), то їй умовні позначення при цьому використовують різні (суцільні лінії, штрихові, штрихові з двома крапками та ін.).

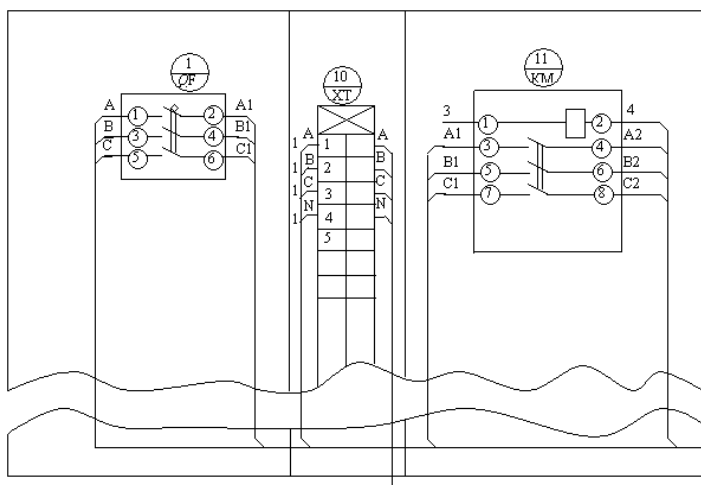


Рис. 3.17. Фрагмент схеми електричної з'єднань (графічний спосіб виконання)

Табличний спосіб застосовують у двох варіантах. Для першого складають монтажну таблицю, де вказують номери кожного електричного кола. У свою чергу, для кожного кола послідовно перелічують умовні літерно-цифрові позначення всіх приладів, апаратів та їх контактів, до яких ці кола приєднані (табл. 3.12).

Таблиця 3.12 – Фрагмент таблиці з'єднань

Номер кола	З'єднання
7	КМ1/6 - КМ2/4 - КТ4/3
8	КМ4/2 - КТ1/293

Так, для кола 7 запис означає, що затискач 6 магнітного пускача *КМ1* з'єднується із затискачем 4 магнітного пускача *КМ2*, який у свою чергу повинен бути з'єднаним з затискачем 3 реле часу *КТ4*.

Другий варіант відрізняється від першого тим, що в таблицю вписуються в міру зростання номери маркування кіл принципів електричних схем (див. рис. 3.18).

Провідник	Звідки надходить	Куди підключається	Дані проводу	Примітка
1	ХТЗ/1	ХТЗ/2	ПВ 1x0,75	П

Рис. 3.18. Форми таблиці з'єднань проводок

Напрямок прокладки проводів, як і для першого варіанта, записується у вигляді дробу. У примітці для найчіткішого розпізнавання проводів слід використовувати додаткові позначення. Наприклад, перемичку позначають літерою “П” (рис. 3.18).

3.5. Схеми підключень

Згідно з ГОСТ 2.702-75* схеми вмикання показують зовнішнє підключення апаратів, установок щитів, пультів і т.д. Схеми з'єднань виконують на підставі принципів схем живлення, специфікацій приладів і обладнання, а також креслень виробничих приміщень із розміщенням технологічного обладнання та трубопроводів. Їх використовують під час монтажу проводок, що забезпечують живлення щитів, пультів, установок, приладів та апаратів.

Практично використовують дві побудови схем підключень: графічну та табличну. Найпоширенішою є графічна. При цьому умовними графічними позначеннями зображають відбірні пристрої та первинні перетворювачі; щити, пульти та локальні пульти керування контролю сигналізації та вимірювання; позашитові прилади та засоби автоматизації; з'єднувальні та протяжні коробки, вільні коробки кінців термопари, електропроводки та кабелі, що прикладаються поза

щитами; вузли приєднання електропроводів і приладів, апаратів та коробок; забірну апаратуру елементів для з'єднання та відгалуження; комутаційні затискачі, розміщені поза щитами; захисне заземлення.

Шафи, пульти, окремі прилади та апарати зображують у вигляді прямокутників або кіл, у середини яких розміщують відповідні надписи.

Зв'язки одного призначення на схемах підключень показують суцільними лініями, і лише в місцях приєднання для приладів виконавчих механізмів та до інших апаратів проводи розділяють, щоб провести їх маркування.

На лініях зв'язку, що означають проводи або кабелі, вказують номер проводки (підключення), марку, переріз та довжину проводів і кабелів (якщо проводка виконана в трубі, то необхідно вказати також характеристику труби).

Проводи, джугути та кабелі показують лініями товщиною 0,4–1 мм.

Схеми підключень виконують без збереження масштабу у вигляді зручному для користування.

На рис. 3.19 показаний фрагмент схеми підключень (графічний спосіб).

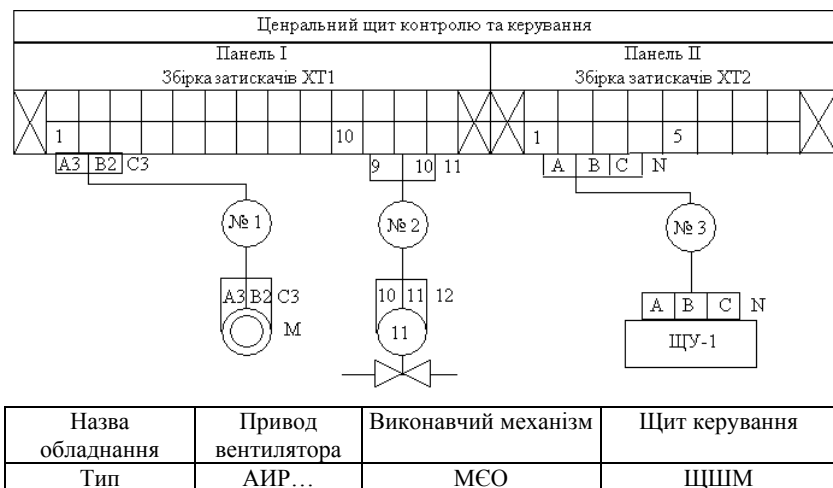


Рис. 3.19. Фрагмент схеми електричної підключень (графічний спосіб виконання)

Значно рідше схеми підключень показують у вигляді таблиць, які виконують окремо на кожну секцію (панель) щита керування (табл. 3.13).

Таблиця 3.13 – Форма таблиці підключень (секція ...)

Кабелі, проводи		Напрямок проводок								
номер	марка	Звідки				номер жили	Куди			
		позиція	тип приладу	збірка зажимів	номер зажиму		номер зажиму	збірка зажимів	позиція	тип приладу
4	КВРГ4*1,5	M2	АИР	ХТ1	1	138	1	ХТ2	А2	СК-32
					2	140	2			
					3	142	3			

**Примітка.* Позицією А2 позначень з'єднувальна коробка типу СК-32.

3.6. Плани виробничих приміщень з нанесенням схем електрообладнання і проводок

Плани приміщень для нанесення схем електрообладнання та проводок зображають спрощено тонкими лініями в масштабі. На планах тонкими лініями вказують контури лише тих будівельних і технологічних конструкцій та трубопроводів, які визначають трасу прокладання електричних мереж і використовуються для їх кріплення і прокладання. Електричні приймачі, розподільні пристрої, електропроводки та інше електроустаткування на плані зображають лініями 1мм завтовшки у вигляді умовних графічних позначень згідно з ГОСТ 21.614-88 “Изображение условных электрооборудований и проводок на планах”. Розміри зображень наведені для креслень, виконаних у масштабі 1:100. Під час виконання зображень в іншому масштабі розміри їх слід змінювати пропорційно масштабу креслення. Проте при цьому розміри (діаметр та сторона) умовного зображення електрообладнання мають бути не менш як 1,5 мм. Розміри зображень шаф, щитів, пультів, ящиків, електротехнічних пристроїв та електрообладнання відкритих розподільних пристроїв слід брати на підставі їхніх фактичних розмірів у масштабі креслення.

Біля позначень силових електричних приймачів проставляють їхній номер за планом (у чисельнику) та їхню номінальну потужність (у знаменнику), а біля позначень розподільних пристроїв – їхні літерні

позначення та номер за планом (наприклад, ЩР1, ЩО2, ЩС1).

Біля світильників проставляють тип світильника, потужність встановлених у ньому ламп (у чисельнику) та висоту підвішування світильників над підлогою (в знаменнику). На плані вказують освітленість для кожного приміщення в люксах.

Над проводкою допускається проставляти марку і переріз проводів або кабелів та способи їх прокладання. Електрообладнання, за виключенням електричних приймачів комплектних пристроїв, апаратів та приладів, встановлених безпосередньо на технологічному обладнанні, і траси електричних мереж, прокладених сховано і відкрито, повинні мати прив'язку та відмітку на плані.

Прив'язку електрообладнання і електричних мереж проводять здебільшого до координатних осей будівель і споруд або до осей технологічного обладнання, яке має власні фундаменти і монтується до прокладання електромереж. Допускається не вказувати прив'язку одиночних пристроїв (світильників, кнопок, штепсельних розеток тощо) і відкрито прокладених кабелів та проводів, якщо місця їх прокладання зрозумілі без прив'язок.

На кресленнях із планами приміщень з нанесенням схем електрообладнання і проводок наводять експлікацію приміщень та принципові схеми електромереж, які виконують згідно з ГОСТ 21.613-88 “Силовое электрооборудование. Рабочие чертежи” (табл. 6.8).

Розміщення на планах елементів пристроїв, проводів і кабелів має відповідати їх дійсному розміщенні на об'єкті чи плані.

Запитання для самоперевірки

1. Які стандарти ви знаєте?
2. Які форми основного напису встановлено стандартом?
3. Які типи схем ви знаєте?
4. Призначення структурних схем.
5. Призначення функціональної схема.
6. Призначення принципової електричної схеми.
7. Якими нормативними документами слід керуватися під час виконанні принципів електричних схем?
8. Яких правил слід дотримуватись під час виконання принципів електричних схем?
9. Призначення схем з'єднання.
10. Які ви знаєте способи виконання схем з'єднання?
11. Схема підключень та її типи.

4. РОЗРАХУНКИ І ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ

4.1. Розрахунок і вибір електроприводів

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

Електропривід має якісно забезпечувати нормальне протікання технологічного процесу при розрахунковій продуктивності робочої машини і високій економічній ефективності. Раціональний електропривід 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 умов 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 захист;

- 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;

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

- *особливо вогі* (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, газу, 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 пилю 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°C) – 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-IIа – 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°C, 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 (загальнокліматичне 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 комплектих 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 “Изделия электротехнические сельскохозяйственного назначения” 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°C або нижча, а середня із щорічних абсолютних мінімумів температури повітря становить – 45°C або вища.

Згідно з ГОСТ 14254-96 “Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (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. Водою 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 “Изделия электротехнические сельскохозяйственного назначения” 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 АИР основного та сільськогосподарського виконань наведені в додатках 8 і 9.

Допустиме число вмикань електродвигуна за годину визначають за формулою:

$$Z_{\text{дон}} = 2250 \frac{(1 - \varepsilon)(1 + \alpha)}{K_i^2 \cdot t_{\text{розг.дон}}}, \quad (4.1)$$

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.

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	—”—
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	—”—
7. Асинхронні серії АИРС...У2 з підвищеним ковзанням	—”—
8. Асинхронні серії АИРП...У2 для приводу вентиляторів тваринницьких і птахівницьких комплексів	—”—
9. Асинхронні багатошвидкісні 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	—”—

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:

$$0,7 < K_{зав} \leq 1. \quad (4.2)$$

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 пультах (щитах) 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 багатшвидкісними двигунами; 8 – пуск двигуна із зниженою напругою, 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, 7-3 80В 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:

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

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

Розрахункову потужність для насоса визначають за формулою:

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

де $Q_{\text{н.ном}}$ – номінальна подача насоса, м³/с; $H_{\text{н.ном}}$ – номінальний напір,

м; γ – густина води, кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; η_n – номінальний ККД насоса; $K_{\text{зап}}$ – 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:

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

де $L_{\text{в.ном}}$ – номінальна подача вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$; $P_{\text{в.ном}}$ – номінальний тиск вентилятора, Па; $K_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу потужності електродвигуна (для електродвигунів осьових $K_{\text{зап}} = 1,1$; 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); η_v – 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:

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

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

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; $P_{\text{сп.ном}}$, $P_{\text{сп}}$ – потужності, споживані вентилятором (насосом) за номінальної і фактичної частот обертання. Для приводу вакуум-насоса потужність електродвигуна визначається за формулою, кВт:

$$P_{\text{дв}} = \frac{Q_{\text{в.н}} h}{\eta_{\text{в.н}} \eta_{\text{пер}}} 10^{-3}, \quad (4.7 \text{ а})$$

де $Q_{\text{в.н}}$ – подача вакуум-насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; h – вакуум, створюваний вакуум-насосом, Па; $\eta_{\text{в.н}}$ – 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:

$$P_{\text{дв}} = \frac{Q_{\text{кв}} K_{\text{вт}} (K_{\text{оп}} L \cos \alpha + H)}{376 \eta_{\text{кв}} \eta_{\text{пер}}}, \quad (4.7 \text{ б})$$

де $Q_{\text{кв}}$ – продуктивність конвеєра, т/год.; $K_{\text{вт}}$ – коефіцієнт втрат потужності під час пуску конвеєра (наближено можна брати: для скребкових конвеєрів – 1,8; стрічкових – 1,4; гвинтових – 1,1); $K_{\text{оп}}$ – 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; $\eta_{\text{кв}}$ – ККД конвеєра.

Для машин, що мають тривалий режим із 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:

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

де $\Delta U_{\text{фак}}$ $\Delta U_{\text{фак.пр}}$ – відповідно спад напруги на затискачах електродвигуна під час його пуску і на затискачах працюючих електродвигунів; $\Delta U_{\text{доп}}$ $\Delta U_{\text{доп.пр}}$ – відповідно допустимий спад напруги на затискачах електродвигуна, що запускається, і на затискачах працюючих електродвигунів, %.

На затискачах електродвигуна під час пуску спад напруги дорівнює:

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

у відсотках від його номінального значення визначається як:

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

де $U_{\text{нyc}}$ – 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 $M_{\text{пус}}$ – 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):

$$\Delta U_{\text{дон}} = \left(1 - \sqrt{\frac{M_{\text{зр}} + M_{\text{над}}}{M_{\text{пуск.ном}}}} \right). \quad (4.13)$$

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:

$$\Delta U_{\text{дон.пр}} = \left(1 - \sqrt{\frac{M_{\text{макс.нав}}}{M_{\text{к}}}} \right), \quad (4.15)$$

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:

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

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; $\Delta U_{\text{над}}$ – надбавка напруги трансформатора, відсоток; $\Delta U_{\text{шнн}}$ – 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:

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

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 $Z_{\text{об}}$, %, визначають за такими формулами:

$$\Delta U_1 = \frac{\sqrt{3} I_{\text{макс}} l (R_0 \cos \varphi + x_0 \sin \varphi)}{U_{\text{ном}}} 100, \quad (4.18)$$

$$Z_1 = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{ном}} k_i}, \quad (4.19)$$

де $I_{\text{макс}} = \frac{S_{\text{роз}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}$ – максимальний струм у лінії перед пуском

електродвигуна, А; $S_{\text{роз}}$ – 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; $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга лінії, В; K_i – кратність пускового струму електродвигуна; $I_{\text{ном}}$ – номінальний струм електродвигуна, А.

Значення $\Delta U_{\text{над}}$ і $\Delta U_{\text{шпи}}$ 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 дістають за формулою:

$$\Delta U_{MP} = \frac{100}{S_K} \sqrt{(K_{фак} S_{\delta\epsilon} \cos\varphi_{н\у\с} + S_{на\epsilon} \cos\varphi_{на\epsilon})^2 + (K_{фак} S_{\delta\epsilon} \sin\varphi_{н\у\с} + S_{на\epsilon} \sin\varphi_{на\epsilon})^2}, \quad (4.20)$$

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

Величини S_K , $\cos\varphi_{н\у\с}$ і $K_{фак}$ визначають за формулами:

$$S_K = \frac{100 S_{ном}}{U_K}; \quad (4.21)$$

$$\cos\varphi_{н\у\с} = \frac{\eta_{ном} \cos\varphi_{ном} (\mu_{н\у\с} + 0,025 k_i^2)}{(1 - S_{ном}) k_i}; \quad (4.22)$$

$$K_{фак} = \frac{100 k_i}{100 + U_K k_i} \frac{Z_{\delta\epsilon}}{S_{ном} Z}, \quad (4.23)$$

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:

$$Z = \sqrt{(R_{\delta\epsilon} + R_l)^2 + (X_{\delta\epsilon} + X_l)^2}, \quad (4.24)$$

де $X_{\delta\epsilon}$ і $R_{\delta\epsilon}$ – відповідно реактивна і активна складові повного опору короткого замикання електродвигуна ($R_{\delta\epsilon} = Z_{\delta\epsilon} \cos\varphi_{н\у\с}$; $X_{\delta\epsilon} = Z_{\delta\epsilon} \sin\varphi_{н\у\с}$); 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.

4.2. Розрахунок і вибір освітлювальних та опромінювальних установок

4.2.1. 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% 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. При цьому люмінесцентним лампам слід віддавати перевагу.

Найменша освітленість робочих площин має відповідати нормам, наведеним у ДБН В 2.5.28-2006 “Природне і штучне

освітлення”, СНиП 11-4-79 “Естественное и искусственное освещение”, 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 рази вищі, ніж для ламп розжарювання.

Для зменшення нерівномірності освітленості робочої поверхні застосовують систему комбінованого освітлення з 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.

4.2.2. 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; 3 – 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 – трізначне 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 напівсферах, 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.

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.

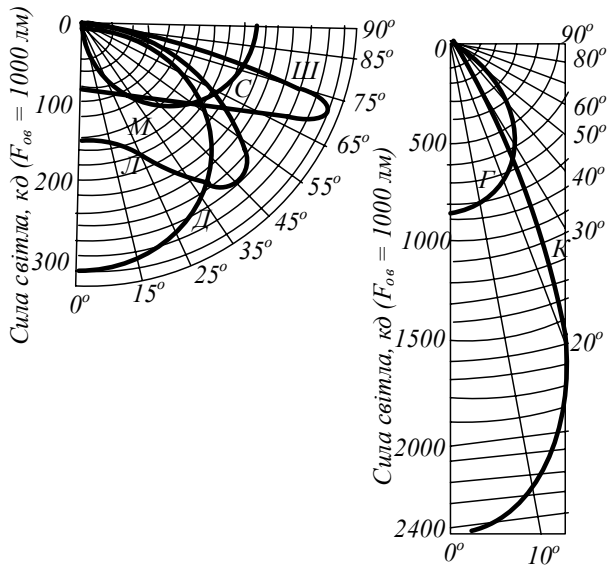


Рис. 4.1. Типи кривих сили світла для світлового потоку світильника з умовною лампою 1000 лм:

К – концентрована; *Г* – глибока; *Д* – косинусна;

Л – напівширока; *Ш* – широка; *М* – рівномірна; *С* – синусна

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.

4.2.3. Розрахунок і проектування освітлення

Проектування освітлення об'єктів різного призначення здійснюють на підставі нормативних вимог СНиП 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).

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.

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

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 (із стороною квадрата L) або прямокутників (із сторонами L_a і L_b) (рис. 4.2). Для прямокутних площин рекомендується брати $L_a \cdot L_b \leq 1,5$. 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 A – відносна відстань між світильниками; h_p – розрахункова висота підвищення світильника (відстань від світильника до розрахункової поверхні), м.

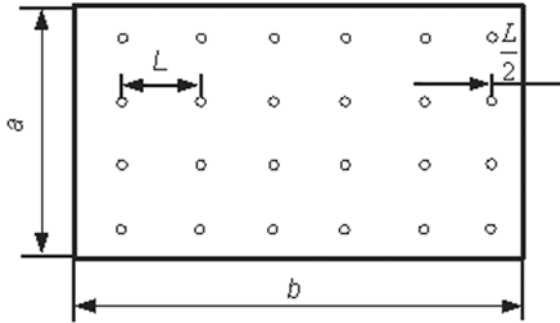


Рис. 4.2. Розміщення світильників по вершинах квадратних площин

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; напівширока – 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:

$$\Phi = \frac{ESK_3Z}{N\eta}, \quad (4.31)$$

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)

$$i = \frac{ab}{h_p(a+b)}, \quad (4.32)$$

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.

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.

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:

$$P = \frac{\omega S}{Nn}, \quad (4.33)$$

де S – площа приміщення, м²; ω – питома потужність загального рівномірного освітлення, Вт·м⁻²; N – кількість світильників у приміщенні; n – кількість ламп у світильнику.

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

Параметри, від яких залежить коефіцієнт η	Тип світильника									
	ПВЛМ-2x40;2x80 з лампами ЛБР					ПВЛМ- 3x40; 1x80 з лампами ЛБР				
	Коефіцієнти відбиття									
$\rho_c, \%$	770	770	550	330	00	770	770	750	330	00
$\rho_{ct}, \%$	550	550	330	110	00	050	550	330	110	00
$\rho_n, \%$	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				

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: $\rho_c=50\%$; $\rho_{ct}=30\%$; $\rho_n=10\%$; $K=1,3$; $Z=1,15$.

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

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

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

h, м	s, 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, м	s, 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	9,7	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

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:

$$\sum e = \frac{I_{\alpha_1} \cos^3 \alpha_1}{h_p^2} + \frac{I_{\alpha_2} \cos^3 \alpha_2}{h_p^2} + \dots + \frac{I_{\alpha_n} \cos^3 \alpha_n}{h_p^2}, \quad (4.34)$$

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.

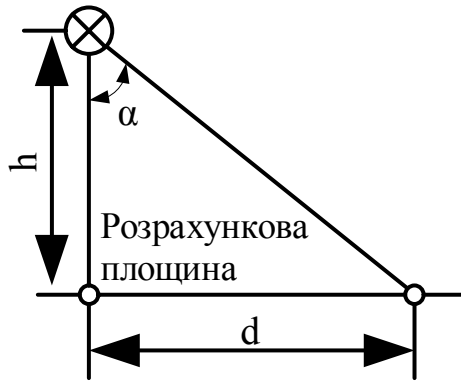


Рис. 4.3. Схема розрахунку освітленості горизонтальної площини точковим методом

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.

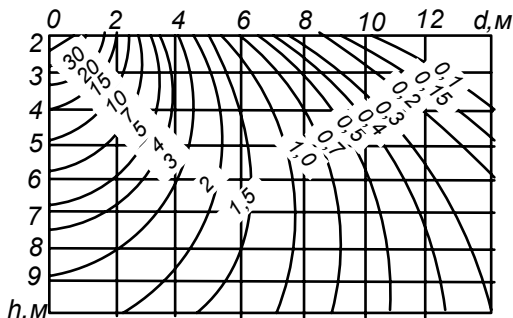


Рис. 4.4. Графік просторових ізолюків для світильників “Астра-1”, “Астра-11”, “Астра-12”: d – відстань від контрольної точки до проекції світлового центра джерела світла на розрахункову площину

Світловий потік лампи Φ_d визначають за формулою:

$$\Phi = \frac{1000Ek}{\mu \sum e}, \quad (4.35)$$

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.

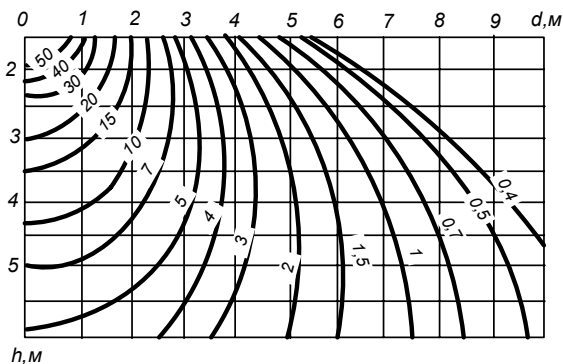


Рис. 4.5. Графік просторових ізолюків для світильників ППД-100 і ППД-200

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).

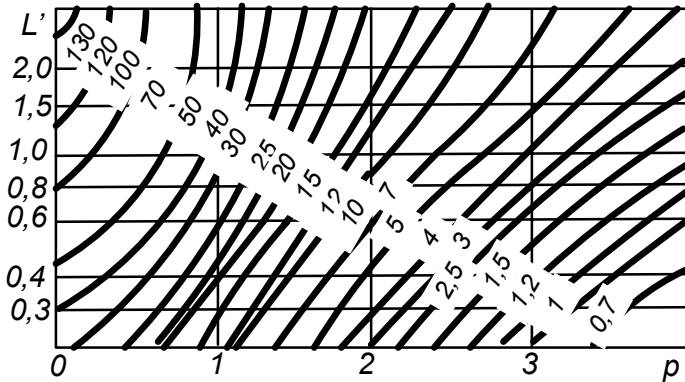


Рис. 4.6. Графіки лінійних ізолюксів умовної горизонтальної освітленості для світильників ПВЛМ з двома лампами ЛБР

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.

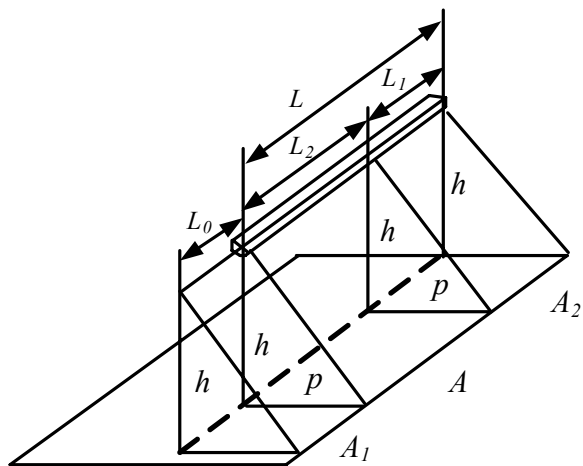


Рис. 4.7. Схема до розрахунку освітленості, створюваної світною лінією

Розрахункова точка може лежати за межами світної лінії. Тоді освітню 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:

$$\phi_{л} = \Phi L, \quad (4.37)$$

де L – довжина світної лінії, м.

Кількість світильників у ряду визначається за формулою:

$$N = \frac{\phi_{лік}}{n\phi_{л1}}, \quad (4.38)$$

де n – кількість ламп у світильнику, шт.; $\phi_{л1}$, – світловий потік одної лампи, лм.

Освітленість у контрольній точці для безперервної лінії визначається за виразом:

$$E = \frac{\phi_{\text{лін}} \mu \sum e}{1000 k h_p L}; \quad (4.39)$$

для лінії з проміжками визначається за виразом:

$$E = \frac{\phi_c \mu \sum e}{1000 k h_p L}, \quad (4.40)$$

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 $\rho_{\text{см}}=0,3$, підлоги $\rho_n=0,1$. 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 $l=0,51 \cdot L = 0,5 \cdot 5,4 = 2,7$ м.

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

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

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 $\eta = 0,49$.

Потрібний 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:

$$E_p = E \frac{\phi_{\lambda}}{\phi} = 30 \frac{2090}{2026} = 30,9 \text{ лм.}$$

У разі освітлення люмінесцентними лампами беремо світильник ПВЛМ-2×40 з двома лампами типу ЛБ-40 ($\Phi_{\lambda} = 3000$ 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 $l_{\lambda}=1,2$ м.

Відстань між світильниками:

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

Відстань від крайніх світильників до стіни:

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

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 кожному світлу лінії, якою є світильник, доповнимо відрізок $L_0 = 1,4$ м. Тоді для кожної доповненої лінії:

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

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

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

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:

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

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

4.2.4. 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 О1-2000-001-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

Продовження таблиці 4.8

1	2	3	4
020П-ДРИ-2000-УХЛ4 “Светотрон”	380	ДРИ-2000-6 1×2000	490×1470
Світильник ССПОЗ-750-001-УХЛ4	220	ДРВ-750 1×750	270×х440
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 (λ=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:

$$\Phi_f = g_{\lambda_{\max}} \int_{\lambda=300}^{\lambda=750} \varphi(\lambda) k(\lambda)_p d\lambda, \quad (4.41)$$

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 фітопотік ламп визначають за формулою:

$$\Phi_{\phi} = \Phi / K_{\phi}, \quad (4.42)$$

де Φ – світловий потік, лм; K_{ϕ} – 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 опромінювачі 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 фітопотік чи необхідну потужність визначають за формулами:

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

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

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

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

4.2.5. 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 дослідниками доведено, що ці негативні явища можна ліквідувати, застосовуючи штучне ультрафіолетове опромінення області УФ-Б ($\lambda=280\text{--}315$ нм).

Ультрафіолетові випромінювання області УФ-С ($\lambda=100-280$ 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 до 6 місяців	160–180 120–140
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

Продовження таблиці 4.11

1	2	3	4	5	6	7
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		
ЭНП01-30	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 опромінювання 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 опромінювання тварин, за відомих типу лампи, даних арматури і висоті підвішування опромінювача над тваринами визначають за формулою:

$$n = \frac{\pi^2 v H_{ep} h_p}{2 \Phi_{ep} K_n \sin \varphi}, \quad (4.45)$$

де n – кількість проходів опромінювача; H_{ep} – денна доза опромінювання, 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 У0-4М 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.

4.2.6. Розрахунок і вибір установок інфрачервоного та комбінованого опромінення

Інфрачервоне випромінювання широко використовують для обігрівання молодняка 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
ССП05-250	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:

$$n = \frac{kE_{onm}S}{P_1\beta U}, \quad (4.49)$$

де S – площа опромінювальної поверхні, m^2 ; 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 підвищення ламп і площі приміщення (знаходиться у межах 0,7–0,85); k – коефіцієнт запасу (беруть у межах 1,1–1,25); E_{onm} – оптимальна енергетична опроміненість, $Вт \cdot м^2$. На рис. 4.8. зображені криві для визначення енергетичної опроміненості для курчат.

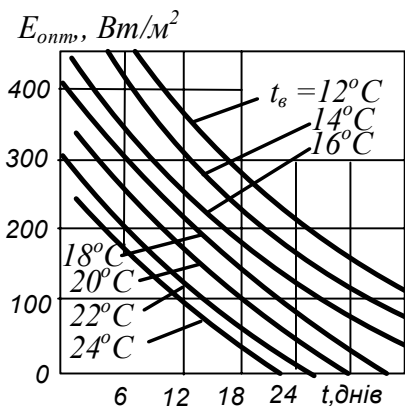


Рис. 4.8. Номограма для визначення оптимальної енергетичної опроміненості для курчат

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:

$$E_{onm} = (E_o - St_g)(1 - \alpha/l), \quad (4.50)$$

де E_o – оптимальна енергетична опроміненість для новонародженого в сухому приміщенні при температурі $t_n = 0^\circ C$, $Вт/м^2$ (курчата – 825; поросята – 700; телята – 500; ягнята – 380; індиченята – 900; каченята і гусенята – 710); S – температурний градієнт

опромінення, $S = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ (для ягнят – $13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$); α – вік тварини чи птиці, днів; l – кількість днів для повної температурної адаптації (беруть $\alpha - 100$ днів); t_v – температура в приміщенні, °С.

4.3. 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.

4.3.1. 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 тепlopостачання використовують електрододатки. Від електрододатків 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.

Для приготування кормів потрібна вода з температурою 40–65°C, для підмивання вим'я у корів – 37–39°C, для миття посуду та іншого обладнання – 50–60°C. Воду нагрівають спочатку до температури 70–90°C, 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, м³·год⁻¹; t_2 , t_x і t_{3M} – відповідно температура гарячої, холодної і змішаної води, °C.

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

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, $i = 9690$ кДж/кг); λ – теплоємність конденсату, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ (при температурі 90°C $\lambda = 380$ кДж/кг).

Розрахункову середню за годину потужність електро-теплогенерувальної 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 електро-теплогенерувальної 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:

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

де Qg – добове споживання теплової енергії, кДж.

Під час вимушеного режиму електроспоживання (наприклад, з врахуванням провалів на графіку електронавантажень енергосистеми) застосовують теплоакумуляційні системи тепlopостачання 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:

$$P_{p,e} = Qg / (3600t \eta), \quad (4.56)$$

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.

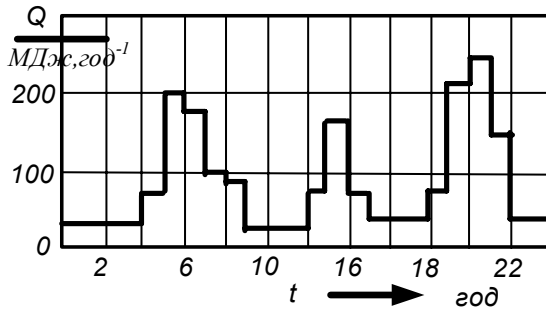


Рис. 4.9. Добовий графік теплового навантаження молочної ферми на 400 голів дійних корів

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

Середнє навантаження визначають за формулою:

$$Q_{\text{сеп}} = Qg / 24. \quad (4.57)$$

Критерієм завантаження теплогенерувального обладнання є коефіцієнт використання максимуму:

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

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

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

Потрібну ємність теплоакумулювальних 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).

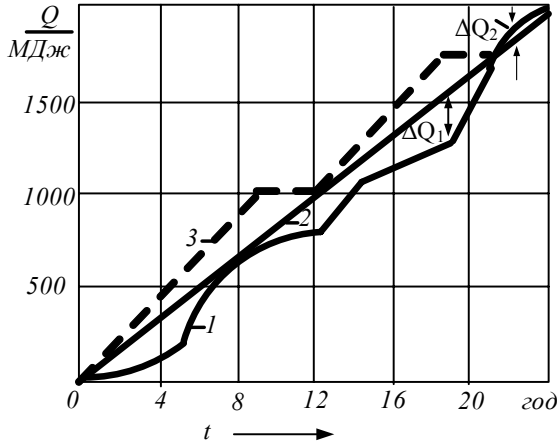


Рис. 4.10. Добові інтегральні графіки теплового навантаження гарячого водопостачання ферми на 400 голів дійних корів: 1 – витрат теплоти; 2 – подачі теплоти при цілодобовій роботі електротеплогенерувальної установки; 3 – подачі теплоти при вимушеному режимі роботи електротеплогенерувальної установки

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 тепло-акумуляційною 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.

Ємність теплоаккумулятора 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:

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

де V_a – теплоакумульовальна ємність, м³; Q_a – максимальна різниця ординат інтегральних графіків подачі і витрати теплоти, кДж.; γ – густина води ентальпії гарячої і холодної при розрахунковій температурі, кгм⁻³; $(i_g - i_x)$ – різниця води, кДж·кг⁻¹.

4.3.2. 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 м²) і ангарні (площею від 500 до 1000 м²) із заксленим 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:

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

де K – зведений коефіцієнт теплопередачі через закслену поверхню парника чи теплиці; F – площа заксленої поверхні, яка омивається зовнішнім повітрям, м²; t_g і t_3 – відповідно температура повітря всередині культивуваційного приміщення і розрахункова температура зовнішнього повітря в найхолодніший місяць роботи парника або теплиці, °С.

Значення зведеного коефіцієнта теплопередачі наближено можна визначити за формулами:

- для утепленого перекриття:

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

- для неутепленого 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:

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

де $t_{\text{мін}}$, $t_{\text{сер}}$ – мінімальна і середня температура найхолоднішого місяця в період вирощування даної культури, $^{\circ}\text{C}$ (значення температур беруть з агрокліматичних 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:

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

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

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

4.3.3. Електричне обігрівання підлоги

Вирощування молодняка 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 0,15–0,2 кВт·м⁻² площі підлоги, яку обігрівають. При розрахунках приймають, що площа теплої підлоги дорівнює для поросят одного опоросу 1–1,4 м², для курчат при утриманні на підлозі – 1,4–1,6 м² 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, м².

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

де N – загальне поголів'я молодняку тварин чи птиці в приміщенні; ΔN – щільність посадки, гол·м².

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, Вт·м⁻¹.

4.3.4. 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:

$$P = \frac{K_3 G [c(t_1 - t_2) + a]}{3600 \eta}, \quad (4.71)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, що враховує старіння нагрівальних елементів і можливе зниження електричної напруги, беруть 1,1–1,3); G – продуктивність установки, кг·год⁻¹, м³·год⁻¹ та ін.; c – середня за період нагрівання питома теплоємність тіла, a – питома теплота

разового перетворення (питома теплота плавлення випаровування) кДж·кг; η – ККД електронагрівальної установки, який складається з електричного ККД і тепловий 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, Вт·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°С понад 500°С	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:

$$S = \frac{P}{10\delta_{дон}}, \quad (4.72)$$

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

Продовження таблиці 4.17

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.

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 електронагрівники електронагрівальні елементи в ґрунті та підлозі)	0,3–0,4

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

Робочий струм нагрівального пристрою визначають за формулами:

- для однофазних установок:

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{U \cdot \eta}, \quad (4.75)$$

- для трифазних:

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta}, \quad (4.76)$$

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:

$$t_p = \frac{t_\partial}{K_M K_c}, \quad (4.77)$$

де t_∂ – 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:

$$l = \frac{U_\phi^2 S}{10^3 P_c \rho_t}, \quad (4.78)$$

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:

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

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

Приклад 4.2. Визначити потужність та геометричні розміри нагрівальних елементів трифазного елементарного електроводонагрівача місткістю 400 л, якщо вода підігрівається від 5 до 50°С 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; $t_1=5^\circ\text{C}$; $t_2=50^\circ\text{C}$ потужність трифазного елементного водонагрівача:

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

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 $t_d=1050^\circ\text{C}$.

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:

$$l = \frac{U_\phi^2 S}{10^3 P_c \rho_t} = \frac{2200,785 \cdot 10^{-6}}{10^3 \cdot 2,333 \cdot 1,11 \cdot 10^{-6}} = 14,67 \text{ м.}$$

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 А·см⁻² під час нагрівання води циліндричними електродами і 0,5 А·см⁻² під час нагрівання плоскими електродами.

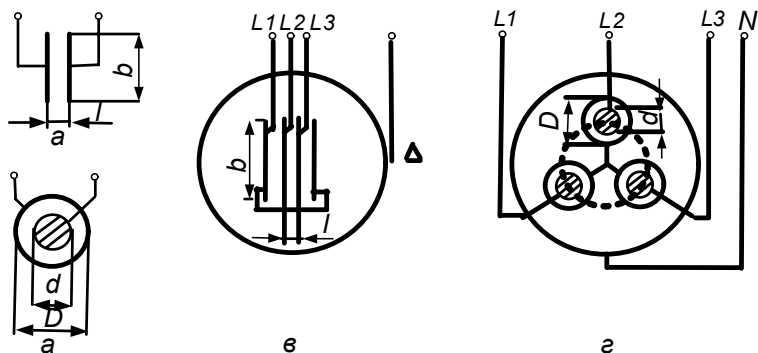


Рис. 4.11. Найпоширеніші типи електродних нагрівників:

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

Відстань між електродами визначається за формулою:

$$l = U / E_{дон}, \quad (4.80)$$

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 пластинчатими 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:

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

Підставивши в формулу (4.81) значення $R_{t_{\text{сеп}}}$, 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 густину струму на електродах за формулою:

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

де K_n – коефіцієнт, що враховує нерівномірність густини струму на поверхні електродів (беруть 1,1–1,4); S – активна поверхня електрода однієї фази, см^2 .

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 $0,2 \text{ м}^3$ гарячої води за годину при нагріванні від 10 до $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Питомий опір води за годину при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ становить $2000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, ККД водонагрівача $\eta=0,96$, напруга живлення – 380 В .

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

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

Середня температура нагрівання води:

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

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

$$l = 380 / 130 = 2,9 \text{ см}.$$

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

$$K = l / [(n-1) b] = 2,9 / [(4-1) 10] = 0,0097.$$

Висота пластин дорівнює:

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

Потужність однієї фази наприкінці нагрівання дорівнює:

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

Максимальна густина струму на електродах дорівнює:

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

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 $\rho_{20} = (0,11 - 0,15) \cdot 10^{-4}$ Ом·см і високий температурний коефіцієнт опору $\alpha = 0,004 - 0,006$ град $^{-1}$. Допустима температура нагрівання сталевого дроту становить 300–350 °С.

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

При частоті 50 Гц для дроту $d = 1 - 6$ мм наближено значення коефіцієнта поверхневого ефекту можна визначити 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:

$$L = \sqrt{\frac{10^5 P U^2 \cos^2 \varphi R_t^2}{4\pi \rho_l (t - t_0)^2}}, \quad (4.98)$$

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

Приклад 4.4. Визначити довжину сталевому оцинкованого дроту діаметром 3 мм ($\rho_{20} = 0,135 \cdot 10^{-4}$ Ом·см; $\alpha = 0,0045$ 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 $R_t = 0,04$ м 2 ·град·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:

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

4.4. 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 опромінення.

У галузі електротехнології на сьогодні проведено багато наукових досліджень, результати яких знайшли практичне застосування в сільськогосподарському виробництві [19]. Хоча промисловість випускає ще мало установок і машин, в яких використовуються принципи електротехнології, однак питання щодо застосування електротехнологій у сільськогосподарському виробництві дуже актуальне. Методики розрахунку і дослідження електротехнологічних установок висвітлені в багатьох працях науково-дослідних інститутів і вищих закладів освіти.

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.

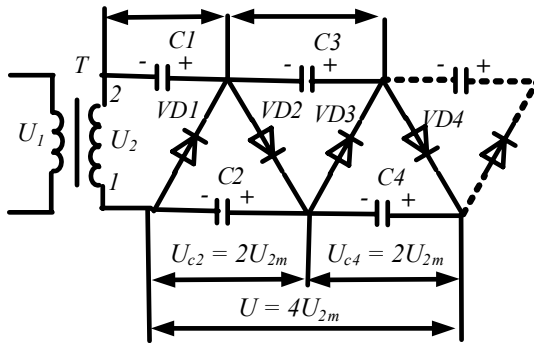


Рис. 4.12. Однонапівперіодна схема множення напруги

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:

$$U = 2n\sqrt{2} \cdot U_2 - \Delta U, \quad (4.101)$$

де U_2 – діюче значення напруги на вторинній обмотці трансформатора.

Для розрахунку схем множення беруть номінальну напругу конденсаторів більшу або таку, що дорівнює $2,85 U_2$. Зворотню 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 із 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.

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

Електротехнологія є основою вдосконалення технологічних процесів. Тому слід практикувати розробку питань щодо застосування електротехнологій в студентських наукових гуртках з метою використання здобутих результатів у дипломних проектах.

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

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

де n_l – рекомендована (табл 4.20) концентрація легких негативно заряджених іонів у зоні дихання тварини чи птиці, см⁻².

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

Вид тварин	Вік тварин (птиці) 10 ³ см 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 коронуєчих електродів у приміщенні, А:

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

де V – внутрішній об'єм приміщення, м³.

За $I_{заг}$ 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 електропривід?
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?

5. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПРОЦЕСАХ

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 нестаціонарні, із зосередженими і розподіленими параметрами*;

- за структурою – *одно- і багатоконтурні*;

- за можливостями змінювати характеристики – *адаптивні та неадаптивні*;

- 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.

5.1. Дослідження і розрахунок характеристик об'єктів автоматизації

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 передаточних функцій.

Існує багато методів здобуття передаточних функцій об'єктів керування. Їх детальніше розглядають у спеціальній літературі. Тому в даному підручнику 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:

$$mc \frac{d\theta}{dt} = Q_T, \quad (5.1)$$

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:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M, \quad (5.2)$$

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

- для об'єктів, що здійснюють лінійний рух:

$$m \frac{d\vartheta}{dt} = F, \quad (5.3)$$

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

- для об'єктів, які наповнюються рідинами:

$$S \frac{dh}{dt} = Q, \quad (5.4)$$

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

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

$$m_0 \frac{d\omega}{dt} = W, \quad (5.5)$$

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

Слід пам'ятати, що для здобуття передаточних 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 передаточної 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_b . Рідина забирається насосом ($Q_e = \text{const}$) при тиску p_2 через вентиль з площею S_2 та коефіцієнтом опору J_2 (рис 5.1).

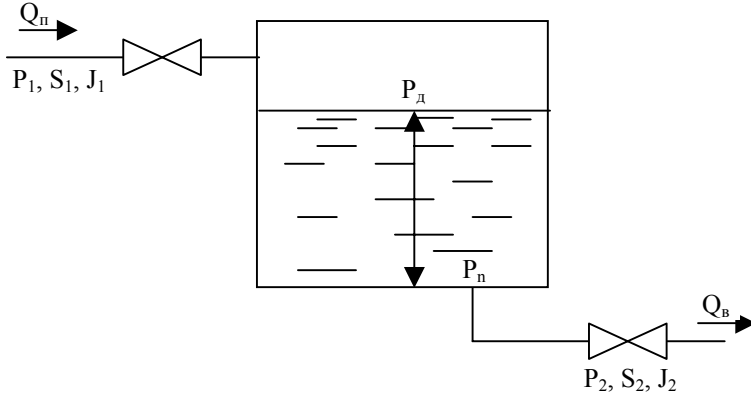


Рис. 5.1. Узагальнена схема резервуара

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

На підставі закону збереження для нашого об’єкта запишемо:

$$S \frac{dH}{dt} = \Delta Q = Q_n - Q_e, \quad (5.6)$$

де S – площа основи резервуара. Відомо, що:

$$Q_n = S_1 \sqrt{\frac{2}{\rho J} (p_i - p_e)}, \quad (5.7)$$

де ρ – питома вага рідини.

Отже,

$$S \frac{dH}{dt} = S_1 \sqrt{\frac{2}{\rho J} (p_i - p_e)} - Q_e. \quad (5.8)$$

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:

$$S \frac{d(H + \Delta H)}{dt} = (S_I + \Delta S_I) \sqrt{\frac{2}{\rho J_1} (p_I - p_e)} - Q_e. \quad (5.9)$$

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

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

$$S \frac{d\Delta H}{dt} = \Delta S_I \sqrt{\frac{2}{\rho J_1} (p_I - p_e)}. \quad (5.10)$$

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

Позначивши $\frac{d}{dt} \rightarrow p$ матимемо:

$$W(p) = \frac{\Delta H(p)}{\Delta S_I(p)} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\rho J_1} (p_I - p_e)}}{S p} = \frac{1}{T p}, \quad (5.11)$$

де $T = S / \sqrt{\frac{2}{\rho J_1} (p_I - p_e)}$ – 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 передаточну функцію. Найчастіше з усіх випробувальних сигналів використовують прямокутну приступку (рис. 5.2). Реакція об'єкта – це крива розгону. Щоб здобути передаточну функцію, її обробляють графічним методом, методом М. Симою (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, передаточна функція буде мати вигляд:

$$W(p) = \frac{Ke^{-p\tau}}{T_p + 1}. \quad (5.12)$$

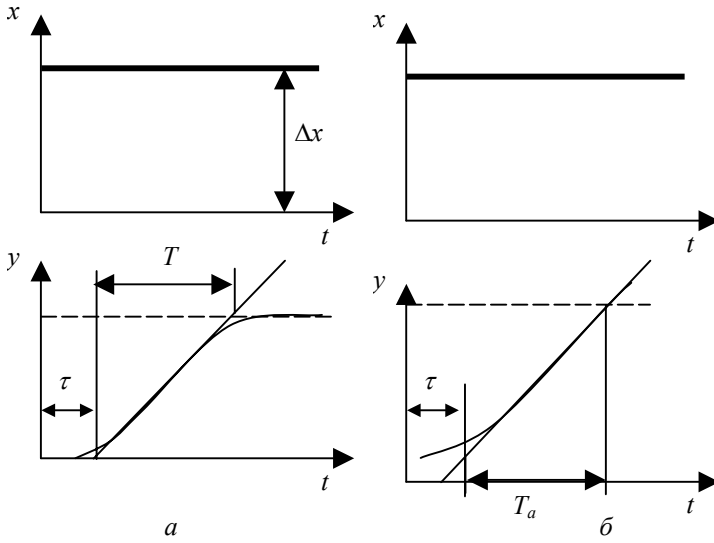


Рис. 5.2. Криві розгону об'єктів:
а – статичних; б – астатичних

Для астатичного об'єкта структура передаточної функції має вигляд:

$$W(p) = \frac{\varepsilon}{p} e^{-p\tau}, \quad (5.13)$$

де ε – швидкість розгону об'єкта,

$$\varepsilon = \frac{K}{T_a} = \frac{y_n / \Delta x}{T_a}, \quad (5.14)$$

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 передаточної функції при цьому матиме вигляд:

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

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

Коефіцієнт передачі об'єкта визначається як i 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 передаточної функції. Розглянемо це дещо детальніше.

Загальний вигляд структури безрозмірної передаточної функції:

$$W^*(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1}, \quad (5.16)$$

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

$$\begin{cases} a_1 = b_1 + s_1; \\ a_2 = b_2 + s_1 b_1 + s_2; \\ a_3 = b_3 + b_2 s_1 + b_1 s_2 + s_3; \\ \dots \\ a_k = b_k + s_k + \sum_{i=1}^{k-1} b_i s_{k-i}, \end{cases} \quad (5.17)$$

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 передаточної функції дещо спрощується, а саме:

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

$$W^*(p) = \frac{1}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + \dots + a_1 p + 1}, \quad (5.18)$$

де $a_3 = S_3, a_2 = S_2, a_1 = S_1$.

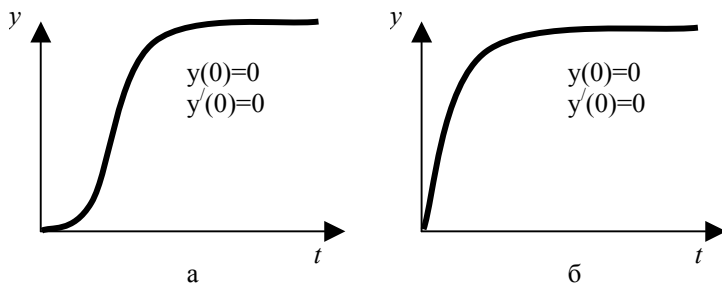


Рис. 5.3. Варіанти кривих розгону за методом інтегральних площин:
а – з точкою перегину; б – без точки перегину

Якщо при цьому $S_3 < 0$, то:

$$W^*(p) = \frac{b_1 p + 1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (5.19)$$

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

$$\begin{cases} a_1 = s_1 + b_1; \\ a_2 = s_2 + b_2; \\ 0 = s_3 + b_1 s_2. \end{cases} \quad (5.20)$$

- якщо крива розгону точки перегину немає (рис. 5.3, б), тобто характеризується умовами $y(0)=0$, $y'(0) \neq 0$, то структура безрозмірної передаточної 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:

$$h(t) = \frac{y(t) - y(0)}{y(\infty) - y(0)}; \quad (5.21)$$

- знаходять першу інтегральну площину:

$$s_1 = \int_0^{\infty} (1 - h(t)) dt; \quad (5.22)$$

- 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:

$$s_3 = s_1^2 \int_0^\infty (1-h(t)) \left[\frac{\theta(t)^2}{2!} - \frac{\theta(t)}{1!} + \frac{s_2}{s_1^2} \right] dt. \quad (5.25)$$

Загальна формула для обчислення інтегральної площини має вигляд:

$$S_k := (s_1)^{k-1} \cdot \int_0^\infty (1-h(t)) \cdot \left[\frac{(-\theta(t))^{k-1}}{(k-1)!} + \frac{(-\theta(t))^{k-2}}{(k-2)!} + \begin{cases} 0 & \text{if } k \leq 2 \\ \sum_{i=0}^{k-3} \left[\frac{S_{k-1-i} \cdot \theta(t)^i}{(s_1)^{k-1-i} \cdot (i!)} \right] & \text{if } k > 2 \end{cases} \right] dt \quad (5.26)$$

Передаточні функції астатичного об'єкта визначаються як різниця передаточних функцій, що відповідають кривим розгону 1 і 2 (рис. 5.4).

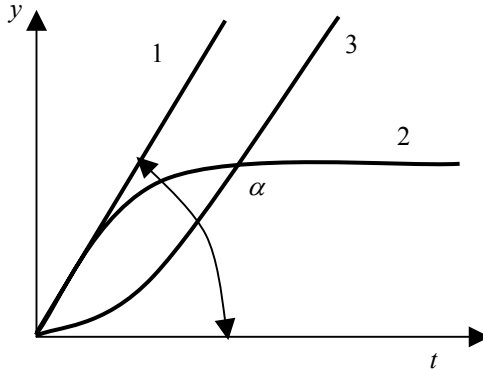


Рис. 5.4. Допоміжні графічні побудови для астатичного об'єкта:
 1 – крива розгону ідеалізованого астатичного об'єкта; 2 – крива розгону статичного об'єкта; 3 – крива розгону реального астатичного об'єкта

Крива розгону теплообмінного пристрою була здобута при зміні положення затвора регулювального органа на 20% (рис. 5.5).

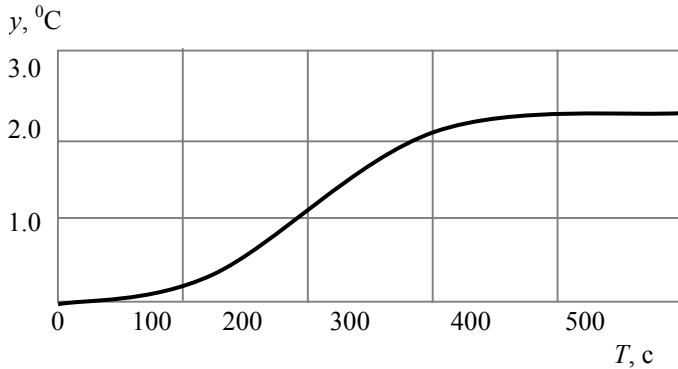


Рис.5.5. Крива розгону теплообмінного пристрою

Використовуючи метод інтегральних площин, знаходимо передаточну функцію:

$$W(p) = [W_1^*(p)W_2^*(p)] \cdot [\Delta y_2(\infty)] / \Delta x, \quad (5.27)$$

де $W_1^*(p)$ – безрозмірна передаточна функція для ідеальної інтегруючої ланки (лінія 1 на рис. 5.4), що визначається як:

$$W_1^*(p) = \frac{\text{tg} \alpha}{\Delta y_2(\infty)} \cdot \frac{1}{p}, \quad (5.28)$$

де $W_2^*(p)$ – безрозмірна передаточна 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 якій $\Delta y(\infty)=2.4$. За кривою розгону $y(t)$ знаходимо час запізнення $\tau = 5\text{c}$ 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 передаточної функції типу (5.18) до структури типу (5.19). Для цього необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$a3 := 0b \quad 1 := 1$$

$$b2 := 0a \quad 1 := 3$$

$$b3 := 0a \quad 2 := 2$$

Given

$$a1 - b1 = S_1$$

$$a2 - b2 - b1 \cdot S_1 = S_2$$

$$a3 - b3 - b2 \cdot S_2 = S_3$$

$$\begin{pmatrix} b1 \\ a1 \\ a2 \end{pmatrix} := \text{Find}(b1, a1, a2) \quad \begin{pmatrix} b1 \\ a1 \\ a2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,55 \\ 2,6 \\ 10,05 \end{pmatrix}$$

Отже, безрозмірна передаточна функція матиме вигляд:

$$W^*(p) = \frac{1,55p + 1}{10,05p^2 + 2,6p + 1} \quad (5.29)$$

Коефіцієнт передачі об'єкта:

$$K = \Delta y(\infty) / \Delta x = 2,4 / 20 = 0,12.$$

Із урахуванням попередньо виділеного часу запізнення остаточно передаточна 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 передаточну 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:

$$\Delta t = \pi/10\omega_v, \quad (5.31)$$

де ω_v – 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 передаточною функцією $W(p) = ke^{-p\tau}/(Tp + 1)$, де $k = OA$ (рис. 5.6):

$$\tau = \Delta\varphi(\omega_i)/\omega_i,$$

$$(5.33)$$

$$T = \arctg \varphi(\omega_i)/\omega_i. \quad (5.34)$$

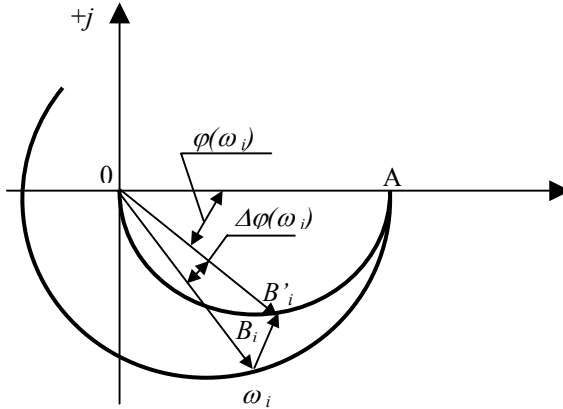


Рис. 5.6. Апроксимація амплітудно-фазочастотної характеристики об'єкта керування

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 взаємнокореляційна функції наведено на рис. 5.7, а.

Як відомо [1], амплітудно-фазова характеристика об'єкта може бути побудована за такими виразами:

$$W(i\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{S_x(\omega)} = K(\omega) + jM(\omega); \quad (5.36)$$

$$K(\omega) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}; \quad (5.37)$$

$$M(\omega) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{+\infty} R_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau}; \quad (5.38)$$

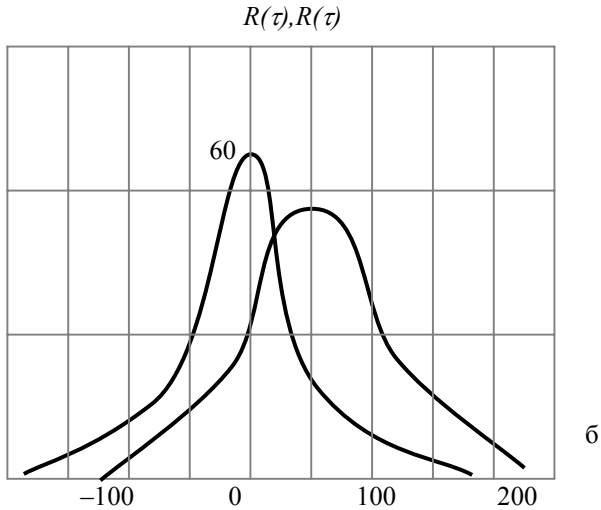
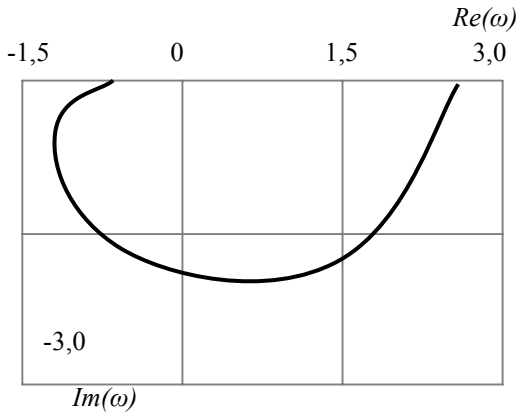


Рис. 5.7. Амплітудно-фазочастотна характеристика об'єкта керування (а) та кореляційні функції (б)

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 будемо 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:

$$W(p) = 2,57e^{-70,8p} / (128p + 1).$$

5.2. Методики синтезу та аналізу систем автоматичного 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 передаточної 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).

5.2.1. Методика уточнення лінійних алгоритмів керування

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.

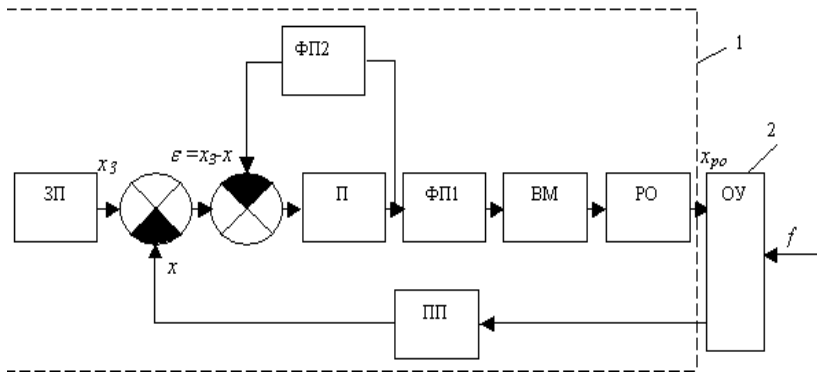


Рис. 5.8. Функціональна схема системи автоматичного керування:
 ЗП – задавальний пристрій; ПП – первинний перетворювач; П – підсилювач у прямому каналі регулювання; ФП1, ФП2 – формувальний пристрій (пристрій, що формує алгоритм керування); ВМ – виконавчий механізм; РО – регулювальний орган; ОУ – об'єкт керування (2); 1 – регулятор

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 регульовального 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 безінерційна ланка з передаточною 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 Δ_f – статична похибка щодо збурення; s – коефіцієнт етатизму; $k_{o.k.}$ – коефіцієнт передачі об'єкта керування; f – збурення на об'єкт;

$$\Delta_x = \Delta x_3(1 - s k k_{o.k.}), \quad (5.43)$$

де Δ_x – статична похибка щодо керування; Δx_3 – зміна уставки на шкалі регулятора.

Інтегральний (I) 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 передаточною функцією $W(p) = 1/T_I p$.

Перевага I-алгоритму полягає у відсутності статичної похибки, а головним недоліком є його сповільнена дія. Тому рекомендується його використовувати в об'єктах із значним самовирівнюванням, а також при нечастих змінах навантаження.

Пропорційно-інтегральний (PI) 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.

Передаточна функція може бути здобута на підставі виразу (5.45):

$$W_{n.i.}(p) = k[1 + 1/T_1 p]. \quad (5.46)$$

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.

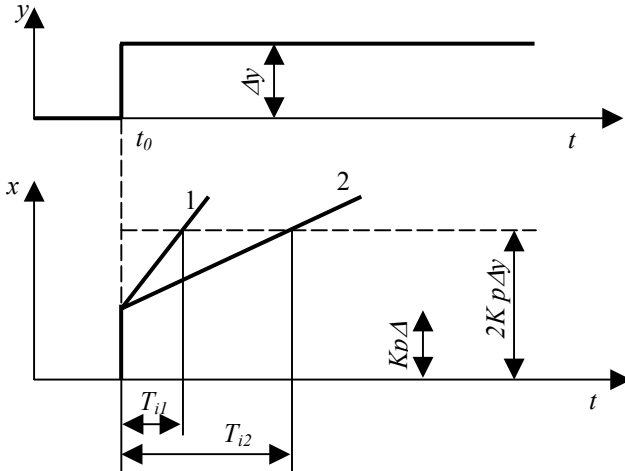


Рис. 5.9. Крива розгону комплексу технічних засобів, що реалізують ПІ-алгоритм керування:
 1 – характеризується часом ізодрому T_{i1} ,
 2 – характеризується часом ізодрому T_{i2}

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-диференційний (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-диференційна 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 .

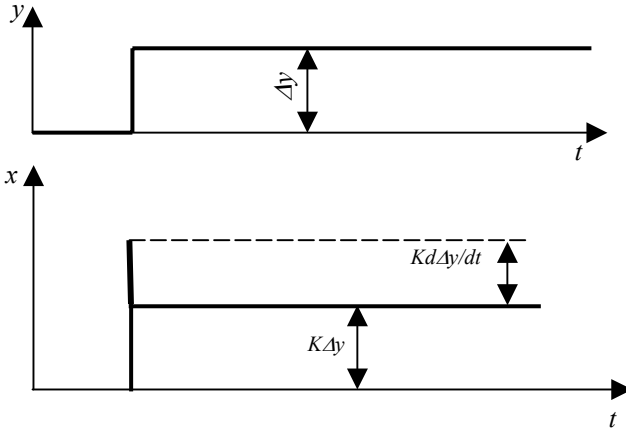


Рис. 5.10. Крива розгону для комплексу технічних засобів, що реалізують ПД-алгоритм керування

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-диференціальні (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:

$$\frac{dx_{p.o.}}{dt} = k \left(\frac{1}{T_i} y + \frac{dy}{dt} \pm T_{II} \frac{d^2 y}{dt^2} \right). \quad (5.49)$$

Знак “+” або “-” вказує, що передування може бути прямим або зворотним. Використавши перетворення Лапласа, передавальну функцію для комплексу технічних засобів, що реалізує ПІД-алгоритм, можна подати у вигляді:

$$W_{ПІД}(p) = k(1 + (1/T_i)p \pm T_{II} p^2). \quad (5.50)$$

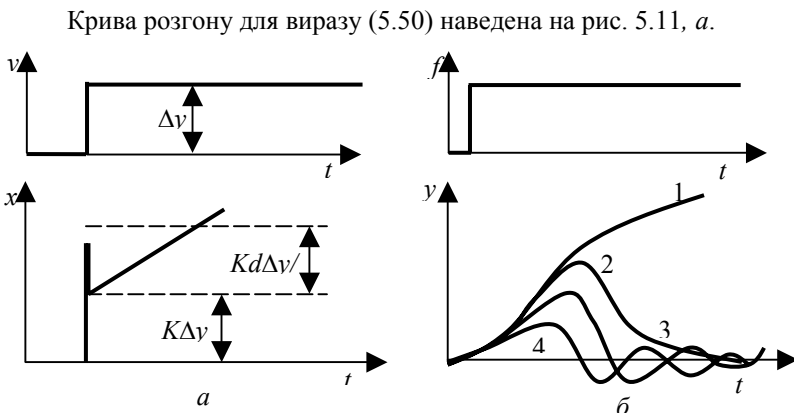


Рис. 5.11. Крива розгону для комплексу технічних засобів, що реалізують ПД-алгоритм керування (а) та результат дії на об'єкт різних алгоритмів керування (б):

1 – крива розгону об'єкта керування; 2 – перехідний 3 – саме, але за умов реалізації П-алгоритма; 4 – те саме, але за умов реалізації ПД-алгоритма

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 П-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 ПД-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 перерегулювання. 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 перерегулюванням, 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).

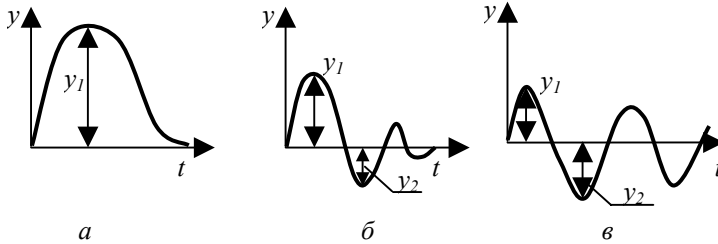


Рис. 5.12. Типові перехідні процеси в системах автоматичного керування:
а – аперіодичний; б – з 20% перерегулюванням; в – з мінімальним інтегральним показником якості

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:

$$R_D = y_1 / (K_0 y_{\max}), \quad (5.51)$$

де y_1 – максимальне динамічне відхилення; K_0 – коефіцієнт передачі об'єкта керування; y_{\max} – максимально можливе значення збурення за навантаженнями (береться у відсотках переміщення регульовального органа). Далі за графічними залежностями (рис. 5.13) дістають алгоритм керування.

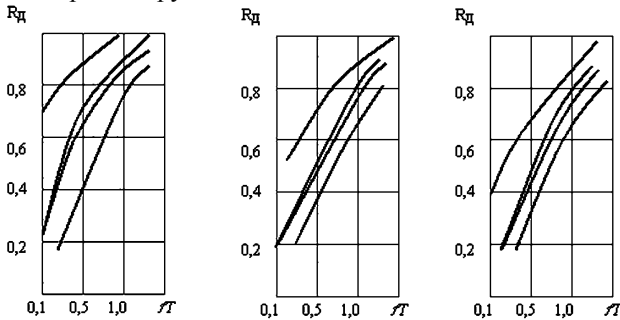


Рис. 5.13. Залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування:
а – для типового аперіодичного перехідного процесу; б – для типового перехідного процесу з 20% перерегулюванням; в – для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості; 1 – П-алгоритм керування, 2 – І-алгоритм керування, 3 – ПІ-алгоритм керування, 4 – ПІД-алгоритм керування

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.

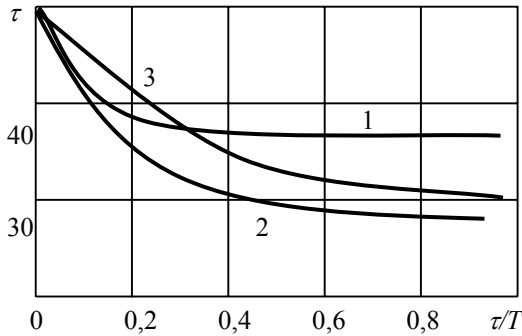


Рис. 5.14. Залежність відносного часу регулювання за умов використання І-алгоритму керування для статичних об'єктів керування:

1 – для аперіодичного типового перехідного процесу, 2 – для типового перехідного процесу з 20% перерегулюванням; 3 – для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості

Якщо виявиться, що П-алгоритм керування найкращий, то в цьому разі потрібно визначити статичну похибку та співставити її з допустимою. Статична похибка може бути знайдена за графічними залежностями, що наведені на рис. 5.15.

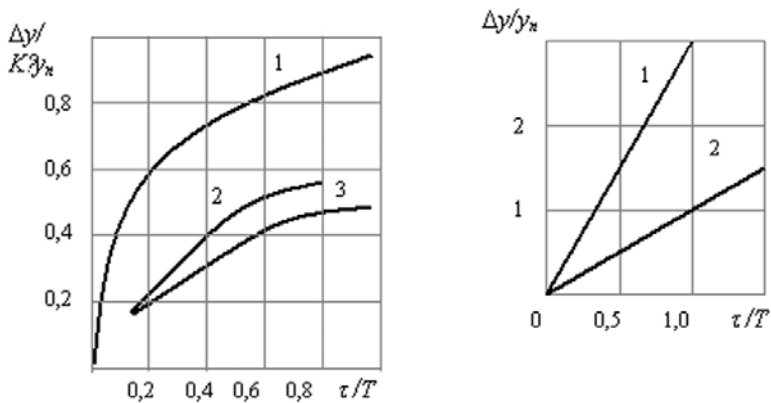


Рис. 5.15. Графічні залежності для визначення статичної похибки за умов використання П-алгоритму керування:

1 – аперіодичний типовий перехідний процес; 2 – з 20% перерегулюванням; 3 – з мінімальним інтегральним показником якості

Приклад 5.4. Для теплового об'єкта з $W(p)=0,2e^{-80p}/(266p+1)$ задані такі показники якості: $y_1=5^\circ\text{C}$, статична похибка $\Delta y=0,3^\circ\text{C}$, $t_p=500$ с, перерегулювання за збуренням $\sigma=0,3$, $y_{\text{макс}}=40\%$. 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 $t_{\text{рп}}=4,5\cdot 80=360$ с. Видно, що $360<500$. Перевіримо виникнення при цьому статичної похибки. За рис. 5.15, а визначаємо $\Delta=K_0\cdot y_{\text{макс}}\cdot 0,57=0,2\cdot 40\cdot 0,57=4,56^\circ\text{C}$.

Оскільки $0,3<4,56$, то П-алгоритм керування не задовольняє вимог технологів. Для ПІ-алгоритму за матеріалами табл. 5.4. знаходимо $t_{\text{рп}}=8\cdot 80=640>500$. Отже, за часом регулювання цей алгоритм не підходить. Для ПІД-алгоритму $t_{\text{рпід}}=5,5\cdot 80=440<500$. Видно, що цей алгоритм керування забезпечує час регулювання, який вимагається технологіями. Оскільки для нього статична похибка відсутня, то його й слід вибрати.

5.2.2. Основні інженерні методи 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 коливальності.

Розрахунок параметрів регуляторів на заданий запас стійкості системи. Згідно з критерієм Найквіста:

$$W_{\text{роз}}(j\omega)=-1, \quad (5.54)$$

де $W_{\text{роз}}(j\omega)$ – амплітудно-фазова характеристика розімкненої системи. На підставі рис. 5.8, можна записати, що:

$$W_{\text{роз}}(j\omega) = W_p(j\omega) W_o(j\omega), \quad (5.55)$$

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

$(-1, j0)$ 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):

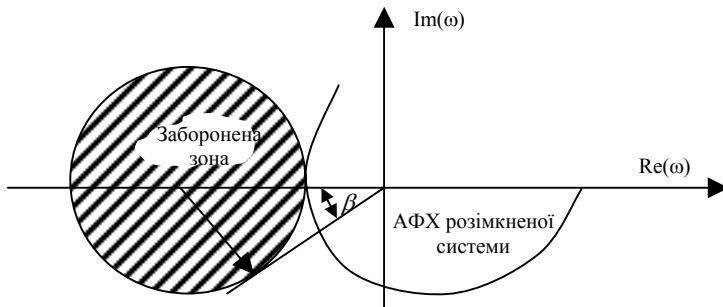


Рис. 5.16. До методики розрахунку параметрів регуляторів за умов обмеження системи керування на заданий частотний показник коливальності

- 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 іздрому);

- проводять коло, центр якого має бути розташований на від'ємній дійсній півосі, і воно має дотикатися до АФХ розімкненої системи та променя.

Радіус кола, яке є заборонною зоною для АФХ розімкненої 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 розімкненої 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 диференційних рівнянь. Прямих методів (аналітичних) розв'язання нелінійних диференційних 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.

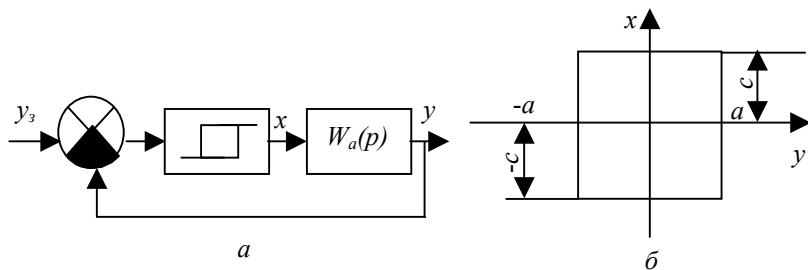


Рис. 5.17. Структурно-алгоритмічна схема узагальненої позиційної системи керування (а) та варіант статичної характеристики узагальненого нелінійного елемента (б)

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:

$$\sin(\omega t) = (1/A) \pm y; \quad \cos(\omega t) = [(1/A \cdot \omega)](dy/dt), \quad (5.64)$$

підставляючи вирази (5.64) у (5.63), маємо:

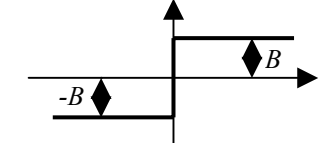
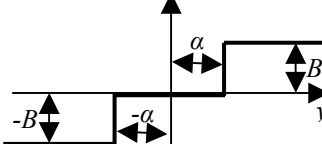
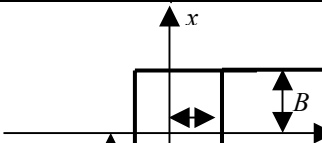
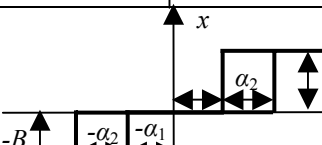
$$x = F(y) \approx \frac{a_1}{A} y + \frac{b_1}{A} \frac{1}{\omega} \frac{dy}{dt} = q_1 y + q_2 \frac{1}{\omega} \frac{dy}{dt}, \quad (5.65)$$

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 передаточними 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:

$$W_{\phi 1}(p) = \frac{K_i(1 - e^{-Tp})^2}{p^2}. \quad (5.67)$$

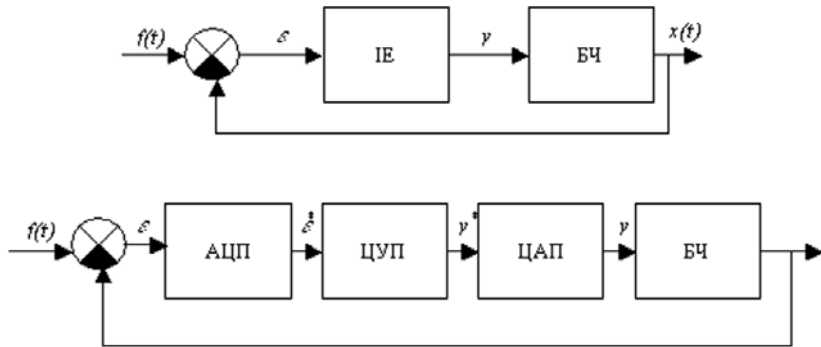


Рис. 5.18. Структура імпульсної (а) та цифрової (б) систем автоматичного керування:

ІЕ – імпульсний елемент; БЧ – безперервна частина системи (об'єкт керування); АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦУП – цифровий керуючий пристрій; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

Фіксатор нульового порядку перетворює вхідні імпульси на послідовність прямокутних імпульсів із тривалістю T . Часові процеси при цьому матимуть вигляд як на рис. 5.19.

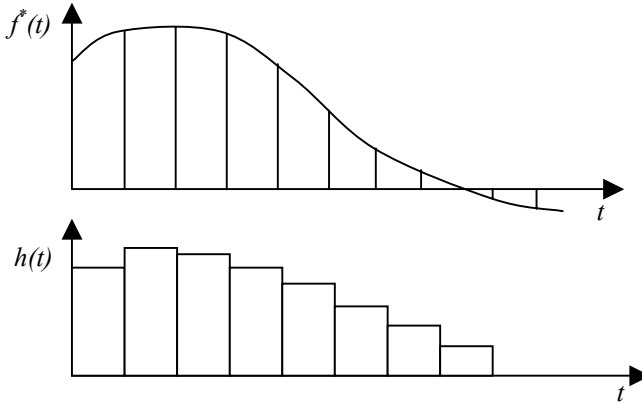


Рис. 5.19. Часові процеси у фіксаторі нульового порядку

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:

$$f(t) = ff[nT] = f(n). \quad (5.69)$$

Аналогом першої похідної безперервної функції для ґратчастої є:

- пряма послідовність:

$$\Delta f(n) = ff[n+1] - ff[n] \quad (5.70)$$

- обернена послідовність:

$$\Delta f(n) = ff[n] - ff[n-1]. \quad (5.71)$$

Аналогом другої похідної безперервної функції для ґратчастої є:

- пряма послідовність:

$$\Delta^2 ff[n] = \Delta ff[n+1] - \Delta ff[n] = ff[n+2] - 2ff[n+1] + ff[n]; \quad (5.72)$$

- обернена послідовність:

$$\Delta^2 ff[n] = \Delta ff[n] - \Delta ff[n-1] = ff[n] - 2ff[n-1] + ff[n-2]. \quad (5.73)$$

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 гратчаста функція; $y[n]$ – гратчаста 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: $T_0(dy/dt) + y = k_0 x$. Записати різницевий його аналог розв'язання та рішення для умов: $T_0 = 1c, k_0 = 1; y[n-1] = 0, x[n] = 1$. З виразу (5.71) маємо:

$$\begin{aligned} T_0 \Delta y[n] + y[n] &= k_0 x[n]; \\ T_0(y[n] - y[n-1])/T + y[n] &= k_0 x[n]; \\ y[n] &= (k_0 x[n] \Delta t + T_0 y[n-1]) / (T_0 + T). \end{aligned} \quad (5.76)$$

Якщо час квантування $T=1$ с, то розв'язання можна записати для зазначених умов в табл. 5.5 (графічне зображення представлено на рис. 5.20).

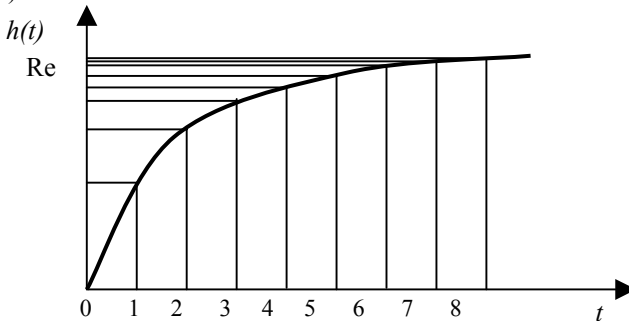


Рис. 5.20. Графічне зображення до прикладу 5.5

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. Теореми: запізнення	$Z = \{f[n - m]\} = \sum_{r=-m}^{\infty} f[r]Z^{-(m+r)} =$ $= Z^{-m} \left[\sum_{r=0}^{\infty} f[r]Z^{-r} + \sum_{r=-m}^{\infty} f[r]Z^{-r} \right] =$ $= Z^{-m} \left[F(Z) + \sum_{r=1}^m f[r]Z^r \right]$ <p style="text-align: center;">$r = n - m$</p>

1	2
випередження	$Z\{f[n+m]\} = Z^m \left[F(Z) - \sum_{k=0}^{m-1} f[k]Z^{-k} \right]$
3. Зображення різниць	$Z\{\Delta f[n]\} = Z\{f[n-1]\} = (Z-1)/ZF(Z) + Z^{-1}f[-1];$ $Z\{\Delta^k f[n]\} = ((Z-1)/Z)^k F(Z)$
4. Зображення сум	$Z\{\sigma f[n]\} = F(Z)/(Z-1);$ $Z\{\sigma^k f[n]\} = F(Z)/(Z-1)^k$
5. Розкладання на ряд Лорана	$F(Z) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n]Z^{-1} = f[0] + f[1]Z^{-1} + f[2]Z^{-2} + \dots$

5.3. 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 (температуру, 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 передаточною функцією:

$$W_0(p) = \frac{K_0 e^{-\tau_0 p}}{T_0 p + 1}; \quad (5.79)$$

а динамічні властивості вимірювальної системи:

$$W_g(p) = \frac{K_g e^{-\tau_0 p}}{T_g p + 1}; \quad (5.80)$$

то при виборі метода та засобів вимірювання контрольованої та регульованої величини потрібно виходити із умов, що:

$$\tau_g \leq (0,2 \dots 0,3) \tau_0; \quad T_g \leq (0,2 \dots 0,3) T_0. \quad (5.81)$$

Передаточні функції вторинних приладів (електронних мостів, потенціометрів, засобів для вимірювання тиску, витрати та ін.) можна подати у вигляді інерційної ланки першого порядку без запізнювання:

$$W_g(p) = k_{g.m.} / (T_{g.m.} p + 1), \quad (5.82)$$

де $T_{в.т} \approx 0,1 t_{в.с.}$, $t_{в.с.}$ – час проходження показчиком 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. Слідкування	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* віток. Електрична вітка поділяється на *аналогову та дискретну*.

Електрична аналогова вітка 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 пожежебезпечності.

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.

5.3.1. 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 (формульальний пристрій); виконавчий механізм; регульовальний орган; первинний перетворювач. Враховуючи, що властивості об'єктів керування надзвичайно різноманітні, регулятори, що випускаються нашою промисловістю, здебільшого не комплектуються виконавчими механізмами, регульовальними 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; $W_n(p)=K_n$ – передаточна 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 $K_n \gg 1$.

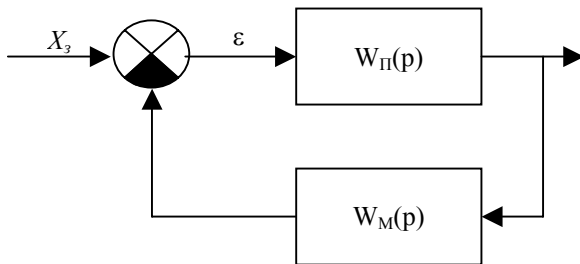


Рис. 5.21. Структурно-алгоритмічна схема узагальненого промислового регулятора

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).

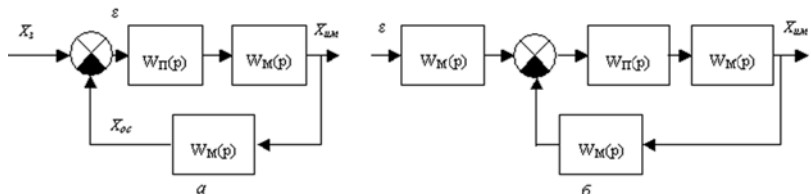


Рис.5.22. Структурно-алгоритмічна схема П-регулятора:
а – без додаткового підсилювача; б – з додатковим підсилювачем

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, однообертовий електродвигун із редуктором типу МЭО. Його динамічні властивості описуються передаточною функцією:

$$W_{в.м.}(p) = 1/(T_{в.м.}p), \quad (5.85)$$

де $T_{в.м.}$ – стала часу виконавчого механізму.

Промисловий П-регулятор реалізує пропорційний алгоритм з деякою похибкою. Це можна показати (рис. 5.22, а) у вигляді:

$$\begin{aligned}
 W_n(p) &= \frac{K_n W_{\text{вм}}(p)}{1 + K_n W_M(p)} = \frac{K_n \frac{1}{T_{\text{в.м.}} p}}{1 + \frac{K_n K_3}{T_{\text{в.м.}} p}} = \frac{K_n}{T_{\text{в.м.}} p + K_n K_3} = \\
 &= \frac{1}{K_3} \cdot \frac{1}{\frac{T_{\text{в.м.}}}{K_n K_3} p + 1} = K_p \frac{1}{T_\delta p + 1} = K_p W_\delta(p), \quad (5.86)
 \end{aligned}$$

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:

$$K_p = K_\varepsilon \cdot 1/K_3, \quad (5.87)$$

де K_ε – коефіцієнт передачі додаткового підсилювального пристрою.

За такої структури промислового П-регулятора (рис. 5.22, б) коефіцієнт передачі встановлюється так: змінюючи K_3 , забезпечують потрібну точність реалізації П-алгоритму керування; змінюючи K_ε , 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).

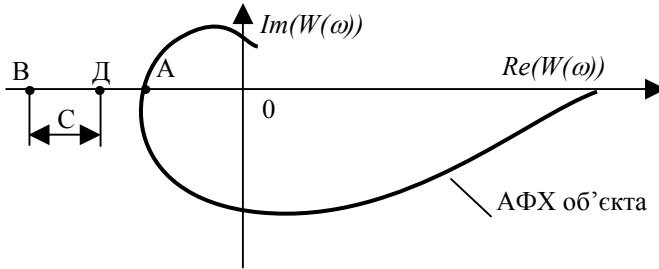


Рис. 5.23. Розрахунок коефіцієнта передачі П-регулятора на заданий запас стійкості системи за амплітудою

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:

$$W_{роз}(j\omega) = \overline{OD} = W_n(j\omega)W_o(j\omega) = K_p W_o(j\omega) = K_p \overline{OA_\pi}$$

$$K_p = \frac{\overline{OD}}{\overline{OA_\pi}} = \frac{OB - C}{\overline{OA_\pi}} = \frac{1 - C}{\overline{OA_\pi}}. \quad (5.89)$$

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:

$$K_p = (1 - 0,56) / \overline{OA_\pi} = 0,44 / \overline{OA_\pi} \quad (5.90)$$

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 $K_p = M / (M^2 - 1) \cdot 1/r$, 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:

$$W_0(p) = \frac{0,15e^{-40p}}{150p + 1}.$$

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:

$$K_p = (1,6/1,6^2 - 1)(1/0,038) = 26,9.$$

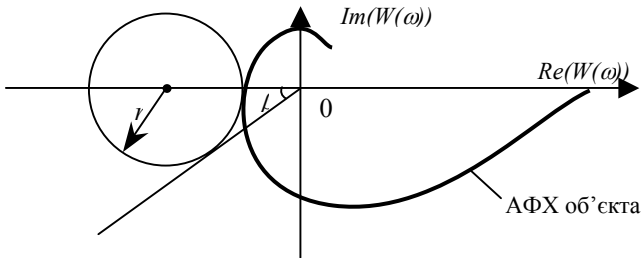


Рис. 5.24. Графічні побудови до прикладу 5.7 (розрахунок коефіцієнта передачі П-регулятора за умов обмеження частотного показника коливальної системи)

На заданий кореневий показник коливальності m можна розрахувати параметр настройки П-регулятора, якщо задана передаточна функція об'єкта керування. Skorистavshись 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:

$$W(\omega) = \frac{1 \cdot e^{-2[(-m+j)\omega]}}{10 \cdot (-m+j) \cdot 1};$$

Обернена розширена АФХ об'єкта матиме вигляд:

$$W(\omega) = \left[\frac{1 \cdot e^{-2[(-m+j)\omega]}}{10 \cdot (-m+j) \cdot \omega + 1} \right]^{-1}$$

Розв'язавши системи рівнянь:

$w:=0,7$

Given

$$\operatorname{Im}\left[(W(w))^{-1}\right]=0$$

$w:=\text{Find}(w)$ $w=0,707$

Kr:=1

Given

$$\operatorname{Re}\left[(W(w) \cdot Kr)^{-1}\right] = -1$$

Kr:=find(Kr) 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 ПІ-алгоритму керування. Передаточна функція цього регулятора матиме вигляд:

$$W_p(p) = \frac{K_n W_{в.м.}(p)}{1 + \frac{KTp}{Tp+1} K_n W_{в.м.}(p)} = \frac{1}{K} \left(1 + \frac{I}{Tp} \right) \times$$

$$\times \frac{K K_n W_{в.м.}(p) Tp}{Tp [W_{в.м.}(p) K K_n + I] + 1} = K_p \left(1 + \frac{I}{Tp} \right) W_\sigma(p), \quad (5.92)$$

де $K_p=1/K$ – коефіцієнт передачі промислового ПІ-регулятора; K – коефіцієнт передачі ланки місцевого зворотного зв'язку;

$W_\sigma(p) = \frac{K K_n W_{в.м.}(p) Tp}{Tp [W_{в.м.}(p) K K_n + I] + 1}$ – передаточна функція баластного пристрою, що вносить зміни в ідеальний ПІ-алгоритм керування.

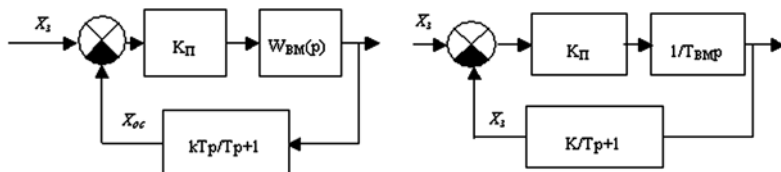


Рис. 5.25. Структури реалізації ПІ-регулятора:

- а – виконавчий механізм не бере участі у формуванні алгоритму керування;
- б – виконавчий механізм бере участь у формуванні алгоритму керування

Як видно з виразу (5.92), коефіцієнт передачі регулятора та його час іздрому визначається параметрами ланки зворотного зв'язку:

$$K_p=1/K; \quad T_i=T. \quad (5.93)$$

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).

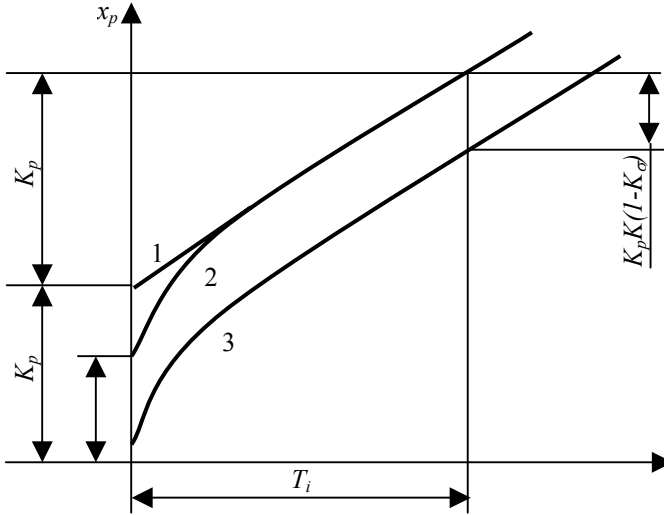


Рис. 5.26. Криві розгону промислових ПІ-регуляторів:

- 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

За першою структурою реалізації ПІ-алгоритм керування (рис. 5.25, а) виконавчий механізм може бути безінерційною ланкою; у цьому разі його передаточна функція $W_{в.м.}(p)=K_{в.м.}$, 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

$$W_{\text{в.м.}}(p) = \frac{1}{T_{\text{в.м.}} p}, \text{ а передаточна функція самого регулятора:} \quad (5.97)$$

$$W_p(p) = K_p(1 + 1/T_p)K_{\sigma} / (T_{\sigma} p + 1),$$

де $K_p = 1/K$ – передаточний коефіцієнт регулятора; $T_i = T$ – 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:

$$K_p = T / (K T_{\text{в.м.}}); \quad T_i = T. \quad (5.98)$$

Параметри баластного пристрою одержують за формулами:

$$K_{\delta} = (K_n K) / (K_n K + 1); \quad T_{\delta} = T / (K_n K + 1) \quad (5.99)$$

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:

$$W_{роз}(j\omega) = K_p [1 - (j/T_i\omega)] W_o(j\omega) = K_p W_o(j\omega) - j [K_p W_o(j\omega)] / (T_i\omega). \quad (5.100)$$

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 $\overline{OE_i}$ 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).

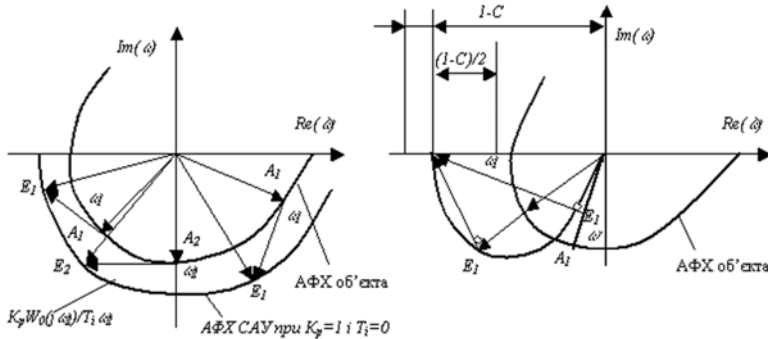


Рис. 5.27. Графічні побудови до методики розрахунку параметрів ПІ-регулятора за умов обмеження системи на заданий запас стійкості за амплітудою

Значення параметрів K_p і T_i , що забезпечують потрібний запас стійкості за амплітудою C , знаходять за виразами:

$$\begin{aligned} \overline{OD} &= W(j\omega_i) = \overline{OE_i} + \overline{E_iD} = \\ &= K_p W_o(j\omega_i) - \frac{K_p W_o(j\omega_i)}{T_i \omega_i} = K_p \overline{OA_i} - j \frac{K_p \overline{OA_i}}{T_i \omega_i} \end{aligned} \quad (5.101)$$

$$\text{Звідси: } \overline{OE}_i = K_p \overline{OA}_i \quad i \quad K_p = \frac{\overline{OE}_i}{\overline{OA}_i}; \quad (5.102)$$

$$E_i D = \frac{K_p W_o(j\omega_i)}{T_i \omega_i} = \frac{\overline{OE}_i}{T_i \omega_i}; \quad T_i = \frac{\overline{OE}_i}{\omega_i E_i D}. \quad (5.103)$$

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 вибрати мінімальне значення лінійного інтегрального показника якості перехідного процесу, вважаючи, що об'єкт керування низько-частотний, 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).

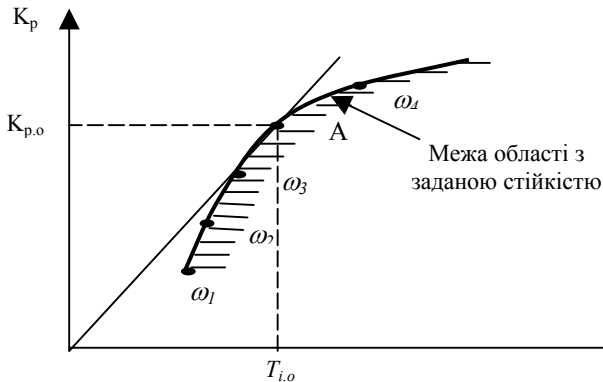


Рис. 5.28. Визначення оптимальних параметрів настройки ПІ-регулятора

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 $K_{p,0}=8,5$; $T_{i,0}=47,5$.

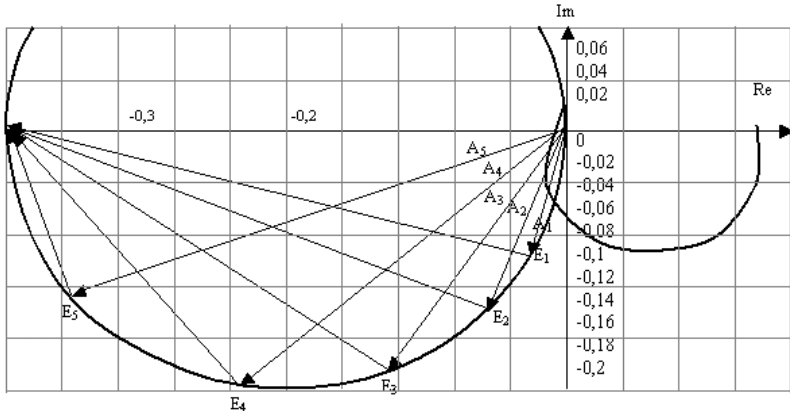


Рис. 5.29. Розрахунок параметрів ПІ-регулятора на заданий запас стійкості системи за амплітудою

Таблиця 5.8 – Результати розрахунків параметрів настройки ПІ-регулятора

ω_i	OE_i	OA_i	$E_{\%D}$	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

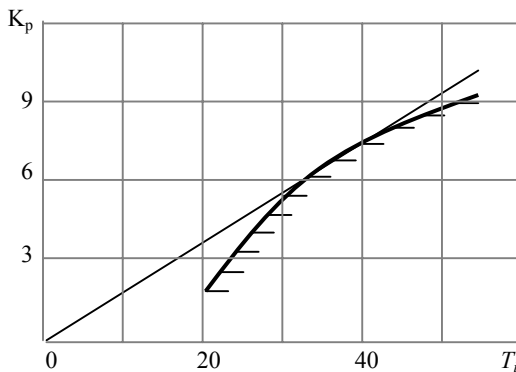


Рис. 5.30. Визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора (до прикладу 5.9)

На заданий частотний показник коливальності. ІІ-регулятор має два параметра настройки. Цей факт обумовлює деякі відмінності застосування такої методики порівняно з ІІ-регулятором. Ці відмінності полягають у побудові АФХ розімкненої системи з ІІ-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 ІІ-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:

$$Wz(w) = W_o(w) \cdot K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot w \cdot j} \right)$$

обчислюємо передаточну функцію розімкненої системи та будуємо для вищезазначених значень часу ізодрому її АФХ (рис. 5.31). Проводимо промінь під кутом $\beta=36,8^\circ$ (приклад 5.6). Будуємо коло, що дотикатиметься до АФХ та променя. Коефіцієнт передачі визначаємо за виразом (5.57), використавши величину радіуса кола.

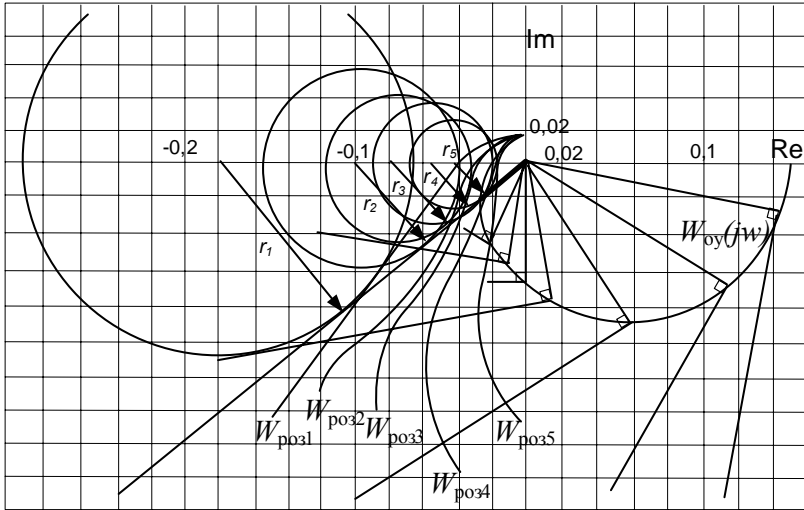


Рис. 5.31. Розрахунок параметрів ПІ-регулятора за умов обмеження частотного показника коливальності системи

Знайдені коефіцієнти передачі регулятора та вибрані раніше значення часу ізодрому дають змогу побудувати лінію межових співвідношень, внаслідок чого можна визначити оптимальні значення K_p та T_i (рис. 5.32). Як бачимо, це 0,28 та 62 с відповідно.

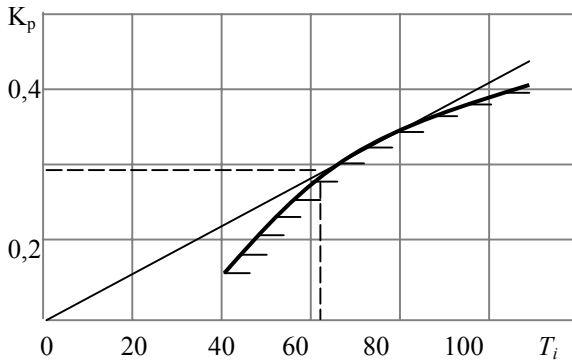


Рис. 5.32. Визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора

Настроювання на заданий кореневий показник коливальності.
 Для того, щоб скористатись системою рівнянь (5.61), потрібно записати вираз для розширеної АФХ ПІ-регулятора:

$$\begin{aligned} W_p[(-m + j) \cdot \omega] &= K_p [1 + (1/(-m + j) \cdot \omega \cdot T_i)] = \\ &= K_p [(1 - (m/(m^2 + 1) \cdot T_i \cdot \omega) - j(1/(m^2 + 1) \cdot T_i \cdot \omega)], \end{aligned} \quad (5.105)$$

де $Re_p(m, \omega) = K_p [1 - (m/(m^2 + 1) \cdot \omega \cdot T_i)]$ – дійсна складова розширеної АФХ ПІ – регулятора; $Im_p(m, \omega) = K_p / (m^2 + 1) \cdot T_i \cdot \omega$ – 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:

$$K_p = m Im_o^{(-1)}(m, \omega) - Re_o^{(-1)}(m, \omega); \quad (5.107)$$

$$T_i = \frac{K_p}{(m^2 + 1) \omega \cdot Im_o^{(-1)}(m, \omega)} \quad (5.108)$$

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;

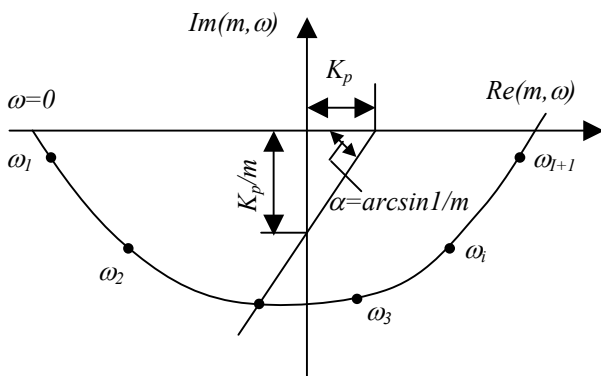


Рис. 5.33. Розширені АФХ об'єкта (обернена) та ПІ-регулятора

- 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 $Im_o^{-1}(m, \omega)$, 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).

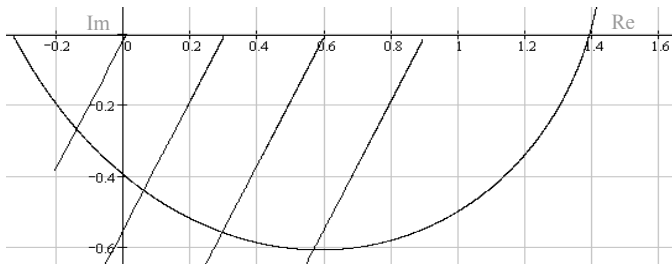


Рис. 5.34. Розширені АФХ (обернені) об'єкта та ПІ-регулятора

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.

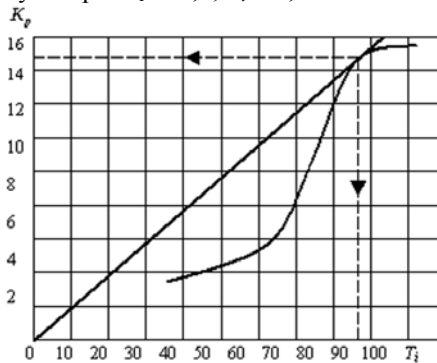


Рис. 5.35. Визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора

Пропорційно-інтегрально-диференційний 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).

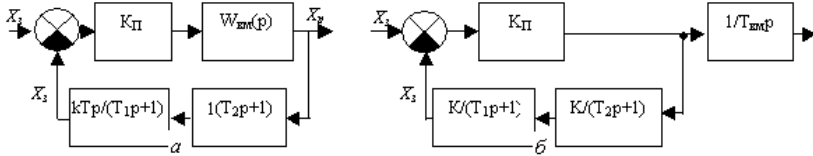


Рис. 5.36. Структурно-алгоритмічні схеми реалізації ПІД-регулятора:
а – за умов, коли виконавчий механізм не бере участі у формуванні алгоритму керування; *б* – за умов, коли інтегруючі властивості виконавчого механізму використовуються у формуванні алгоритму керування

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:

$$K_p = \frac{T_2 + T_I}{K \cdot T_I}; \quad (5.112)$$

$$T_i = T_1 + T_2; \quad (5.113)$$

$$T = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_1 + T_2}. \quad (5.114)$$

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:

$$K_p = \frac{T_1 + T_2}{K T_{в.м.}}, \quad (5.115)$$

де $T_{в.м.}$ – 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'єданого 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).

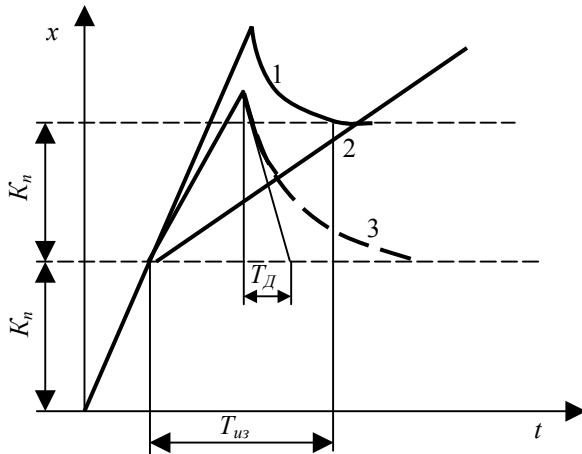


Рис. 5.37. Криві розгону:

1 – ПІД-регулятора, який складається з промислового ПІ-регулятора та диференціюючої приставки; 2 – крива розгону промислового ПІ-регулятора; 3 – крива розгону ПІД-регулятора

Як і для попереднього регулятора, для ПІД-розрахунку настрайовувальних 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 ПП-промислового регулятора):

$$\begin{aligned} W_{роз}(j\omega) &= K_p \left[1 - j \left(\frac{1}{T_i \omega} - 0,5T_i \omega \right) \right] W_o(j\omega) = \\ &= K_p W_o(j\omega) - jK_p W_o(j\omega) \left(\frac{1}{T_i \omega} - 0,5T_i \omega \right) = \overline{OE_i} + \overline{E_i D} = \overline{OD}. \end{aligned} \quad (5.118)$$

Векторне рівняння (5.118) дає змогу записати, що:

$$K_p = \frac{\overline{OE_i}}{\overline{OA_i}}. \quad (5.119)$$

Для конкретної частоти векторний вираз (5.119) перетворюється на скалярний:

$$\overline{E_i D} = K_p W_o(j\omega) (1/T_i \omega - 0,5T_i \omega) = \overline{OE_i} (1/T_i \omega - 0,5T_i \omega). \quad (5.120)$$

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 ППД-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:

$$aT_i^2 + bT_i - d = 0. \quad (5.122)$$

Скориставшись рис. 5.29, проведемо розрахунки параметрів настройки ПД-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 ПД-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

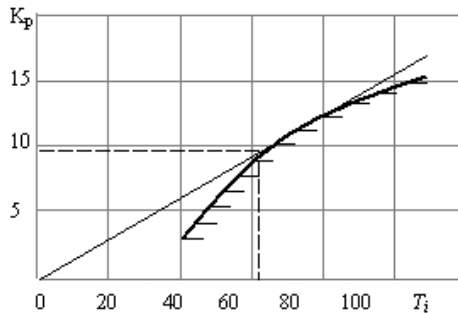


Рис. 5.38. Визначення оптимальних параметрів ПД-регулятора на заданий запас стійкості системи за амплітудою

Таким чином, оптимальне значення коефіцієнта передачі регулятора $K_{p0}=8,6$, часу ізодрому $T_{i0}=42$, часу передування $T_{n0}=T_{i0}/2=21$.

На заданий частотний показник коливальності. За умов використання ПД-регулятора АФХ розімкненої системи матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 W_{роз}(j\omega) &= W_p(j\omega)W_o(j\omega) = K_p(1 - j(1/T_i\omega - T_n\omega))W_o(j\omega) = \\
 &= K_pW(j\omega) - j(1/T_i\omega - T_n\omega)K_pW_o(j\omega).
 \end{aligned}
 \tag{5.123}$$

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.

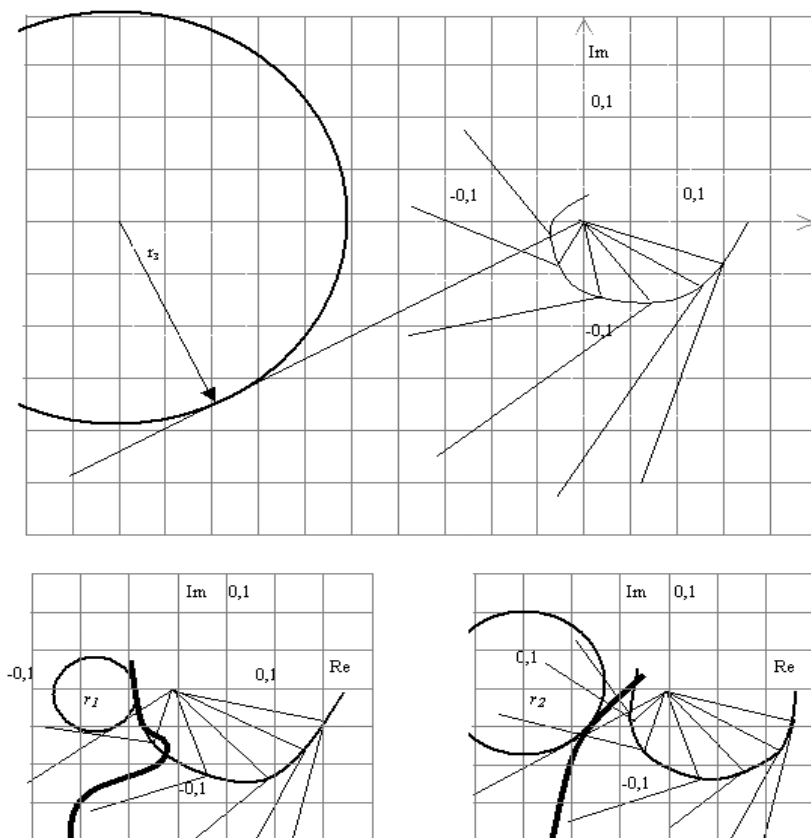


Рис. 5.39. Розрахунок параметрів ПІД-регулятора за умов обмеження системи на заданий частотний показник коливальності

Таблиця 5.10 – Результати розрахунків параметрів настройки ПІД-регулятора

ω	0,003	0,006	0,01	0,021	0,025	0,03	0,043	
$W_o(j\omega_i) \times (1/T_i\omega_i - 0,5T_i\omega_i)$	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	$T_{i3}=70c$ $r_3=1,8$ $K_{p3}=0,54$

Співвідношення K_p та T_i дали змогу побудувати лінію межових співвідношень (рис. 5.40), та визначити оптимальні параметри настройки ПІД-регулятора.

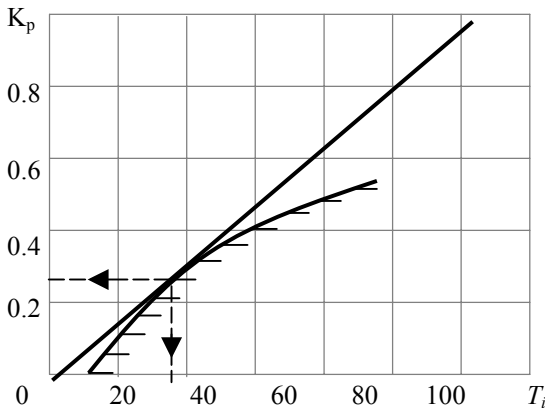


Рис. 5.40. Визначення оптимальних параметрів ПІД-регулятора за умов обмеження системи на заданий частотний показник коливальності

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:

$$\begin{aligned}
W_p[(-m+j)\omega] &= K_p \left[1 + \frac{1}{(-m+j)\omega T_i} + (-m+j)\omega T_n \right] = \\
&= K_p \left[1 + \frac{(-m+j)}{(m^2+1)\omega T_i} - T_n m \omega + j T_n \omega \right] = \\
&= K_p \left\{ \left[1 - \frac{m}{(m^2+1)\omega T_i} - T_n m \omega \right] - j \left[\frac{1}{(m^2+1)\omega T_i} + T_n \omega \right] \right\}
\end{aligned} \tag{5.124}$$

Пам'ятаючи, що найкраща якість перехідного процесу спостерігається за умов, коли $T_n=0,5T_i$, можна записати:

$$W_p[(-m+j)\omega] = Re_p(m,\omega) - j Im_p(m,\omega), \tag{5.125}$$

$$Re_p(m,\omega) = K_p \left[1 - \frac{m}{(m^2+1)\omega T_i} - 0,5T_i m \omega \right]; \tag{5.126}$$

де

$$Im_p(m,\omega) = K_p \left[\frac{1}{(m^2+1)\omega T_i} + 0,5T_i \omega \right].$$

Щодо ПД-регулятора система рівнянь (5.61) набере вигляду:

$$\left. \begin{aligned}
K_p \left[1 - \frac{m}{(m^2+1)\omega T_i} - 0,5T_i m \omega \right] &= -Re_o^{(-1)}(m,\omega); \\
K_p \left[\frac{1}{(m^2+1)\omega T_i} + 0,5T_i \omega \right] &= Im_o^{(-1)}(m,\omega)
\end{aligned} \right\} \tag{5.127}$$

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 із 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; гідромурфти; напрямні апарати центроушійних 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_v – 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 затвора.

За умов рівновідсоткової пропускної характеристики, приріст пропускної здатності пропорційний значенню пропускної здатності (рис. 5.41, крива 2):

$$\frac{dK_\gamma}{ds} = cK_\gamma, \quad (5.129)$$

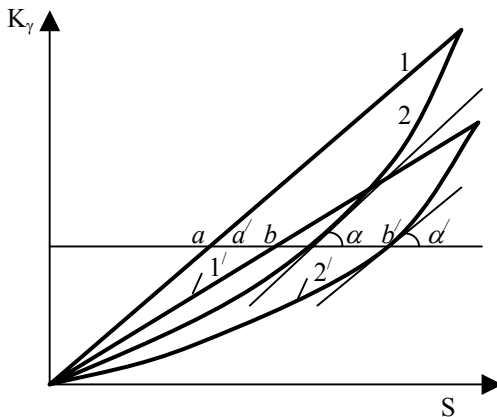


Рис. 5.41. Пропускні характеристики регулювальних органів:
1 – лінійна; 2 – рівновідсоткова

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 пропускну 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 – пропускну 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):

$$\frac{F_k}{F_{kmax}} = f(s), \quad (5.131)$$

де F_k – поточне значення площі перерізу каналу; F_{kmax} – найбільше значення площі перерізу каналу.

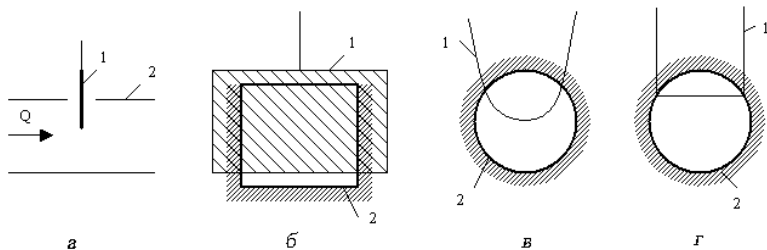


Рис. 5.42. Конструкції шиберів:

а – загальна схема; б – канал (або трубопровід) (2) та рухома частина шибера (1) прямокутного перерізу; в – канал (або трубопровід) та рухома частина шибера круглого перерізу; г – канал (або трубопровід) круглого перерізу та рухома частина шибера прямокутного перерізу

Змінюючи профіль перерізу каналу або профіль дросельного органа, можна здобути конструктивну характеристику шибера 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 шибера значною мірою розвантажений, оскільки сили, які створюються тиском середовища на обидві його половини, частково зрівноважуються.

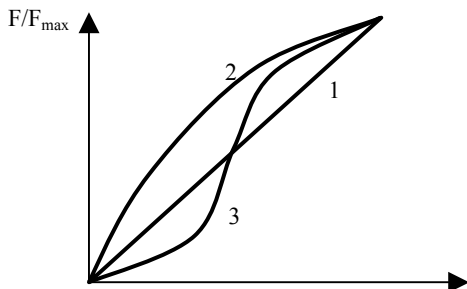


Рис. 5.43. Конструктивні характеристики шиберів:

*1 – для шибера та каналу (або трубопроводу) прямокутного перерізу;
2, 3 – канали (або трубопроводи) круглого перерізу*

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 – багатолопатні; безупорні; упорні. Затвор безупорних 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 двосідлоподібними. За конструкцією затвора їх поділяють на тарільчаті, пробкові та поршневі. Односідлоподібні клапани використовують для малих розмірів проходів (до 15 мм), забезпечуючи герметичність закриття проходу. Двосідлоподібні – 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 $K_{pоз}$.

У свою чергу $K_{pоз}$ 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);

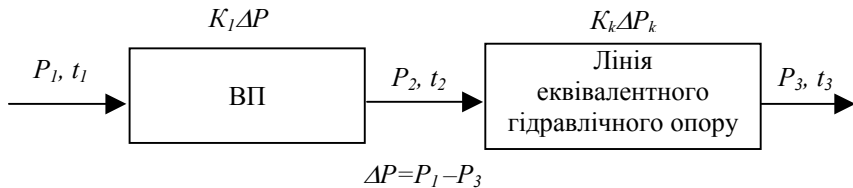


Рис. 5.44. Схема для розрахунку регулювальних органів

- визначають для рідини робочу ділянку кривої зміни перепаду тиску (для газу та пару знаходять лише максимальний та мінімальний перепади тиску).

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 гідравлічного 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_{γ_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°C; $T_1 = 273+t_1$;

$T_2 = 273+t_2$; 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:

$$K_\gamma = Q_{max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{min}}} = \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_c - \Delta P_{1min}}}, \quad (5.135)$$

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	
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	

Продовження таблиці 5.12

1	2	3	4	5
25	160	125	80	Односідлоподібні регулювальні клапани СИУ випускають з лінійними і логарифмічними характеристиками, з сальниковими або сальфонними ущільненнями штока, регулювальні і запірно-регулювальні.
	250			
	3,2			
	5			
50	8	150	125	Клапани із сальниками – $p_v = 10; 16; 40$ і 64 кг/см^2 , із сальфоном – $p_v = 16; 40$ і 64 кг/см^2 .
	12			
	20			
	32			
100	50	200	320	Максимально допустима температура для клапанів 120; 225 та 450°C
	80			
	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:

$$K_{\gamma l} = Q_{max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{l max}}}, \quad (5.137)$$

де $K_{\gamma l}$ – пропускну здатність лінії еквівалентного гідравлічного опору; $\Delta P_{l max}$ – максимальний перепад тиску в лінії еквівалентного гідравлічного опору;

- дістають відношення перепаду тиску на регулювальному органі при максимальній витраті до перепаду тиску в лінії:

$$n = K_{\gamma v.n} / K_{\gamma l}, \quad (5.138)$$

- уточнюють перепад тиску на виконавчому пристрої:

$$\Delta P_{v.n} = \Delta P_c / (1 + n^2); \quad (5.139)$$

- визначають витрату рідини через ВП у разі перепаду тиску на ньому $\Delta P_{вп}$:

$$Q_{v.n} = K_{\gamma v.e.v.} \sqrt{\frac{\Delta P_{v.n}}{\gamma}}; \quad (5.140)$$

- 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 витратну (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, порівнююють його з технічними можливостями регулювального органа та роблять висновки щодо доцільності його експлуатації. Пропускна здатність: $\gamma=1\text{г/см}^3$; $v=0,2\text{ с}$; $Q_{max}=440\text{ м}^3/\text{год}$; $Q_{min}=220\text{ м}^3/\text{год}$; $t_1=t_2=30\text{ }^\circ\text{C}$; $p_1=15\text{ кгс/см}^2$; $\Delta p_c=10\text{ кгс/см}^2$; $\Delta p_{max}=4\text{ кгс/см}^2$.

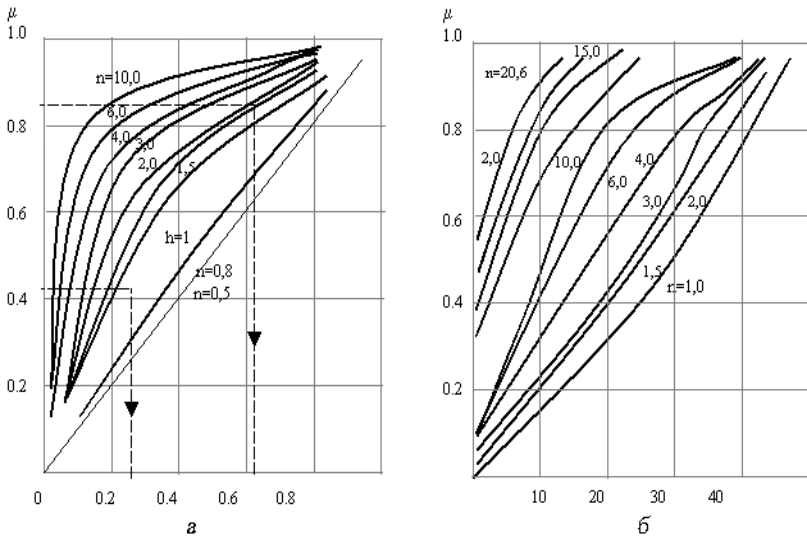


Рис. 5.45. Витратні характеристики для регулювальних клапанів (а) та поворотних заслінок (б)

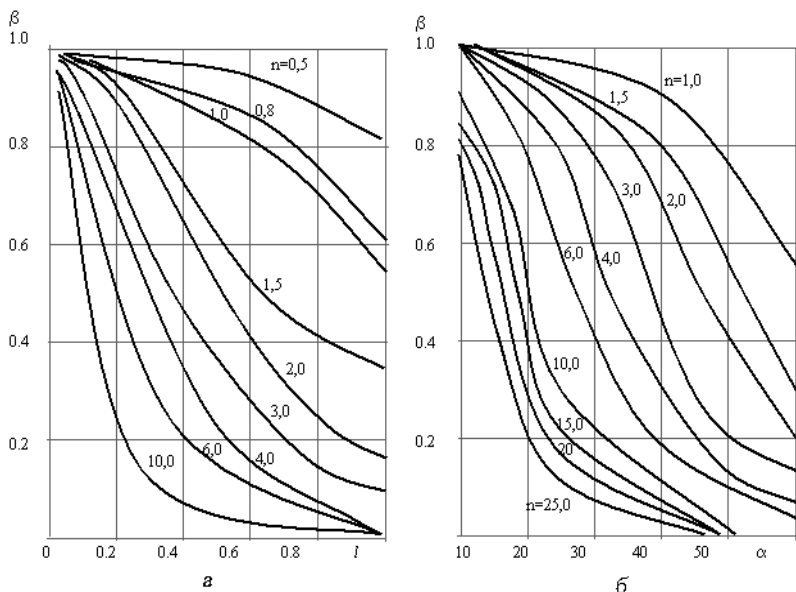


Рис. 5.46. Залежність перепаду тиску від ходу затвора для регулювальних клапанів (а) та поворотних заслінок (б)

Приклад 5.14. Вибрати регулювальний орган для таких умов: середовище, що регулюється, – вода:

$$K_{y_{max}} = Q_{max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta p_{max}}} = Q_{max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta p_c - \Delta p_{lmax}}} = 440 \sqrt{\frac{1}{10 - 4}} = 180 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Поправку на в'язкість не вводимо, оскільки індекс в'язкості:

$$Z = 420 Q / \nu \sqrt{K_\gamma} = 420 \cdot 440 / 0,2 \sqrt{180} > 1000.$$

За табл. 5.12 вибираємо двосідлоподібний регулювальний клапан з умовним діаметром $D_v=125$ мм та пропускну здатністю $K_{yв.п.}=250 \text{ м}^3/\text{год}$ (умова $K_{yв.п.}>1,2$ $K_{yв.п.}=1,2 \cdot 180=216$ виконується, оскільки $250>216$).

Далі знаходимо робочу ділянку витратної характеристики. Для цього проведемо розрахунки:

$$K_{yл} = Q_{max} \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta P_{lmax}}} = 440 \sqrt{\frac{1}{4}} = 220 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

$$n = K_{\gamma_{\text{в.н.}}}/K_{\gamma_{\text{л}}} = 250 / 220 = 1,14;$$

$$\Delta p_{\text{в.н.}} = \Delta p_c / (1 + n^2) = 10 / (1 + 1,14^2) = 4,35 \text{ кгс/см}^2;$$

$$Q_{\text{в.н.}} = K_{\gamma_{\text{в.н.}}} \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{в.н.}}}{\gamma}} = 250 \sqrt{\frac{4,35}{1}} = 521 \text{ м}^3 / \text{год};$$

$$\mu_{\text{max}} = Q_{\text{max}} / Q_{\text{в.н.}} = 440 / 521 = 0,84;$$

$$\mu_{\text{min}} = Q_{\text{min}} / Q_{\text{в.н.}} = 220 / 521 = 0,422.$$

За графіком рис. 5.45 вибираємо витратну характеристику ВП, згідно з якою відносний хід затвора регулювального органа:

$$l_{\text{max}} = 0,29; \quad l_{\text{min}} = 0,73,$$

де $l = S/S_{\text{max}}$; S – хід затвора регулювального органа; S_{max} – його максимальне переміщення.

За графіком рис. 5.46 здобуваємо перепад тиску (його відносне значення):

$$\beta_{\text{max}} = 0,9; \quad \beta_{\text{min}} = 0,6.$$

Абсолютне значення перепаду тиску визначаємо за виразом (5.142):

$$\Delta p_{\text{max}} = \beta_{\text{max}} \Delta p_c = 0,9 \cdot 10 = 9,0 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\Delta p_{\text{min}} = \beta_{\text{min}} \Delta p_c = 0,6 \cdot 10 = 6,0 \text{ кгс/см}^2.$$

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 шибера: 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 шибера.

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:

$$M_{пов} = a\Delta p D^3, \quad (5.144)$$

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,

$$M_{в.м.} = 2M_{пов}, \quad (5.145)$$

де $M_{в.м.}$ – переставний момент виконавчого механізму.

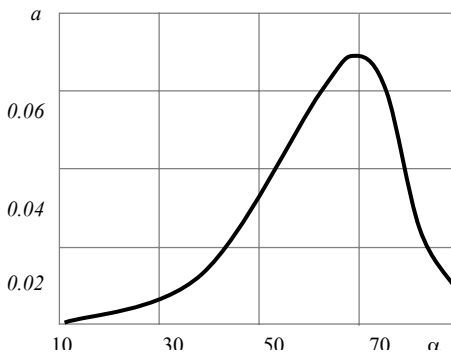


Рис. 5.47. Залежність коефіцієнта a від кута повороту диска заслінки α

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 , мм	ΔS_c , см ²	$d_{шт}$, 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:

$$F_{ум} = 0,785 d_{шт}^2 P_{кл}, \quad (5.147)$$

де $d_{шт}$ – діаметр штока (визначається за табл. 5.11); $P_{кл}$ – максимальний тиск за клапаном.

Силу тертя штока визначити важко, тому переставне зусилля виконавчого механізму знаходять за виразом:

$$F_{в.м.} = 2(F_3 + F_{ум}), \quad (5.148)$$

де $F_{в.м.}$ – 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 багатообертових 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 регульовального органу відрізняються лише масштабами. У разі нелінійного – створюються нерівні переміщення затвора регульовального органу $h_{p.o.}$ за відносно рівних переміщень вихідного елемента виконавчого механізму $\varphi_{в.м.}$, 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.

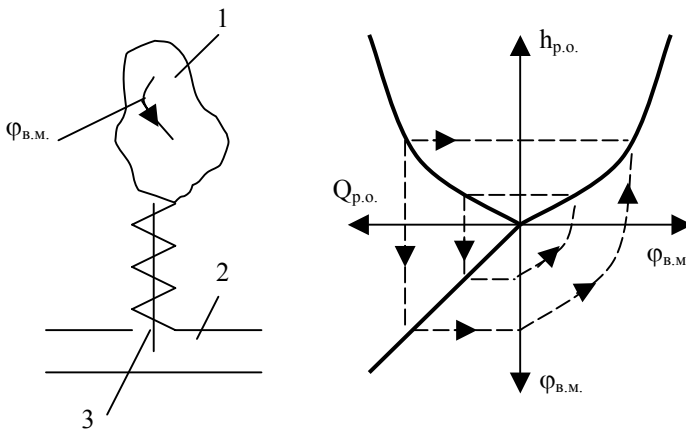


Рис. 5.48. Схема кулачкового з'єднання (а) та графічне пояснення до профілювання кулачкового з'єднання (б)

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.

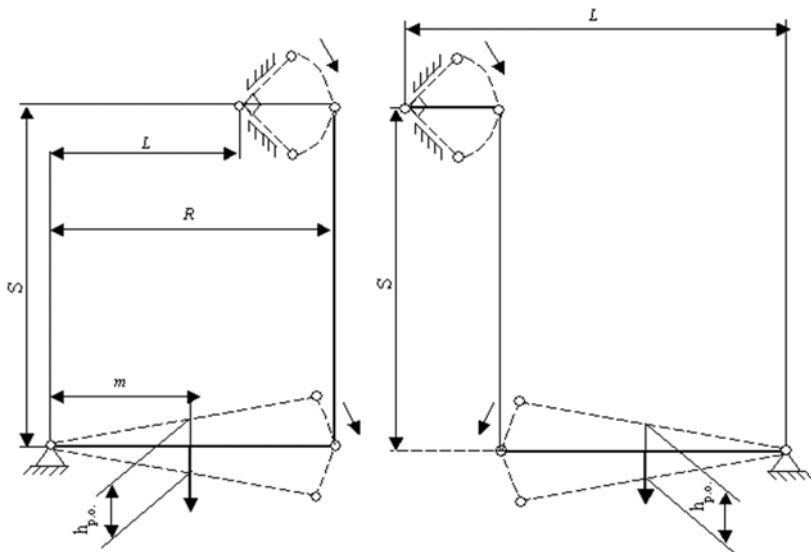


Рис. 5.49. Кінематика прямого (а) і непрямого (б) з'єднань виконавчого механізму та регулювального органа

За умов використання регулювального органа з лінійною витратною характеристикою або близькою до лінійної встановлені розміри з'єднання становитимуть:

$$S = (3...5)r, \quad (5.149)$$

- 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:

$$S = (3...5)r; \quad (5.149)$$

- 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 однообертові виконавчі механізми, їх технічна характеристика наведена в табл. 5.14.

Таблиця 5.14 – Технічна характеристика однообертових виконавчих механізмів

Тип	Номінальний момент на валу, Н·м	Пусковий момент, Н·м	Часодного 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

Продовження таблиці 5.14

1	2	3	4	5	6	7	8
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

Багатообертові виконавчі механізми використовують значно рідше і вибирають їх за умов, що:

$$M_{\text{д.н.}}/M_{\text{екв}} \geq 0,8 \dots 1,0, \quad (5.156)$$

де $M_{\text{д.н.}}$ – номінальне значення моменту на валу двигуна; $M_{\text{екв}}$ – еквівалентний момент. Еквівалентний момент можна визначити за таких умов:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\left(M_{\text{зр}} + \frac{M_{\text{дн}}}{\eta \cdot i}\right)^2 + \left(\frac{J_{\text{д}}}{\eta} + \frac{J_{\text{н}}}{\eta^2 i^2}\right) \frac{a_{\text{н}}^2 i^2}{2}}, \quad (5.157)$$

де $M_{\text{зр}}$ – момент зрушення; $J_{\text{д}}$ – момент інерції двигуна; $J_{\text{н}}$ – момент інерції, що створюється навантаженням; η – ККД редуктора; i – передавальне відношення редуктора;

$$i = \omega_{\text{дн}}/\omega_{\text{дн}} = (\pi n_{\text{н}}/30)/\omega_{\text{н}}, \quad (5.158)$$

де $\omega_{\text{дн}}$, $\omega_{\text{н}}$ – колова частота обертання двигуна та робочої машини (навантаження) відповідно.

Потужність виконавчого механізму при цьому вибирають за стандартною залежністю:

$$P = (1,2 \dots 1,5)(M_{\text{н}}\omega_{\text{н}} + J_{\text{н}}\omega_{\text{н}}a_{\text{н}}). \quad (5.159)$$

Приклад 5.15. Вибрати виконавчий механізм для слідкуючої системи за умов: статичний момент навантаження $M_{\text{н}}=0,03724$ Н·м, максимальна швидкість об'єкта керування $\omega_{\text{н}}=2\text{с}^{-1}$, максимальне його прискорення $a_{\text{н}}=6\text{с}^{-2}$, момент інерції $J_{\text{н}}=0,02058$ 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 $P_{\text{д.н.}}=4,1$ Вт; номінальний момент обертання $M_{\text{дн}}=9,8 \cdot 10^{-3}$ Н·м; момент зрушення $M_{\text{зр}}=29,4 \cdot 10^{-5}$ Н·м; номінальна частота обертання $n_{\text{н}}=4000$ мин⁻¹; момент інерції

$$J_{\text{дн}} = 7,84 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{с}^2.$$

Для вибраного двигуна потрібен редуктор з передавальним відношенням:

$$i = \omega_{\text{д.н.}} / \omega_{\text{н}} = (\pi n_{\text{н}} / 30) / \omega_{\text{н}} = 400\pi / 2 \cdot 30 = 210.$$

Оскільки номінальна потужність вибраного двигуна дещо менша за потрібну потужність, перевіримо умову (5.156). Для цього розрахуємо еквівалентний момент:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\left(\left(29,4 \cdot 10^{-5} + \frac{0,03724}{0,7 \cdot 210} \right)^2 + \left(\frac{7,84 \cdot 10^{-6}}{0,7} + \frac{0,02058}{0,7^2 \cdot 210^2} \right) \frac{6^2 \cdot 210^2}{2} \right)} = 140,14 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Так як:

$$M_{\text{д.н.}} / M_{\text{н}} = 9,8 \cdot 10^{-3} / 1,4 \cdot 10^{-3} \approx 7 > 0,8 \dots 1,0,$$

то двигун АДП-123 може бути використаний як виконавчий механізм.

5.3.2. 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 автоколиваний у системі. Пошук необхідних параметрів настройки, як правило, ведуть за кілька етапів: за умов незадовільних автоколиваний зону нечутливості змінюють, що спричинює зміну амплітуди та частоти (вони визначають якість перехідного процесу).

Згідно з критерієм Найквіста (він використовується в методі Гольдфарба) маємо:

$$W_{\text{роз}}(j\omega) = W_{\text{л.ч.}}(j\omega)W_{\text{н.ч.}}(j\omega) = -1, \quad (5.160)$$

де $W_{\text{л.ч.}}(j\omega)$ – амплітудно-фазова характеристика лінійної частини системи автоматичного регулювання; $W_{\text{н.ч.}}(j\omega) = -1$ – 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,

$$W_{л.ч.}(j\omega) = -l(q_1 + jq_2) = -(q_1^2 + jq_2^2) = Re_{н.ч.}^{(-l)}(A) + jIm_{н.ч.}^{(-l)}(A). \quad (5.162)$$

де $Re_{н.ч.}^{(-l)}(A)$ – дійсна обернена складова амплітудно-фазової характеристики нелінійної частини системи автоматичного регулювання; $Im_{н.ч.}^{(-l)}(A)$ – уявна обернена складова амплітудно-фазової характеристики нелінійної частини системи автоматичного регулювання.

Розв'язання рівняння (5.160) дає можливість знайти частоту ω^* та період T^* автоколиваний (якщо вони існують).

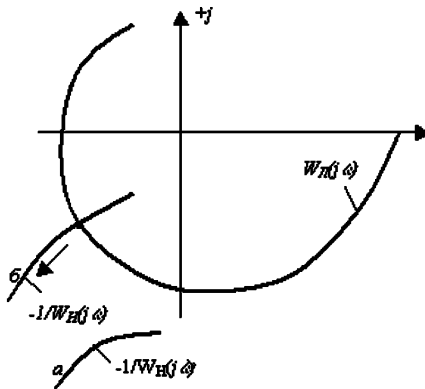


Рис. 5.50. Розташування годографів на комплексній площині:
а – для умов, коли в системі не виникають стійкі автоколювання;
б – для умов, коли в системі стійкі автоколювання виникають

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 автоколиваний A від 0 до ∞ (цей параметр входить до складу коефіцієнтів гармонічної лінеаризації q_1 та q_2). За

взаємним розміщенням указаних годографів доходять висновку про наявність автоколивань у системі:

- якщо годографи не перетинаються (рис. 5.50, *a*), 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 [°C/B]; постійної часу [с]; часу запізнювання [с]; статична характеристика нелінійної частини наведена в табл. 5.4 поз. 3 з параметрами $a=4$ °C; $B=190$ 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, *a*. 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.

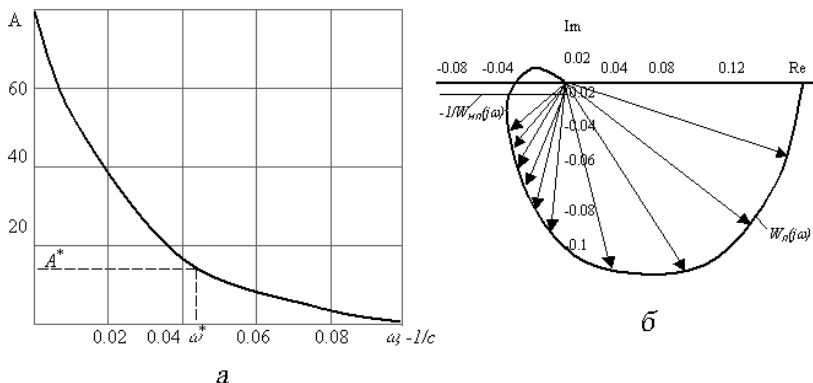


Рис. 5.51. Розрахунок параметрів автоколивань:
а – амплітудно-частотна характеристика лінійної частини системи; *б* – розташування годографів на комплексній площині

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:

$$[0,15 / (2250 + 1)] [\cos(40\omega^*) 150\omega^* \sin(40\omega^*)] = 0,023; \quad \omega^* = 0,042 \text{ c}^{-1}.$$

Отже, параметри автоколивань становлять: амплітуда $6,9^\circ \text{C}$; частота $0,042 \text{ c}^{-1}$. 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 перемикачів 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 регулятора 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 $\varepsilon_0^{(c)}$ указує, 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. $B_1 \neq B_2$ $a \neq 0$		$t_1 = \frac{2a}{K_0B_1}; t_2 = \frac{2a}{K_0B_2}; T = \frac{2a}{K_0B} \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right); \eta = \frac{K_0B_1B_2}{a(B_1 + B_2)}$ $A_1 = A_2 = a; \Delta A = 2a$

Продовження таблиці 5.15

1	2	3
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. $B_1 \neq B_2$ $a \neq 0$	$\frac{K_0}{p} e^{-p\tau}$	$t_1 = t_2 = 2 \left[\tau + \frac{a}{K_0 B} \right]; T = 4 \left[\tau + \frac{a}{K_0 B} \right]; \eta = \frac{K_0 B}{2(a + K_0 B \tau)};$ $A_1 = A_2 = a + K_0 B \tau; \Delta A = 2(a + K_0 B \tau);$ $t_1 = t_2 = 2\tau; T = 4\tau; \eta = \frac{1}{2\tau};$ $A_1 = A_2 = K_0 B \tau; \Delta A = 2K_0 B \tau$ $t_1 = \tau \left(1 + \frac{B_2}{B_1} \right) + \frac{2a}{K_0 B_1}; t_2 = \tau \left(1 + \frac{B_1}{B_2} \right) + \frac{2a}{K_0 B_2};$ $T = \tau \left(2 + \frac{B_1}{B_2} + \frac{B_2}{B_1} + \frac{2a}{K_0} \right) \left(\frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} \right);$ $\eta = \frac{2K_0 B_1 B_2}{(B_1 + B_2)(2a + K_0(B_1 + B_2))};$ $A_1 = a + K_0 B_1 \tau; \Delta A_2 = a + K_0 B_2 \tau; \Delta A = 2a + K_0 \tau (B_1 + B_2)$ $t_1 = \tau \left(1 + \frac{B_2}{B_1} \right); t_2 = \tau \left(1 + \frac{B_1}{B_2} \right); T = \tau \left(2 + \frac{B_1}{B_2} + \frac{B_2}{B_1} \right);$ $\eta = \frac{2B_1 B_2}{\tau (B_1 + B_2)^2};$ $A_1 = K_0 B_1 \tau; A_2 = K_0 B_2 \tau; \Delta A = K_0 \tau (B_1 + B_2)$
5. $B_1 = B_2 = B$ $a \neq 0$	$\frac{K_0}{T_0 p + 1} e^{-p\tau}$	$t_1 = t_2 = \tau + T_0 \ln \frac{2K_0 B}{K_0 B - a - e^{-\tau/T}}; T = 2t_1; \eta = \frac{2}{T};$ $A_1 = A_2 = K_0 B (1 - e^{-\tau/T}) + a e^{-\tau/T}; \Delta A = 2A_1;$

Продовження таблиці 5.15

1	2	3
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 $T^*=213,6 \text{ с}$, $\omega^*=0,029 \text{ с}^{-1}$, $A^*=9,7^\circ \text{C}$.

5.3.3. 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 програмуєчому контролері. Алгоритми керування при цьому реалізуються програмно.

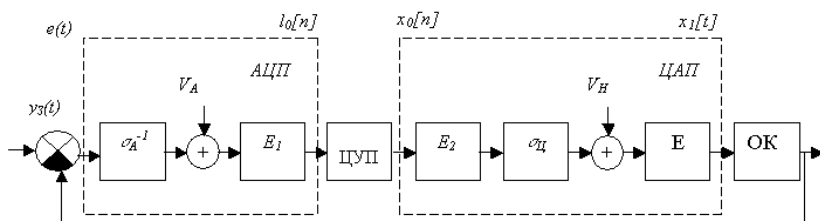


Рис. 5.52. Типова структура цифрових систем автоматичного керування:

АЦП – аналого-цифровий перетворювач; δ_A^{-1} – коефіцієнт передачі лінеаризованої частини вхідного перетворювача; V_A – джерело шуму квантування; E_I – імпульсний елемент першого роду; ЦУП – цифровий керуючий пристрій; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; E_2 – імпульсний елемент другого роду, $\delta_Ц$ – коефіцієнт передачі лінеаризованої частини вихідного перетворювача, $V_Ц$ – 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

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 ПД-алгоритм керування:

$$D_{\text{pid}}(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}. \quad (5.171)$$

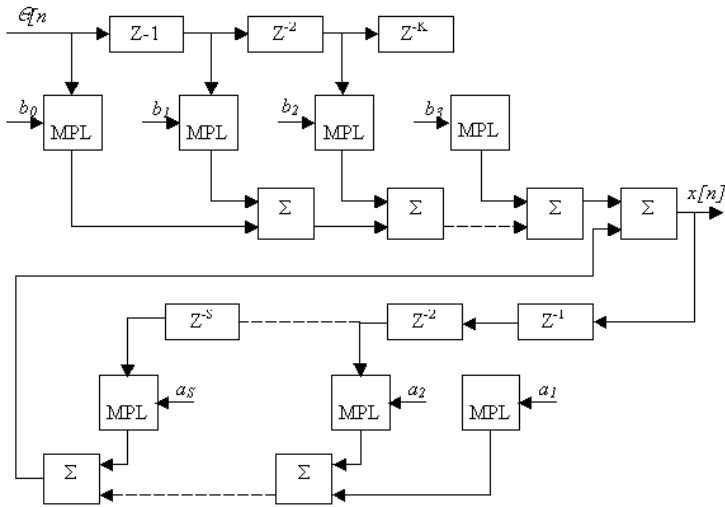


Рис. 5.53. Структурна схема програмної реалізації алгоритму (5.170)

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:

$$x(t) = e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) dt + t_n \frac{de}{dt}. \quad (5.173)$$

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 $x[n-1]$

$$x[n-1] = e[n-1] + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^n e[i-1] + \frac{T_n}{T} (e[n-1] - e[n-2]). \quad (5.175)$$

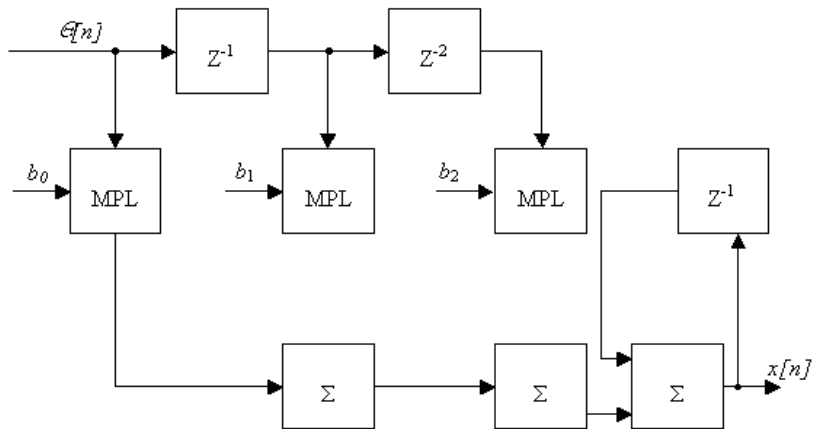


Рис. 5.54. Структурна схема програмної реалізації ПІД-алгоритму керування

Щоб дістати рекурентне рівняння, потрібно від виразу (5.174) відняти рівняння (5.175):

$$x[n] - x[n-1] = \left(1 + \frac{T_n}{T}\right)e[n] - \left(1 + \frac{2T_n}{T} - \frac{T}{T_i}\right)e[n-1] + \frac{T_n}{T}e[n-2]. \quad (5.176)$$

Позначимо $b_0 = 1 - \frac{T_n}{T}$; $b_1 = -\left(1 + \frac{2T_n}{T} - \frac{T}{T_i}\right)$; $b_2 = \frac{T_n}{T}$. Тоді:

$$x[n] = x[n-1] + b_0e[n] + b_1e[n-1] + b_2e[n-2]. \quad (5.177)$$

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:

$$D_{ni}(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (5.178)$$

Відповідне їй різницеве рівняння:

$$x[n] = x[n-1] + b_0e[n] + b_1e[n-1]. \quad (5.179)$$

Структурну схему програмної реалізації різницевого рівняння (5.178) наведено на рис. 5.55.

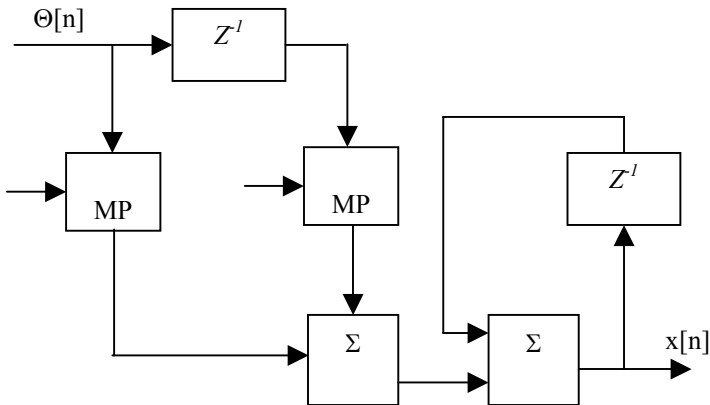


Рис. 5.55. Структурна схема програмної реалізації ПІ-алгоритму керування

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:

$$x(t) = e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) dt. \quad (5.180)$$

- для такту $x[n]$:

$$x[n] = e[n] + \frac{T}{T_1} \sum_{i=0}^n e[i-1]; \quad (5.181)$$

- для такту $x[n-1]$:

$$x[n-1] = e[n-1] + \frac{T}{T_1} \sum_{i=0}^{n-1} e[n-1]; \quad (5.182)$$

Щоб здобути рекурентне рівняння, потрібно від виразу (5.181) відняти вираз (5.182):

$$x[n] - x[n-1] = e[n] - e[n-1]. \quad (5.183)$$

Беручи $b_0 = 1; b_1 = T/T_1 - 1$, матимемо:

$$x[n] = x[n-1] + b_0 e[n] + b_1 e[n-1]. \quad (5.184, a)$$

Як бачимо, рівняння (5.179) і (5.184) ідентичні.

Для ПІ-алгоритму керування дискретна передавальна функція має вигляд:

$$D_n(z) = b_0. \quad (5.184, б)$$

Її різницевий оригінал:

$$x[n] = b_0 e[n]. \quad (5.185, a)$$

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:

$$\alpha(t) = \alpha_m \sin(\omega_k t), \quad (5.185, 6)$$

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_{0m} , 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_k , 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:

$$\lambda_e = \ddot{\alpha}_m / \dot{\alpha}_m; \quad L(\lambda_e) = 20 \lg |W(j\lambda_e)| = 20 \lg \left| \alpha_m^2 / (\theta_{om} \ddot{\alpha}_m) \right|. \quad (5.197)$$

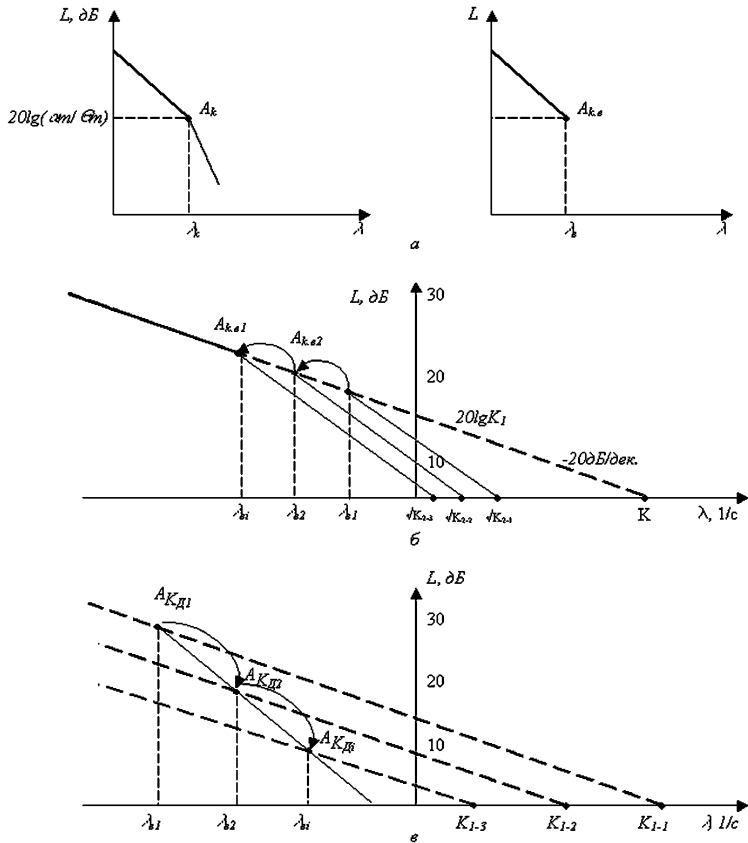


Рис. 5.56. Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики цифрових систем:

*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-частотні характеристики для різних добротностей системи*

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 $a_{e.m.}$ 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

$$\theta_{\alpha_m} = \dot{\alpha}_m / k_1, \quad (5.199)$$

де k_1 – добротність за швидкістю, що визначається в точці перетину осі $\lambda_e=1$ з логарифмічною амплітудно-частотною характеристикою (рис. 5.56, б).

Значення коефіцієнта k_1 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 $\ddot{\alpha}_m$ 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 $\alpha(t) = \ddot{\alpha}_m t^2 / 2$. Для цього випадку встановлена похибка в системі з астатизмом другого порядку:

$$\theta_{\ddot{\alpha}_m} = \ddot{\alpha}_m / k_2, \quad (5.200)$$

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_m і $\ddot{\alpha}_m$ 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, a_m – максимальне його прискорення, θ_{om} – 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:

$$\lambda_{zp} < 2/T; \quad \mu_m \geq \arcsin(1/M), \quad (5.204)$$

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 $\varphi(\lambda)$ 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.

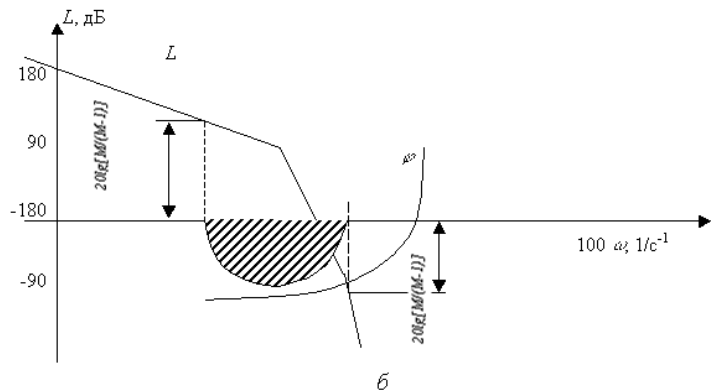
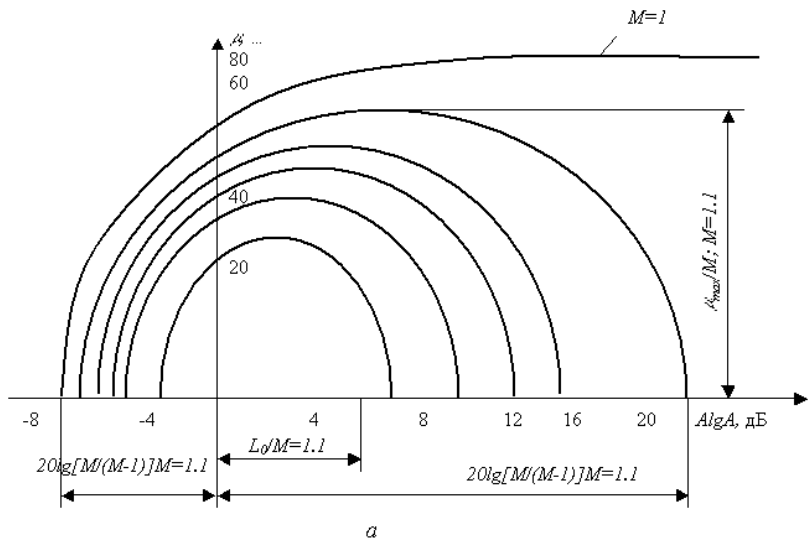


Рис. 5.57. Бажані логарифмічні амплітудно-частотні характеристики цифрових систем:
a – для заданого показника коливальності; *б* – бажана логарифмічна амплітудно-частотна характеристика

5.4. 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 ЛКС);
- агрегатна система засобів обчислювальної техніки (АСЗТ-М, АСЗТ-ПС) та ін.

Під час остаточного вирішення питання щодо вибору технічних засобів для проекрованої 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?

6. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ПРОВОДОК І ПУСКОЗАХИСНОЇ АПАРАТУРИ

6.1. 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 тепловий знос 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 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 здобує 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 мм 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:

$$P_{вст} = S_{ном} \sqrt{ПВ} \cdot \cos \varphi_{ном}, \quad (6.2)$$

де $S_{ном}$, $ПВ$ – відповідно паспортні значення повної потужності та повторності вмикання; $\cos \varphi_{ном}$ – 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.

Уразі вмикання однофазного споживача на лінійну напругу:

$$P_{екв} = 3P_{вст.л}, \quad (6.5)$$

де $P_{вст.ф}$ – 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 (добу).

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, нарощують 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:

$$Q_{ном} = \frac{P_{ном}}{\eta} tg\varphi. \quad (6.8)$$

У разі часткового навантаження:

$$Q_4 = Q_0 + \Delta Q\beta_2, \quad (6.9)$$

де $tg\varphi$ – 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:

$$P_{роз} = K_{макс} K_{в} \sum_{i=1}^{i=n} P_{вст i}, \quad (6.12)$$

де $\sum_{i=1}^{i=n} P_{вст i}$ – сумарна встановлена потужність електроспоживачів, кВт; $K_{в}$ – 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:

$$k_{макс} = f(n_{еф}, k_{в}). \quad (6.13)$$

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_M залежно від ефективного числа електроспоживачів n_{ef} та коефіцієнта використання встановлювальної потужності K_B . Якщо кількість споживачів менша за чотири, то цей метод не застосовують.

Таблиця 6.2 – Визначення K_{\max} за n_{ef} і K_B

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 мм, розрахункові навантаження слід визначати не за тридцятихвилинним 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 днів у періоди максимальних навантажень дослідним шляхом знаходять тридцятихвилинні максимуми. Потім здобувають генеральну середню (математичне сподівання) навантаження:

$$\bar{P} = P_{\text{сеп}} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n}, \quad (6.16)$$

та середньозважене відхилення:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{n.\text{сеп}} = \sqrt{\frac{(P_1 - \bar{P})^2 + (P_2 - \bar{P})^2 + \dots + (P_n - \bar{P})^2}{n}}, \quad (6.17)$$

де $P_1 + P_2 + \dots + P_n$ – сума тридцятихвилинних максимумів, визначених дослідним шляхом.

Розрахункове навантаження, кВт:

$$P_{\text{роз}} = P_{\text{сеп}} + \beta \sigma_{n.\text{сеп}},$$

де β – коефіцієнт надійності (беруть рівним 2,5).

Дані досліджень ($P_{\text{роз}}$) використовують при проектуванні електрифікації підприємств, що аналогічні досліджуванім.

Метод коефіцієнта одночасності. Його використовують для визначення розрахункових навантажень електричних ліній 0,38 кВ та трансформаторних підстанцій 6-35/0,4 кВ [17].

Розрахункові P_d і вечірні P_v максимуми навантаження здобувають за формулами:

$$P_{\partial} = \sum_{i=1}^{i=n} P_{\partial i} K_0, \quad (6.18)$$

$$P_{\epsilon} = \sum_{i=1}^{i=n} P_{\epsilon i} K_0, \quad (6.19)$$

де $P_{\partial i}$, $P_{\epsilon i}$ – відповідно денне і вечірне розрахункове навантаження 2-ої ділянки лінії чи на вводі i -ого споживача; K_0 – коефіцієнт одночасності (відношення суміщеного максимуму навантаження до суми максимумів навантаження окремих споживачів чи їх груп).

За розрахункове навантаження $P_{роз}$ беруть більше з P_{∂} і P_{ϵ} . 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

Кіль- кість спожи- вачів	2	3	4...5	6...7	8...10	11...15	16...20	21...40	41...70	71...150	Понад 150
K_0	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 менш ніж 0,5 год, кВт; t – тривалість

безперервної роботи кожного з електроспоживачів з потужністю – $P_{встп}$, 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, кВ·А, дістають за формулою:

$$S_{роз} = P_{роз} / \cos\varphi. \quad (6.21)$$

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 $\cos\varphi$ 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 $\cos\varphi$ від співвідношення між сумою $P_{вст.дв.}$ та сумарною $P_{заг}$.

$P_{вст.дв.}/P_{заг}$	$\cos\varphi$	$P_{вст.дв.}/P_{заг}$	$\cos\varphi$
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 $\cos\varphi$ 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 $\cos\varphi$ від співвідношення між сумою $P_{наг}$ та сумарною $P_{заг}$

$P_{наг}/P_{заг}$	$\cos\varphi$	$P_{наг}/P_{заг}$	$\cos\varphi$
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:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (S_{позі} x_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} S_{позі}}; \quad y = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (S_{позі} y_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} S_{позі}}; \quad (6.22)$$

де x_i, y_i – координати центрів ваги окремих споживачів; потужності на вводі споживачів, $S_{позі}$ – розрахункові потужності на вводі споживачів.

6.2. Розрахунок проводок і способи їх прокладання

6.2.1. 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 роliках (ізоляторах, клицях), у трубах (сталевих або вінілплатових), 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 АБВГ, 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		
Кабелі для приєднання переносних і пересувних електроприймачів у промислових установках	0,35	-
Скручені двожильні проводи з багатодротовими жилами для стаціонарної проводки на роликах	0,75	-
Незахищені ізольовані проводи для стаціонарної проводки всередині приміщень:	1	-
безпосередньо на основах, на роликах, клицях і тросах;	1	2,5
для жил, приєднаних до гвинтових затискачів	1	2

Продовження таблиці 6.8

1	2	3
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 чотирипровідною 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.

6.2.2. 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 багатожилнього провідника), нульовий робочий провід чотирипровідної 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 $I_{розр}$ – 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 струмо-провідних жил, мм ²	Сила струму, А, для проводів					
	прокладених відкрито	в 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-

Продовження таблиці 6.9

1	2	3	4	5	6	7
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 струмоведучих жил, мм ²	Сили струму, А, для проводів і кабелів				
	одножильних	двожильних		трижильних	
	при прокладанні				
	відкрито	відкрито	в землі	відкрито	в землі
1	2	3	4	5	6
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

Продовження таблиця 6.10

1	2	3	4	5	6
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	23	21	34	19	29
4	31	29	42	27	38
6	38	38	55	32	46
10	60	55	80	42	70
16	75	70	105	60	90
25	105	90	135	75	115
35	130	105	160	90	140
50	165	135	205	110	175
70	210	165	245	140	210
95	250	200	295	170	255
120	295	230	340	200	295
150	340	270	390	235	335
185	390	310	440	270	385

*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 розчіплювач (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 миттєво-діючим розчіплювачем (відсічкою) та для кабелів з паперовою ізоляцією;

- 100 % для номінального струму розчіплювача автоматичного вимикача з нерегульованою обернено залежною від струму характеристикою, незалежно від наявності або відсутності відсічки, – для провідників усіх марок;

- 100 % для струму зрушення розчіплювача автоматичного вимикача з нерегульованою обернено залежною від струму характеристикою – для провідників з полівінілхлоридною, гумовою та аналогічною за тепловими характеристиками ізоляцією;

- 125 % для струму зрушення розчіплювача 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:

$$\Delta U_{л} = IR, \quad (6.29)$$

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:

$$\Delta U_{л} = \frac{\sum (P_{роз} l)}{CS}; \quad (6.30)$$

б) для однієї ділянки лінії:

$$\Delta U_{л} = \frac{P_{роз} l}{CS}, \quad (6.31)$$

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:

$$C = \frac{\gamma U_{л}^2}{10^5}; \quad (6.32)$$

б) для двофазної лінії змінного струму з нульовим проводом:

$$C = \frac{\gamma U_{л}^2}{2,25 \cdot 10^5}; \quad (6.33)$$

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); $U_{л}$ – 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 ввіді	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	

6.3. 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 розчіплювачами 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 розчіплювачами 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 $0,3 I_{\text{ном}}$ апарата, з дугогасною камерою – $I_{\text{ном}}$ при напрузі 380 В змінного струму, в колах постійного струму відповідно $0,2 I_{\text{ном}}$ і $I_{\text{ном}}$ 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) $I_{\text{ном}}$

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 ($U_n \geq U_M$), за струмом ($I_{\text{ном.п}} \geq I_{\text{ном.ел.дв}}$), за струмом теплового реле ($I_{\text{ном.т.р}} \geq I_{\text{ном.ел.дв}}$), за струмом неспрацювання теплового реле ($I_{\text{неспр.}} \geq I_{\text{ном.ел.д}}$) з подальшим регулюванням струму неспрацювання на $I_{\text{ном.ел.дв}}$, за напругою котушки, за конструкцією і виконанням. Технічні характеристики теплових реле серії РТЛ наведено в додатку 4.

Кнопки керування (серії КЕ) та *кнопочі 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, нерізьбові 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 $U_{ав} \geq U_{м}$;

➤ 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 розчіплювачів має дорівнювати номінальному струму електродвигуна або трохи перевищувати його ($I_{ном.розч.} \geq I_{ном.ел.дв.}$) з подальшим регулюванням струму неспрацювання теплового розчіплювача на номінальний струм електродвигуна;

➤ струм відсічки електромагнітного розчіплювача 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 розчіплювачів.

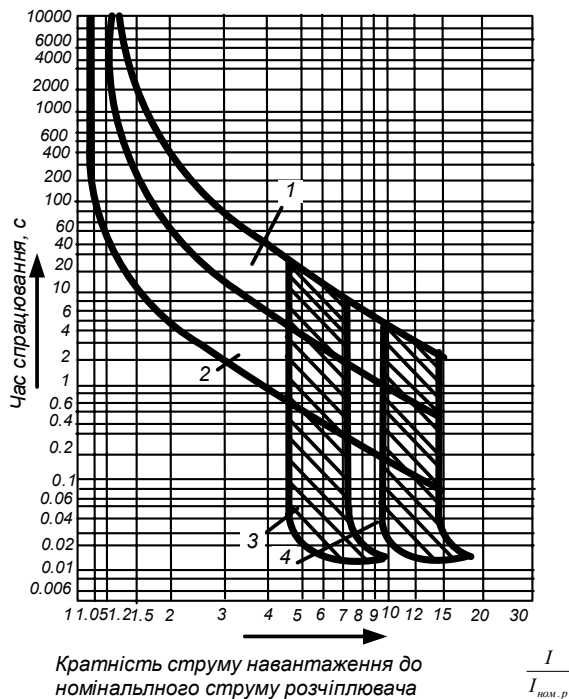


Рис. 6.1. Захисна часострумовева характеристика автоматичного вимикача BA51-35:

- 1 – захисна характеристика, знята з холодного стану;
- 2 – захисна характеристика, знята з нагрітого стану;
- 3 – зона роботи електромагнітного розчіплювача струму під час постійного струму;
- 4 – зона роботи електромагнітного розчіплювача струму під час змінного струму

Вибираючи автоматичний вимикач для захисту електричної лінії, яка живить декілька електродвигунів, номінальний струм автоматичного вимикача і номінальний струм розчіплювача мають дорівнювати сумі номінальних струмів одночасно працюючих електродвигунів або трохи перевищувати її. У даному випадку струм відсічки електромагнітного розчіплювача:

$$I_{\text{від.роз.}} \geq 1,8 \cdot \left(\sum_{i=1}^{i=n-1} I_{\text{ном}i} + I_{\text{пуск.найб.}} \right), \quad (6.35)$$

де $I_{\text{ном}i}$ – номінальний струм i -го електродвигуна, А; $I_{\text{пуск.найб.}}$ – 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 розчіплювачів 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 пускатрів. Вибираючи запобіжники для захисту електродвигуна від струмів к.з., дотримуються таких умов:

➤ номінальний струм запобіжника має дорівнювати номінальному струму електродвигуна або трохи перевищувати його ($I_{\text{ном.з}} \geq I_{\text{ном.сл.дв.}}$);

➤ 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 ($I_{\text{гр.вим.}} \geq I_{\text{к.з.}}$);

➤ струм плавкої вставки:

$$I_{\text{пл.вст}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{\alpha} = \frac{I_{\text{ном}i} K_i}{\alpha}, \quad (6.36)$$

де $I_{\text{пл.вст}}$ – струм плавкої вставки, А; $I_{\text{пуск}}$, $I_{\text{ном}i}$ – 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:

$$I_{\text{пл.вст}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-1} I_{\text{ном}i} + I_{\text{пуск.найб.}}}{\alpha}, \quad (6.37)$$

де $\sum_{i=1}^{i=n-1} I_{ном i}$ – сума номінальних струмів одночасно

працюючих електродвигунів без струму двигуна з найбільшим пусковим струмом, A ; $I_{пук.найб.}$ – пусковий струм електродвигуна з найбільшим пусковим струмом, A .

Якщо кількість електродвигунів становить більше ніж п'ять, то струм плавкої вставки:

$$I_{пл.вст} = \sum_{i=1}^{i=n-1} I_{ном i} + \frac{I_{пук.найб.}}{\alpha}. \quad (6.38)$$

Стандартну плавку вставку вибирають рівною або трохи більшою за струм, визначений за наведеними вище формулами.

Плавкі вставки запобіжників та теплові розчіплювачі 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 розчіплювача 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 шинопроводами і з'єднаною з корпусом шафи нульовою шиною і лінійними та ввідним (або без нього) автоматичними вимикачами (рис. 6.2).

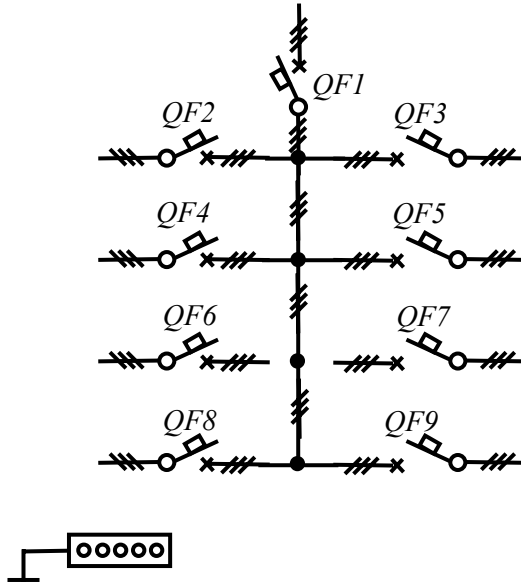


Рис. 6.2. Принципова електрична схема розподільної шафи ПР8501-091: QF1, QF2, ..., QF9 – автоматичні вимикачі

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 розчіплювачами на струми 6,3...63 А і триполюсними ВА51-31 та ВА51-35 з розчіплювачами 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.

6.4. 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 глухозаземленою 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.:

$$I_{\text{к.з.}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{к.з.}}^{(3)} \approx 0,87 I_{\text{к.з.}}^{(3)}. \quad (6.39)$$

Під час однофазного к.з. відбувається замикання однієї 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 глухозаземленою 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 розчіплювача автоматичного вимикача з обернено залежною від струму характеристикою.

У разі захисту електричних мереж автоматичними вимикачами, що мають лише електромагнітний розчіплювач (відсічку) провідність вищевказаних провідників повинна забезпечувати струм не менший від струму відсічки, помноженому на коефіцієнт розкиду струмів спрацювання електромагнітного розчіплювача K_p (за заводськими даними) і на коефіцієнт запасу 1,1:

$$I_{к.з.}^{(1)} \geq I_{від.роз.} K_p K_z. \quad (6.40)$$

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 вищевказаних вимог нульовий провідник рекомендують прокладати разом з фазними.

Струм однофазного к.з. можна визначити за наближеною формулою:

$$I_{к.з.}^{(1)} = \frac{U_\phi}{Z_{m0} + Z_n}, \quad (6.41)$$

де U_ϕ – фазна напруга, В; Z_{m0} – 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_0 за формулою:

$$Z_{m0} = 26/S, \quad (6.42)$$

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 Y / Y_0

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 “Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением 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 взаємодією 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:

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.н.н}}^2}{\sqrt{3} I_{\text{в.н.н}} U_{\text{ср.в.н}}}, \quad (6.46)$$

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, установленого 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:

$$X'_{\phi-n} = 0,1451 g l_{\phi-n}; \quad (6.49)$$

$$X''_{\phi-n} = \pi f \mu 10^{-4}, \quad (6.50)$$

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:

$$X'' = 0,6R_{20}. \quad (6.51)$$

Опір петлі фаза-нуль визначають за формулами:

для чотирипровідної повітряної лінії і відкритих шинопроводів із алюмінію і міді:

$$Z_n = \sqrt{(R_\phi + R_n)^2 + (2X'_{\phi-n})^2}; \quad (6.52)$$

для чотирипровідних 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 чотирипровідних кабельних ліній із алюмінієвими або мідними жилами:

$$Z_n = R_\phi + R_n; \quad (6.54)$$

для трипровідних 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 чотирипровідних провідок 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:

$$\sum R_{\kappa} = R_m + R_{\phi}; \quad (6.59)$$

$$\sum X_{\kappa} = X_m + X_{\phi}, \quad (6.60)$$

де R_m, X_m – відповідно активна і реактивна складові повного опору Z_T 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:

$$Z_m = \frac{U_{\text{к.з.}} U_{\text{л}}^2}{100 S_{\text{ном}}} = \frac{U_{\text{к.з.}} U_{\text{л}}}{100 \sqrt{3} I_{\text{ном}}}; \quad (6.61)$$

$$R_m = \frac{\Delta P_M U_{\text{л}}^2}{S_{\text{ном}}^2}; \quad (6.62)$$

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 + R_m^2}, \quad (6.63)$$

де $S_{\text{ном}}, I_{\text{ном}}$ – відповідно номінальні потужність і номінальний струм трансформатора; $U_{\text{к.з.}}$ – напруги к.з. трансформатора; ΔP_M – втрати к.з. трансформатора.

Струм к.з. на шинах 0,4 кВ трансформатора:

$$I_{\text{к.з.}}^{(3)} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} Z_m} = \frac{100}{U_{\kappa}} I_{\text{ном}}. \quad (6.64)$$

Ударний струм трифазного к.з. беруть рівним його амплітудному значенню I_a (у мережах 0,38/0,22 кВ ударний коефіцієнт $K_{\text{уд}} = 1$):

$$i_{\text{уд}} = I_a = \sqrt{2} I_{\text{к.з.}}^{(3)}. \quad (6.65)$$

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.

6.5. 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 пере-

важно 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, вентильні установки з спеціальним регулюванням тощо.

Реактивну потужність, яку генерують повітряні лінії, струмопроводи 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:

$$Q_{\text{дв}} = \frac{a_{\text{макс}} P_{\text{ном}} \operatorname{tg} \alpha}{\eta}, \quad (6.67)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність, кВт; $\operatorname{tg} \alpha$ – тангенс кута α , 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

$$Q_Y = 3 \left(U / \sqrt{3} \right)^2 \omega C 10^{-3} = U^2 \omega C 10^{-3}. \quad (6.70)$$

Найефективнішими компенсувальними пристроями в сільсько-господарських установках є статичні конденсатори, технічні дані яких наведено в додатку 7.

Компенсація може бути індивідуальною (конденсатори встанов-

люють 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:

$$Q_k = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2), \quad (6.71)$$

де P – середнє значення споживаної активної потужності, кВт; $\operatorname{tg}\varphi_1$ – тангенс кута зсуву фаз, що відповідає середньозваженому значенню коефіцієнта потужності за найбільш завантажену добу; $\operatorname{tg}\varphi_2$ – те саме, планове нормативне розрахункове значення.

Якщо маємо змінний графік реактивних навантажень, то компенсувальний компенсуючий 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:

$$Q_0 = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta} \operatorname{tg}\varphi; \quad (6.72)$$

$$Q_L = 3I^2 \frac{X_L}{1000}; \quad (6.73)$$

$$Q_L = \frac{S_{\text{ном}}}{1000} (I_k + \beta^2 U_p), \quad (6.74)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність електродвигуна, кВт; $\operatorname{tg}\varphi$ – тангенс кута φ , що відповідає номінальному значенню коефіцієнта потужності електродвигуна; I – струм в лінії, А; X_L – індуктивний опір лінії, Ом; $S_{\text{ном}}$ – номінальна потужність трансформатора, кВ·А; I_x – 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:

$$U_p = \sqrt{(U_{\hat{e}})^2 - (U_a)^2}; \quad (6.75)$$

$$U_a = \frac{\Delta P_M}{S_{\text{ном}}} 100; \quad (6.76)$$

$$\beta = \frac{I_{\text{сеп}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}}{S_{\text{ном}} T_p}, \quad (6.77)$$

де ΔP_m – втрати к.з. трансформатора, кВт; $I_{\text{сер}}$ – 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 загально встано влено ю 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 встановлено ї потужності асинхронних електродвигунів і зварювальних трансформаторів у загальній встановлено ї 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 безпечно 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?

7. ЩИТИ І ПУЛЬТИ В ПРОЕКТАХ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

7.1. 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, контрольно-вимірвальні 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 використовуються 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).

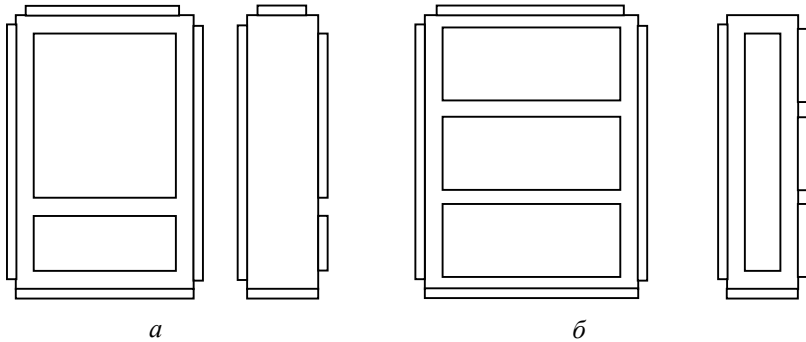


Рис. 7.1. Виконання шаф керування:
а – I виконання; б – II виконання

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 унифицированных типовых конструкций агрегатных комплексов ГСП. Типы и основные размеры”, ДСТУ 3288-95 (ГОСТ 26032-96) “Система унифицированных типовых конструкций агрегатных комплексов. Загальні технічні умови”. ОСТ 36.13-76 “Щиты и пульты систем автоматизации технологических процессов”. 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 внутрішньощитових 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.

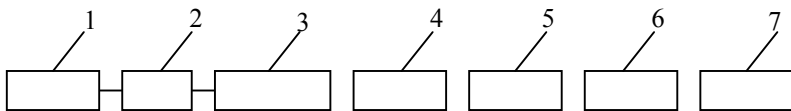


Рис. 7.2. Структура умовного запису шафи керування:

- 1 – найменування виробу; 2 – умовне позначення;*
- 3 – виконання; 4 – розміри шафи керування;*
- 5 – кліматичне виконання та категорія розташування; 6 – ступінь захищеності;*
- 7 – галузевий стандарт*

Слід зазначити, що ступінь захисту шафових щитів від дотику до струмопровідних частин, попадання сторонніх предметів і води має бути не нижче як ІР30 (забезпечує захист струмопровідних частин від сторонніх предметів, розміри яких перевищує 2,5 мм; захист від попадання води відсутній), ступінь захисту панельних щитів – ІР00. Наприклад, запис модифікації: щит – ЩПК-3-ЗЛ-1 (1000+800+600) У4ІР00 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 ІР00.

Таблиця 7.1 – Позначення щитів і пультів

Найменування	Умовне позначення
1. Шафний щит: із задніми дверима із задніми дверима, відкритими з двох боків із задніми дверима, відкритими з правого боку із задніми дверима, відкритими з лівого боку із задніми і передніми дверима двосекційний тощо малогабаритний	ЩШ-3Д ЩШ-3Д-02 ЩШ-3Д-ОП ЩШ-3Д-ОЛ ЩШ-3ПД 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. Пульт: закритий правий лівий середній з нахиленою 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 нахиленою 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 “Щиты и пульти систем автоматизации технологических процессов. Требования к выполнению, технической документации, предъявляемой заводу-изготовителю”).

Креслення загального вигляду щитів і пултів 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).

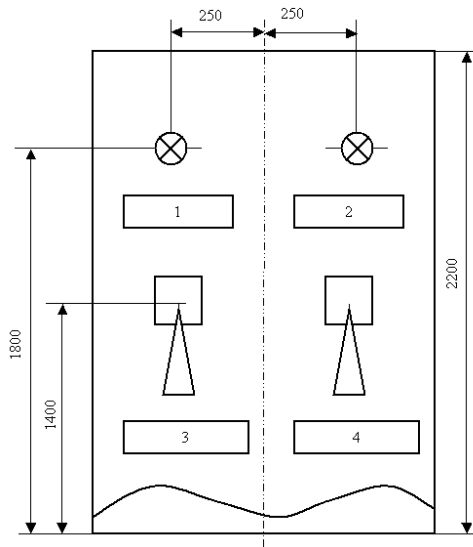


Рис. 7.3. Фрагмент загального вигляду щита керування

-
- 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 проводок”, “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 контура 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
---------------	--------	-----------	---------------	--------	-----------

7.2. 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 замкнутися 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 важкогорючих 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, углів, 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);

Таблиця 7.3 – Межі допустимих значень вібрації

Частота, Гц	Амплітуда, мм	Швидкість коливальних рухів, см/с	Прискорення коливальних 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

- шуму понад тих меж, що вказано в табл. 7.4;

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 комфортних умов для людини
	випадкова дія (одна година і менше)	постійна дія (один місяць)	
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

- дії магнітного поля від електрообладнання та електропроводок з напруженістю понад 400 В/м.

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 направлені 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 розрізнятися, – не більш як 2–4 м; мнемосхеми – 4–5 м.

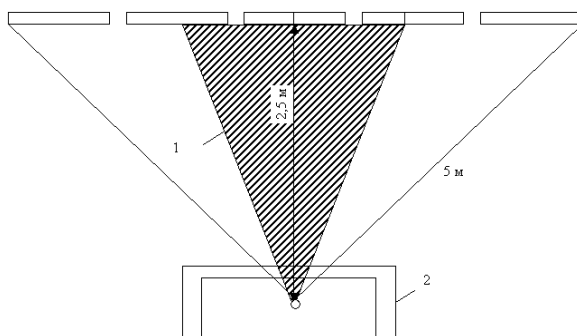


Рис. 7.4. Розташування стола оператора в щитовому приміщенні:
1 – сектор найкращого огляд; 2 – стіл оператора

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 , °C	ϕ , %	v^* , м/с, не більше	t , °C	ϕ , %	v^* , 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 електропровідними; 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/м³.

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.

7.3. 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)

напрямок 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 $\alpha = 25'$; для символів складної конфігурації з деталями всередині $\alpha = 35'$; для найменших деталей складних символів $\alpha = 60'$; оптимальний розмір символу, які забезпечує швидке зчитування, відповідає $\alpha = 40'$);

- 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 (пульта) 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, вимірвальних 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?

8. РОЗРАХУНКИ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Системи електрифікації та автоматизації сільськогосподарського призначення експлуатуються в особливих виробничих умовах: підвищена вологість, наявність агресивного середовища, складні температурні режими, вібрація та ін. Це накладає на них підвищені вимоги щодо надійності та відповідності вимогам технологів, оскільки вказані системи обслуговують біологічні об'єкти.

8.1. Розрахунок надійності систем електрифікації та автоматизації

Надійність визначають як властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників у заданих межах.

Надійність функціонування окремих елементів всієї системи регламентується ГОСТ 27.002-89 “Надежность в технике, термины и определения”.

Основним питанням в теорії надійності є *відмова* – це повна або часткова втрата працездатності та порушення нормального функціонування об'єкта, внаслідок чого його характеристики не відповідають певним вимогам. Відмова завжди розглядається як функція часу, яка з певною ймовірністю може існувати в будь-який момент часу, тобто момент появи відмови може розглядатись як безперервна функція.

Проте одночасно відмова – це величина дискретна.

Розрізняють відмови трьох видів:

- *припрацьовані* є наслідком невідпрацьованих технологій та неякісного контролю виробів у процесі їх виробництва;

- *спрацьовані* є наслідком старіння окремих компонентів виробів;

- *раптові* виникають випадково, виключити їх появу нелегко.

Потрібно розрізняти також *збій* – відмова, що самоусувається. Збій призводить до короткочасного порушення працездатності виробу. Причиною його є перешкоди в лініях зв'язку, джерела живлення тощо.

Згідно з ГОСТ 27.002-89 надійність – це комплексна властивість, яка залежно від призначення об'єкта та умов його експлуатації може включати безвідмовність, довговічність, ремонтоздатність і збережність як для системи, так і для її складових частин.

Безвідмовність – це властивість об'єкта безперервно зберігати працездатність протягом деякого часу (напрацювання).

Довговічність – це властивість об'єкта зберігати працездатність до появи граничного стану за умов встановленої системи технічного обслуговування та ремонтів.

Ремонтоздатність – це пристосованість виробу до попередження та визначення причин виникнення його відмов, пошкоджень та усунень їх наслідків шляхом проведення ремонтів та технічного обслуговування.

Збережність – властивість виробу безперервно зберігати працездатний стан під час зберігання, транспортування та після них.

Крім згаданих понять надійності, які характеризують властивості об'єкта, є поняття, що визначають стан виробу. Серед них: справний і несправний, граничний, пошкодження, відмови (про відмову згадувалось раніше).

Справний стан – це такий, за якого виріб відповідає всім вимогам, що встановлюються нормативно-технічною документацією, а *несправний* – коли виріб не відповідає хоча б одній вимозі.

Працездатний (або *непрацездатний*) стан характеризується здатністю (або нездатністю) виробу виконувати задані функції із збереженням значень заданих параметрів згідно з нормативно-технічною документацією.

Граничний стан – це такий, за якого подальша експлуатація виробу має бути припинена через порушення вимог безпеки, відхилень параметрів за певні межі, зниження ефективності експлуатації нижче допустимої, а також через потребу проведення

середнього або капітального ремонтів. Признаки (критерії) межового стану встановлюються нормативно-технічною документацією на даний виріб.

Пошкодженням називають подію, яка полягає в порушенні справності виробу через вплив зовнішніх дій, які перевищують рівні, що встановлюються нормативно-технічною документацією. Пошкодження може бути суттєвим, спричиняючи порушення працездатності і несуттєвим, за якого працездатність виробу зберігається.

Кількісними показниками надійності є такі: ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, напрацювання на відмову, середній термін служби, середній час відновлення, середній строк зберігання, коефіцієнт готовності об'єкта та ін.

Ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$ – це ймовірність того, що в заданому інтервалі часу при заданих режимах і умовах роботи не виникає відмови виробу. Ймовірність безвідмовної роботи – це статистичний показник, що визначається за формулами:

$$p(t) = N(t)N_n, \quad (8.1)$$

де $N(t)$ – кількість виробів, що безвідмовно пропрацювали до кінця напрацювання; N_n – початкова кількість виробів, або $p(t)$ може бути розрахованим і так:

$$p(t) = e^{-k\lambda t}, \quad (8.2)$$

де k – коефіцієнт, що враховує вплив навколишнього середовища (для нормальних лабораторних умов $k=1$; для стаціонарних установок сільськогосподарського виробництва $k=10...15$; для мобільних агрегатів $k=25..30$); λ – інтенсивність відмови, що наведена в технічній документації на вироби; t – час експлуатації.

Інколи користуються протилежним до ймовірності безвідмовної роботи показником – ймовірністю відмови $g(t)$; при цьому $p(t)+g(t)=1$.

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ визначається як ймовірність виникнення відмови виробу, що не відновлюється (не ремонтується), на одиницю часу після даного моменту часу за умови, що відмова до цього не виникла. Інтенсивність відмови:

$$\lambda(t) = \Delta N(t)/(N_n t), \quad (8.3)$$

де $\Delta N(t)$ – кількість виробів, що відмовили за час t , год; N_n – кількість працездатних виробів на початку інтервалу t ; t – інтервал часу спостереження.

Значення інтенсивності відмов наведено в табл. 8.1.

Для будь-якого виду виробів інтенсивність відмов – це показник, що залежить від тривалості експлуатації. При цьому розрізняють три етапи експлуатації (рис. 8.1):

- перший етап (I) характеризується підвищеною інтенсивністю відмов у процесі припрацювань, що пояснюється виробничими дефектами та помилками, які були допущені під час виготовлення, складання, монтажу;

- другий етап (II) – це нормальна робота; для нього інтенсивність відмов практично незмінна;

- третій етап (III) – це старіння та спрацювання; для нього характерне поступове збільшення інтенсивності відмов.

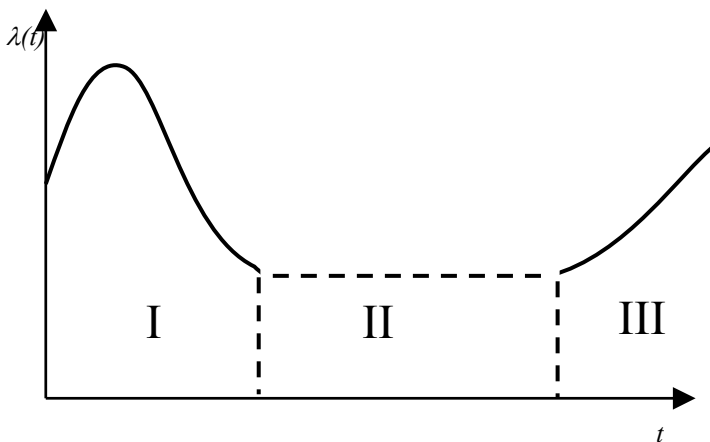


Рис. 8.1 Залежність інтенсивності відмов від часу:
 I – припрацювання; II – нормальна експлуатація;
 III – старіння співвідношенням

Важливим показником надійності виробів є *середнє напрацювання на відмову*:

$$T_{сep} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (8.4)$$

де t_i – час напрацювання до відмови i -го виробу; n – кількість виробів, що відмовили.

Таблиця 8.1 – Інтенсивність відмови для деяких виробів

Найменування виробу	Середнє значення інтенсивності відмов $10^{-6}C/год^{-1}$	Найменування виробу	Середнє значення інтенсивності відмов $10^{-6}C/год^{-1}$
1. Теплові вимикачі	0,1375	9. Конденсатори:	
2. Діоди:		паперові до 600 В	0,025
германієві	0,3	паперові > 600 В	0,09
кремнієві	0,2	керамічні	0,100
селенові	0,2	скляні	0,06
карбідно-кремнієві	0,550	фарфорові	0,09
3. Резистори:		електролітичні	0,135
вугільні	0,043	10. Запобіжники	0,5
композиційні	0,053	11. Трансформатори:	
металоплівкові	0,04	силові	1,04
плівкові	0,03	імпульсні	0,17
проволочні	0,087	12. Електродвигуни:	
4. Лампи:		змінного струму	5,24
накалювання	0,625	постійного струму	9,36
жевріючого розряду	10,25	13. Регулятор тиску	26
5. Реле:		14. Електричні регулятори	42
загального	0,250	рівня	
призначення		15. Логометри	
потужні	0,300	16. Рівноважені мости	380
із затримкою часу	0,390	17. Потенціометри	105
теплові	0,400		105
часу (електронні)	1,2	18. Прилади систем:	
електромеханічні	0,500	ЭАУС	220
6. Мікрвимикачі	0,250	УСЭППА	5
7. Вимикачі:		“Старт”	45
кнопкові	0,063	19. Виконавчі механізми:	
пакетні	0,175	КДУ	220
кінцеві	0,161	МИМ	110
8. Транзистори:		20. Інтегральні мікросхеми	0,100
кремнієві	0,500	21. Спеціалізована ЕОМ	40
германієві	0,300	22. Тригер на інтегральних	0.100
		схемах	
		23. Батарея акумуляторна	1,4
		24. Муфти	0,6
		електромагнітні	

Зрозуміло, що чим більша кількість виробів випробовувалась, тим точніше знаходиться середнє напрацювання. З інтенсивністю відмов воно пов'язане співвідношенням:

$$T_{cee} = 1/\lambda. \quad (8.5)$$

Для виробів, що відновлюються, використовують показники безвідмовності: параметр потоку відмов, напрацювання на відмову, середній час відновлення та коефіцієнт готовності.

Параметр потоку відмов $\omega(t)$ – середнє число відмов виробу, що відновлюється, за одиницю часу, що береться для даного інтервалу часу:

$$\omega(t) = \Delta N / (N_n t). \quad (8.6)$$

Як видно, за структурою залежність (8.6) повторює вираз (8.3).

Напрацювання на відмову T_o – це середній час напрацювання виробу, що відновлюється, між відмовами (без врахування часу, що витрачається на відновлення виробу):

$$T_o = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n}, \quad (8.7)$$

де n – кількість відмов виробу за час спостереження; t_i – час справної роботи виробу між $i-1$ і i -ю відмовами.

Середній час відновлення T_g – це середній час, що витрачається на відновлення виробу після відмови, включаючи пошуки причини відмови. Його можна одержати за формулою:

$$T_g = \frac{\sum_{i=1}^m \tau_i}{m}, \quad (8.8)$$

де m – кількість виробів, що відновлюється; τ_i – тривалість відновлення i -го виробу.

Коефіцієнт готовності K_r – це комплексний показник надійності, який відображає ймовірність того, що виріб буде працездатним у будь-який момент часу, крім періодів, що плануються (у ці періоди не передбачається використання виробу за призначенням). Коефіцієнт готовності:

$$K_r = T_o / (T_o + T_g). \quad (8.9)$$

Ймовірність безвідмовної роботи автоматичної системи залежить від надійності її елементів, структурної схеми їх з'єднань та

резервування.

Структурні схеми з'єднань елементів поділяють на три типи (визначаючи $p(t)$, вважаємо, що $\lambda(t)=\text{const}$):

- система з послідовним з'єднанням n елементів (працездатна лише у разі справності всіх її складових елементів); ймовірність безвідмовної роботи:

$$p(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^n k_i t}, \quad (8.10)$$

де $P_i(t), k_i$ – ймовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов i -го елемента;

- система з паралельним з'єднанням m елементів; у цьому разі ймовірність безвідмовної роботи:

$$p(t) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)]; \quad (8.11)$$

- змішане з'єднання n послідовних і m паралельних елементів; ймовірність безвідмовної роботи:

$$p(t) = \prod_{i=1}^n \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_j(t)] \right\}. \quad (8.12)$$

За всіх умов, коли результуюча надійність об'єкта буде менша від заданої технічними вимогами, використовують резервування як схемний метод підвищення надійності.

Є кілька методів структурного резервування: навантажене (паралельне з'єднання однотипних елементів); резервування у разі двох видів відмов (обрив і коротке замикання).

У практиці проектування найпоширеніший метод навантаженого резервування. Якщо резервування будь-якого вузла виконано m елементами, то результуюча ймовірність безвідмовної його роботи у разі ідентичності цих m елементів матиме вигляд:

$$p_{\text{рез}}(t) = 1 - (1 - e^{-k\lambda t})^m. \quad (8.13)$$

Приклад 8.1. На рис. 8.2, а зображено принципову електричну схему керування конвеєром. Задана її ймовірність безвідмовної роботи $P_3(t) = 0,96$. Необхідно розрахувати дійсну ймовірність безвідмовної роботи і за потребою застосовувати метод навантаженого резервування.

Аналізуючи схему бачимо, що всі її елементи можна розбити на

три групи: електромеханічні реле, механічні контакти, кнопка “Пуск”. Інтенсивності їх відмов та результуючої наведено в табл. 8.2. Отже, результуюча інтенсивність відмови всіх елементів буде становити:

$$\lambda_p = (3,0 + 2,25 + 0,063)10^{-6} = 5,313 \cdot 10^{-6}, \text{ год}^{-1}$$

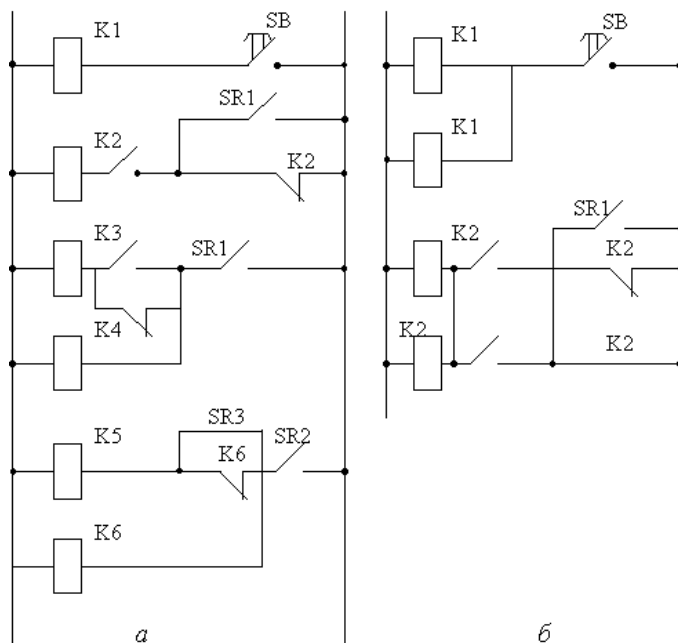


Рис. 8.2. Принципова електрична схема:
a – початкова; *б* – після резервування її елементів

Таблиця 8.2 – Інтенсивності відмов елементів схеми

Найменування елемента	Кількість	Інтенсивність відмови елемента, 10^{-6} год^{-1}	Результуюча інтенсивність, 10^{-6} год^{-1}
1. Електромеханічні реле	6	0,5	3,0
2. Механічні контакти	9	0,25	2,25
3. Кнопка “Пуск”	1	0,063	0,063

Нехай термін експлуатації системи становитиме $i = 10 \cdot 10^3$ год, тобто результуючу ймовірність безвідмовної роботи системи визначимо за виразом (8.10):

$$p_{\text{рез}}(1000) = e^{-1,5,313 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,951.$$

Видно, що $p_3(i) = 0,96 < p_{\text{рез}} 0,951$. Щоб підвищити надійність розглядуваної застосовуємо метод навантаженого резервування. Резервувати будемо не всю схему, а лише її частину, що складається із елементів K_1 та K_2 (до уваги беруться контакти, котушки цих елементів).

На підставі формули (8.10) матимемо:

$$p_3(t) = p_1(t) \cdot p_2(t), \quad (8.14)$$

де $p_1(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи схеми, що резервується; $p_2(t)$ – те саме, але тієї частини схеми, що резервуванню не підлягає.

Аналізуючи схему, знаходимо:

$$p_2(t) = e^{-1 \cdot (4 \cdot 0,5 + 7 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,063) \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,961.$$

Тоді з виразу (8.14):

$$p_1(t) = p_3(t) / p_2(t) = 0,96 / 0,961 = 0,998.$$

Пам'ятаючи, що навантажене резервування – це паралельне з'єднання однотипних елементів, та на підставі формули (8.13) матимемо:

$$0,998 = 1 - \left(1 - e^{-1 \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-4}}\right)^m,$$

$$m = \frac{\log(1 - 0,998)}{\log\left(1 - e^{-1 \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-4}}\right)} \approx 2,$$

де $\lambda_1 = (2 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,25) \cdot 10^{-6} = 1,25 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹ – сумарна інтенсивність відмов елементів тієї частини схеми, що підлягає резервуванню.

Отже, досить двох елементів (для K_1 та K_2), з'єднаних паралельно, щоб забезпечити задану надійність для всієї схеми (частина схеми, що резервується, наведено на рис. 8.2, б).

8.2. Розрахунок стійкості та якості систем автоматичного керування

Спроектована система автоматичного керування має бути, по-перше, стійкою, а по-друге, забезпечувати вимоги технологів. Відповідність системи цим вимогам визначається за перехідним процесом, який характеризується, як відомо, такими показниками: динамічним відхиленням, статичною похибкою, перерегулюванням, часом регулювання та ін.

Для лінійних систем стійкість здебільшого дістають за критеріями Гурвіца, Михайлова або Найквіста [2]. Показники якості перехідного процесу розраховують, будуючи перехідний процес методом Солодовніка [2] або безпосередньо розв'язуючи диференціальне рівняння, яке описує динамічні властивості всієї системи. При цьому користуються й числовими методами (наприклад, Ейлера або Рунге-Кута). За умов, що до складу системи входить ланка чистого запізнення, на підставі ряду Пада, матимемо:

$$e^{-p\tau} = (1 - 0,5p\tau)/(1 + 0,5p\tau). \quad (8.15)$$

Для позиційних систем, як уже зазначалось, аналіз якості перехідного процесу проводять за допомогою методів Гольдфарба або припасовувань. На відміну від методу Гольдфарба метод припасовувань є більш універсальний і може бути використаний практично для всіх об'єктів. Перехідний процес слід розраховувати за формулами, що наведені у таблиці 4.

Стійкість замкнутих цифрових систем визначається коренями характеристичного рівняння. Так, для стійкої системи корені характеристичного рівняння (знаменника передаточної функції замкненої системи, привірного до нуля):

$$I + W(z) = 0, \quad (8.16)$$

мають міститися всередині кола одиничного радіуса, тобто бути за модулем менше, ніж одиниця:

$$|z_i| < 1, \quad (8.17)$$

де $i=1,2,\dots,K$; K – порядок знаменника передаточної функції замкненої системи.

Доцільно, під час визначення стійкості цифрової системи перейти від комплексної величини z до комплексної величини ω :

$$W = (z - 1)/(z + 1). \quad (8.18)$$

Ця операція відображає внутрішню частину круга одиничного радіуса на ліву половину ω – площини (рис. 8.3), що дає змогу використовувати відомі алгебраїчні критерії стійкості для характеристичного рівняння:

$$1 + W[(1 + \omega)/(1 - \omega)] = 0. \quad (8.19)$$

Можливе також використання критерію стійкості Найквіста в його звичайному формулюванні. З цією метою можливе використання як частотних передаточних функцій розімкненої системи, здобутих внаслідок підстановки $z = e^{j\omega T}$, так і частотних передаточних функцій із

використанням псевдочастоти $W^*(j\lambda) = W \left[\frac{1 + j \frac{\lambda T}{2}}{1 - j \frac{\lambda T}{2}} \right]$.

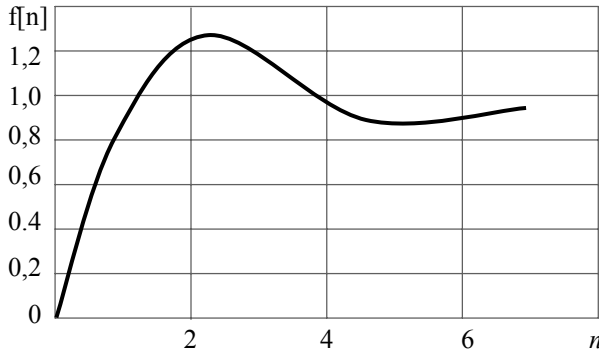


Рис. 8.3. Перехідний процес у цифровій системі

У цьому разі в передаточній функції $W(z)$ проводиться заміна

$$Z = \frac{1 + j \frac{\lambda}{T}}{1 - j \frac{\lambda}{T}}. \quad \text{Як і для лінійних систем, амплітудно-фазова}$$

характеристика на комплексній площині, яка будується за функцією $W(e^{j\omega T})$ або $W^*(j\lambda)$, не повинна охоплювати точку $(-1, j0)$. Отже, в замкненому стані система буде стійкою.

Приклад 8.2. Замкнена цифрова система має характеристичне рівняння $Z^2 + A \cdot Z + B = 0$. Визначити стан системи (стійка чи нестійка).

Скористаємось білінійним перетворенням, згідно з яким:

$$\begin{aligned} Z &= (1 + \omega)/(1 - \omega); \\ [(1 + \omega)/(1 - \omega)]^2 + A(1 + \omega)/(1 - \omega) + B &= 0; \\ (1 + A + B)\omega^2 + 2(1 - B)\omega + 1 - A + B &= 0. \end{aligned} \quad (8.21)$$

Щоб корені рівняння (8.6) містились у лівій півплощині, потрібно забезпечити додатність усіх його коефіцієнтів, тобто умови стійкості системи є такі:

$$1 + A + B > 0; \quad 1 - B > 0; \quad 1 - A + B > 0. \quad (8.22)$$

Значення A і B залежить від періоду дискретності та параметрів настройки цифрового регулятора дає змогу в кінцевому випадку побудувати межу стійкості для системи, що розглядається.

Якість функціонування цифрових систем можна оцінити, проаналізувавши перехідний процес, що будується за передаточною функцією замкненої системи $W(z)$. Цю побудову можна провести, розклавши цифрову передаточну функцію в ряд Лорана:

$$W(z) = C_0 C_1 Z^{-1} + C_2 Z^{-2} + \dots \quad (8.23)$$

Розкладання в ряд Лорана можна здійснювати різними методами. Найкращим, на наш погляд, для дробно-раціональних функцій є метод ділення чисельника на знаменник.

Із основного рівняння відомо, що передаточну функцію можна представити як:

$$W(Z) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] Z^{-n} = f[0] + f[1] Z^{-1} + f[2] Z^{-2} + \dots, \quad (8.24)$$

де $f[n]$ – гратчаста функція (точніше її ордината на n -му такті).

Якщо співставити вирази (8.8) і (8.9), то матимемо:

$$f[0] = C_0; \quad f[1] = C_1; \quad f[2] = C_2 \text{ тощо.}$$

Тобто, коефіцієнти ряду Лорана відповідають значенню ординат гратчастої перехідної функції 1, 2 такту.

Приклад 8.3. Побудувати перехідний процес у замкненій цифровій системі, якщо передаточна функція має вигляд:

$$W(Z) = 0,632Z^2 / (Z^3 - 1,736Z^2 + 1,104Z - 0,368).$$

Розкладемо цифрову передаточну функцію в ряд Лорана, поділивши чисельник на знаменник:

$$\begin{array}{r} 0,32Z^2 \\ \underline{0,632Z^2 - 1,097Z + 0,698 - 0,233Z^{-1}} \\ 1,097Z - 0,698 + 0,233Z^{-1} \\ \underline{1,097Z - 1,904 + 1,211Z^{-1} - 0,404Z^{-2}} \\ 1,206 - 0,978Z^{-1} + 0,404Z^{-2} \\ \underline{-1,206 - 2,904Z^{-1} + \dots} \end{array} \left| \frac{Z^3 - 1,736Z^2 + 1,104Z - 0,368}{0,632Z^{-1} + 1,097Z^{-2} + 1,206Z^{-3}} \right.$$

Отже, ряд Лорана для даного прикладу має вигляд:

$$W(z) = 0,632z^{-1} + 1,097z^{-2} + 1,206z^{-3} + 1,102z^{-4} + 1,01z^{-5} + 0,972z^{-6} + 0,992z^{-7} + \dots$$

Перехідний процес для зазначеної системи наведено на рис. 8.3.

8.3. Економічне обґрунтування проєктів електрифікації та автоматизації

Проєкт електрифікації та автоматизації технологічних процесів має забезпечувати збільшення обсягу виробництва продукції, продуктивності праці, зменшення енергомісткості, собівартості продукції та терміну окупності. Ефективність електрифікації та автоматизації оцінюють відповідними показниками.

Узагальнюючим показником ефективності капітальних вкладень у розвиток електрифікації та автоматизації є зведені розрахункові витрати, які враховують експлуатаційні витрати і частку капітало-вкладень, що припадає на один рік. *Зведені витрати* визначають за формулою:

$$B_{зв} = C + E_n K, \quad (8.25)$$

де $B_{зв}$ – зведені витрати, грн./рік; C – річні експлуатаційні витрати, грн./рік; K – капітальні витрати, грн.; E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, 1/рік.

Інколи доцільно використовувати показник *питомих зведених витрат* (на одиницю продукції), грн./(рік·ц):

$$B_{зв} = B_{зв}/Q, \quad (8.26)$$

де Q – річне виробництво продукції, ц.

Капітальні витрати складаються: з вартості засобів електрифікації та автоматизації K_3 , з урахуванням їх доставки, зберігання і монтажу; витрат на модернізацію діючого виробництва K_m , пов'язану із здійсненням проекту електрифікації, та автоматизації процесів; вартості будівництва та реконструкції приміщень K_n внаслідок реалізації проекту; залишкової вартості K_o основних засобів, які підлягають ліквідації при впровадженні проекту, за вирахуванням вартості K_p , здобутої від реалізації частини ліквідованих основних засобів. Отже,

$$K = K_3 + K_m + K_n + K_o - K_p. \quad (8.27)$$

Річні експлуатаційні витрати складаються з витрат на заробітну плату обслуговуючого персоналу C_3 , амортизаційних відрахувань C_a , витрат на поточний ремонт засобів електрифікації і автоматизації C_p , витрат на оплату електроенергії C_e і паливно-мастильних матеріалів $C_{пм}$, витрат на допоміжні матеріали C_d :

$$C = C_d + C_a + C_p + C_e + C_{пм} + C_3. \quad (8.28)$$

Річний фонд заробітної плати обслуговуючого персоналу дістають за формулою:

$$C_3 = NZZ_{зм}T + H, \quad (8.29)$$

де N – кількість робітників в одній зміні; Z – кількість змін роботи на добу; $Z_{зм}$ – середня заробітна плата робітника за зміну; T – річна кількість робочих днів; H – нарахування на основний фонд заробітної плати (соцстрах, відпусток тощо). *Амортизаційні відрахування* за рік знаходять за формулою:

$$C_a = \frac{C_b A}{100}, \quad (8.30)$$

де C_b – балансова вартість засобів електрифікації та автоматизації, грн.; A – річна норма амортизації, яку беруть у розмірі 14–15 %.

Витрати на поточний ремонт і технічне обслуговування в розмірі 14...18% від балансової вартості засобів електрифікації та автоматизації.

Вартість електроенергії визначають за її витратою та тарифом на оплату 1 кВт · год. Витрати коштів на паливно-мастильні матеріали розраховують окремо для різних видів пального і мастил з урахуванням обсягів їх споживання та відповідних цін. Витрати на допоміжні матеріали орієнтовно беруть у розмірі 1 % від загальної суми експлуатаційних витрат.

Після розрахунків зведених витрат для різних варіантів проектів

електрифікації та автоматизації вибирають варіант із мінімальною величиною зведених витрат, тобто:

$$B_{зв} = C + E_n K \rightarrow \min. \quad (8.31).$$

Слід зазначити, що крім показника зведених витрат, для оцінки технічних рішень застосовують ще такі економічні показники: підвищення продуктивності праці, зниження трудомісткості виробництва продукції та зниження її собівартості, прибуток, рентабельність, термін окупності капіталовкладень та ін.

Підвищення продуктивності праці, відсоток, визначається:

$$P_T = \frac{3_{T1} - 3_{T2}}{3_{T1}} \cdot 100, \quad (8.32)$$

де 3_{T1} , 3_{T2} – відповідно існуючі та перспективні витрати праці на одиницю продукції, люд.-год/т.

Зниження трудомісткості виробництва продукції внаслідок впровадження проекту електрифікації і автоматизації можна визначити за формулою:

$$E_T = (3_{T1} - 3_{T2}) \cdot Q_n, \quad (8.33)$$

де E_T – річна економія витрат праці, год; Q_n – кількість продукції, що вироблена протягом року, т.

Собівартість продукції грн./т,

$$C_g = \frac{\sum 3_i}{\Pi}, \quad (8.34)$$

де $\sum 3_i$ – сума всіх витрат на виробництво продукції, грн.; Π – кількість продукції, т.

Сумарні витрати на виробництво продукції складаються з затрат на оплату праці персоналу, амортизацію, поточний ремонт і технічний огляд обладнання та технічних засобів, водопостачання, пальне і електроенергію. Сюди ж включається вартість кормів, насіння, добрив, отрутохімікатів та ін, а також загальновиробничі і загальногосподарські витрати. Із суми витрат вираховують вартість побічної продукції та відходів виробництва, що використовуються (гній, послід, рідкі стоки тощо).

Зниження собівартості, %,

$$\Delta C_g = \frac{C_{g1} - C_{g2}}{C_{g1}} \cdot 100, \quad (8.35)$$

де C_{g1} , C_{g2} – відповідно існуюча та проектна собівартість, грн.
Прибуток внаслідок впровадження нової техніки, грн.

$$П = Ц - C_v, \quad (8.36)$$

де $Ц$ – ціна всієї продукції, що реалізується, грн.; C_v – собівартість всієї продукції, грн.

Рентабельність виробництва, %,

$$P = \frac{П_p}{C_v} \cdot 100. \quad (8.37)$$

Термін окупності капіталовкладень визначається діленням загальних капіталовкладень на величину чистого доходу; чистий дохід за рік, грн., складається з економії зарплати, прибутку внаслідок збільшення продукції та поліпшення її якості за виключенням річних експлуатаційних витрат, тобто:

$$Ч = E_{з.п.} + E_{п.п.} + E_{я.п.} - C, \quad (8.38)$$

де $E_{з.п.}$ – економія зарплати; $E_{п.п.}$ – прибуток внаслідок збільшення продукції; $E_{я.п.}$ – прибуток внаслідок поліпшення якості продукції; C – річні експлуатаційні витрати. *Річний економічний ефект* внаслідок впровадження нової техніки:

$$E_p = (\epsilon_{np1} - \epsilon_{np2})Q, \quad (8.39)$$

де ϵ_{np1} , ϵ_{np2} – відносні наведені витрати на одиницю продукції до і після впровадження проекту відповідно; Q – річний обсяг виробництва продукції.

Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення терміну “Надійність”?
2. Які розрізняють відмови роботи електрообладнання?
3. Дайте визначення терміну “Безвідмовність”?
4. Імовірність безвідмовної роботи?
5. Які ви знаєте етапи експлуатації електрообладнання?
6. Дайте визначення терміну “Середній час відновлення”?
7. Стійкість та якість систем автоматичного керування?
8. Дайте визначення терміну “Капітальні витрати”?
9. Дайте визначення терміну “Собівартість продукції”?
10. Дайте визначення терміну “Рентабельність”?
11. Дайте визначення терміну “Термін окупності”?
12. Дайте визначення терміну “Річний економічний ефект”?

Позначення конструкторських документів

Клас 1	Тип 2	Вид 3	
2 – Прилади і групи	2.00 – Складні і комбіновані	2.000	Передавачі та приймачі
		2.002	Підсилювачі і підсилювальні пристрої
		2.008	Перетворювачі
		2.009	Інші
	2.01 – Передавачі	2.010	Частотної модуляції
		2.016	Імпульсних сигналів
		2.019	Інші
	2.03 – Підсилювачі	2.030	Високої частоти, НВЧ
		2.032	Низької частоти і постійного струму
		2.039	Інші
	2.06 – Радіотехнічні	2.062	Контури
		2.067	Фільтри
		2.069	Блоки комбіновані
	2.08 – Радіотехнічні	2.087	Блоки живлення
		2.089	Інші
	2.21 – Радіотехнічні	2.210	Генератори синусоїдальних напруг
	2.22 – Радіотехнічні	2.222	Блоки напівпровідникових приладів
	2.25 – Радіотехнічні	2.250	Фільтри
		2.259	Блоки комбіновані
	2.89 – Різного призначення	2.893	Пристрої медичні
2.899		Інші	
2.93 – Пристрої вакуумні, пневматичні, гідравлічні	2.920	Інші	
	2.933	Пристрої медичні	
	2.935	Пристрої біологічні	
3 – Прилади і групи	3.11 – Генератори	3.110	Постійного струму до 0,5 кВт
		3.117	Високої частоти
		3.119	Інші
	3.29 – Різного призначення	3.293	Пристрої медичні

Продовження додатка А

1	2	3	
	3.45 – Набори елементів (матриці)	3.450	Резисторів
		3.452	Конденсаторів
		3.454	Діодів
		3.456	Транзисторів
		3.458	Комбіновані
	3.95 – Пристрої медичні, тренувальні	3.950	Пристрої медичні оптико-механічні
	3.957	Пристрої тренувальні	
	3.959	Інші	
4 – Прилади, групи і комплекти	4.12 – Шасі, стінки, кришки, щити	4.120	Шасі приладів, блоків механізмів
	4.17 – Комплекти упаковок. Тара	4.170	Комплекти упаковок
		4.177	Таблиці, графіки, паспорти, схеми та ін.
4.7 – Трансформатори, дроселі, індуктивності та ін.			
4.85 – Кабелі з'єднуючі	4.858	Загального призначення	
	4.859	Інші	
4.86 – Проводи і шнури з'єднувальні	4.860	Шнури	
	4.863	Проводи, джгути (проводів)	
	4.869	Інші	
4.93 – Комплекти ізоляційні і монтажні	4.930	Монтажні	
	4.939	Інші	
5 – Вузли	5.32 – Електроди	5.327	Резонаторів і елементів п'єзо кристалічних
		5.328	Напівпровідникових
		5.329	Інші
	5.40 – Радіотехнічні	5.401	Блоки комбіновані
	5.42 – Радіотехнічні	5.422	Блоки напівпровідникових приладів
	5.44 – Пристрої електротехнічні	5.443	Пристрої медичні
	5.97 – Пристрої медичні, тренувальні	5.970	Пристрої медичні оптико-механічні
		5.979	Інші
6 – Вузли	6.79 – Кабелі, проводи, шнури	6.790	Проводи, шнури, джгути
	6.81 – Пояснювальні і вказівні	6.810	Описи, таблиці, графіки, інструкції

Продовження додатка А

1	2	3	
		6.812	Паспорти, формуляри
		6.814	Схеми (неелектричні)
		6.819	Інші
7 – Деталі	7.07 – Електро- і радіоприладів	7.070	Екрани
		7.079	Інші
	7.10 – Електро- і радіоприладів	7.100	Плати з друкованими схемами
		7.102	Плати з друкованим монтажем
	7.16 – Електро- і радіоприладів	7.161	Плати друковані
	7.18 – Різного призначення	7.180	Деталі пристроїв медичних
	7.34 – З напівпровідникових матеріалів і металічних сплавів	7.340	Пластини
		7.343	Електроди
	7.40 – Металічні	7.400	Виводи
	7.76 – Кабелі, проводи	7.760	Проводи
		7.762	Шнури
		7.69	Інші
	7.80 – Корпуси, каркаси	7.800	Корпуси
		7.804	Каркаси
	7.81 – Основи, плати	7.810	Основи
		7.814	Плати
7.817		Плати для друкованого монтажу	
7.99 – Різного призначення			
8 – Деталі	8.60 – Металоконструкцій	8.600	Планки, підкладки, прокладки
	8.61 – Металоконструкцій	8.610	Пластини, смуги, стрічки
		8.619	Інші
	8.70 – Стойки, ніжки	8.700	Стойки
		8.703	Ніжки
	8.99 – Різного призначення	8.991	Інші

Плавкі запобіжники серій ПРС та ПН-2

Тип	Номинальні сили струму	Номинальні сили струму
ПРС-6	6	1;2;4;6
ПРС-25	25	4; 6; 10; 16; 20; 25
ПРС-63	63	20; 25; 40; 63
ПРС-100	100	40; 63; 80; 100
ПН2-100	100	31; 5; 40; 50; 63; 80; 100
ГШ2-250	250	80; 100; 125; 160; 200; 250
ПН2-400	400	200; 250; 315; 350; 400
ПН2-600	600	315; 400; 500; 600

Пускачі серії ПМЛ (ТУ У 3.11-05814256-097-97)

ПМЛ – X X X X X X X X X X
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

1 – умовне позначення серії;

2 – величина пускача за номінальним струмом: 1 – 10 А, 16 А; 2 – 25 А; 3 – 40 А; 4 – 63 А, 80 А; 5 – 125 А; 6 – 160 А;

3 – виконання пускача за призначенням та наявністю теплового реле: 1 – нереверсивний без теплового реле; 2 – нереверсивний з тепловим реле; 5 – реверсивний без теплового реле з механічним блокуванням для ступеня захисту IP00, IP20 і з електричним та механічним блокуванням для ступеня захисту IP40, IP54; 6 – реверсивний з тепловим реле і електричним та механічним блокуванням; 7 – з перемиканням схеми зірка-трикутник;

4 – виконання за ступенем захисту, наявністю кнопок, сигнальних ламп: 0 – IP00, без кнопок; 1 – IP54, без кнопок (для пускачів без теплового реле) або з кнопкою “Реле” (для пускачів з тепловим реле); 2 – IP54, з кнопками “Пуск” і “Стоп”; 3 – IP54, з кнопками “Пуск” і “Стоп” та сигнальною лампою (виготовляється тільки для напруг 127, 220, 380 В, 50 Гц);

5 – кількість і виконання допоміжних контактів 0 – 1z (у пускачів на 10, 16, 25 і 40 А); 1z+1p (на 40; 63; 80; 125 і 160 А), змінний струм; 1 – 1p (на 10, 16, 25 і 40 А);

Продовження додатка В

- 6 – Д – позначення пускача з номінальним струмом на 16 А – для 1 величини, 80 – для 4 величини, з зменшеними габаритними показниками для 3 величини;
- 7 – М – позначення виконання пускача з можливістю кріплення як на стандартну рейку, так і гвинтами на площині;
- 8 – кліматичне виконання (О, О*, ОМ), за ГОСТ 15150-69;
- 9 – категорія розміщення (2, 4) за ГОСТ 15150-69;
- 10 – виконання за стійкістю проти спрацювання (А – 3, 0 млн. циклів; Б – 1, 5 млн циклів; В – 0, 3 млн циклів).

**Технічні характеристики реле серії РТЛ
(ТУ У 3.11-05814256-99-97)**

Тип реле	Номинальна сила струму реле, А	Номинальна сила струму пускача, А	Діапазон регулювання номінальної сили струму неспрацювання, А	
РТЛ-1001 О4	25	10	0,1...0,17	
РТЛ-1002 О4			0,16...0,26	
РТЛ-1003 О4			0,24...0,4	
РТЛ-1004 О4			0,38...0,65	
РТЛ-1005 О4			0,61...1,0	
РТЛ-1006 О4			0,95...1,6	
РТЛ-1007 О4			1,5...2,6	
РТЛ-1008 О4			2,4...4,0	
РТЛ-1010 О4			3,8...6,0	
РТЛ-1012 О4			5,5...8,0	
РТЛ-1014 О4			7...10	
РТЛ-1016 О4			16	9,5...14
РТЛ-1021 О4				13...19
РТЛ-1016 О4			25	9,5...14
РТЛ-1021 О4	13...19			
РТЛ-1022 О4	18...25			
РТЛ-2053 О4	80	40	25...32	
РТЛ-2055 О4			30...41	
РТЛ-2053К О4			23...32	
РТЛ-2055К О4			30...41	
РТЛ-2055 О4		63	30...41	
РТЛ-2057 О4			38...52	
РТЛ-2059 О4			47...64	
РТЛ-2061 О4		80	54...74	
РТЛ-2061 О4			54...74	
РТЛ-2063 О4			63...86	
РТЛ-2061ДМ			54...74	
РТЛ-2063ДМ			63...86	
РТЛ-3125 О4			160	78...125
РТЛ-3170 О4		105...170		

Автоматичні вимикачі серії ВА51

Тип вимикачів	Номинальна сила струму вимикача, А	Номинальна сила струму розчіплювача максимального струму, А	Кількість полюсів	Сила струму відсічки в кратності від номінального
ВА51-25-34	25	6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	2	10 I _{НОМ.Д}
ВА51-25-34	25	—??—	3	10 I _{НОМ.Д}
ВА51Г-25-34	25	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10;	3	14 I _{НОМ.Д}
ВА51-29-14	63	6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50;	1	(3, 7, 10) I _{НОМ.Д}
ВА51-31-24	100	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	2	(3, 7, 10) I _{НОМ.Д}
ВА51-31-34			3	(3, 7, 10) I _{НОМ.Д}
ВА51Г-31-34			3	14 I _{НОМ.Д}
ВА51-33-24	160	80; 100; 125; 160	2	10 I _{НОМ.Д}
ВА51-33-34			3	10 I _{НОМ.Д}
ВА51Г-33-34			3	14 I _{НОМ.Д}

Шафи серії ПР 8501

Номер схеми	Номінальний струм, А	Номінальний робочий струм, А, для виконання		Кількість вимикачів			Виконання за способом встановлення та захищеністю		
				однополюсних ВА51-31 (6,3-100 А)	триполюсних				
		IP21 УЗ	IP51 УХЛ2, Т2		ВА51-31(6,3-100А)	ВА51-35(100-250А)	начіпне IP21, IP51	підлогове IP21, IP51	утоплене IP21
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Із затискачем на вході									
001	160	128	120	3	-	-	+	-	+
002				6	-	-	+	-	+
003				3	1	-	+	-	+
004				-	2	-	+	-	+
005				12	-	-	+	-	+
006				6	2	-	+	-	+
007				-	4	-	+	-	+
008				18	-	-	-	-	+
009				12	2	-	+	-	+
010				6	4	-	+	-	+
011				-	6	-	+	-	+
012	250	200	188	12	-	-	+	-	+
013				6	2	-	+	-	+
014				-	4	-	+	-	+
015				18	-	-	+	-	+
016				12	2	-	+	-	+
017				6	4	-	+	-	+
018				-	4	-	+	-	+
019				24	-	-	+	-	+
020				18	2	-	+	-	+
021				12	4	-	+	-	+
022				6	6	-	+	-	+
023				-	8	-	+	-	+
024				30	-	-	+	-	+
025				24	2	-	+	-	+
026				18	4	-	+	-	+
027				12	6	-	+	-	+
028				-	8	-	+	-	+
029				-	10	-	+	-	+

Продовження додатка Е

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
З вимикачами ВА51-33 з номінальним струмом до 160 А на вводі									
045	160	128	120	3	-	-	-	-	+
046				6	-	-	+	+	+
047				3	1	-	+	-	+
048				-	2	-	+	-	+
049				12	-	-	+	-	+
050				6	2	-	+	-	+
051				-	5	-	+	-	+
052				18	-	-	+	-	+
053				12	2	-	+	-	+
054				6	4	-	+	-	+
055				-	6	-	+	-	+
З вимикачами ВА-35 з номінальним струмом до 250 А на вводі									
056	250	200	188	12	-	-	+	-	+
057				6	2	-	+	-	+
058				-	4	-	+	-	+
059				18	-	-	+	-	+
060				12	2	-	+	-	+
061				6	4	-	+	-	+
062				-	6	-	+	-	+
063				24		-	+	-	+
064				18	2	-	+	-	+
065				12	4	-	+	-	+
066				6	6	-	+	-	+
067				-	8	-	+	-	+
068				30	-	-	+	-	+

Додаток Ж

Технічні характеристики конденсаторів серії КМ

Тип	Номінальна напруга, кВ	Номінальна потужність,	Номінальна ємність, мкФ
КМ 1-0,22	0,22	4,5	296
КМ 1-0,3 8	0,38	12	265
КМ2-0,22	0,22	9	592
КМ2-0,38	0,38	24	530

**Технічні характеристики електродвигунів серії АІР
основного виконання ($U_{НОМ} = 380 В$)**

Тип	$P_{НОМ}$, кВт	$n_{н}$, хв. ⁻¹	$I_{н}$, А	ККД, %	$\cos\phi_{НОМ}$	$M_{пуск}/M_{НОМ}$	$M_{МІН}/M_{НОМ}$	$M_{МАКС}/M_{НОМ}$	$I_{пуск}/I_{НОМ}$	Момент інерції ротора, кг·м ² ·10 ⁻³	Маса, кг (ІМ1081)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$n_0 = 3000 \text{ хв}^{-1}$											
АІР50А2УЗ	0,09	2660	0,30	60	0,75	2,2	1,8	2,2	4,5	0,025	2,5
АІР50В2УЗ	0,12	2660	0,39	63	0,75	2,2	1,8	2,2	4,5	0,028	2,8
АІР56А2УЗ	0,18	2730	0,52	68	0,78	2,2	1,8	2,2	5,0	0,42	3,4
АІР56В2УЗ	0,25	2730	0,70	69	0,79	2,2	1,8	2,2	5,0	0,47	3,9
АІР63А2УЗ	0,37	2730	0,91	72	0,86	2,2	1,8	2,2	5,0	0,76	4,7
АІР71А2УЗ	0,75	2820	1,75	78,5	0,83	2,1	1,6	2,2	6,0	0,97	8,0
АІР71В2УЗ	1,1	2800	2,55	79	0,83	2,1	1,6	2,2	6,0	1,1	9,4
АІР80А2УЗ	1,5	2850	3,31	81	0,85	2,1	1,6	2,2	7,0	1,8	12,7
АІР80В2УЗ	2,2	2850	4,63	83	0,87	2,0	1,6	2,2	7,0	2,1	15
АІР90L2УЗ	3,0	2850	6,13	84,5	0,88	2,0	1,6	2,2	7,0	3,5	19
АІР100S2УЗ	4,0	2850	7,94	87	0,88	2,0	1,6	2,2	7,5	5,9	26
АІР100L2УЗ	5,5	2850	10,7	88	0,89	2,0	1,6	2,2	7,5	7,5	31,4
АІР112M2УЗ	7,5	2900	14,8	87,5	0,88	2,0	1,6	2,2	7,5	10	49
АІР132M2УЗ	11	2910	21,1	88	0,90	1,6	1,2	2,2	7,5	23	77,5
АІР160S2УЗ	15	2910	28,5	90	0,89	1,8	1,7	2,7	7,0	39	100
АІР160M2УЗ	18,5	2910	34,5	90,5	0,90	2,0	1,8	2,7	7,0	43	110
АІР180S2УЗ	22	2920	41,5	90,5	0,89	2,0	1,9	2,7	7,0	57	160
АІР180M2УЗ	30	2925	55,5	91,5	0,90	2,2	1,9	3,0	7,5	70	180
АІР200M2УЗ	37	2940	70,6	91,5	0,87	1,6	1,5	2,8	7,0	130	220
АІР200L2УЗ	45	2940	86,5	92	0,88	1,8	1,5	2,8	7,5	140	240
АІР225M2УЗ	55	2940	99,3	92,5	0,91	1,8	1,5	2,6	7,5	220	320
АІР250S2УЗ	75	2940	136	93	0,90	1,8	1,6	3,0	7,5	410	425
АІР250M2УЗ	90	2940	160	93	0,92	1,8	1,6	3,0	7,5	460	455

Продовження додатка К

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$n_0 = 1500 \text{ хв}^{-1}$											
АИР50А4УЗ	0,06	1335	0,27	53	0,63	2,1	1,8	2,2	4,5	0,029	2,6
АИР50В4УЗ	0,09	1335	0,37	57	0,65	2,1	1,8	2,2	4,5	0,033	3,0
АИР56А4УЗ	0,12	1350	0,44	63	0,66	2,1	1,8	2,2	5,0	0,70	3,4
АИР56В4УЗ	0,18	1350	0,63	64	0,68	2,1	1,8	2,2	5,0	0,79	3,9
АИР63А4УЗ	0,25	1320	0,83	68	0,67	2,1	1,8	2,2	5,0	1,2	4,7
АИР63В4УЗ	0,37	1320	1,18	68	0,70	2,1	1,8	2,2	5,0	1,4	5,6
АИР71А4УЗ	0,55	1360	1,69	70,5	0,70	2,3	1,8	2,2	5,0	1,3	8,6
АИР71В4УЗ	0,75	1350	2,14	73	0,73	2,2	1,6	2,2	5,0	1,4	9,4
АИР80А4УЗ	1,1	1395	2,75	75	0,81	2,2	1,6	2,2	5,5	3,2	11,9
АИР80В4УЗ	1,5	1395	3,52	78	0,83	2,2	1,6	2,2	5,5	3,3	13,8
АИР90Л4УЗ	2,2	1400	5,0	81	0,83	2,1	1,6	2,2	6,5	5,6	18,6
АИР100С4УЗ	3,0	1410	6,7	82	0,83	2,0	1,6	2,2	7,0	8,7	23
АИР100Л4УЗ	4,0	1410	8,5	85	0,84	2,0	1,6	2,2	7,0	11	29
АИР112М4УЗ	5,5	1430	11,4	85,5	0,86	2,0	1,6	2,2	7,0	17	49
АИР132С4УЗ	7,5	1440	15,1	87,5	0,86	2,0	1,6	2,2	7,5	28	70
АИР132М4УЗ	11	1450	22,0	87,5	0,87	2,0	1,6	2,2	7,5	40	83,5
АИР160С4УЗ	15	1455	28,5	90	0,89	1,9	1,8	2,9	7,0	78	100
АИР160М4УЗ	18,5	1455	34,9	90,5	0,89	1,9	1,8	2,9	7,0	100	110
АИР180С4УЗ	22	1460	42,5	90,5	0,87	1,7	1,5	2,4	7,0	150	170
АИР180М4УЗ	30	1470	56,9	92	0,87	1,7	1,5	2,7	7,0	190	190
АИР200М4УЗ	37	1470	68,3	92,5	0,89	1,7	1,6	2,7	7,5	280	245
АИР200Л4УЗ	45	1470	83,0	92,5	0,89	1,7	1,6	2,7	7,5	340	270
АИР225М4УЗ	55	1470	101	93	0,89	1,7	1,6	2,6	7,0	510	335
АИР250С4УЗ	75	1480	138	94	0,88	1,7	1,4	2,5	7,5	890	450
АИР250М4УЗ	90	1480	164	94	0,89	1,5	1,3	2,5	7,5	1100	480
АИР280С4УЗ	110	1470	196	93,5	0,91	1,6	1,0	2,2	6,5	2300	594
АИР280М4УЗ	132	1470	229	94	0,93	1,6	1,0	2,2	6,5	2500	752
$n_0 = 1000 \text{ хв}^{-1}$											
АИР63А6УЗ	0,18	860	0,79	56	0,62	2,0	1,6	2,2	4,0	1,8	4,6
АИР63В6УЗ	0,25	860	1,04	59	0,62	2,0	1,6	2,2	4,0	2,2	5,5
АИР71А6УЗ	0,37	915	1,31	65	0,65	2,0	1,6	2,2	4,5	1,7	8,4
АИР71В6УЗ	0,55	915	1,74	68,5	0,70	2,0	1,6	2,2	4,5	2,0	9,9
АИР80А6УЗ	0,75	920	2,26	70	7,2	2,0	1,6	2,2	4,5	3,1	13,5
АИР80В6УЗ	1,1	920	3,05	74	0,74	2,0	1,6	2,2	4,5	4,6	15,3
АИР90Л6УЗ	1,5	925	4,2	76	0,72	2,0	1,6	2,2	6,0	7,3	19
АИР100Л6УЗ	2,2	945	5,6	81	0,74	2,0	1,6	2,2	6,0	13	27,5
АИР112МА6УЗ	3,0	950	7,1	81	0,76	2,0	1,6	2,2	6,0	17	43
АИР112МВ6УЗ	4,0	950	9,2	82	0,81	2,0	1,6	2,2	6,0	21	48
АИР132С6УЗ	5,5	960	12,3	85	0,80	2,0	1,6	2,2	7,0	40	68,5
АИР132М6УЗ	7,5	960	16,5	85,5	0,81	2,0	1,6	2,2	7,0	58	81,5
АИР160С6УЗ	11	970	22,9	88	0,83	2,0	1,6	2,7	6,5	120	100
АИР160М6УЗ	15	970	30,1	88	0,85	2,0	1,6	2,7	6,5	150	120

Продовження додатка К

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
АІР180М6УЗ	18,5	980	37	89,5	0,85	1,8	1,6	2,4	6,5	200	180
АІР200М6УЗ	22	980	44,7	90	0,83	1,6	1,4	2,4	6,5	360	225
АІР200Л6УЗ	30	975	59,6	90	0,85	1,6	1,4	2,4	6,5	400	250
АІР225М6УЗ	37	980	72,7	91	0,85	1,5	1,4	2,3	6,5	610	305
АІР250С6УЗ	45	980	87	92,5	0,85	1,5	1,4	2,3	6,5	1000	390
АІР250М6УЗ	55	980	105	92,5	0,86	1,5	1,4	2,3	6,5	1100	430
АІР280С6УЗ	75	980	137	92,5	0,90	1,3	1,0	2,2	6,5	2900	637
АІР280М6УЗ	90	975	163	93	0,90	1,4	1,0	2,4	6,5	3400	702
АІР315С6УЗ	110	980	195	93	0,92	1,4	1,0	2,3	6,0	4000	847
АІР315М6УЗ	132	980	238	93,5	0,90	1,4	1,0	2,3	6,5	4500	950
$n_0 = 750 \text{ хв}^{-1} = 750 \text{ хв}^{-1}$											
АІР71В8УЗ	0,25	690	1,04	56	0,65	1,8	1,4	1,9	4,0	1,9	7,8
АІР80А8УЗ	0,37	700	1,54	60	0,61	1,8	1,4	1,9	4,0	3,4	13,8
АІР80В8УЗ	0,55	700	2,07	64	0,63	1,8	1,4	1,9	4,0	4,1	15,5
АІР90Л8УЗ	0,75	700	2,47	70	0,66	1,6	1,2	1,7	3,5	6,7	19,7
АІР90ЛВ8УЗ	1,1	700	3,32	72	0,70	1,6	1,2	1,7	3,5	8,6	22,3
АІР100ЛВ8УЗ	1,5	705	4,1	76	0,73	1,6	1,2	1,7	5,5	13	31,3
АІР112МА8УЗ	2,2	710	6,2	76,5	0,71	1,8	1,4	2,2	6,0	17	43,5
АІР112МВ8УЗ	3,0	710	7,8	79	0,74	1,8	1,4	2,2	6,0	25	48,5
АІР132С8УЗ	4,0	715	10,5	83	0,70	1,8	1,4	2,2	6,0	42	68,5
АІР132М8УЗ	5,5	710	13,6	83	0,74	1,8	1,4	2,2	6,0	57	82
АІР160С8УЗ	7,5	725	17,5	87	0,75	1,6	1,4	2,4	5,5	120	100
АІР160М8УЗ	11	725	25,5	87,5	0,75	1,6	1,4	2,4	6,0	150	120
АІР180М8УЗ	15	730	31,2	89	0,82	1,6	1,5	2,2	5,5	230	180
АІР200М8УЗ	18,5	730	39,0	89	0,81	1,6	1,4	2,3	6,0	360	225
АІР200Л8УЗ	22	730	45,8	90	0,81	1,6	1,4	2,3	6,0	400	250
АІР225М8УЗ	30	730	62,2	90,5	0,81	1,4	1,3	2,3	6,0	610	305
АІР250Б8УЗ	37	735	77,9	92,5	0,78	1,5	1,4	2,3	6,0	1100	400
АІР250М8УЗ	45	735	93,6	92,5	0,79	1,4	1,3	2,2	6,0	1200	430
АІР280Б8УЗ	55	725	106	92	0,86	1,4	1,0	2,2	6,0	3200	643
АІР280М8УЗ	75	725	141	93	0,87	1,4	1,0	2,2	6,0	4000	735
АІР315С8УЗ	90	740	173	93	0,85	1,2	1,0	2,2	6,0	4900	927
АІР315М8УЗ	110	740	209	93	0,86	1,2	0,9	2,2	6,0	5800	1001
АІР355С8УЗ	132	735	252	93,5	0,85	1,2	0,9	2,0	6,5	9000	1175
АІР355М8УЗ	160	735	306	93,3	0,85	1,2	0,9	2,0	6,5	10000	1280

**Технічні характеристики електродвигунів серії АІР
сільськогосподарського виконання ($I_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$)**

Тип двигуна	$P_{\text{НОМ}}$, кВт	$\eta_{\text{НОМ}}$, %	$\cos\varphi_{\text{НОМ}}$	Ков- зання, %	$M_{\text{ПУСК}}/$ $M_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{МІН}}/$ $M_{\text{НОМ}}$	$M_{\text{МАКС}}/$ $M_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{ПУСК}}/$ $I_{\text{Н}}$ ом	Маса, кг (ІМ1081)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n_0 = 3000 \text{ хв}^{-1}$									
АІР71А2БСУ2	0,75	78,5	0,83	6,0	2,1	1,6	2,2	6,0	9,6
АІР71В2БСУ2	1,1	79,0	0,83	6,5	2,1	1,6	2,2	6,0	10,4
АІР80А2БСУ2	1,5	81,0	0,85	5,0	2,1	1,6	2,2	7,0	13,3
АІР80В2БСУ2	2,2	83,0	0,87	5,0	2,0	1,6	2,2	7,0	15,9
АІР90Л2БСУ2	3,0	84,5	0,88	5,0	2,0	1,6	2,2	7,0	20,8
АІР100S2БСУ2	4,0	97,0	0,88	5,0	2,0	1,6	2,2	7,5	28,7
АІР100L2БСУ2	5,5	88,0	0,89	5,0	2,0	1,6	2,2	7,5	34,2
$n_0 = 1500 \text{ хв}^{-1}$									
АІР71А4БСУ2	0,55	71,0	0,73	9,5	2,3	1,6	2,4	5,0	9,0
АІР71В4БСУ2	0,75	75,0	0,80	10,0	2,5	1,6	2,6	5,0	10,3
АІР80А4БСУ2	1,1	75,0	0,81	7,0	2,2	1,6	2,2	5,5	13,8
АІР80В4БСУ2	1,5	78,0	0,83	7,0	2,2	1,6	2,2	5,5	15,7
АІР90Л4БСУ2	2,2	81,0	0,83	7,0	2,0	1,6	2,2	6,5	20,2
АІР100S4БСУ2	3,0	82,0	0,83	6,0	2,0	1,6	2,2	7,0	25,8
АІР100L4БСУ2	4,0	85,0	0,86	6,0	2,1	1,6	2,3	6,0	31,1
$n_0 = 1000 \text{ хв}^{-1}$									
АІР71А6БСУ2	0,37	65,0	0,66	8,5	2,0	1,6	2,2	4,5	9,4
АІР71В6БСУ2	0,55	68,5	0,70	8,5	2,0	1,6	2,2	4,5	10,9
АІР80А6БСУ2	0,75	70,0	0,72	8,0	2,0	1,6	2,2	4,5	12,5
АІР80В6БСУ2	1,1	74,0	0,74	8,0	2,0	1,6	2,2	4,6	16,2
АІР90Л6БСУ2	1,5	76,0	0,72	7,5	2,0	1,6	2,2	6,0	20,9
АІР100L6БСУ2	2,2	81,0	0,74	5,5	2,0	1,6	2,2	6,0	29,8
$n_0 = 750 \text{ хв}^{-1}$									
АІР71В8БСУ2	0,25	56,0	0,65	8,0	1,8	1,4	1,9	4,0	9,8
АІР80А8БСУ2	0,37	60,0	0,61	6,5	1,8	1,4	1,9	4,0	15,7
АІР80В8БСУ2	0,55	64,0	0,63	6,5	1,8	1,4	1,9	4,0	15,9
АІР90L8БСУ2	0,75	75,0	0,73	5,5	1,4	1,3	2,0	4,0	20,3
АІР90LV8БСУ2	1,2	77,0	0,72	5,5	1,4	1,4	2,0	4,0	23,8
АІР100L8БСУ2	1,5	74,0	0,73	7,5	1,8	1,4	2,1	3,6	29,5

Продовження додатка Л

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$n_0 = 3000 \text{ хв}^{-1}$									
АИР71А2ЭБСУ2	0,75	78,5	0,83	6,0	2,2	2,1	1,6	6,0	8,9
АИР71В2ЭБСУ2	1,1	79,0	0,83	6,5	2,2	2,1	1,6	6,0	9,7
АИР80А2ЭБСУ2	1,5	81,0	0,85	5,0	2,2	2,1	1,6	7,0	12,7
АИР80В2ЭБСУ2	2,2	83,0	0,87	5,0	2,2	2,0	1,6	7,0	15,0
АИР90L2ЭБСУ2	3,0	84,5	0,88	5,0	2,2	2,0	1,6	7,0	19,2
АИР100S2ЭБСУ2	4,0	87,0	0,88	5,0	2,2	2,0	1,6	7,5	26,0
АИР100L2ЭБСУ2	5,5	88,0	0,89	5,0	2,2	2,0	1,6	7,5	31,5
$n_0 = 1500 \text{ хв}^{-1}$									
АИР71А4ЭБСУ2	0,55	71,0	0,73	9,5	2,4	2,3	1,6	5,0	8,3
АИР71В4ЭБСУ2	0,75	75,0	0,8	10,0	2,6	2,5	1,6	5,0	9,6
АИР80А4ЭБСУ2	1,1	75,0	0,81	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	12,1
АИР80В4ЭБСУ2	1,5	78,0	0,83	7,0	2,2	2,2	1,6	5,5	14,0
АИР90L4ЭБСУ2	2,2	81,0	0,83	7,0	2,2	2,1	1,6	6,5	18,8
АИР100S4ЭБСУ2	3,0	82,0	0,83	6,0	2,2	2,0	1,6	7,0	23,2
АИР100L4ЭБСУ2	4,0	85,0	0,84	6,0	2,2	2,0	1,6	7,0	29,0
$n_0 = 1000 \text{ хв}^{-1}$									
АИР71А6ЭБСУ2	0,37	65,0	0,66	8,5	2,2	2,0	¹⁾⁶ 1,6	4,5	8,6
АИР71В6ЭБСУ2	0,55	68,0	0,70	8,5	2,2	2,0	1,6	4,5	10,1
АИР80А6ЭБСУ2	0,75	70,0	0,72	8,0	2,2	2,0	1,6	4,5	11,9
АИР80В6ЭБСУ2	1,1	74,0	0,74	8,0	2,2	2,0	1,6	4,5	15,4
АИР90L6ЭБСУ2	1,5	76,0	0,72	7,5	2,2	2,0	1,6	6,0	19,2
АИР100L6ЭБСУ2	2,2	81,0	0,74	5,5	2,2	2,0	1,6	6,0	27,1
$n_0 = 750 \text{ хв}^{-1}$									
АИР71В8ЭБСУ2	0,25	61,0	0,60	8,0	1,9	1,8	1,4	4,0	9,1
АИР80А8ЭБСУ2	0,37	60,0	0,61	6,5	1,9	1,8	1,4	4,0	13,6
АИР80В8ЭБСУ2	0,55	64,0	0,63	6,5	1,9	1,8	1,4	4,0	15,3
АИР90L8ЭБСУ2	0,75	75,0	0,73	8,5	2,0	1,4	1,3	4,0	18,9
АИР90LВ8ЭБСУ2	1,1	77,0	0,72	8,5	2,0	1,4	1,4	3,5	22,2
АИР100L8ЭБСУ2	1,5	76,0	0,76	6,0	2,0	1,6	1,5	3,7	27,0

Приклад 1.

Розрахувати параметри настройки П-регулятора на заданий запас стійкості за амплітудою в математичному пакеті Mathcad.

$$C:=0.45$$

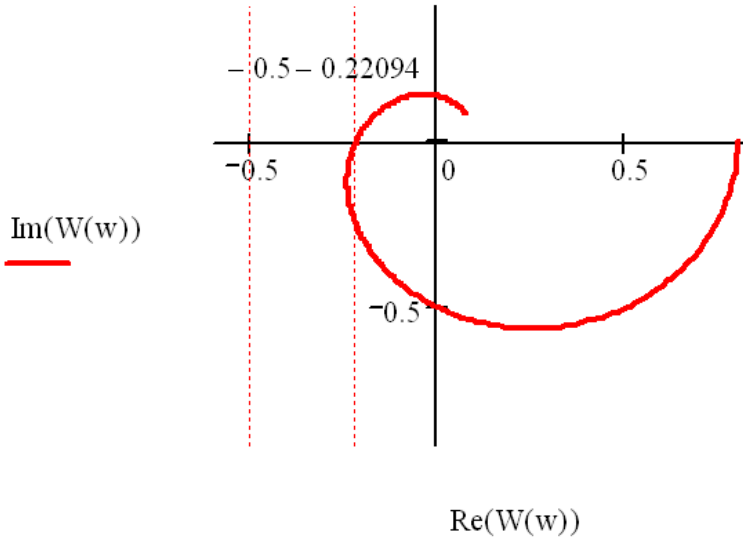
C – показник стійкості за амплітудою.

$$w:=0,0.0001..0.05 \quad i:=1..5 \quad j:=\sqrt{-1}$$

Задана передаточна функція ОУ.

$$W(w):=\frac{0.8 * e^{-80 * j * w}}{(150 * j * w) + 1}$$

Будуємо годограф:



$$K_p := \frac{1-C}{0.22094}$$

K_p – коефіцієнт передачі регулятора.

$$K_p=2.489$$

Приклад 2.

Розрахувати параметри настройки П-регулятора на заданий частотний показник коливальності в математичному пакеті Mathcad.

Будуємо годограф та промінь під кутом β проводимо коло з радіусом r , яке дотикається до догографа та променя. Знаходимо K_p , яке знаходимо за радіусом i частотним показником коливальності.

$a_{x_i} :=$	$a_{y_i} :=$	$b_{x_i} :=$	$b_{y_i} :=$
0	0	-1.145	0
-1	-1.27	-0.4435	-0.55581

$$x := 0, -0.0001 \dots -1.5$$

$$y(x) := \sqrt{0.895^2 - (x + 1.145)^2}$$

$$M := 1.27$$

$$\beta := \text{asin}\left(\frac{1}{M}\right) * \frac{180}{\pi}$$

$$\beta = 51.943$$

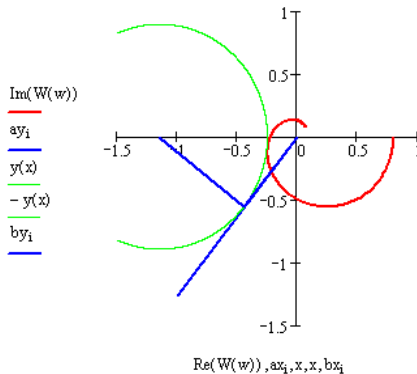
$$r := 0.895$$

M – частотний показник коливальності;

β – кут нахилу променя до осі;

r – радіус кола.

Будуємо годограф та кут нахилу променя до осі:



Визначаємо радіус кола

$$K_p := \frac{M}{M^2 - 1} * \frac{1}{r} \quad K_p = 2.315$$

Приклад 3

Розрахувати параметри настройки ПІ-регулятора за заданим амплітудним показником коливальності в математичному пакеті Mathcad.

$$w:=0,0.0001..0.05 \quad i:=1..12 \quad j:=\sqrt{-1} \quad C:=0.45 \quad M:=1.27 \quad r:=\frac{1-C}{2}$$

$$d:=2*r$$

d – діаметр кола;

r – радіус кола;

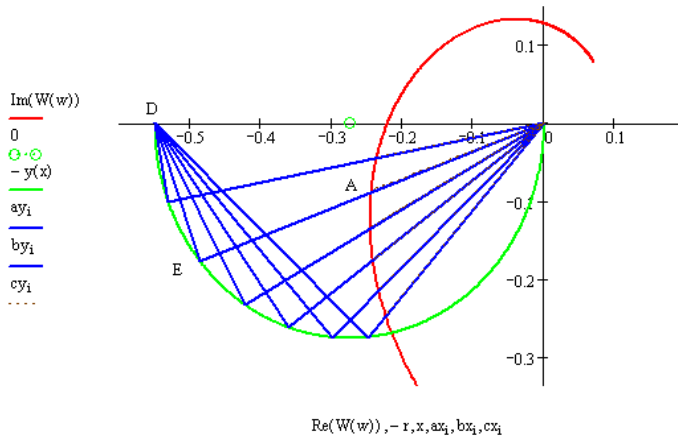
c – показник коливальності.

Задана передоточна функція ОУ:

$$x:=0,-0.001..-d \quad W(w):=\frac{0.8 * e^{-80 * j * w}}{(150 * j * w) + 1} \quad y(x):=\sqrt{r^2 - (x + r)^2}$$

OE		ED		OA	
ax _i :=	ay _i :=	bx _i :=	by _i :=	cy _i :=	cx _i :=
0	0	-0.55	0	0	0
-2.249	-0.27377	-0.249	-0,27377	-0.22398	-0.24547
0	0	-0.55	0	0	0
-0.3	-0.27386	-0.3	-0,27386	-0.23406	-0.21243
0	0	-0.55	0	0	0
-0.361	-0.26121	-0.361	-0,26121	-0.24184	-0.17437
0	0	-0.55	0	0	0
-0.423	-0.23178	-0.423	-0,23178	-0.24566	-0.13271
0	0	-0.55	0	0	0
-0.486	-0.17636	-0.486	-0,17636	-0.24366	-0.0856
0	0	-0.55	0	0	0
-0.531	-0.10044	-0.531	-0,10044	-0.23613	-0.04284

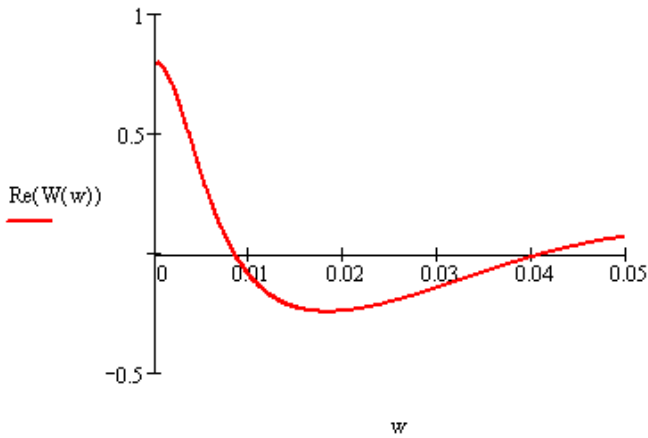
Будуємо годограф, будуємо коло, проводимо декілька відрізків, які відсікають на АФЧХ відрізки ОА на колі ОЕ та ЕД



Визначаємо довжину відрізків ОА, ОЕ, ЕД.

OA	ED	OE	Re(W)
$\sqrt{(cx_i)^2 + (cy_i)^2}$	$\sqrt{d^2 - [(ax_i)^2 + (ay_i)^2]}$	$\sqrt{(ax_i)^2 + (ay_i)^2}$	w
			cx_i:=
0	0.55	0	0
0.332	0.407	0.37	0.0146
0	0.55	0	0
0.316	0.371	0.406	0.0155
0	0.55	0	0
0.298	0.322	0.446	0.0166
0	0.55	0	0
0.279	0.264	0.482	0.0179
0	0.55	0	0
0.258	0.188	0.517	0.0196
0	0.55	0	0
0.24	0.102	0.54	0.0212
			-0.22398
			-0.23406
			-0.24184
			-0.24566
			-0.24366
			-0.23613

Визначаємо частоти, при яких відбувається перетин АФЧХ та відрізків.



Визначаємо параметри настройки регулятора K_p та T_i

$i:=1..6$

$w_i :=$

0.0146
0.0155
0.0166
0.0179
0.0196
0.0212

$OA_i :=$

0.332
0.316
0.298
0.279
0.258
0.24

$ED_i :=$

0.407
0.371
0.322
0.264
0.188
0.102

$OE_i :=$

0.37
0.406
0.446
0.482
0.517
0.54

$$K_p = \frac{OE}{OA}$$

$$\frac{OE_i}{OA_i} =$$

$$T_i = \frac{OE}{w * ED}$$

$$\frac{OE_i}{w_i * ED_i} =$$

$$\frac{K_p}{T_i} > \max$$

$$\frac{\frac{OE_i}{OA_i}}{\frac{OE_i}{w_i * ED_i}} =$$

1.114
1.285
1.497
1.728
2.004
2.25

62.267
70.603
83.439
101.998
140.306
249.723

max >	0.018
	0.018
	0.018
	0.017
	0.014
	$9.01 * 10^{-3}$

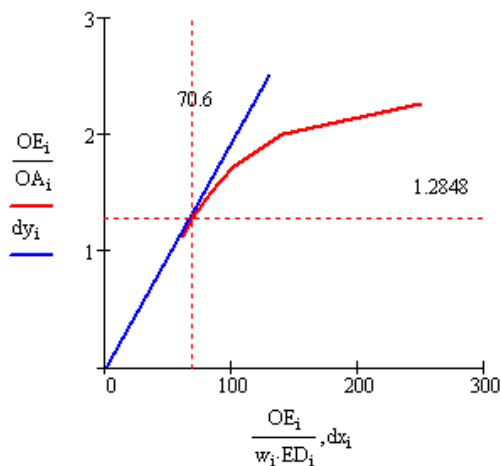
Будуємо лінію межових співвідношень, та проводим дотичну до неї.

$$dx_i :=$$

0
130

$$dy_i :=$$

0
2.5



Отже, $K_p=1,285$, а $T_i=70,6$ сек є оптимальними параметрами настройки.

Приклад 4

Розрахувати параметри настройки ПІ-регулятора на заданий частотний показник коливальності в математичному пакеті Mathcad.

$$w:=0.00001,0.00002..0.06 \quad i:=1..7 \quad j:=\sqrt{-1} \quad C:=0.45 \quad M:=1.27$$

$$r:=\frac{1-C}{2} \quad d:=2*r$$

Задана передаточна функція ОУ:

$$\begin{array}{|c|} \hline ax_i := \\ \hline 0 \\ \hline -3 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|} \hline ay_i := \\ \hline 0 \\ \hline -1.32*3 \\ \hline \end{array}$$

$$\beta:=\text{asin}\left(\frac{1}{M}\right) \quad \beta:=51.943 \text{ deg}$$

$$W(w):=\frac{0.8*e^{-80*j*w}}{(150*j*w)+1}$$

T – стала часу (інерційність);
M – частотний показник коливальності;
d – діаметр;
r – радіус кола.

Передаточна функція з ПІ-регулятором:

$$T:=130$$

$$W1(w):=W(w)-j*\left(\frac{W(w)}{T*w}\right)$$

Повторюємо побудови для декількох значень T, підставляючи в формулу W1(w) та визначаємо r.

$$r = 1.415$$

Визначивши r знаходимо Kp за формулою.

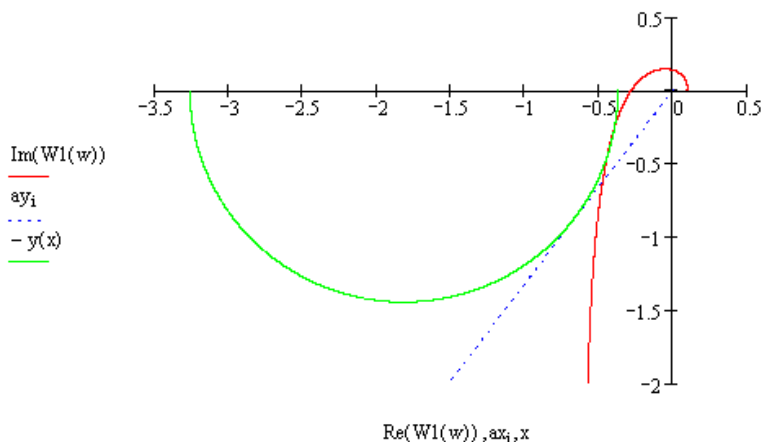
$$K_p := \frac{M}{M^2 - 1} * \frac{1}{r}$$

$$K_p = 1.464$$

$$x := 0, -0.0001 \dots -3.5$$

$$y(x) := \sqrt{1.445^2 - (x + 1.82)^2}$$

Будуємо годограф та промінь під кутом β , проводимо коло радіусом r , яке дотикається до голографа та променя.



Отримуємо ряд значен K_z та T_i :

$$r_i :=$$

$$K_{p_i} :=$$

$$T_i :=$$

$$\frac{K_{p_i}}{T_i} :=$$

3.15
2.15
1.819
1.63
1.445
1.415
1.4

0.658
0.964
1.139
1.271
1.434
1.464
1.48

80
100
110
120
130
140
150

max >

$8.225 \cdot 10^{-3}$
$9.64 \cdot 10^{-3}$
0.01
0.011
0.011
0.01
$9.867 \cdot 10^{-3}$

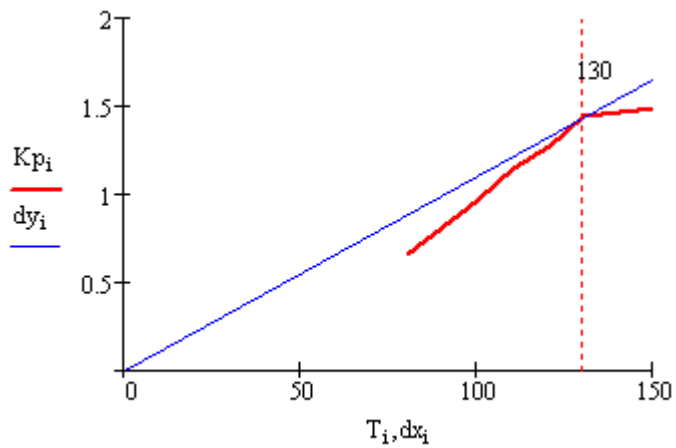
$$dx_i :=$$

0
150

$$dy_i :=$$

0
1.655

Будуємо лінію межових співвідношень та знаходимо оптимальне значення $K_p=1,434$, $T_i=130$.



Приклад 5

Розрахувати параметри настройки І-регулятора на заданий запас стійкості за амплітудою в математичному пакеті Mathcad.

$$w:=0.00001,0.00002..0.06 \quad i:=1..5 \quad j:=\sqrt{-1} \quad C:=0.45 \quad M:=1.27$$

C – показник стійкості за амплітудою.

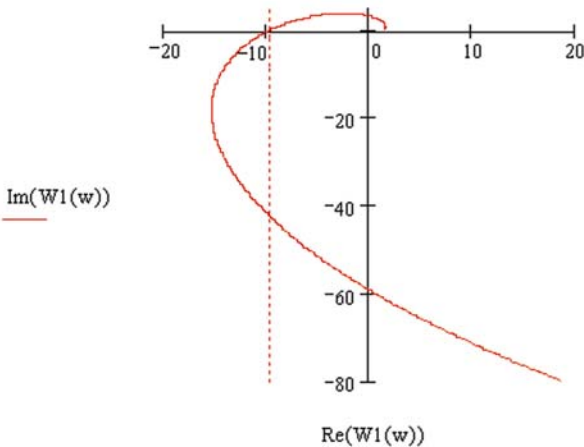
Задана передоточна функція ОУ:

$$W(w):= \frac{0.8 * e^{-80 * j * w}}{(150 * j * w) + 1} \quad W1(w):= W(w) * \left(\frac{1}{w}\right)$$

$W(p)=K_p/p$ – передаточна функція І-регулятора або $W(p)=1/T_i * p$.

$W1(w)$ – передоточна функція ОУ з І-регулятором.

Будуємо годограф.



$$K_p := \frac{1 - C}{9.571} \quad K_p = 0.057$$

K_p – коефіцієнт передачі

Приклад 6

Розрахувати параметри настройки І-регулятора на заданий частотний показник коливальності в математичному пакеті Mathcad.

$$\beta := \text{asin}\left(\frac{1}{M}\right) \quad \beta := 0.907$$

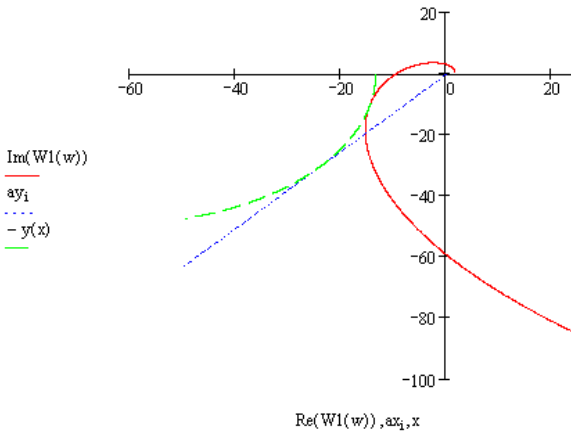
$ax_i :=$
0
-50

$ay_i :=$
0
-1.27*50

$$x := 0, -0.001 \dots -50$$

$$y(x) := \sqrt{49.2^2 - (x + 62.6)^2}$$

Будуємо годограф та промінь під кутом β , проводимо коло з радіусом r , яке дотикається до годографа та променя. Знаходимо K_p , як шукається за радіусом і частотним показником коливальності.



Визначаємо радіус кола:

$$r := 49.2$$

Визначивши r знаходимо K_p за формулою.

$$K_p := \frac{M}{M^2 - 1} * \frac{1}{r}$$

$$K_p = 0.042$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Бесекерский В.А. Микропроцессорные системы автоматического управления. – Л.: Машиностроение, 1988. – 365 с.
2. Бойко М.Ц., Стеклов В.К. Системы автоматического управления на базе микро-ЭВМ. – К.: Техніка, 1989. – 182 с.
3. Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.К., Мешель Б.С. Электрические нагрузки промышленных предприятий. – Л.: Энергия, 1971. – 164 с.
4. Олійник В.С., Гайдук В.М., Гончар В.Ф. та ін. Довідник сільського електрика /За ред. В. С. Олійника. – 3-те вид., перероб. і допов. – К.: Урожай, 1989. – 264 с.
5. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
6. Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях. – М.: Союзэнерго, 1981. – 27 с.
7. Козинский В.А. Электрическое освещение и облучение. – М.: Агропромиздат, 1991. – 238 с.
8. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
9. Мартыненко И.И., Лысенко В.Ф. Проектирование систем автоматики. – М.: Агропромиздат, 1991. – 242 с.
10. Мартыненко И.И., Тищенко Л.П. Курсовое и дипломное проектирование по комплексной электрификации и автоматизации. – М.: Колос, 1978. – 123 с.
11. Марченко О.С. Довідник по монтажу і налагодженню електрообладнання в сільському господарстві. – К.: Урожай, 1994. – 240 с.
12. Марченко О.С., Дацішин О.В., Лавріненко Ю.М. та ін. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві /За ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 416 с.
13. Поярков К.М. Практикум по проектированию комплексной электрификации. – М.: Агропромиздат, 1987. – 192 с.
14. Правила устройства электроустановок: Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.
15. Проектирование комплексной электрификации /Под ред. Л.Г. Прищепы. – М.: Колос, 1983. – 271 с.
16. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.

17. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. ВГПИ и НИИ “Сельэнергопроект”. – М., 1981. – 106 с.

18. Трегуб ВТ., Ладанюк АЛ. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации пищевых производств. – М.: Лег. и пищ. пром., 1980. – 350 с.

19. Басов А.М., Быков В.Г., Лаптев А.В., Файн В.Б. Электро-технология I. – М.: Агропромиздат, 1985. – 256 с.

20. Мартиненко І.І., Лисенко В.П., Тищенко Л.П., Лукач В.С. Проектування систем електрифікації та автоматизації сільського господарства. Підручник. – К: Вища школа, 1999. – 201 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	5
1.1. Вихідні дані для проектування та їх аналізу	5
1.2. Основні нормативні документи з проектування	7
1.3. Стадійність проектування	11
1.4. Автоматизація проектних робіт	12
2. МАТЕРІАЛЬНО-ТЕХНІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ ВИРОБНИЦТВА	15
2.1. Визначення розмірів виробничих приміщень	16
2.2. Електропостачання об'єктів сільського господарства	16
2.3. Визначення витрат електроенергії в сільському господарстві..	21
2.3.1. Розрахунки навантаження на освітлення	21
2.3.2. Розрахунки електроспоживання силових установок	22
2.4. Визначення потужності системи опалення	23
2.5. Розрахунки вентиляції сільськогосподарських виробничих приміщень	24
2.6. Розрахунки водопостачання	27
3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ОФОРМЛЕННЯ ПОЯСНЮВАЛЬ- НОЇ ЗАПИСКИ ТА ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ В ПРОЕКТАХ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	29
3.1. Оформлення пояснювальної записки	29
3.2. Оформлення схем	40
3.2.1. Структурні схеми	42
3.2.2. Функціональні схеми автоматизації	43
3.3. Принципові електричні схеми	54
3.4. Схеми з'єднань	66
3.5. Схеми підключень	69
3.6. Плани виробничих приміщень з нанесенням схем електро- обладнання і проводок	71
4. РОЗРАХУНКИ І ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ	73
4.1. Розрахунок і вибір електроприводів	73
4.2. Розрахунок і вибір освітлювальних та опромінювальних установок	87

4.2.1. Види і системи освітлення	87
4.2.2. Світильники	88
4.2.3. Розрахунок і проектування освітлення	91
4.2.4. Розрахунок і вибір установок для опромінення рослин за умов захищеного ґрунту	104
4.2.5. Розрахунок і вибір установок для ультрафіолетового опромінення	106
4.2.6. Розрахунок і вибір установок інфрачервоного та комбінованого опромінення	109
4.3. Розрахунок та вибір електронагрівників	112
4.3.1. Розрахунок і вибір установок для нагрівання води	112
4.3.2. Електричне обігрівання в парниках і теплицях	117
4.3.3. Електричне обігрівання підлоги	118
4.3.4. Тепловий та електричний розрахунок електронагрівальних установок	119
4.4. Розрахунок і вибір установок для застосування електротехнологій у сільськогосподарському виробництві	129
5. РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ В СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПРОЦЕСАХ	133
5.1. Дослідження і розрахунок характеристик об'єктів автоматизації	135
5.2. Методики синтезу та аналізу систем автоматичного керування	148
5.2.1. Методика уточнення лінійних алгоритмів керування	149
5.2.2. Основні інженерні методики розрахунку параметрів регуляторів на стадії проектування	157
5.3. Розрахунки і вибір технічних засобів автоматизації	167
5.3.1. Вибір комплексу технічних засобів лінійних систем автоматичного регулювання	170
5.3.2. Вибір комплексу технічних засобів позиційних систем автоматичного регулювання	211
5.3.3. Вибір комплексу технічних засобів імпульсних систем автоматичного керування	218
5.4. Типові комплекти технічних засобів автоматизації	230
6. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ПРОВОДОК І ПУСКОЗАХИСНОЇ АПАРАТУРИ	231
6.1. Визначення розрахункових навантажень	231
6.2. Розрахунок проводок і способи їх прокладання	242
6.2.1. Способи виконання проводок	242
6.2.2. Розрахунок внутрішніх і зовнішніх проводок	245

6.3. Вибір пускозахисної апаратури та розподільних пристроїв	252
6.4. Перевірка захисних апаратів на спрацювання під час короткого замикання	260
6.5. Заходи щодо компенсації реактивної потужності	265
7. ЩИТИ І ПУЛЬТИ В ПРОЕКТАХ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	271
7.1. Класифікація щитів і пультів. Вимоги до розробки їх креслень	271
7.2. Комплектування щитів і пультів апаратурою керування та захисту. Вимоги до щитових приміщень	277
7.3. Розробка мнемосхем	282
8. РОЗРАХУНКИ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ	284
8.1. Розрахунок надійності систем електрифікації та автоматизації	284
8.2. Розрахунок стійкості та якості систем автоматичного керування	293
8.3. Економічне обґрунтування проектів електрифікації та автоматизації	296
ДОДАТКИ	300
ЛІТЕРАТУРА	325

Навчальне видання

І.І.Мартиненко, **В.П. Лисенко**, **Л.П. Тищенко**, **І.М. Болбот**,
П.В. Олійник

**ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ
ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ АПК**

Українською мовою

Редактори: *С.Ф. Світельська, Н.В.Цибенко, Н.М.Салмай*
Комп'ютерна верстка: *О.П. Давиденко*

Підписано до друку 22.10.2008 р.
Умов. друк. арк. 13,7
Наклад 2000 прим. Зам. № 315

Редакційно-видавничий відділ
Навчально-методичного центру
Міністерства аграрної політики України
Технікумівська, 1, смт Немішасве
Бородянського Київської
т/ф 8 (04477) 41-2-69

Свідectво про внесення до Державного реєстру
суб'єкта видавничої справи ДК № 2435