

Б.М. ГОНЧАРЕНКО, доктор технічних наук

О.П. ЛОБОК, кандидат фізико-математичних наук

Національний університет харчових технологій

ВДОСКОНАЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Наведені методи лінійної теорії автоматичного регулювання (ТАР) та сучасної теорії автоматичного керування (ТАК), які застосовуються при розробленні систем автоматизації технологічних процесів харчових виробництв та реалізуються як ієрархічні структури на основі комп'ютерних промислових мереж. Згідно з системним підходом показані основні напрямки використання математичного моделювання при створенні ефективних систем автоматизації складних, в тому числі і нелінійних об'єктів, що функціонують в умовах невизначеності. Згадуються інформаційні технології та методи, що застосовуються в інтелектуальних системах.

Ключові слова: теорія автоматичного регулювання, керування, технологічний об'єкт, функціональна структура, системний аналіз, синтез керування, лінійність-нелінійність, невизначеність, математична модель, передавальна функція, алгоритм керування, оптимізація, робастність, адаптивність, когнітивність, генетика, критерій, стійкість, якість.

Вступ. Теорія автоматичного керування історично складалась прикладами та теоретичними дослідженнями в цій галузі у вигляді теорії автоматичного регулювання (ТАР) та пізніше сучасної теорії автоматичного керування (ТАК). Остання досліджує властивості складних (нелінійних, з запізненням, слабо визначених) об'єктів на основі системного підходу до створення систем автоматизації за допомогою нелінійних і спеціальних матмоделей та спеціально синтезованих керувальних алгоритмів і комп'ютерних програм як регуляторів (адаптивних, робастних, спеціальних), а також інформаційних систем прямого керування або дорадчих, застосування

комп'ютерних технологій та інтелектуальних методів, які всі разом складають функціональну структуру систем автоматичного керування.

Постановка задачі. У відомих авторам друкованих або дисертаційних роботах з автоматизації керування технологічними об'єктами як правило висвітлювався один з використовуваних новітніх методів, застосованих до одного з можливих конкретних технологічних об'єктів керування. Але не наводився послідовний, системний та повний опис всіх можливих на той час новітніх і сучасних методів та підходів до автоматизації складних нелінійних об'єктів, що функціонують в умовах невизначеностей і вимагають застосування якщо не методів штучного інтелекту, то його елементів: нейронних мереж, нечіткої логіки, генетичних алгоритмів керування. Лише останнім часом у роботі [1] ґрунтовно оговорені досягнення і проблеми як класичної, так і сучасної теорії автоматичного керування. Так само вже систематичне і послідовне нагадування у даній статті про можливості новітніх методів має принести безсумнівну користь для їхнього застосування.

Мета статті. Дати нарис розвитку методів ТАР від простих лінеаризованих технологічних об'єктів керування до сучасної ТАК складними нелінійними об'єктами, що функціонують в умовах невизначеності.

Виклад основного матеріалу. Класична ТАР виникла з потреб автоматизації окремих «простих» об'єктів і ґрунтувалася на лінійних математичних моделях, за що дістала назву крім класичної ще й лінійної. Для лінійної ТАР характерним є конкретне застосування методів та технічних засобів [2], а з алгоритмів керування обмежений перелік типових законів, з яких найдосконалішим є ПД-закон. Типовими були закони, доступні реалізуватися у вигляді електронно-механічних пристроїв.

Сучасна ТАК характеризується створенням систем автоматизації для складних об'єктів на основі нелінійних або ж і спеціальних математичних моделей, використанням спеціальних алгоритмів керування (нелінійних, адаптивних, робастних), застосуванням новітніх комп'ютерних технологій та інтелектуальних методів.

Сучасна ТАК сформувалась на дослідженні методів керування класом «складних» об'єктів, при аналізі яких враховуються їхні нелінійність, нестационарність, багатовимірність, розподіленість координат, недетермінованість, а також й невизначеність, бо складні об'єкти стають такими саме в умовах суттєвих невизначеностей. Були розроблені для застосування формалізовані регулярні методи синтезу систем керування на основі простору станів, матмоделей в координатах стану, векторно-матричного числення, теорії оптимізації розширеного масштабу. Сучасна ТАК має методи синтезу різнотипних систем: багатовимірних, нелінійних, з розподіленими координатами, зі змінюваними параметрами та структурами, адаптивних, дискретних, робастних та таке інше.

Синтезовані при наявності невизначеностей у матмоделі регулятори і системи називаються робастними, що трактується як мала чутливість до можливих змін математичної моделі об'єкта або кола зворотного зв'язку.

Сутність проблеми робастності становить вивчення питання збереження певних властивостей замкненої системи при можливих варіаціях (невизначенні) деяких її характеристик або умов функціонування. Основна й принципово нова ідея синтезу робастного керування полягає в тому, щоб однаковим регулятором забезпечити стійкість замкнених систем не тільки для номінального (без врахування помилок моделі) об'єкта, але й для будь-яких об'єктів, що належать множині «збурених» об'єктів, що визначаються класом невизначеності.

Початком строгої класичної теорії робастного керування, розповсюдженої на багатовимірні системи, послужила пропозиція критерія оптимальності на основі H^∞ - норми багатовимірної передавальної функції замкненої системи або енергії виходу системи при поданні на вхід сигналу з одиничною енергією. Якщо виходом є помилка керування, то мінімізуючи H^∞ - норму, мінімізуємо енергію помилки для найгіршого випадку вхідного збурювання. У скалярному випадку норма такої функції скінченна й дорівнює максимальному значенню амплітудно-частотної характеристики.

Сучасна ТАК стосується в першу чергу складних нелінійних технологічних об'єктів, які функціонують в умовах невизначеності [2]. Звичайно система вважається складною [3], якщо для побудови її адекватної моделі недостатньо апіорної інформації і її поведінка (реакція на діяння) істотно залежить від невідомих чинників, умови її функціонування невизначені, тобто є складними, а створення системи автоматизації є проблематичним. Проте такими складними-невизначеними системами майже завжди успішно керує людина-оператор. Тому для керування виникли методи штучного інтелекту на основі нейронних мереж, нечіткої (fuzzy) логіки, еволюційних (генетичних) алгоритмів, нечітких когнітивних карт, дерев розв'язків і таке інше. На засадах сучасної ТАК ґрунтуються системи штучного інтелектуального керування: експертні системи, які відтворюють керувальні дії високофахових спеціалістів-експертів; спеціалізовані діалогові системи, які забезпечують паритетний інтерактивний діалог людини-оператора з ЕОМ; інформаційні системи оброблення сигналів та зображень, які забезпечують збирання та оброблення даних про стан об'єктів та процесів керування, їхній аналіз (розпізнавання, тлумачення) або прогнозування; інформаційні системи керування, які виконують оцінювання стану об'єктів та прийняття (або підтримання) рішень для забезпечення бажаних техніко-економічних показників функціонування об'єктів в умовах невизначеності. Для функціонування останніх потрібне отримання і використання інформації про стан як самих складних (нестационарних, недовизначених) об'єктів керування, так і зовнішнього відносно їх середовища, тому такі системи мають в складі бази даних і бази знань різноманітного наповнення. Автоматизація організаційних процесів традиційно використовувала переважно евристичні методи, а автоматизація технологічних процесів більше - формалізовані регулярні. Гібридний клас організаційно-технологічних систем об'єднав формалізовані методи з інтелектуально-евристичними, що на основі апіорної інформації забезпечує регуляризацію задач керування та розв'язання їх в класі інтелектуальних систем [4]. Сучасні технічні засоби автоматизації дозволяють

так вдосконалювати системи автоматизації, що нові синтезовані алгоритми керування реалізуються або програмним шляхом, або з використанням промислових мікропроцесорних контролерів.

Ефективним шляхом вдосконалення САК в харчових виробництвах є впровадження підсистем підтримки прийняття рішень (ПППР – DSS – Decision Support System) менеджерами в складних ситуаціях на основі досягнень в галузі інформаційних технологій, телекомунікаційних мереж, ПЕОМ, динамічних електронних таблиць, експертних систем. Структура PPPPР включає три головні складові підсистеми: інтерфейсу користувача, керування базами даних, керування базами моделей. Перше покоління PPPPР (з 1970 р.) було засобом комп'ютеризованої допомоги у прийнятті управлінських рішень і мало такі ознаки: керування даними (банки всіх доступних даних, їх оброблення та оцінювання), керування обчисленнями – загальне моделювання, спілкування – інтерфейси користувачів (фахові мови програмування).

Сучасні PPPPР забезпечують допомогу в цілому діапазоні рішень, підтримку рішень користувача підвищенням їхньої ефективності, інтеграцією моделей і аналітичних методів при обробленні вибірки даних, забезпеченням дружнього інтерфейсу та простоти доступу, інтерактивністю розв'язування задач в режимі діалогу, гнучкістю та адаптивністю при зміні середовища або підходу до розв'язання задач. У PPPPР знайшли практичне застосування математичні методи прийняття рішень, нейронні мережі, системи нечіткої логіки та експертні системи. Характерними є оптимізаційні задачі, що входять до лінійного програмування при поетапному розв'язуванні (динамічне програмування). До них належать задачі розпізнавання образів та побудова прогнозів.

Нейронна мережа – це сукупність нейронів, що зв'язані великою кількістю зв'язків. Під штучною нейронною мережею розуміють математичну модель, а також пристрій паралельних обчислень, як системи штучних нейронів, що з'єднані та тих, що взаємодіють між собою. Штучні нейронні мережі являють з себе розподілені і паралельні системи, здатні до адаптивного

навчання шляхом аналізу позитивних і від’ємних впливів. Елементарним перетворювачем в даних мережах є штучний нейрон або просто нейрон за аналогією з біологічним прототипом. Математично штучний нейрон представляють як деяку нелінійну функцію від одного аргументу – лінійної комбінації всіх вхідних сигналів. Дану функцію називають функцією активації.

Штучний нейрон складається з елементів трьох типів: помножувачів (синапсів), суматора і нелінійного перетворювача. Синапси здійснюють зв'язок між нейронами, домножують вхідний сигнал на число, що характеризує силу зв'язку (вага синапсу). Суматор виконує додавання сигналів, що надходять по синаптичним зв'язкам від інших нейронів, і зовнішніх вхідних сигналів. Нелінійний перетворювач реалізує нелінійну функцію одного аргументу – виходу суматора. Ця функція називається функцією активації чи передавальною функцією нейрона. Нейрон в цілому реалізує скалярну функцію векторного аргументу. Математична модель штучного нейрону:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i + b,$$
$$Y = f(S),$$

де S - результат підсумовування (sum); W_i – вага (weight) синапсу, $i = 1 \dots n$; X_i – компонент вхідного вектора (вхідний сигнал), $i = 1 \dots n$; b – значення зміщення (bias); n – число входів нейрона; Y – вихідний сигнал нейрона; $f(S)$ – нелінійне перетворення (функція активації).

Синаптичні зв'язки з позитивними вагами називають збуджувальними, з негативними – гальмівними. Описаний обчислювальний елемент можна вважати спрощеною математичною моделлю біологічних нейронів, але щоб підкреслити відмінність біологічних і штучних нейронів, останні іноді називають *нейроподібними елементами* або *формальними нейронами*.

Головна ідея нечіткої логіки [5] полягає в заміні складної математичної моделі реального процесу на логіко-лінгвістичну модель керування цим процесом. В рамках керування передбачається використання досвіду оператора. Стратегія керування формується як набір лінгвістичних правил, які доступні

для виконання людиною, але які складно формалізувати на основі звичайних алгоритмів керування, бо вони не можуть бути інтерпретовані однозначно, хоч і містять важливу інформацію. Основою підходу є моделювання нечітких параметрів лінгвістичної змінної. При прийнятті керувальних рішень для складних об'єктів підходи імітаційного моделювання, орієнтовані на використання кількісних об'єктивних оцінок, і методи традиційної теорії прийняття рішень виявляються недостатніми. Ефективним розв'язком цієї задачі є використання когнітивного моделювання, яке дозволяє структурувати і систематизувати наявну інформацію, визначити сценарії функціонування системи та спрогнозувати динаміку досягнення цілей, а також досліджувати альтернативи рішень і обирати з них оптимальні.

Когнітивний підхід заснований на створенні та дослідженні когнітивних карт ситуацій, які в широкому розумінні представляють собою схематичний, спрощений опис фрагментів функціонування системи, що відноситься до конкретної проблемної ситуації. Основною метою когнітивного моделювання є формування та уточнення гіпотези щодо функціонування досліджуваного об'єкту, що розглядається як слабкоструктурована система, яка складається з окремих внутрішніх і зовнішніх елементів, підсистем, що взаємодіють одне з одним, на основі структурної схеми причинно-наслідкових зв'язків.[3]. Основним завданням, яке вирішуються в рамках когнітивного підходу є прогнозування та вибір альтернативних стратегій керування. Когнітивні моделі дозволяють здійснювати аналіз досліджуваної ситуації за допомогою вивчення структури взаємних впливів концептів когнітивної карти та динамічного аналізу, який полягає у генерації можливих сценаріїв розвитку. Когнітивні моделі є ідеальними для моделювання та керування складними виробничими процесами, бо поєднують в собі переваги нечіткої логіки та нейронних мереж: нечіткої логіки (відпадає необхідність знання точних математичних моделей, діє правило ЯКЩО – ТО для слабо формалізованих об'єктів); нейронних мереж (нелінійність опису, можливість самонавчання, щоб отримати оптимальні закони керування).

Використання синергетичного підходу (самоорганізації) [6] для керування дозволяє створити динамічні процеси, що базуються на організації та самоорганізації, відповідають природі об'єкта керування, узгоджують керування з результатом і вихідними (початковими) значеннями. Це дає оцінити нелінійності, нестійкості, нерівноважності, усвідомити процеси, що розвиваються завдяки флуктуаціям, що породжують точки біфуркації, в яких з'являються різні напрями змінювань системи, можливість спонтанного виникнення самоорганізації із безладу і хаосу в дисипативних структурах (вони започаткували «науку про складність» - нелінійну динаміку). У спадок нелінійній динаміці залишилося ряд проблем, які почали розв'язуватися з відкриттям стохастичної поведінки динамічних систем і знаходженням стійких локалізованих структур, які є основою виникнення динамічного хаосу (турбулентності) та вихорових структур. Нелінійна динаміка в межах теорії якості та біфуркації динамічних систем запропонувала свої алгоритми «спрощення» складних систем. Одним з головних алгоритмів є пропозиція масштабної інваріантності на всіх рівнях, прикладом якої слугують фрактальні множини на основі принципів самоподібності. Наразі предметом нелінійної динаміки стає дослідження складних систем зі змінною структурою та хаосом, систем з пам'яттю та самонавчанням. Цей напрям відомий як нейронаука. Її розвиток показав, що основним принципом розуміння процесів постановки нових проблем є комп'ютерне моделювання, бо дає нові розв'язки незнайомих ситуацій керування. Синергетичний підхід пропонує таку структуру керування та процедур самоорганізації, щоб потрібний стан системи ставав стійким, а рух у фазовому просторі приводив в його бажану точку.

В кінці XX століття був заснований сценарно-цільовий підхід для аналізу і прогнозування роботи організаційно-економічних систем. Він враховує: цілі, що складаються з цільових компонентів і представляються у вигляді графа типу дерева; операції, які забезпечують досягнення цілей перетворенням об'єктів; об'єктів, які є результатом виконання операцій (готові продукти, напівпродукти, вантажі, документи, фінансові або інформаційні потоки);

ресурси, які використовуються для проведення операцій (сировина, кошти); переходи, які відбуваються в системі як факт передавання об'єктів між операціями; події, які конкретизують передавання об'єктів між операціями. Аналіз проводиться на двох рівнях: на першому складається цільовий сценарій у вигляді графів операцій і цілей, на другому – формується і досліджується структурна реалізація сценарію в формі прографа. Програф – це процесно-ресурсно-об'єктний граф, що має два підрівня: базовий та табличний. Отримання максимального прибутку можливе за умови досягнення таких підцілей: дотримання технологічного регламенту, скорочення часу на прийняття оперативних управлінських рішень, використання інтелектуальних підсистем автоматизації на різних рівнях, впровадження мікропроцесорної техніки та комп'ютерно-інтегрованих технологій, вдосконалення керування технологічними процесами, проведення діагностики та прогнозування. Цільовий сценарій у вигляді графа операцій поєднує властивості статичних і динамічних моделей організаційно-технологічних систем. Статика дає візуалізацію послідовності виконання операцій, а динаміка виконання ілюструється за допомогою міток (маркерів), які знаходяться на вершинах графа. Граф цілей – орієнтований граф, в якому вершини відповідають цілям, ілюструє ієрархію цілей. Граф цілей узгоджується з графом операцій таким чином, щоб для кожного шляху на графі цілей існувала послідовність переходів на графі операцій. Використовуючи графи операцій і цілей, виводяться базовий і табличний прографи шляхом введення в цільовий сценарій символів об'єктів, подій, ресурсів і часової шкали, в межах якої розгортаються події.

Використання теорії марківських процесів дає доступ до розгляду дискретних просторово-часових структур. Але стан системи визначається не змінними стану, а їхніми ймовірностями та щільністю розподілу ймовірності. Для визначення стану процесу при $t \geq t_0$ потрібно знайти лише стан у момент початку t_0 , тобто марківський процес не має післядії. Для однорідного марківського процесу, який залежить лише від періоду часу з моменту початку стану, можна записати

$$A(t + \Delta t) = P(\Delta t) A(t),$$

де $A(t)$ – матриця, елементи якої $a_i(t)$ дають оцінку ймовірності стану i системи в момент часу t ; $P(\Delta t)$ – матриця, елементи якої $P_{ij}(\Delta t)$ свідчать про ймовірність переходу із стану i в стан j в момент t .

Останнім часом за врахування умов невизначеності стали застосовними математичні моделі, побудовані в нечіткому середовищі [6]. Використовуючи функції належності $\mu_{x_i}(x) \in [0,1]$ як сумісність змінної x і нечіткої множини x_i , моделі подають у вигляді відображення, яке кожній нечіткій вхідній множині ставить у відповідність вихідну (з виходу) нечітку множину. Нечітку модель подають у вигляді

$$M = \mu_1 / x_1 + \mu_2 / x_2 + \dots + \mu_i / x_i,$$

де M – нечітка множина; μ_i - функції належності; x_i - елементи нечіткої множини.

Висновки. З метою систематичного огляду методів сучасної теорії автоматичного керування при розробленні (синтезі) систем автоматизації технологічних об'єктів харчових виробництв реалізуються ієрархічні структури на основі комп'ютерних промислових мереж. Показані основні напрямки використання сучасних методів для створення ефективних систем автоматизації складних, в тому числі і нелінійних об'єктів, що функціонують в умовах невизначеності.

ЛІТЕРАТУРА

1. М54. Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5-ти тт. 2-е изд. перераб. и доп. Т 1. Математические методы, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издат-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 636 с., ил.
2. Ладанюк А.П. Сучасні методи автоматизації технологічних об'єктів [Текст]: монографія / А.П. Ладанюк, О.А. Ладанюк, Р.О. Бойко, В.В.Іващук, Д.О.Кроніковський, Д.А. Шумигай // – К.: Інтер Логістік Україна, 2015. 408 с.

3. Ладанюк А.П. Іноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу [Текст]: монографія / А.П. Ладанюк, В.М. Решетнюк, В.Д. Кишенько, Я.В. Смітюх // – К.: НУХТ «Центр учбової літератури», 2014. – 280 с.
4. Дорф Р. Бишоп Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп // - М.: Лаборатория базовых знаний, ЮНИМЕДИАСТАЙЛ, 2002. 831 с.
5. Леоненков А.Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzy Tech / А.Ю. Леоненков. – С.Птб.: БХВ, 2003. –720 с.
6. Владимирский Э.И. Синергетические методы управления хаотическими системами [Текст]: / Э.И. Владимирский, Б.И. Исмаилов // – Баку: ELM, 2011. – 240 с.

Б.Н. ГОНЧАРЕНКО, доктор технических наук

А.П. ЛОБОК, кандидат физико-математических наук

Национальный университет пищевых технологий

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Приведены методы линейной теории автоматического регулирования (ТАР) и современной теории автоматического управления (ТАУ), которые применяются при разработке систем автоматизации технологических процессов пищевых производств и реализуются как иерархические структуры на основе компьютерных промышленных сетей. Согласно системному подходу показаны основные направления использования математического моделирования при создании эффективных систем автоматизации сложных, в том числе и нелинейных объектов, функционирующих в условиях неопределенности. Упомянуты информационные технологии и методы, применяемые в интеллектуальных системах.

Ключевые слова: теория автоматического регулирования, управление, технологический объект, функциональная структура, системный анализ, синтез

управления, линейность-нелинейность, неопределенность, математическая модель, передаточная функция, алгоритм управления, оптимизация, робастность, адаптивность, когнитивность, генетика, критерий, устойчивость, качество.

B.M. GONCHARENKO, Ph.D.

A.P. LOBOK, the candidate of physical and mathematical sciences

National University of Food Technologies

IMPROVEMENT OF AUTOMATIC FUNCTIONAL STRUCTURE OF CONTROL OF TECHNOLOGICAL OBJECTS

The methods of linear automatic control theory (ACT) and modern control theory (MCT), which are used in the development of process automation systems and food production are implemented as hierarchical structures based on computer networking industry. According to the system approach shows the main directions of use of mathematical modeling to create effective systems for automating complex, including non-linear processes, operating under conditions of uncertainty. Reference is made to information technologies and methods used in intelligent systems.

These citations reflect the basic directions and methods used in recent years in developing advanced automated control systems and the synthesis of control appropriate actions to ensure their required or desired nature, such as robust or adaptive.

Keywords: theory of automatic control, management, technological object, functional structure, system analysis, synthesis control, linearity, nonlinearity, uncertainty, mathematical model, transfer function, control algorithm, optimization, robustness, adaptability, cognition, genetics, criterion, stability, quality.

Одержана редколегією 20.09.2015 р.