

УДК 62.50

С.В. Павлова, канд. техн. наук, доц.

ЄДИНЕ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЬНЕ УЯВЛЕННЯ СИСТЕМ I^2C^3S З РІЗНИМ РІВНЕМ ІНТЕГРОВАНОСТІ ТА РОЗПОДІЛЕНОСТІ

Розроблено модельне рамочне архітектурне уявлення процесів у системах I^2C^3S , що дозволяє на єдиних структурних засадах досліджувати та синтезувати ефективні системи I^2C^3S , об'їмаючи дві концепції: теорії автоматичного керування ACS-View та комп'ютерних і телекомунікаційних наук CS&T-View.

So-called "frame" modeling architectural representation of processes in the I^2C^3S -systems is developed. It allows on uniform structural bases to investigate and synthesize effective systems I^2C^3S , uniting two concepts – the concept of automatic control theory ACS-View and the concept of computer and telecommunication sciences CS&T-View.

Постановка проблеми

Важливість і необхідність розробки методів керування нелінійними об'єктами в цілому з використанням розподілених комп'ютерних систем є однією з основних проблем сучасної теорії керування.

Потреба в дослідженнях цього напрямку викликана, з одного боку, зростанням вимог до систем керування технологічними процесами, серед яких важливими є вимоги максимізації ефективності керування цими процесами і забезпечення підвищених рівнів надійності та безпеки функціонування створюваних складних систем, з іншого боку, природним ускладненням самих технологічних процесів.

У зв'язку з розвитком комп'ютерних систем з'являється можливість створення нового типу систем керування складними процесами, заснованого на комп'ютерно-системних засобах керування і комунікації керуючих впливів та інформаційних потоків.

Як вважають у середовищі спеціалістів з керування, об'єднаних у межах IFAC (International Federation of Automatic Control), цей новий клас систем керування, віднесено до класу систем I^2C^3S (Integrated Intellectual Communication Computer Command System).

Проблема керування складними нелінійними динамічними системами I^2C^3S в усій області їхнього визначення відповідає Державній програмі автоматизації України, Державній програмі «Інформаційні та телекомунікаційні технології в освіті та науці на 2006–2010 роки», пріоритетному напрямку розвитку науки в Україні «Нові комп'ютерні засоби та технології інформатизації суспільства».

Аналіз публікацій і досліджень

З огляду сучасної літератури, присвяченої дослідженню проблеми створення ефективних систем I^2C^3S , впливає щонайменше двостратна концепція їх дослідження:

– мережева (комп'ютерно-комунікаційна);
– прикладна (керування динамічним процесом).
Перша страта – комунікаційна, на якій досліджуються питання, що цілком відносяться до суті комп'ютерно-комунікаційної області [1; 2] – механізмів розподілених систем:

- паралелізм;
- синхронізація;
- вибір;
- взаємне вилучення;
- пріоритети;
- якісні та кількісні властивості передавання даних;
- відносність часу;
- середній час до першої помилки.

На другій страті дослідників турбує немовби зовсім інші питання, пов'язані з утворенням замкнених систем керування прикладними процесами, тобто питання, що відносяться до галузі керування безвідносно до тих засобів, якими воно здійснюється, використовуються лише інтегровані відображення вад передачі сигналів структурними каналами мереж.

Сучасний підхід ґрунтується на двох модельних уявленнях систем I^2C^3S :

- використанні STPN (стохастичні мережі Петрі);
- використанні методу передатних функцій щодо лінійних прикладних процесів зі сталими параметрами, що потім повинні узгоджуватися на якісному рівні.

Складність процесів, що відбуваються в системах I^2C^3S , обмежує теоретичні системні можливості обох підходів до відображення всіх аспектів мережевих засад та властивостей прикладних процесів у цілому, штучно відокремлює один підхід від іншого та призводить до системних вад у дослідженні цих систем.

Проблемність нового для теорії керування класу систем I^2C^3S полягає в тому, що кожна система цього класу утворюється сукупністю вилучених і розділених одне від одного керуючих і

керуваних динамічних підсистем, що багатоконтурно зв'язані засобами відкритої інтелектуальної комп'ютерно-комунікаційної мережі, яка не є винятковою приналежністю конкретної керованої системи [1; 2].

Рівноважність кожної із трьох підсистем породжує в їх дослідженні проблему двох точок зору [1; 2]:

– комп'ютерних і телекомунікаційних наук CS&T-View (Computer Science and Telecommunication View);

– теорії автоматичного керування ACS-View (Automatic Control Science View).

З літератури, присвяченої дослідженням складних керованих систем, випливає, що в цьому класі систем найбільш бурхливо й ефективно розвивається страта – теорія керування та спостереження у складних системах в умовах невизначеності зі змішаними різномірними обмеженнями [3–5].

Характерна риса цієї теорії – використання замість гіпотези про стохастичну природу всіх невизначених величин і процесів лише апріорного припущення про їх опукло-множинні оцінки [3; 4]. Це дозволило створити єдину системну базу дослідження складних систем, об'єднавши методи робастної стійкості, ідентифікації, оцінювання, синтезу керування з такими методологічними положеннями теорії позиційних ігор, як принципи гарантованого результату та динаміки множини позицій, що постають у формі диференціальних і різницевих включень [3–7].

Для вирішення цього класу завдань набули застосування методи теорії інваріантності за тих обмежень і умов, які визначені теорією керування та спостереження у складних системах в умовах невизначеності зі змішаними різномірними обмеженнями [4].

У цілому для аналізу та синтезу керувань складними активними системами превалюють евристичні методи аналізу та вирішення з широким використанням комп'ютерного моделювання [5; 8].

Невирішена частина проблеми

Вузьким місцем у розв'язанні завдань алгоритмізації сучасних динамічних процесів є проблема аналізу та синтезу складних істотно нелінійних динамічних систем із наперед заданою гарантованою якістю свого функціонування.

У зв'язку з практичною необхідністю та недостатньою методологічною базою для вирішення цієї проблеми ще більш актуальним напрямом дослідження є розробка методів аналізу та синтезу

інтелектуального інтегрованого керування складними нелінійними процесами в інформаційно-керувальних системах (ІКС), що забезпечує наперед заданий гарантований результат їх функціонування в умовах невизначеності у максимальній розширеній області стану процесу.

Мета роботи – розробити єдине математичне модельне уявлення систем I^2C^3S з різним рівнем інтегрованості та розподіленості, точніше – побудувати модельне уявлення систем I^2C^3S як динамічного керованого процесу в цілому на засадах суттєво нелінійних систем диференціальних рівнянь типу А.Ф. Філіппова [6] у тому їх вигляді, що дозволить об'єднати процеси у системах I^2C^3S на концептуальних стратах ACS та CS&T.

При цьому модель систем I^2C^3S має бути такою, щоб допускала дослідження і створення:

– нових принципів побудови гнучких систем керування складними процесами та системами з підвищеним рівнем ефективності, використанням стратегій зосередженого та розподіленого керування процесом;

– нових алгоритмічних можливостей гнучкого керування технологічними процесами як в умовах конфлікту досліджуваного процесу з його зовнішнім і внутрішнім середовищами, так і в широкому діапазоні зміни станів процесів.

Під час створення моделі вважатимемо, що складні системи керування – це збірна назва таких систем, які складаються з великої кількості взаємозалежних елементів.

Відповідно до енциклопедії [9], характерні ознаки складних систем такі:

– багатомірність і велика кількість елементів, що утворюють систему;

– однорівнева та багаторівнева багатозв'язність;

– різноманіття можливих форм і структур зв'язків елементів системи між собою від простих “мереж”, “дерев” до різноманітних за конфігураціями ієрархічних структур;

– багатокритеріальність і наявність ряду суперечливих локальних і глобальних критеріїв, яким повинна задовольняти система;

– багаторазовість зміни складу, структур і станів системи;

– різноманіття природи елементів, що становлять систему (машини, автомати й люди);

– різномірність інформації, що циркулює;

– багатоплановість у науковому відношенні.

Розв'язання проблеми синтезу складних керованих систем відноситься до проблематики кібернетики, зокрема, інформатики та штучного

інтелекту, а також до нової галузі сучасних досліджень і розробки, визначеної як інтелектуальне керування.

Сьогодні інтелектуальне керування як галузь досліджень, формується та розвивається на стику сучасної теорії керування і штучного інтелекту [10].

Теорію керування тут розуміють як сукупність методів, що дозволяють виробити й обґрунтувати рішення, які приймаються для досягнення заздалегідь поставленої мети, в умовах певним чином визначеної ситуації, а штучний інтелект – як розділ інформатики, що вивчає методи та прийоми моделювання і відтворення за допомогою ЕОМ розумної діяльності людини, пов'язаної з вирішенням завдань [11; 12].

Важливим компонентом фундаментальних досліджень зі штучного інтелекту тут є теорія ергатичних систем [7].

У сфері інтелектуального керування розглядають багатоцільові завдання керування в реальному масштабі часу, коли складна динамічна система функціонує в середовищі, що змінюється, і в умовах невизначеності.

Для зазначених завдань керування характерні такі ознаки:

- неповнота інформації про стан системи та середовища;
- нелінійний характер динамічного процесу;
- невизначеність ситуацій керування;
- залежність моделей системи та середовища, їх складності та точності від мети керування;
- відкритість систем з метою підвищення інтелектуальності та удосконалення власного поведіння;
- структурна варіативність;
- необхідність розв'язання завдань у реальному часі, масштаб якого залежить від мети;
- зміна цілей і критеріїв якості їх досягнення;
- зміна властивостей збурень і перешкод;
- розподілення ресурсів системи (енергетичних, просторових і часових, обчислювальних, інформаційних та ін.);
- конфліктність завдань керування;
- перманентність процесу прийняття рішень;
- наявність структурних і неструктурних збурень.

Нелінійна розподілена система керування динамічними системами

Структурно етапи розвитку концепції гнучкого розподіленого керування пояснюють схеми, показані на рис. 1–3.

Особливістю сучасних тенденцій розвитку систем керування є комплексний розвиток як систем безпосереднього прямого керування технологічними об'єктами (етап I), так і опосередкованого непрямого керування (етапи II і III).

У першому випадку (етап I) структура керованої системи має вигляд, показаний на рис. 1, де пристрій виміру В, пристрій керування ПрК просто-риво невіддільні від об'єкта керування.

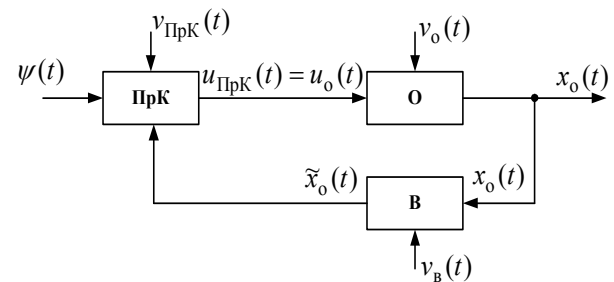


Рис. 1. Загальна структура системи безпосереднього прямого керування (зосереджена концепція):

ПрК – пристрій керування;

О – об'єкт керування;

В – вимірювальний пристрій (датчик);

$v_{\text{ПрК}}(t)$, $v_0(t)$, $v_{\text{в}}(t)$ – перешкоди та збурення, що діють на компоненти системи;

$\psi(t)$ – командний сигнал (завдання);

$u_{\text{ПрК}}(t)$ – керуючий сигнал, вироблений ПрК;

$u_0(t)$ – керуючий сигнал, що надійшов на вхід об'єкта;

$x_0(t)$ – вихідна змінна стану об'єкта;

$\tilde{x}_0(t)$ – виміряний системою В стан об'єкта О

Етап II (рис. 2) характеризується передачею інформації від пристрою керування до об'єкта та від об'єкта до пристрою керування за фізичними виділеними каналами.

На рис. 3 показано структурну схему етапу III, який характеризується наявністю гнучкого транспорту керуючої інформації через глобальну мережу, спеціально організованими віртуальними каналами в мережах IP, WAN та LAN.

Поява у структурі об'єкта О систем ІККС₁ та ІККС₂ викликана необхідністю збереження цілісності керування системи.

Під час просторового видалення пристрою керування ПрК від місця розташування об'єкта (рис. 3) для передавання керуючих впливів на об'єкт використовується інформаційно-комп'ютерна комунікаційна система ІККС₁.

Поява інформаційно-комп'ютерної комунікаційної системи ІККС₂ обумовлена необхідністю передачі інформації про поточний стан об'єкта у «вилучений» центр керування.

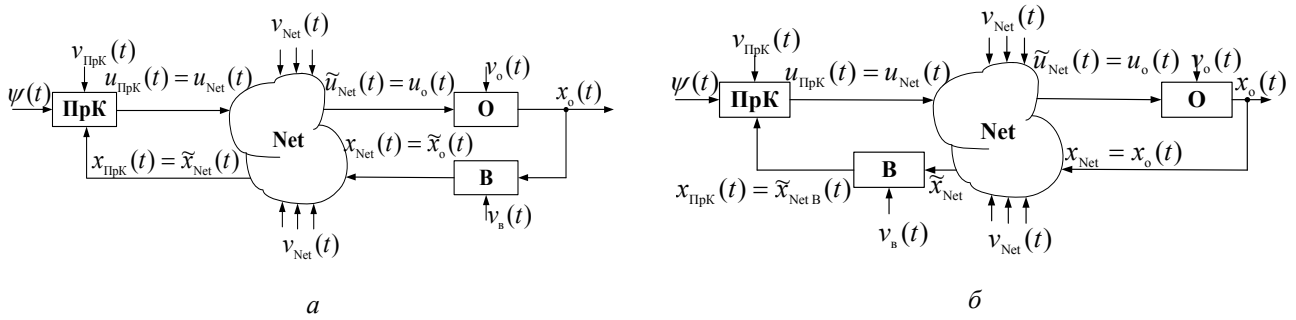


Рис. 2. Загальна структура системи розподіленого вилученого керування, що використовує для передачі керуючих сигналів глобальну обчислювальну мережу (Net):

- a* – структура системи з вимірювальним пристроєм, сполученим з об’єктом керування;
- б* – структура системи з вимірювальним пристроєм, вилученим та віддаленим від об’єкта керування;

$v_{Net}(t)$ – перешкоди та збурення, які діють на мережу та в мережі;
 $u_{Net}(t)$ – керуючий сигнал, що надійшов у мережу;
 $\tilde{u}_{Net}(t)$ – керуючий сигнал, переданий мережею;
 $x_{Net}(t)$ – інформація про стан об’єкта, що надійшла в мережу;
 $\tilde{x}_{Net}(t)$ – інформація про стан об’єкта, передана мережею;
 $\tilde{x}_{Net B}(t)$ – вимірний системою В стан об’єкта О, переданого мережею;
 $x_{ПпК}(t)$ – інформація про стан об’єкта, яка надійшла на керуючий пристрій

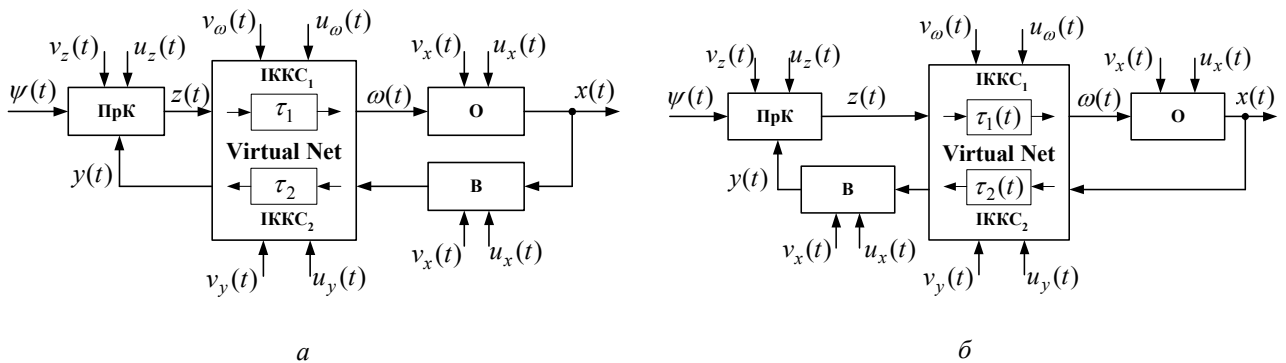


Рис. 3. Загальна структура системи розподіленого вилученого керування в термінах істотних змінних:

- a* – структура системи з вимірювальним пристроєм, сполученим з об’єктом керування;
- б* – структура системи з вимірювальним пристроєм, вилученим та віддаленим від об’єкта керування;

ІККС₁ і ІККС₂ – взаємозалежні інформаційно-комп’ютерні комунікаційні системи;
 Virtual Net – віртуальна персональна мережа;
 $v_i(t)$ – перешкоди й збурення, що діють на компоненти системи;
 $u_i(t)$ – сигнали, що змінюють стани відповідних підсистем;
 $x(t)$ – інформація про стан об’єкта;
 $z(t)$ – обчислений керуючий сигнал;
 $\omega(t)$ – керуючий сигнал на виході мережі;
 $y(t)$ – інформація про стан об’єкта, передана мережею; $\tau_1(t)$, $\tau_2(t)$ – вектори затримок у мережі, що відповідають системам ІККС₁ і ІККС₂

Зі зміною системи з прямого безпосереднього керування до системи опосередкованого непрямого керування відбувається цілком природне ускладнення задачі. Це викликано ростом розмірності цілісної системи за рахунок залучення в процес керування компонентів ІККС₁ та ІККС₂.

Важлива особливість такого розширення полягає в тому, що в цьому випадку принципово змінюються динамічні властивості всієї системи за рахунок залучення до системи динамічних процесів функціонування ІККС₁ та ІККС₂ у реальному масштабі часу, з одного боку. А з іншого боку, при цьому істотно розширюється спектр збурень, що діють на систему, яка щойно утворилася.

Під час аналізу й синтезу систем прямого й непрямого керування в системному плані важливо враховувати, що принципово кожна з них є динамічною системою.

Практична потреба у створенні розподілених систем – це використання та прикріплення зовнішнього обчислювального ресурсу для підвищення ефективності керування об'єктом.

Проблема, яка при цьому виникає, полягає в тому, що вихідний динамічний процес у разі потреби доповнюється системою, що приєднується. У результаті різко ускладнюється первісно визначена проблема за рахунок стрибкоподібного росту складності розподіленої системи, яка щойно утворилася.

Фазовими станами розподіленої системи є в цьому випадку його крайні стани: система безпосереднього прямого керування, система розподіленого вилученого керування та деяка множина проміжних фаз.

Динамічна модель такої системи за умов, викладених у роботах [13; 14], може розглядатися у формі двох модельних уявлень:

1) у формі нелінійної системи в термінах істотних змінних з аргументами, що відхиляються:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \tilde{F}_x(t, x(t), \omega(t), u_x, v_x); \\ \dot{y} &= \tilde{F}_y(t, x(t - \tau_x), y(t), z(t), \omega(t - \tau_\omega), u_y, v_y); \\ \dot{z} &= \tilde{F}_z(t, y(t), z(t), \psi(t), u_z, v_z); \\ \dot{\omega} &= \tilde{F}_\omega(t, \omega(t), z(t - \tau_1), x(t - \tau_x), y(t - \tau_y), u_\omega, v_\omega), \end{aligned} \quad (1)$$

де \tilde{F}_i – вектор-функція відповідних аргументів;

x – вектор змінних об'єкта;

ω – вектор змінних на вході об'єкта, що відображає мережею вектор керувань z ;

u_i – керуючі функції відповідних елементів системи;

v_i – перешкоди та збурення, що діють на відповідні елементи системи;

τ_i – затримки в системі;

y – вектор змінних, що відображають мережею стан x ;

z – вектор змінних, вироблених вилученою керуючою системою;

ψ – вектор-функція завдання функціонування системи;

2) апроксимаційне вираження з використанням або рядів Тейлора, або рядів Пада, або методу гармонійної лінеаризації для уявлення функцій з аргументами, що відхиляються [15–17]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F_x(t, x(t), \omega(t), u_x, v_x); \\ \dot{y} &= F_y(t, x(t), y(t), z(t), \omega(t), u_y, v_y); \\ \dot{z} &= F_z(t, y(t), z(t), \psi(t), u_z, v_z); \\ \dot{\omega} &= F_\omega(t, x(t), y(t), z(t), \omega(t), \psi(t), u_\omega, v_\omega), \end{aligned} \quad (2)$$

де F_i – вектор-функція відповідних аргументів, утворена в результаті процедури апроксимації.

Нехай \tilde{n} – розмірність системи (1), а n_c – розмірність системи (2). При цьому розмірність n_c системи (2) перевершує розмірність \tilde{n} системи (1):

$$n_c > \tilde{n} \geq n_0,$$

де n_0 – розмірність зосередженої системи:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F_x(t, x, u_x, v_x); \\ \dot{y} &= F_y(t, x, y, u_y, v_y). \end{aligned} \quad (3)$$

Для випадку, коли мережа мобільна, модельні уявлення (1), (2), (3) значно ускладнюються за рахунок ускладнення функцій F і \tilde{F} .

У результаті в узагальненому модельному виразі рівняння розширеної системи І²С³S набувають форму рівнянь:

– для випадку системи з аргументами, що відхиляються:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \tilde{F}(t, x(t - \tau), u, v); \\ x &\in Q_x; \\ u &\in U; \\ v &\in V; \end{aligned} \quad (4)$$

– для уявлення (2):

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= F(t, x, u, v); \\ x &\in Q_x; \\ u &\in U; \\ v &\in V. \end{aligned} \quad (5)$$

Загальним єдиним уявленням обох граничних форм (4) і (5) служить модель

$$\frac{dx}{dt} = F(t, x, u, v, \tau), \quad (6)$$

де τ – має також системний зміст збурення і тому може бути для однаковості уявлення включено до складу розширення вектора v [7; 18]:

$$\frac{dx}{dt} = F(t, x, u, g), \quad (7)$$

де g – вектор комплексного збурення системи:

$$g = (v, \tau) \in G.$$

Для того, щоб задовольнити з гарантованим результатом потребу практики й мати потенційну можливість достатньо коректного розв'язання проблеми аналізу та синтезу функцій керування динамічними розподіленими процесами, їхні модельні уявлення (7) повинні мати вигляд істотно нелінійних систем диференціальних рівнянь [5–7; 13; 19]:

$$\frac{dx_j}{dt} = F_j(t, x_1, \dots, x_n, f_1(t), \dots, f_n(t)), \quad (8)$$

де $F_j, f_j, \frac{\partial F_j}{\partial x_i}, \frac{\partial F_j}{\partial f_i}, \frac{\partial^2 F_j}{\partial x_i \partial x_\alpha}, \frac{\partial^2 F_j}{\partial f_i \partial x_\alpha}, \frac{\partial^2 F_j}{\partial f_i^2}, \frac{\partial f}{\partial t}$ за всіх $\alpha, i \in N (N = \{1, 2, \dots, n\})$ – обмежені кусково-безперервні функції;

x_1, \dots, x_n – змінні, що описують стан системи керування;

$f_1(t), \dots, f_n(t)$ – зовнішні збурення.

Розглянуті в системі (8) функції F_j є речовинними функціями, визначеними майже всюди у відкритій або замкненій області Q_x простору (t, x_1, \dots, x_n) , тобто у всіх точках області за винятком тих точок, в яких ці функції зазнають розриву.

При цьому вся сукупність цих точок утворить у Q_x множину G_0 із нульовою мірою за Лебегом $\mu = 0$.

Множина G_0 утворить поверхні в Q_x . Вважаємо, що область Q_x ділиться цими поверхнями на підобласті Q_{x_i} , що мають позитивну міру. Це означає, що в кожній відкритій області Q_{x_i} функції

$$\frac{\partial F_j}{\partial f_i}, \frac{\partial^2 F_j}{\partial x_i \partial x_\alpha}, \frac{\partial^2 F_j}{\partial x_i \partial f_\alpha}, \frac{\partial^2 F_j}{\partial f_i^2}, \frac{\partial f_i}{\partial t}$$

безперервні. При цьому між деякими збуреннями допускається можливість функціонального зв'язку як лінійного, так і нелінійного типу:

$$\Phi_i(f_\beta(t), f_\gamma(t), \dots, f_\alpha(t)) \equiv 0.$$

Усі функції в моделі (1)–(8) задають звичайним для математики та обчислювальної техніки способом.

У математичних дисциплінах функції задають таблицями значень, графіками, формулою або на різних областях декількома формулами. При цьому основні форми їх аналітичного завдання функцій такі: явні, неявні та параметричне завдання.

У моделі (1)–(8) можна використовувати елементарні та неелементарні функції, що можуть визначатися різними способами, починаючи від простого опису значень аргумента та функції за допомогою декількох математичних формул, графів, формул переходу до границі, системою диференціальних рівнянь, розв'язання яких не може бути отримано у квадратурах, а також за допомогою функціональних рівнянь [20].

В обчислювальній техніці використовується завдання функцій у вигляді відображень, відносин і перетворень стандартних функцій, операторів-функцій і підпрограм функцій користувача [21].

Передбачається також, що розв'язання системи (8) існує і воно єдине за заданих початкових умов. Достовірність та обґрунтованість моделі (1)–(8) прикладних процесів класу систем $\Gamma^2 C^3 S$, що містять у собі розподілені комп'ютерні мережі, обґрунтовано теоретичними положеннями робіт з алгоритмізації процесів цього класу [6; 13; 14; 22]. Клас систем $\Gamma^2 C^3 S$, математичним відображенням якого є рівняння (1)–(8), досить широкий і практично охоплює системи керування динамічними об'єктами різних класів.

Висновки

Модельні уявлення (1)–(8) корисні для вирішення завдань:

- синтезу систем розподіленого автоматичного регулювання;
- оптимального керування в динаміці в «великому» по Q_x та T ;
- більш глибокого розуміння системних процесів у системах I^2C^3S ;
- проектування нових та подальшого вдосконалення діючих промислових об'єктів на сучасних комп'ютерно-інформаційних засадах;
- з'ясування характеристик протікання перехідних процесів і оцінок часу запізнювання перехідних процесів різними каналами, а також часу закінчення перехідних процесів систем I^2C^3S ;
- уникання конфліктних явищ, що виникають у системах I^2C^3S .

Література

1. *Gay Juanole*. Quality of Service of Communication Networks and Distributed Automation: Models and Performances [Електронний ресурс]: World Congress Barcelona, Spain, 2002 IFAC. – Elsevier Science Ltd The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2002. – 1 електр. опт. диск CD-ROM: цв; 12 см. – Систем. требования: Windows 98/200/NT/XP. Java-enabled Internet Browser. Adobe Acrobat Reader. – Заголовок с экрана.
2. *Casanova V. J/Salt*/ Real-Time Implementation of Multirate Control Techniques for an ICCS [Електронний ресурс]: World Congress Barcelona, Spain, 2002 IFAC. – Elsevier Science Ltd The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK, 2002. – 1 електр. опт. диск CD-ROM: цв; 12 см. – Систем. требования: Windows 98/200/NT/XP. Java-enabled Internet Browser. Adobe Acrobat Reader. – Заголовок с экрана.
3. *Petr Horacek*. 16th IFAC World Congress Final Report. September 5.2005 – Digital or multimedia/DVD, Imprint: Elsevier Science. – 27 June 2006.
4. *Кунцевич В.М.* Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. – К.: Наук. думка, 2006. – 264 с.
5. *Krotov V.F., Kurzhanski A.B.* National Achievements in control theory (The Aerospace Perspective) // <http://aca.2004.aanet.ru/004.pdf>.
6. *Филитов А.Ф.* Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. – М.: Наука, – 1985.
7. *Павлов В.В.* Инвариантность и автономность нелинейных систем управления. – К.: Наук. думка, 1971. – 272 с.
8. *Верлань А.Ф., Ефимов И.Е., Латышев А.В.* Вычислительные процессы в системах управления и моделирования. – Л.: Судостроение, 1981. – 248 с.
9. *Энциклопедия кибернетики*. Т. 2. – К.: Гл. ред. Укр. сов. энцикл., 1974. – 620 с.
10. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Фесуннов Б.Е.* Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физ.-мат. лит., 2000. – 352 с.
11. *Летов А.М.* Состояние и перспективы развития теории управления // Автоматика и телемеханика. – 1972. – № 9. – С. 12–22.
12. *Математический энциклопедический словарь* / Гл. ред. Ю.В. Прохоров. – М.: БР Энциклопедия. – 1995. – 848 с.
13. *Методы алгоритмизации непрерывных производственных процессов* / В.В. Иванов, А.И. Березовский, В.К. Задирака и др. – М.: Наука, 1975. – 400 с.
14. *Глушков В.М.* Введение в кибернетику. – К.: АН УССР, 1964. – 324 с.
15. *Системы цифрового управления самолетом* / А.Д. Александров, В.П. Андреев, В.Н. Кейти и др. / под ред. А.Д. Александрова, С.М. Федорова. – М.: Машиностроение, 1993. – 223 с.
16. *Рудис В.И.* Полуавтоматическое управление самолетом. – М.: Машиностроение, 1978. – 182 с.
17. *Метод гармонической линеаризации в проектировании нелинейных систем автоматического управления* / А.А. Вавилов, В.В. Павлов, Е.П. Попов и др. – М.: Машиностроение, 1970. – 568 с.
18. *Дружинин В.В., Конторов Д.С.* Конфликтная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1982. – 200 с.
19. *Справочник по теории автоматического управления* / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.
20. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов* / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука. Гл. физ.-мат. лит., 1981. – 720 с.
21. *Толковый словарь по вычислительным системам* / под ред. В. Иллингурта и др.: пер. с англ. А.К. Белоцкого и др.; под ред. Е.К. Масловского. – М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.
22. *Айзерман М.А., Гусев Л.А., Розеноэр Л.И., Галь А.А.* Логика. Автоматы. Алгоритмы. – М.: Физ.-мат. литература, 1963. – 556 с.