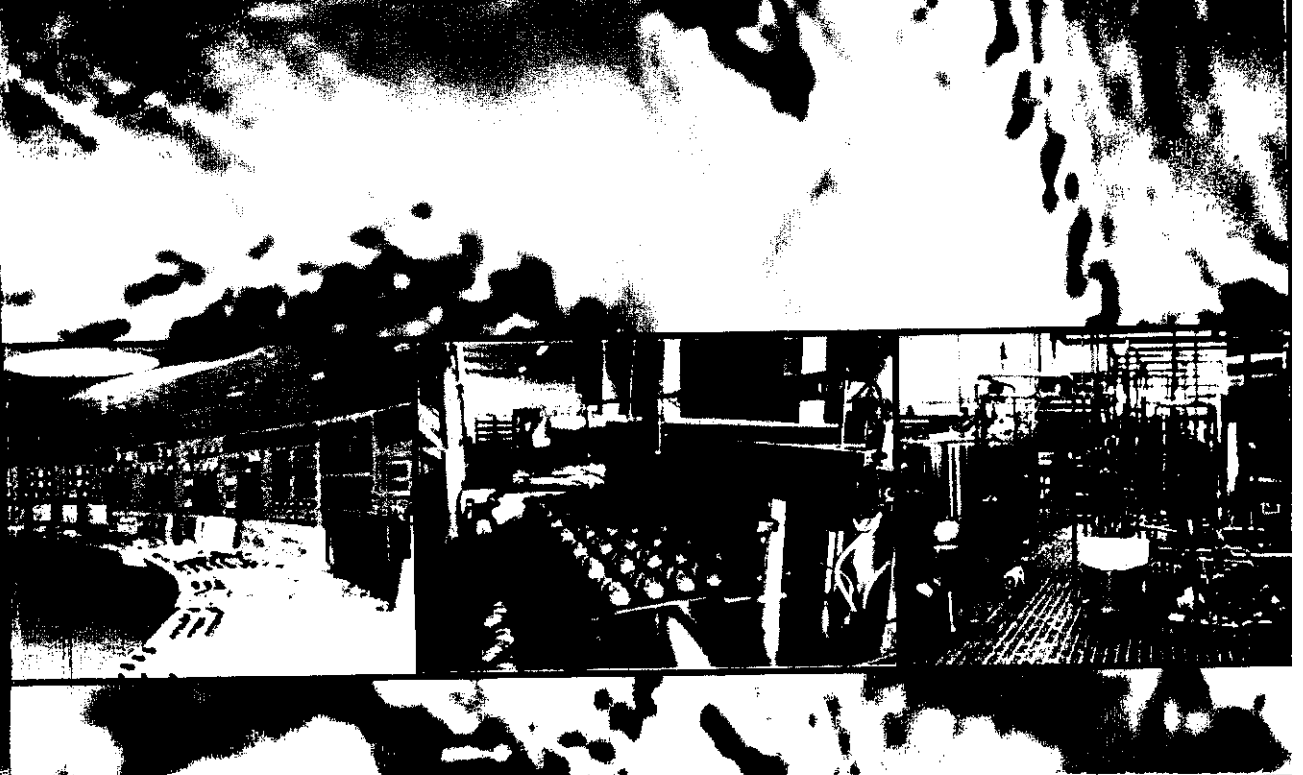


Б.М. Гончаренко
А.П. Ладанюк

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



УДК 664.512.011.56:681.3

*Гриф надано Міністерством освіти
і науки, молоді та спорту України
(лист № 1/11-16817 від 29.10.2012 р.)*

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. **Ю.К. Зіатдінов** (Національний авіаційний
університет)

д-р техн. наук, проф. **С.А. Шворов** (Національний університет
біоресурсів і природокористування України)

Гончаренко Б.М., Ладанюк А.П. Автоматизація виробничих процесів
харчових технологій: Підруч. — К.: НУХТ, 2014. — 530 с.

ISBN 978-966-612-163-2

Розглянуто основи метрології та вимірювальної техніки, принципи побудови схем автоматичного контролю й керування, принципи дії, технічні та метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів і приладів контролю температури, тиску, витрати, рівня, складу й фізико-хімічних властивостей речовин, основи проектування автоматизованих систем різного рівня та призначення. Висвітлено основи теорії автоматичного керування, алгоритми й об'єкти керування, методи моделювання систем керування, проблеми стійкості та якості систем автоматичного керування. Описано технічні засоби впливу на технологічні процеси. Розглянуто основи сучасних мікропроцесорних засобів та комп'ютерно-інтегрованих систем на базі мереж. Наведено приклади схем автоматизації різних харчових технологічних процесів.

Для студентів вищих технічних навчальних закладів, які навчаються за напрямом «Інженерна механіка», у тому числі «Пакувальна техніка», «Харчова технологія та інженерія» і «Біотехнологія».

УДК 664.512.011.56:681.3

ISBN 978-966-612-163-2

© Б.М. Гончаренко, А.П. Ладанюк, 2014
© НУХТ, 2014

ПЕРЕДМОВА

Автоматизація виробництва завжди була однією з основних складових прискорення науково-технічного прогресу в агропромисловому комплексі і харчових технологіях. У 80-х роках минулого століття вона почала набувати нових ознак завдяки бурхливому розвитку технічних засобів — мікропроцесорної техніки і персональних електронно-обчислювальних машин (ПЕОМ), функціональні можливості яких дають змогу використовувати найдосконаліші методи в межах сучасних складних систем керування. Мікропроцесорні пристрої та ЕОМ, пов'язані між собою обчислювальними й керувальними мережами з використанням загальних баз даних, сприяли впровадженню комп'ютерних технологій у нетрадиційні сфери діяльності підприємства, що проявляється в інтеграції виробничих процесів і керуванні ними. Розвиток обчислювальної техніки уможливив автоматизацію керування через застосування ЕОМ і мікропроцесорів (МП) безпосередньо в технологічних процесах. Це ознаменувало новий етап розвитку автоматизації, характерною ознакою якого для безперервних технологічних процесів став перехід до оптимального керування ними.

При цьому нагальною потребою стало збільшення швидкодії, точності та надійності засобів аналітичної техніки. Це пов'язано з тим, що нині існує суперечність між величезними можливостями ЕОМ у частині оброблення інформації та керування й досить обмеженими можливостями отримання початкової інформації про якість сировини і продукції та перебіг технологічних процесів.

На сучасному етапі головним напрямом автоматизації в агропромисловому комплексі є створення комп'ютерно-інтегрованих виробництв. За кордоном ця концепція дістала назву CIMS (Computer Integrated Manufacturing Sistem). Системи автоматизації ґрунтуються на функціональних можливостях мікропроцесорних систем керування з використанням принципів інтеграції, розподіленого керування та програмних комплексів. За умови автоматизації виробництва в агропромисловому комплексі об'єктом керування є не окремий технологічний процес чи агрегат, а технологічний комплекс (ТК) зі складними взаємозв'язками між його підсистемами. Сучасні системи автоматизації на основі мікропроцесорних контролерів і ЕОМ мають широкі функціональні можливості й досконалі технічні характеристики, які забезпечують підвищення надійності та живучості, швидкодію, оперативність керування, збільшення кількості входів-виходів, поліпшення умов праці операторів.

Комплексна автоматизація процесів (апаратів) харчових технологій передбачає не тільки автоматичне забезпечення нормального перебігу їхніх

процесів з використанням різноманітних автоматичних пристроїв (контролю, регулювання, сигналізації тощо), а й автоматичне керування запуском та зупиненням апаратів для ремонтних робіт і в критичних ситуаціях.

За автоматизованого виробництва людина переходить на творчу роботу — аналіз результатів керування, складання завдань і програм для автоматичних приладів, налагодження складних автоматичних пристроїв тощо. Для обслуговування агрегатів, оснащених складними системами автоматизації, потрібні фахівці з високим рівнем знань. З підвищенням кваліфікації та культурного рівня працівників стирається грань між фізичною і розумовою працею. Спеціалісти будь-якого профілю працюють у новому інформаційному просторі, що потребує від них знань, потрібних під час роботи на автоматизованому обладнанні, автоматизованих ТК, із застосуванням комп'ютерних технологій.

Розширення функціональних можливостей сучасних мікропроцесорних систем керування пов'язане зі значно зростаючою кількістю видів і систем відображення технологічної інформації: використанням динамічних мнемосхем; одержанням графіків зміни технологічних параметрів за будь-який відрізок часу; формуванням передісторії розвитку процесу; архівуванням за допомогою таблиць, звітних документів тощо. Все це дає змогу підвищувати оперативність й адекватність керування, максимально враховувати виробничу ситуацію, що сприяє зростанню показників ефективності функціонування ТК. У створенні систем автоматизації використовують багатоконтурні системи, в яких реалізуються принципи компенсації збурень, адаптації, досконалі структури типу каскадних систем, з додатковими сигналами тощо.

Цей підручник розрахований на студентів, які не спеціалізуються в галузі автоматизації виробництва (механіків, технологів, теплотехніків тощо), але яким для роботи в умовах комп'ютерно-інтегрованого виробництва конче потрібні базові знання з названих проблем. У ньому викладено загальні питання автоматизації, методи автоматизованого контролю технологічних параметрів, основи теорії автоматичного керування (регулювання) та оптимізації, основи технічних засобів автоматизації, у тому числі мікропроцесорних, питання проектування систем автоматизації, типові схеми автоматизації технологічних процесів харчової промисловості.

Підручник підготовлено відповідно до навчальної програми дисципліни «Автоматизація виробничих процесів», яку на кафедрі «Автоматизація процесів управління» Національного університету харчових технологій багато років викладають студентам напрямів «Інженерна механіка», а також «Пакувальна техніка», «Харчові технології та інженерія» і «Біотехнологія». Основним завданням вивчення дисципліни «Автоматизація виробничих процесів» є отримання студентами в процесі її вивчення певних знань, які формуються на трьох рівнях: знати, уміти, мати навички в галузі автоматизації.



ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА

1.1. ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ СУЧАСНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Для автоматизації виробництва організовують спеціальну систему керування його складовими технологічними процесами. Система характеризується сукупністю підсистем, створених множиною елементів, природу яких визначає розв'язуване завдання виробництва. Важливо, що система є не просто сукупністю елементів, а виявляє нові властивості, яких не мають окремі складові елементи.

Сукупність виконуваних системою функцій створює функціональну структуру системи, а сукупність технічних засобів і відповідних зв'язків між ними, які забезпечують функціонування системи, — технічну структуру системи. Для оцінювання ефективності функціонування системи вибирають певний узагальнений показник (критерій).

Система керування завжди взаємопов'язана сукупністю об'єкта керування (керованої підсистеми) і керувальної системи (регулятора або контролера у найширшому значенні цих понять). Система керування має спеціальні функції й задані специфічні цілі, які визначають технічну структуру для реалізації цих функцій і завдань.

Система керування не може бути ізольованою, оскільки вона пов'язана із зовнішнім середовищем і взаємодіє з ним, тому є відкритою, тобто з часом змінює або склад елементів, або зв'язки між ними.

Об'єкт керування, у свою чергу, також є відкритою системою, що взаємодіє із зовнішнім середовищем, яке своїм впливом збурює і порушує режим роботи об'єкта. Нормальний робочий технологічний режим у збуреному об'єкті можна відновити спеціально сформованими керувальними діями, які впливають на об'єкт протилежно до збурень і компенсують їхній вплив. Такі дії здійснюються регуляторами або контролерами, які, маючи інформацію про поточний стан об'єкта і мету керування ним, формують керувальну дію (керування), щоб забезпечити наближення реального поточного стану об'єкта до заданого метою керування, тобто бажаного. Процеси керування об'єктом (або регулювання його стану) не є миттєвими, бо прикладання дій, реагування на них та визначення реакції об'єктів керування — інерційні й потребують певного часу.

Щоб здійснити керування, потрібно: попередньо зібрати й обробити інформацію про стан об'єкта, а часом і про його навколишнє середовище;

проаналізувати її з урахуванням завдання (бажаного стану об'єкта); виробити керувальну дію на основі порівняння поточного і бажаного стану об'єкта; реалізувати керування певними технічними засобами, які впливають на об'єкт.

Сучасні автоматизовані харчові об'єкти керування — це переважно технологічні комплекси (ТК) харчового виробництва, як і одночасно підрозділи підприємства, що узгоджено працюють з іншими його підрозділами, створюючи разом складну комп'ютерно-інтегровану систему. Ця система є ієрархічною або багаторівневою, в якій рівні мають певне підпорядкування в сенсі прийняття рішень для керування.

При цьому до розглядуваних структур реалізуються такі підходи:

- ✓ складна система поділяється на взаємозв'язані підсистеми, кожна з яких має свої завдання і критерії ефективності її функціонування;

- ✓ завданням цілої системи за ієрархією є сукупність підзавдань (завдань підсистем); так само складаються ієрархії математичних моделей і технічних засобів;

- ✓ інтеграція підсистем у систему керування формується додатковим завданням координації роботи підсистем — узгодженням підзавдань із загальним завданням ТК.

Технологічні комплекси харчових виробництв містять велику кількість ступенів (послідовних процесів) перероблення сировини чи напівпродуктів, на яких часто відбуваються складні хіміко-фізичні перетворення речовин. Машинно-апаратурна схема ТК може складатися послідовним та паралельним з'єднанням елементів, яке ускладнюється як байпасними (паралельними), так і рециклічними (зворотними) технологічними зв'язками. Все це ускладнює підходи до автоматизації ТК.

До того ж технологічні комплекси харчових виробництв мають ще й специфічні особливості:

- ✓ ТК формуються з ділень (підсистем), які складно зв'язані між собою і з навколишнім середовищем;

- ✓ окремі підсистеми ТК можуть мати різні критерії керування (ефективності, оптимальності), а для узгодження роботи підсистеми потрібно сформулювати спеціальне завдання координації керувань;

- ✓ властивості перероблюваної ТК сільськогосподарської сировини можуть змінюватися в широкому діапазоні, вносячи збурення у роботу ТК;

- ✓ ТК має, як правило, ієрархічну структуру, що зумовлено наявністю його загальної (глобальної) мети керування і окремих цілей керування підсистемами.

Щоб підсистеми, розроблювані при автоматизації керування, були типовими за інформаційним, програмним і технічним забезпеченням для різних за своїми характеристиками, структурою та властивостями технологічних комплексів, їх доцільно класифікувати за такими основними ознаками:

- ✓ за способом функціонування — неперервні, неперервно-циклічні, неперервно-періодичні та періодичні, що визначає характер потоків на вході

та виході об'єктів і особливості їхніх технологічних параметрів. У неперервних ТК, наприклад, потоки не змінюються між входом та виходом, а технологічні параметри змінюються монотонно або неперервно-довільно;

- ✓ за продуктивністю — велико-, середньо- та малотоннажні, що визначається за середньою для галузі продуктивністю;

- ✓ за кількістю виконуваних функцій — одно- та багатофункціональні, що відповідає виробництву одно- чи багатоасортиментної продукції;

- ✓ за кількістю ланок (дільниць) — мало- та багатоланкові, починаючи з трьох;

- ✓ за ступенем однорідності ланок — однорідні та неоднорідні ТК (однорідними називають ланки з регулярною структурою);

- ✓ за способом з'єднання ланок (технологічною топологією) — однонаправлені та зустрічнонаправлені (зі зворотними рециркуляційними зв'язками);

- ✓ за характеристиками потоків — ураховують стан середовища (газо-подібне, рідке, сипке);

- ✓ за наявністю нагромаджувальних місткостей — з місткостями на різних дільницях і без них, а також з різним запасом сировини, напівпродуктів чи готового продукту;

- ✓ за інформаційною потужністю — вирізняють ТК з різною кількістю змінних, необхідних для контролю та керування: до 40 — найменша потужність, до 160 — мала, до 650 — середня, до 2500 — підвищена, понад 2500 — велика потужність. Ця ознака надзвичайно важлива для вибору структури системи керування і необхідних технічних засобів.

Можна виокремити й інші ознаки ТК щодо, наприклад, математичних моделей, завдань керування (оптимізації) та координації.

Технологічні комплекси як складова (підсистема) комп'ютерно-інтегрованого виробництва пов'язані з іншими підрозділами підприємства, які вирішують завдання оперативного керування ним, поточного та довгострокового планування, адміністративно-господарської діяльності. Тому залежно від виду зв'язку між підрозділами розрізняють такі види інтеграції, що визначаються складністю ТК як об'єкта керування, його багатовимірністю, залежністю показників функціонування від багатьох чинників:

- ✓ функційну, що забезпечує єдність мети та узгодженість виконання технологічних і виробничо-господарських функцій;

- ✓ організаційну, яка дає можливість організовувати потрібну взаємодію оперативно-технічного персоналу на різних рівнях керування;

- ✓ програмну, що в умовах комп'ютерно-інтегрованого виробництва дає змогу використовувати узгоджені й взаємопов'язані комплекси програм;

- ✓ інформаційну, яка ґрунтується на комплексному підході до створення інформаційної бази, що забезпечує інформаційну взаємодію всіх компонентів системи керування;

- ✓ технічну, яка полягає у створенні єдиного автоматизованого технологічного комплексу «технологічний об'єкт — система керування».

Процес функціонування технологічних комплексів харчових виробництв залежить від багатьох чинників. Так, деякі ТК, що мають постійні параметри, працюють у стабільних режимах, а керування ними, в тому числі й оперативна оптимізація, зводиться до оптимального розподілу матеріальних потоків. Значну групу складають ТК зі змінюваними параметрами. У них крім оптимального розподілу матеріальних потоків потрібно знаходити і підтримувати такі технологічні режими, які забезпечують найвищі техніко-економічні показники їхньої роботи.

При цьому зміна технологічного режиму однієї з підсистем (дільниць) може зумовлювати зміни технологічних режимів решти підсистем.

На кожну з підсистем і на ТК у цілому діють численні збурення, тобто чинники зовнішнього середовища, які порушують обраний чи заданий статичний режим роботи, за якого технологічні параметри змінюються мало або є постійними. Внаслідок порушень виникають перехідні процеси, які полягають у зміні технологічних параметрів у часі, тобто настає динамічний режим роботи ТК.

Під час функціонування ТК різні режими роботи виникають під впливом чинників, що проявляються з різними частотами. Наприклад, зміна якісних показників сировини, структури ТК, зупинення і пуски окремих агрегатів належать до низькочастотних збурень, а зміна витрат робочих речовин і потоків енергоносіїв — до високочастотних. Якщо перехідні процеси за технологічними змінними тривають значно менше часу, ніж між моментами виникнення істотних збурень (періодом їхньої зміни), що часто так і буває, то основним режимом роботи таких керованих ТК є статичний.

Тому, вважаючи при функціонуванні ТК статичний режим роботи основним, керування ним здійснюється таким чином, щоб показник ефективності (критерій керування) роботи підсистем і ТК у цілому був би найвищим в інтервалі часу. Для окремої дільниці (підсистеми) ТК показник економічної ефективності має вигляд

$$E_i = \int_0^{t_2} \left(B\Pi_i - \sum_{j=1}^m Z_j \right) dt,$$

де B — випуск продукту чи напівпродукту (або продуктивність) за готовим продуктом; Π_i — частина загальної ціни, яка умовно формується на цій стадії виробництва, причому $\sum_{i=1}^n \Pi_i = \Pi$ — ціна готового продукту; Z_j — витрати, що залежать у тому числі від вибору технологічного режиму.

За послідовного характеру перероблення сировини і напівпродуктів економічність ТК є адитивною функцією від економічності підсистем:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i,$$

де n — кількість підсистем.

У цьому разі завдання керування підсистемами і ТК у цілому полягає в забезпеченні умови $E, E_i \rightarrow \max$, що реалізовується в системі пошуком та підтриманням відповідних технологічних режимів.

1.2. ОСНОВНІ ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ В ГАЛУЗІ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Автоматизація виробництва (виробничих або технологічних процесів) — це етап машинного виробництва, що характеризується звільненням людини від безпосереднього виконання функцій керування технологічними й виробничими процесами та передавання цих функцій технічним засобам — автоматичним пристроям і системам. Автоматизація ґрунтується на поняттях технологічного процесу та керування (в літературі вживають також термін «управління»).

Технологічний процес (ТП) є сукупністю операцій над початковою сировиною в технологічних апаратах з метою отримання продукту із заданими властивостями. Перебіг ТП характеризується технологічними параметрами або змінними Y . Їхні значення, що забезпечують нормальний (регламентований) стан ТП, визначаються технологічним регламентом. Такі значення називають *номінальними* Y_0 . Значення технологічних параметрів у часі називають *поточними* $Y(t)$. Вони можуть змінюватися внаслідок зовнішніх збурень (найчастіше через зміну витрати або складу сировини, стану обладнання), що порушують статичний (нормальний) режим роботи, зумовлюючи відхилення поточних значень технологічних параметрів від номінальних значень, тобто появу їх *неузгодження* $\Delta Y = Y_0 - Y(t)$. Для забезпечення нормального режиму в умовах дії збурень потрібно передбачити спеціально сформовані керувальні дії на ТП, які забезпечували б компенсацію дії збурень, тобто усували неузгодження.

Збурення виникають спонтанно і непередбачено, а керувальні дії (керування) організовуються цілеспрямовано й реалізуються за допомогою *регулювальних органів* (РО), що забезпечують таку зміну інтенсивності (витрати) матеріальних або енергетичних потоків технологічних процесів, яка призводить до компенсації дії збурень (усунення неузгоджень). Підкреслимо ще раз протилежний характер впливу на ТП збурень і керувань.

Керування — цілеспрямована дія на технологічний процес (об'єкт керування), яка забезпечує оптимальний чи заданий режим його роботи усуненням неузгоджень або компенсацією дії збурень.

З погляду загальних кібернетичних (керувальних) систем процес керування складається з елементарних операцій або етапів, які по суті є однаковими для технічних систем і для систем біологічної або/і соціальної природи. Незалежно від мети, призначення, структури об'єкта керування сам процес формування керування передбачає виконання крім технологічних ще й таких інформаційних функцій (операцій) керування:

- ✓ одержання та попереднє оброблення інформації про фактичний поточний стан об'єкта, системи і навколишнього середовища (параметрів $Y(t)$);
- ✓ аналіз одержаної інформації, порівняння поточного стану з номінальним, дійсної виробничої ситуації із заданою (бажаною) з метою виявлення неузгодження $\Delta Y = Y_0 - Y(t)$;

✓ прийняття рішень про дію на об'єкт у певному напрямку (формування алгоритму керування) та оцінювання можливості реалізації такої дії;

✓ реалізація керування, тобто формування і здійснення дії на об'єкт за допомогою відповідних технічних засобів, але обов'язково за принципом від'ємного зворотного зв'язку, оскільки за додатного не усувається неузгодження, але може втрачатися стійкість системи.

Якщо ці функції формування керування виконує людина в замкненому контурі зворотного зв'язку усунення неузгодження (більш за те, саме вона замикає контур дії), то керування називають *ручним*. Якщо людина не бере безпосередньої участі у формуванні керувальної дії, сформованої цього разу спеціальним пристроєм, а перебуває поза замкненим контуром керування, то керування називають *автоматичним*.

У складних ситуаціях або в складних (великих) системах саме прийняття остаточних рішень щодо керування залишається за людиною, яка на основі досвіду та інтуїції здатна приймати адекватні до ситуації рішення. Таке керування є *автоматизованим*. З огляду на це системи керування називають або *автоматичними*, або *автоматизованими*. У разі застосування автоматичних систем за людиною залишаються лише функції налаштування, обслуговування і нагляду за функціонуванням системи керування. За автоматизованих систем технічні засоби забезпечують людину оперативною інформацією (аж до пропозиції можливого варіанта рішення), але остаточне рішення, тобто оцінювання ситуації і формування керувань, залишається за людиною.

Автоматичне керування та автоматичні системи є більш досконалішими і розвиненими теоретично й технічно. Проте в комп'ютерно-інтегрованому виробництві часто використовують автоматизовані системи, оскільки в складних комп'ютерно-інтегрованих системах однозначні рішення для подальшої роботи не є очевидними, тому такі системи краще функціонують. Під час здійснення процесу керування часто доводиться спочатку відшукувати потрібний режим роботи, а вже потім його підтримувати. Для простих об'єктів керування значення технологічних параметрів слід задавати попередньо і такими їх підтримувати (регулювати). Такі системи керування називають *автоматичними системами регулювання* (АСР), або *системами автоматичного регулювання* (САР).

Розглядаючи сучасні системи автоматизації, які є складними комп'ютерно-інтегрованими ієрархічними (з багаторівневим підпорядкуванням) системами, зазначимо, що сукупність взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів у них призначена для досягнення певної мети виробництва (розв'язання конкретних завдань). Сукупність елементів системи та характер зв'язків між ними визначаються саме структурою системи, тому при створенні й аналізі систем автоматизації вирізняють такі їхні структури:

✓ функціональну — сукупність частин для виконання окремих функцій, зокрема одержання інформації, її оброблення, передавання;

✓ алгоритмічну — сукупність частин для виконання певних алгоритмів оброблення інформації;

✓ технічну (конструктивну) — сукупність необхідних технічних засобів для відображення функційної та алгоритмічної структур.

Розглянемо загальну структуру АСР як перший рівень ієрархічних систем керування (рис. 1.1, а). *Об'єкт керування* (ОК) або регулювання — технологічний процес чи агрегат, в якому відбуваються перетворення речовини, хімічні реакції, тепло- та масообмін, переміщення речовини, біосинтез тощо для одержання продукту чи напівпродукту заданої якості в потрібній кількості. Стан об'єкта, як зазначалося, характеризується сукупністю поточних технологічних змінних (параметрів), таких як температура, тиск, рівень, положення робочих органів. Цей стан об'єкта позначимо вектором $Y = (Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n)$. В окремому випадку $n = 1$ (стан характеризує один параметр), а Y є скаляром. Усі ці параметри відносно ОК — *вихідні*, а для системи АСР — *регульовані*. У реальних умовах стан об'єкта завжди порушують збурення (збурювальні дії). Вектор збурень позначимо $Z = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_l)$ і врахуємо, що серед них є вимірювані й невимірювані величини. До перших, для вимірювання яких існують прилади, належать витрати, температури, тиск, вміст речовин у потоці тощо, до других, для вимірювання яких немає приладів, — зміна умов тепло- та масообміну, коефіцієнти хімічних реакцій та ін.

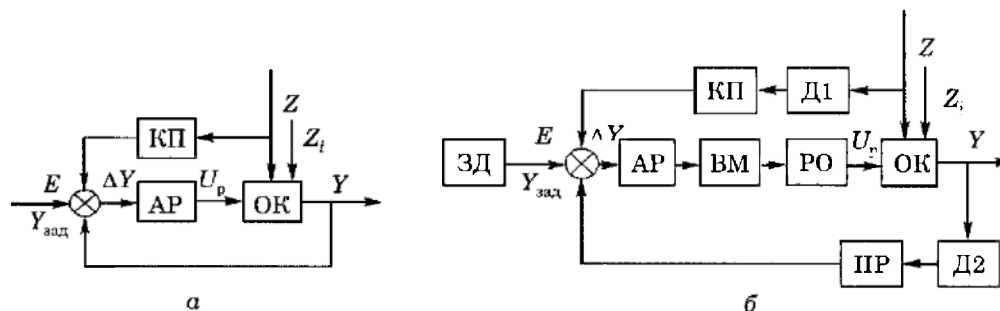


Рис. 1.1. Загальна структура АСР:
а — укрупнена; б — деталізована;
ПР — перетворювач для узгодження сигналів

Очевидно, що дію тих збурень, що є шкідливими, потрібно компенсувати за рахунок спеціально створюваних керувальних дій, серед яких зміни потоків речовин, енергоносіїв та інші, на які відносно просто впливати. Ці дії формуються спеціальним пристроєм — автоматичним регулятором (АР), яких в АСР може бути кілька залежно від кількості регульованих величин Y . Тоді керування (керувальна дія) U_p — це також вектор $U_p = (U_1, U_2, U_3, \dots, U_k)$. Автоматичний регулятор визначає на елементі E порівняння (суматорі) сигнал неузгодження ΔY , що залежить від поточного Y і заданого значення $Y_{\text{зад}}$ змінних та збурення (основного) Z , яке надходить в АР через компенсуювальний пристрій (КП) і формує керування U_p на основі сигналу неузгодження.

Структура АСР за потреби може бути деталізована за реальним складом. На рис. 1.1, б додатково показано давачі (інформаційні перетворювачі) Д1, Д2, за допомогою яких вноситься інформація відповідно про значення Z та Y , виконавчий механізм (ВМ) і регулювальний орган (РО), що безпосередньо діють на об'єкт (ОК). Задане значення $Y_{\text{зад}}$ може вводитися на елемент порівняння (Е) за допомогою спеціального задавача (ЗД).

За рис. 1.1, а можна простежити основні принципи регулювання, які використовуються за певних умов. Якщо немає можливості вимірювати значення збурень Z , то їхній вплив оцінюють за відхиленням вихідного параметра Y , який піддається вимірюванню. За наявності неузгодження $\Delta Y = Y_0 - Y(t)$ регулятор (АР) формує як функцію від нього керування U_p , яке діє на об'єкт (ОК) і в принципі компенсує вплив усіх збурень Z , у тому числі основного Z , й усуває неузгодження. Це принцип *регулювання за відхиленням* (неузгодженням), або принцип Ползунова — Уатта, названий за прізвищами винахідників перших у світі промислових регуляторів рівня та відцентрового регулятора швидкості парового двигуна, що діяли саме за цим принципом регулювання. Він є найпростішим і універсальним.

Метою роботи АСР і дії в ній регулятора за принципом відхилення є усунення неузгодження, проте АР не може почати працювати, доки неузгодження не стане відчутним. Інакше кажучи, для початку підтримання умови $Y(t) = Y_{\text{зад}}$ треба попередньо, щоб ця умова порушилася. Це призводить до запізнювання формування керувань і появи істотних неузгоджень, достатніх за величиною для початку роботи регулятора, але при цьому неузгодження від впливу всіх збурень усуваються відразу. Якщо серед збурень можна виокремити основне і виміряти його, то для збільшення швидкодії регулятора можна сформулювати керування саме за цим збуренням і компенсувати його дію окремо превентивно (ще до того, як сформується реакція об'єкта на це збурення і проявиться неузгодження) за допомогою компенсувального пристрою (КП), але контур АР слід розімкнути, бо відпадає потреба у вимірюванні Y і визначенні неузгодження ΔY . Керування формується і реалізовується ще до появи відхилення технологічного параметра, що крім швидкодії також дає підвищену точність регулювання, оскільки для вмикання регулятора КП відпадає потреба дочекатися появи достатнього для спрацювання АР неузгодження. Це принцип *регулювання за збуренням*, або принцип Понселе. Він дає змогу краще усувати неузгодження від основного збурення і зовсім не реагує на їх репту, адже вимірювати і вводити в систему всі без винятку збурення практично неможливо. Основним збуренням є зазвичай навантаження ОК, тому цей принцип відомий ще і як принцип регулювання за навантаженням.

У результаті застосування одночасно обох принципів — за відхиленням та за збуренням отримуємо *комбінований принцип регулювання*. У комбінованих АСР для формування керування використовують сигнал за основним збуренням, а також сигнал головного зворотного зв'язку за відхиленням. Для формування керування у КП вводиться лише сигнал най-

істотнішого збурення, якщо його можна вимірювати з необхідною точністю, а дія решти збурень компенсується АР і враховується через їхній вплив на неузгодження, яке усувається вже за принципом регулювання за відхиленням.

Комбінований принцип позбавлений недоліків обох попередніх принципів і об'єднує їхні переваги: дія основного збурення на ОК компенсується КП у головному розімкненому контурі збурення (без впливу власне на його величину) превентивно (до появи неузгодження від нього), а неузгодження від решти збурень компенсується потім АР за принципом регулювання за відхиленням, тобто за рахунок зворотного зв'язку через АР (у міру дії цих збурень на об'єкт) у замкненому контурі вихідного параметра Y .

Відомий ще і такий принцип регулювання, як адаптація (рис. 1.2). Автоматичні системи регулювання, що ґрунтуються на цьому принципі, також належать до замкнених супервізорних (для яких значення завдання коригується в процесі роботи) систем з самоприспосовуванням та самоналагодженням. Вони замість компенсуючого пристрою (КП) містять допоміжний регулятор (ДР) з еталонною моделлю або ідентифікатором, який враховує поточне значення вихідного параметра Y , основного збурення Z , попередньої регулювальної дії U_p , виробляє на цій основі завдання $Y_{\text{зад}}$ регулятору (АР). Системи за принципом адаптації є доцільними за функціонування ОК в умовах постійної зміни технологічних, виробничих та економічних обставин і досить легко здійснюються за допомогою мікропроцесорних контролерів.

Процес функціонування АСР полягає в тому, що вона в ідеалі має забезпечувати найкраще виконання двох умов: з максимальною точністю підтримувати $Y_{\text{зад}}$ і повністю компенсувати дію всіх збурень. У реальних наближеннях АСР до ідеальної використовують низку показників якості її роботи, серед яких основним є похибка регулювання (неузгодження) $\Delta Y = Y_{\text{зад}} - Y(t)$.

Якщо в АСР підтримується постійне значення технологічного параметра $Y_{\text{зад}} = \text{const}$, то саме мінімум неузгодження є критерієм керування. Якщо ж в АСР здійснюється, наприклад, оптимальне керування, то критерієм керування вибирають складніший показник, наприклад продуктивність, собівартість або їх мінімізацію. З цього погляду критерій керування — це технологічний параметр (неузгодження) або техніко-економічний показник (продуктивність, собівартість), що характеризує в цілому якість роботи технологічного ОК, керованого у складі АСР. Під оптимізацією керування розуміють вибір (пошук) такого керування, що дає змогу досягнути максимуму чи мінімуму критерію керування або принаймні його сталого значення, за існуючих умов (за певних ресурсів і обмежень).

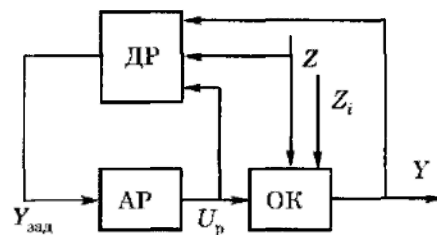


Рис. 1.2. Автоматична система регулювання за принципом адаптації

Автоматичні системи мають різне призначення, різні структури, реалізуються на різних технічних засобах. Проте в будь-якому разі для забезпечення їх роботоздатності потрібно дотриматися таких умов:

- ✓ системи повинні бути стійкими, тобто всі перехідні (динамічні) процеси в них мають бути збіжними, незалежно від причин, які їх зумовили. Стійкість — необхідна, але недостатня умова роботоздатності АСР: нестійкі системи не використовуються, але для остаточного оцінювання використаних систем застосовують інші додаткові показники (якості);

- ✓ системи повинні забезпечувати якість перехідних процесів, яка характеризується кількісними показниками — відхиленнями у статичі та динаміці, тривалістю та коливальністю процесів тощо;

- ✓ системи мають бути надійними, щоб у змінюваних умовах функціонування зберігати роботоздатність (мати запас стійкості).

Дотримання цих умов є необхідним і достатнім для оцінювання САР щодо їх використання.

1.3. ЗАВДАННЯ І ВИДИ КЕРУВАННЯ

Технологічні процеси і комплекси в харчовій промисловості дуже відрізняються, проте для них можна визначити обмежену кількість класів завдань керування:

- ✓ підтримання *на заданому рівні* технологічних параметрів або функцій від них (завдання стабілізації), що характерно особливо для власне технологічних ОК;

- ✓ зміна технологічних параметрів за певною програмою чи відповідно до виконання деяких умов (*програмно-логічне керування*); особливо це стосується об'єктів керування, стан яких визначається просторовими координатами;

- ✓ компенсація збурень, серед яких виокремлюють чинники зовнішнього середовища або зміни властивостей власне об'єкта. Тут існує кілька підкласів завдань. Це насамперед компенсація збурень, що діють на вихідні технологічні змінні об'єкта (параметри стану). Наступне завдання — компенсація небажаних змін властивостей об'єкта, що проявляються в процесі керування. Нарешті, для складних об'єктів і технологічних комплексів істотними є збурення, які зумовлюють зміну структури об'єкта. Зміни в самому об'єкті часто пов'язані зі зміною умов тепло- та масообміну в ньому, а зміни в його структурі спричинені відмовою в роботі окремих його частин;

- ✓ *координація взаємодії* елементів об'єкта. Це завдання набуває особливого значення для технологічних комплексів, коли окремі агрегати не можуть функціонувати без взаємного врахування умов роботи інших. Більш того, для забезпечення високих показників функціонування всього ТК потрібна взаємодія підсистем.

Відповідно до зазначених завдань організовують такі види керування:

- ✓ *координатне*, за якого зміною вхідних величин (витрат матеріальних та енергетичних потоків в об'єкті) змінюють координати стану або обмежують області їх допустимих значень чи показників якості;

✓ *параметричне*, коли цілеспрямовано змінюють значення фізичних параметрів елементів об'єкта;

✓ *структурне*, за якого керуванням є цілеспрямована зміна складу елементів та (чи) зв'язків між ними і режимів функціонування.

При автоматизації складних об'єктів, наприклад технологічних комплексів, наведені види керування поєднують. Це є однією з найважливіших проблем формування функціональної структури системи керування.

Розглянемо деякі основні поняття теорії керування складними об'єктами — технологічними комплексами.

Функціональна структура відображає основні функції системи, тобто сукупність функцій (операцій, дій), які забезпечують досягнення заданої мети функціонування системи. Важливим тут є те, що для організації і реалізації керування різними об'єктами існує порівняно невеликий набір функцій — типова функціональна структура.

Інформаційні функції призначені для вимірювання значень технологічних параметрів, збирання, сортування та розподілу даних про стан об'єкта.

Функції формування керувальних дій визначають такі їхні значення, щоб забезпечити функціонування об'єкта на основі даних, одержаних при реалізації інформаційних функцій.

Функції реалізації керувальних дій перетворюють сигнали від функцій керувальних дій на фізичні дії на об'єкт.

Функції програмування (вибору) **режимів** керування формують значення сукупності технологічних змінних (технологічні режими) за сигналами, одержаними ззовні, наприклад, від системи вищого рівня або від розв'язання завдань оптимізації підсистеми ТК і координат її роботи.

Наведені функції є типовими для всіх видів керування (координатного, параметричного, структурного), а обсяг операцій та їхній зміст повністю визначаються властивостями і структурою об'єкта. Сукупність названих функцій утворює з відповідними технічними засобами *контур керування* (регулювання).

Для структурного керування першочергового значення набувають й інші функції. Функція технологічного діагностування — це інформаційна функція контурів структурного керування, яка об'єднує такі операції: контроль змін технологічного стану; пошук місця цих змін; оцінювання глибини (обсягу) змін стану об'єкта діагностування.

Крім компенсації збурень у контурах структурного керування використовують такі функції:

✓ *реконфігурування* структури об'єкта, що забезпечує вибір найкращого варіанта структури об'єкта, встановлення необхідних зв'язків і режимів функціонування окремих об'єктів;

✓ *аварійний захист*, до якого входять операції оцінювання відмов (простих чи аварійних) та локалізації їхнього впливу на працюючі еле-

менти, а також переведення об'єкта за допомогою реконфігурування його структури в один із необхідних станів — працюючий або з простими відмовами;

✓ *керування резервами*, тобто під'єднання за потреби резервних елементів і контроль результатів цих під'єднань;

✓ *технологічне обслуговування та ремонт*: для визначення обсягу і змісту відновних робіт, встановлення нових режимів функціонування на цей період, виконання самого обслуговування та ремонту, а також контролю якості відновних робіт.

Визначимо ще один принципово важливий момент: структурне керування набуває більшого значення за впровадження комп'ютерних програмно-технічних комплексів, оскільки воно стосується і програмних засобів, які в деяких випадках відіграють вирішальну роль. Є ще одна важлива особливість: структури контурів координатного та програмного керування близькі між собою за методами компенсації збурень, а обидва ці контури разом з об'єктом керування (автоматизації) становлять об'єкт для контурів структурного керування. Вибір варіанта функціональних структур визначається двома чинниками: видом мети (завдання) керування і способом компенсації збурень.

Для координатного і параметричного керувань важливими є такі класи системи:

✓ *системи стабілізації* мають забезпечувати «близькість» поточного значення координат (параметрів) до їх заданого значення та оцінювання точності такого наближення;

✓ *у системах програмного керування* «близькість» поточного значення оцінюється за зміни завдання (програми). У системах стабілізації і програмного керування задані значення координат відомі, але у першому випадку вони сталі на тривалих інтервалах часу, а в другому змінюються за програмою;

✓ *у системах слідкувального керування* задані (потрібні) значення координат — випадкові величини, а саме завдання є функцією довільного виду, яка наперед відома. Прикладом може бути система керування співвідношенням «паливо — повітря» при спалюванні в топці, коли витрата палива змінюється випадково залежно від теплового навантаження, а витрата повітря регулюється згідно зі зміною витрати палива;

✓ *системи екстремального керування* мають забезпечувати пошук і утримання такого режиму роботи об'єкта, який відповідає екстремуму його статичної характеристики, наприклад максимальному тепловиділенню для теплогенераторів;

✓ *системи оптимального керування* забезпечують найкращий режим об'єкта в існуючих умовах (за певних ресурсів і обмежень), що оцінюється кількісно за допомогою комплексного показника якості (критерію оптимальності), який для таких систем є і критерієм керування.

1.4. КЛАСИФІКАЦІЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ

Завданням автоматичної системи регулювання є автоматичне підтримання регульованої величини на заданому рівні $Y(t) = Y_{\text{зад}}$. АСР працюють безпосередньо на об'єкті, тому вони є нижнім рівнем комп'ютерно-інтегрованої системи керування. Для загального уявлення про множину систем регулювання та керування розглянемо їхню класифікацію за основними ознаками:

- ✓ видом регульованої величини;
- ✓ напрямком передавання та використання інформації;
- ✓ принципом керування;
- ✓ призначенням або видом алгоритму функціонування;
- ✓ кількістю регульованих величин;
- ✓ характером перетворення сигналів у системі;
- ✓ сталістю параметрів об'єкта керування;
- ✓ характеристикою сигналів у системі;
- ✓ видом оптимізації;

За *видом регульованої величини* АСР можуть бути автоматичними системами регулювання власне температури, рівня, тиску або послідовності технологічних операцій тощо.

За *напрямком передавання інформації* та її використання в процесі керування існують два типи АСР — розімкнені та замкнені. У розімкнених АСР немає зворотного зв'язку, а інформація передається лише від автоматичного регулятора чи іншого пристрою керування до об'єкта. У розімкнених АСР можуть бути різні варіанти, наприклад на пристрій керування може надходити або лише завдання $Y_{\text{зад}}$, або лише основне збурення Z .

У першому випадку (дії завдання) це може відбуватися за дистанційного керування різними технологічними процесами (агрегатами, робочими пакувальними органами). Точність підтримання завдання $Y(t) = Y_{\text{зад}}$ повністю визначається постійністю параметрів системи, передусім об'єкта, а результат такого керування вважається гарантованим.

У другому випадку (дії збурення) ставиться завдання здійснити в системі таке керування, щоб повністю або частково компенсувати дію збурення раніше, ніж об'єкт зреагує на нього. У таких АСР реалізовується вже згадуваний принцип керування за збуренням. Можливий також комбінований варіант АСР, в якій одночасно використовується обидва сигнали (і завдання, і збурення). Проте застосування розімкнених систем у кожному конкретному випадку визначається властивостями об'єкта (насамперед його стаціонарністю, незмінністю властивостей у часі) й характером збурень, що діють на об'єкт.

Замкнені АСР мають найхарактернішу ознаку у вигляді наявності зворотного зв'язку, що дає інформацію про фактичний стан регульованої величини $Y(t)$, який є результатом керування нею $U_p = F(\Delta Y)$ за відхиленням. При цьому зворотний зв'язок має бути від'ємним, щоб $\Delta Y = Y_{\text{зад}} - Y(t) \rightarrow 0$. У комбінованих АСР для формування керувальної дії використовуються

сигнали $Y_{\text{зад}}$, $Y(t)$ і Z , контур збурення залишається розімкненим, а контур відхилення — замкненим зворотним зв'язком.

Зворотний зв'язок відіграє важливу роль у створенні найскладніших систем керування і є фундаментальним поняттям кібернетики — науки про керування.

За *принципом керування*, як зазначалося, АСР можуть бути системами регулювання за відхиленням, збуренням і комбіновані. Інколи до них додають ще й принцип адаптації.

За *призначенням* або *видом алгоритму функціонування* АСР можуть бути системами стабілізувальними, програмними або слідкувальними. Тут визначальною ознакою є характер встановлення завдання $Y_{\text{зад}}$.

У АСР *стабілізації* $Y_{\text{зад}} = \text{const}$ на значних інтервалах часу. Це означає необхідність підтримання на певному рівні протягом деякого інтервалу часу низки регульованих параметрів — температури, тиску, рівня та ін. Періодично $Y_{\text{зад}}$ потрібно змінювати за зміни виробничої ситуації, але знову на тривалий період керування.

В АСР *програмного керування* $Y_{\text{зад}} = \text{var} = f(t)$, тобто завдання змінюється в часі за певною програмою, яка може задаватися часовим графіком. Ці системи, як правило, є розімкненими, використовуються у керуванні періодичними і циклічними процесами, які мають стабільні (стаціонарні) характеристики.

У *слідкувальних системах* задане значення параметра також змінюється $Y_{\text{зад}} = \text{var}$, але характер його зміни не є функцією часу і наперед невідомий. Це може відбуватися за умови, що завдання є функцією іншого параметра, який змінюється довільно $Y_{\text{зад}} = \text{var} \neq f(t) = F[T(t)]$. Це АСР підтримання співвідношення витрат або, наприклад, підтримання температури в приміщенні, коли параметри теплоносія є функцією температури зовнішнього повітря.

За *кількістю регульованих величин* можна виокремити одно- та багатовимірні АСР, з відповідно однією або багатьма вихідними (регульованими) величинами. Системи автоматичного керування складними об'єктами частіше є багатовимірними. У свою чергу, вони можуть бути системами *незв'язаного* або *зв'язаного* керування. За *незв'язаного* керування кілька вихідних (технологічних) параметрів не пов'язані між собою (між ними немає взаємного впливу) і для кожного з них використовується окремий контур регулювання зі своїм регулятором, який працює незалежно (автономно) від інших. За *зв'язаного* керування регульовані параметри пов'язані між собою через об'єкт спільними матеріальними або енергетичними потоками чи процесами, що відбуваються в об'єкті, і незалежне їх регулювання є неефективним або ж і просто неможливим. Тому в АСР зв'язаного керування вводяться додаткові зв'язки між регуляторами для забезпечення (за потреби) незалежності одного контуру регульованого параметра від іншого. Такі штучно «розв'язані» АСР називають *автономними* системами.

Серед багатовимірних систем реалізуються також інваріантні системи на основі компенсації основних збурень, такі системи не чутливі (інваріантні)

до цих збурень. Реальні об'єкти характеризуються, як правило, множиною вихідних параметрів, тобто є багатовимірними. Проте за технічної реалізації АСР потрібно у кожному випадку встановлювати доцільність створення багатовимірних систем на основі тісного зв'язку між параметрами та інтенсивністю збурень.

За *характером перетворень сигналів* у системі або в її окремих елементах АСР бувають лінійними і нелінійними. Системи називають *лінійними*, коли вони досить точно описуються лінійними залежностями. Мають на увазі, що статичні характеристики, які зв'язують їхній «вихід-вхід», є лінійними залежностями в робочому діапазоні зміни параметрів. У реальних системах, якщо враховувати наявність моторів, реле, зазорів у рухомих частинах або різної природи процесів в об'єкті, завжди є нелінійності, що робить їхні статистичні характеристики також *нелінійними*.

Для спрощення аналізу, синтезу АСР та їхніх розрахунків нелінійні системи по можливості (хоча б в околі робочої точки номінального режиму) замінюють еквівалентними лінійними. Таку заміну називають *лінеаризацією*. Одержують наближено лінійні або лінеаризовані системи, до яких застосовано добре розроблені загальні методи (наочні й прості) аналізу і синтезу лінійних систем. На цій підставі нелінійні системи (за аналізу і синтезу) намагаються зводити до лінійних, щоб отримати лінеаризовані, але доцільність такої заміни оцінюють у кожному конкретному випадку, оскільки при цьому може втрачатися точність одержаних результатів.

Основною перевагою використання лінеаризованих систем є можливість застосування до них *принципу суперпозиції* (накладання реакції), згідно з яким реакція лінійної системи на будь-яку комбінацію дій на неї визначається як сума реакцій на кожну з них. Принцип суперпозиції дає змогу під час аналізу і синтезу лінійних (лінеаризованих) об'єктів вивчати їхню реакцію (поведінку) для кожного каналу дії (збурення або керування) окремо, нехтуючи іншими (припускаючи їхню відсутність), а потім одержати загальний результат як суму окремих результатів. Це істотно спрощує розрахунки АСР.

За *сталістю параметрів об'єкта керування* умовно розрізняють системи стаціонарні й нестаціонарні. Ця особливість систем керування проявляється не відразу, а за тривалої роботи, коли відбуваються певні зміни характеристик і властивостей окремих її елементів, насамперед об'єкта. Для *стаціонарних* систем припускають, що параметри системи не змінюються або змінами можна знехтувати. У *нестационарних* системах зміни параметрів набувають істотного значення, їх потрібно враховувати, а це зумовлює створення *адаптивних* систем, які мають властивість пристосовуватися до змін характеристик об'єктів. Вони містять елемент адаптації (пристосовування), який забезпечує введення в систему сигналів, що відображають зміни в об'єкті й у зовнішньому середовищі. Адаптивні системи виходять складнішими, але за істотної нестаціонарності об'єкта забезпечують високі техніко-економічні показники (ефективність). Окрім того, стаціонарні системи описуються простішими залежностями (на-

приклад, диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами), а для нестационарних — диференціальні рівняння містять змінні коефіцієнти, значення яких залежать від тривалості роботи.

За *характеристиками сигналів* усі системи керування поділяють на неперервні (існує також термін-синонім «аналогові») та дискретні. В неперервних АСР усі сигнали (і вхідні і вихідні) — неперервні функції часу, а в дискретних — вихідні сигнали змінюються стрибкоподібно за плавної зміни вхідних і є імпульсами певної величини й тривалості. До дискретних систем належать позиційні (релейні), імпульсні та цифрові. У *позиційних* АСР керувальна дія має однозначно визначене значення (найчастіше максимальне або мінімальне). В *імпульсних* — керування квантоване за часом, а в *цифрових* — за часом і за значенням, тобто має до перетворення в аналогову форму вигляд цифрових двійкових кодів. Цифрові АСР мають наразі найбільше значення на підставі використання в системах керування мікропроцесорних контролерів та персональних комп'ютерів, які є цифровими пристроями.

Цифрові АСР дають можливість реалізовувати складні й досконалі методи і алгоритми керування, зокрема створювати екстремальні чи оптимальні АСР. За допомогою екстремальних систем можна підтримувати роботу об'єкта в такому режимі, який відповідає екстремуму його статичної характеристики, наприклад максимальному тепловиділенню, що настає за певного співвідношення витрат палива і повітря. Оптимальні системи передбачають формування такого керування у системі, яке оптимізує значення узагальненого показника ефективності (критерію оптимальності) за існуючих умов (обмежень) та наявних ресурсів. У цих системах критерій оптимальності завжди набуває екстремального характеру (максимуму чи мінімуму), наприклад максимального випуску продукції чи мінімальних витрат ресурсів за існуючих вимог до якості продукції або до значення технологічних параметрів.

Контрольні запитання і завдання

1. Дайте визначення поняттям «об'єкт керування», «система керування» та «автоматичний регулятор».
2. Схарактеризуйте процес функціонування замкненої і розімкненої систем керування.
3. Особливості автоматизації технологічних комплексів.
4. Назвіть основні ознаки та особливості технологічних комплексів з погляду керування ними.
5. Наведіть визначення основних термінів: автоматизація виробництва, автоматичні й автоматизовані системи, структури систем, вхідні та вихідні змінні об'єкта керування.
6. Поясніть поняття «критерій керування (управління)» і його представлення в АСР різного призначення.
7. Поясніть основні принципи регулювання та порівняйте їх.
8. Основні завдання керування.
9. Класифікація АСР за основними ознаками.