УДК 519.876.3:004.89

МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ З КЕРОВАНОЮ СТРУКТУРОЮ

©2018 **ЗЕЛІНСЬКА О. В.**

УДК 519.876.3:004.89

Зелінська О. В. Моделювання складних систем управління з керованою структурою

Метою статті є побудова процесів керування структурою складних систем. Одним із домінуючих завдань прикладної теорії складних систем є завдання побудови процесів керування структурою складних об'єктів. Її розв'язання є найнеобхіднішим зовнішнім доповненням до проблематики добре аксіоматизиваної математичної теорії систем, що створила апарат дослідження внутрішніх властивостей динамічних диференціальних і кінцевих динамічних систем (керованості, спостережливості та ін.) та надає можливість розв'язувати завдання логічного керування структурою системи та динамікою підсистем у векторних просторах. Також визначено обчислювальну схему для моделювання систем з керованою структурою. Практичне застосування графів для аналізу такого класу систем забезпечує всю необхідну інформацію для числового моделювання динамічних процесів як на цифрових ЕОМ, так і на цифро-аналогових комплексах.

Ключові слова: *логіко-динамічні системи, моделювання, складні системи, проектування, керування, змінні.*

Формул: *7.* ***Бібл.:*** *10.*

Зелінська Оксана Владиславівна *– кандидат технічних наук, старший викладач кафедри моделювання та інформаційних технологій в економіці, Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, Вінниця, 21008, Україна)*

E-mail: *zeloksanavlad@gmail.com*

УДК 519.876.3:004.89

Зелинская О. В. Моделирование сложных систем управления с управляемой структурой

Целью статьи является построение процессов управления структурой сложных систем. Одной из доминирующих задач прикладной теории сложных систем является задача построения процессов управления структурой сложных объектов. Ее решение является необходимым внешним дополнением к проблематике хорошо аксиоматизированной математической теории систем, которая создала аппарат исследования внутренних свойств динамических дифференциальных и конечных динамических систем (управляемости, наблюдаемости и др.) и позволяет решать задачи логического управления структурой системы и управления динамикой подсистем в векторных пространствах. Также определена вычислительная схема для моделирования систем с управляемой структурой. Практическое применение графов для анализа такого класса систем обеспечивает всю необходимую информацию для численного моделирования динамических процессов как на цифровых ЭВМ, так и на цифро-аналоговых комплексах.

Ключевые слова: *логико-динамические системы, моделирование, сложные системы, проектирование, управление, переменные.*

Формул: *7. Библ.: 10.*

Зелинская Оксана Владиславовна *– кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры моделирования и информационных технологий в экономике, Винницкий национальный аграрный университет (ул. Солнечная, 3, Винница, 21008, Украина)*

E-mail: *zeloksanavlad@gmail.com*

UDC 519.876.3:004.89

Zelinska O. V. Modeling the Complex Control Systems with Controlled Structure

The article is aimed at building the control processes of the complex system structure. One of the dominant tasks of the applied theory of complex systems is the task of building the control processes of the complex system structure. A solving of it is a necessary external addition to the problematics of well axiomatized mathematical theory of systems, which created the apparatus of researching the internal properties of the dynamic differential and finite dynamic systems (controllability, observability, etc.) and allows to solve the tasks of logical management of system structure and control of dynamics of subsystems in vector spaces. The computational scheme for modeling of systems with the managed structure has been defined as well. Practical application of graphs for analysis of such a class of systems provides all necessary information for numerical modeling of dynamic processes both on digital computers and on digital-analogue complexes.

Keywords: *logical-dynamic systems, modeling, complex systems, projecting, management, variables.*

Formulae: *7.* ***Bibl.:*** *10.*

Zelinska Oksana V. *– PhD (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Modeling and Information Technologies in Economics, Vinnytsia National Agrarian University (3 Soniachna Str., Vinnytsia, 21008, Ukraine)*

E-mail: *zeloksanavlad@gmail.com*

Функціонування багатьох сучасних технічних комплексів і складних об'єктів включає цілі сукупності станів, режимів і динамічних процесів. Завдання проектування систем керування подібними об'єктами перетворилася в наукову проблему, розв'язання якої виходить за рамки традиційної теорії автоматичного керування. Аксіоматика класичної теорії керування будувалася для моделей зі стаціонарною структурою. У складних системах структура об'єкта керування і склад його підсистем підлягають керуванню та координації в процесі цілеспрямованого функціонування. Використовувати апарат дослідження систем зі стаціонарною структурою для завдань проектування складних систем (з керованою структурою) неможливо, тому що саме поняття керування не може бути представлено категоріями традиційних моделей.

У зв'язку з цим виникла задача розробки нових принципів керування й адекватних їм математичних моделей систем з керованою структурою і складом підсистем. Ці розробки виконувалися з певною орієнтацією на системні методи проектування. Головною вимогою такої орієнтації є побудова аксіоматики нового класу моделей, що відповідала б досить високим стандартам суворості. Останні визначаються необхідністю застосування ЕОМ у проектуванні складних систем і неминучістю постановки завдання багатокритеріальної оптимізації проектних рішень.

Вивченням питання моделювання та проектування складних систем займалися такі вчені, як Жук К. Д., Клюєв В. В., Пістунов І. М., Харченко В. С., Кунцевич В. М., Лисогор В. М. та ін.

Метою статті є побудова процесів керування структурою складних систем.

Сучасні технічні комплекси вийшли далеко за рамки традиційних об'єктів, досліджуваних у теорії автоматичного регулювання. Крім «емоційних» аспектів проблеми складності, в сучасній теорії систем існують конкретні задачі проектування, побудови та експлуатації складних технічних комплексів.

Найбільш глибоким і важким з цих завдань є завдання системного проектування, розв'язання якого вже повинно містити принципову технологію побудови складного об'єкта та принципи його програмованої експлуатації згідно із сучасними вимогами багатокритеріальної оптимізації.

Жодна з традиційних теорій синтезу систем, технології побудови та експлуатації технічних об'єктів не включала у свою проблематику завдань системного зв'язку «своїх» рішень з рішеннями «сусідніх» етапів. Уперше проблема системного підходу була охоплена з точки зору кібернетики, коли був сформульований принцип зовнішнього доповнення в керуванні [1; 2], що мав свого абстрагованого «двійника» в теорії висновку, відомого як теорема Гьоделя [1]. Тоді стала зрозумілою безперспективність «відновлення» традиційної теорії автоматичного керування, наслідком чого постала необхідність створення зовсім нової теорії систем з її прикладною частиною – системотехнікою.

До такого несподіваного фіналу привели дослідників стандарти суворості, що підсилюються у проектуванні, які диктує «законодавиця мод» у технічній кібернетиці – теорія багатокритеріальної оптимізації. Цих законів не знали архітектори піраміди Хеопса і римського водопроводу, але вони стали основними аксіомами для сучасних дослідників-системотехніків, які мають вирішувати в конкретних проектах проблему складності при обмеженнях на ресурси та в умовах «психологічного тиску» з боку конкурентних проектів.

Традиційні теорії технічного напрямку (теорія машин, теоретична електроніка, теорія регулювання, теорія автоматів та ін.) включали у свою проблематику вивчення внутрішніх властивостей досліджуваних об'єктів. Завдяки цьому цим теоріям вдалося досягти певної досконалості. Однак жодна з названих теорій не включала у свою проблематику (і не була побудована аксіоматика) завдань архітектурного плану.

Побудова всіх «стикових» архітектурних проектних рішень для системи фізично різнорідних об'єктів і є основним завданням системного проектування. Для більшої точності можна визначити проблематику теорії системного проектування як створення методів синтезу (проектування) законів функціонування складних систем, методів побудови таких об'єктів і програми їх експлуатації. Мовою згаданих сучасних стандартів суворості ця проблема трактується як оптимізація життєвих циклів складних систем. Одним із домінуючих завдань прикладної теорії складних систем є завдання побудови процесів керування структурою складних об'єктів. Її розв'язання є найнеобхіднішим зовнішнім доповненням проблематики добре аксіоматизиваної математичної теорії систем [3], що створила апарат дослідження внутрішніх властивостей динамічних диференціальних і кінцевих динамічних систем (керованості, спостережливості та ін.).

Теорія систем з керованою структурою охоплює цілий клас об'єктів, що функціонують у режимах взаємодії, координації та цілеспрямованої зміни структурних станів. Моделі процесів керування в таких системах є ефективним засобом для того, щоб формально ввести в завдання проектування категорії цілей функціонування складних об'єктів. У зв'язку з цим при побудові архітектури складних систем ми вже не можемо задовольнятися відомим принципом Беллмана: «Керування u є функція фазового стану $x(t)$». Процес керування, побудований на цьому принципі, може виступати лише як локальний при стаціонарності структури на обмеженому відрізку часу.

У силу існування складних обмежень і неоднозначних нелінійностей у математичній моделі система її функціонування після досягнення багатьох цілей вимагає найбільш складного способу керування – цілеспрямованої зміни структури окремих підсистем і формування їхньої взаємодії. Оскільки моделлю дискретних послідовностей для керування структурою і складом звичайно приймається логічна мережа, наш клас систем належить до «гібридної» системи з логіко-динамічним принципом функціонування. У це визначення ми вкладаємо цілком визначене поняття ієрархії рівнів складної системи, верхній з яких розв'язує завдання логічного керування структурою системи, нижній – керування безпосередньою динамікою підсистем у векторних просторах. Керування в класі таких систем принципово відрізняється від однорівневих систем, хоча вони й мають велику рівномірність, насамперед тому, що завдання керування не може бути розв'язане для ієрархічної системи в цілому на основі принципу [3]: керування є функція фазового стану. Отже, для виділеного класу складних систем керування необхідне формулювання нового принципу, адекватного завданням проектування, та його експериментальна перевірка.

Ідея ієрархії в системах керування полягає, зокрема, в тому, що вимірна диференціальна динаміка (хоча і великої мірності) «вкладається» як елементарний підпроцес у дискретну сукупність якісних (структурних) станів системи в цілому. Завдання керування такими підпроцесами на верхньому рівні є завданням оптимального упорядкування зміни узагальнених (структурних) станів системи. Наступним рівнем ієрархії в складній системі є керування складом підсистем, що взаємодіють. Моделлю третього рівня є зростаюча мережа, процес зростання та спадання якої є формуванням логічної схеми даної операції для досягнення заданої мети керування в системі. Розгляд багатьох практичних прикладів у системах такого класу підтверджує природний характер такої ієрархії керування. Конструктивність ієрархічної структури цього класу дає можливість досить повно сформулювати задачу оптимізації керування. У законах функціонування складних ієрархічних систем виникає нове («гібридне») поняття взаємозв'язку, відмінне від звичайного поняття зворотного зв'язку. Розкриття цього поняття формалізованою мовою сучасної теорії керування та є побудовою аксіоматичних визначень у виділеному класі систем [2].

Прикладами таких систем можуть бути сучасні енергетичні комплекси, складні самохідні машини, системи багатоцільового функціонування типу літальних апаратів, суден, складні машинно-інформаційні системи та ін.

Динамічні диференціальні системи з керованою структурою можуть бути представлені сукупністю (кінцевою нескінченістю) систем диференціальних рівнянь, що моделюють окремі режими:

$$\overline{x} = f_s(\overline{x}, \overline{u}, t) - \text{ стану,} \quad (1)$$

$$\overline{y} = q_s(x, \overline{u}, t) - \text{ виходу,} \quad (2)$$

де $s = 1, 2,\dots, S$; $F\{f_s\}$ – неупорядкована сукупність структур системи; $S\{s\}$– нескінченність порядкових індексів.

Кожна з векторних функцій $f_s(\overline{x}, \overline{u}, t)$ представляє локальну динаміку системи в s-му режимі. Властивості таких режимів відрізняються між собою числовими характеристиками параметрів і траєкторій. Наприклад, динаміка польоту літального апарату в областях дозвукових і надзвукових швидкостей представляє дискретну послідовність двох характерних режимів системи.

Дискретні послідовності на нескіченостях структур $F\{f_s\}$ системи і впливів $U\{u_k(t)\}$ у (1), (2) зручно визначити гібридними функціями [4; 5] такого вигляду (за числом керувань) – входів (впливів) $\overline{u}(t) = L_k^u \overline{u}(t),\ k = 1, 2,\dots, k,\ \overline{u}_L(t) = \sum\limits_{k \in K} L_k^u \overline{u}_k(t)$ структур динамічної системи:

$$\begin{gathered} L_k^u \wedge L_j^u = 0,\ k \neq j;\ \underset{k \in K}{V} L_k^u = 1, \\ f_L(\overline{x}, \overline{u}, t) = \sum_{s \in S} L_s^x f_s(L_s^f, \overline{x}, \overline{u}_L, t) d \end{gathered} \quad (3)$$

при

$$L_s^x \wedge L_d^x = 0,\ s \neq d,$$

$$\underset{s \in S}{V} L_s^f = 1,\ \underset{s \in S}{V} L_s^x = 1.$$

Логічні змінні L_k^u, L_s^f, L_s^x є в загальному випадку значеннями двозначних неоднорідних багатомісних предикатів і виражають умови переходів від моделі одного режиму f_v до іншого f_{v+1}. Технічною реалізацією предикатних функцій як умов дискретних переходів можуть бути різного роду датчики, сигналізатори і перетворювачі з двозначним виходом. Аналогічними реалізаціями можна вважати дискретну зміну параметрів і характеристик об'єкта і керуючого пристрою в системі. Класичним прикладом керування у формі (3) є реостатний пуск за допомогою логічного керуючого пристрою електродвигуна постійного струму. Інші приклади таких систем наведено в роботах [6; 7].

Синтез закону функціонування багатокрокової логіко-динамічної системи (ЛДС) можна розглядати як рішення розглянутого завдання керування в кожному конкретному випадку. Завдання впорядкування структурних станів $\langle f_{vk}, \varphi_{vk}, \eta_{vk} \rangle$ систем Σ (верхній рівень) можна досить повно представити апаратом логіко-диференціальних рівнянь:

$$\begin{gathered} \overline{x} = \sum_{v=1}^{N} a_v^f f_v(\beta_x^x x(t), \beta_v^u u(t)), \\ \overline{y} = \sum_{v=1}^{N} a_v^\eta \eta_v(\beta_v^x x(t)), \end{gathered} \quad (4)$$

отриманих у такий спосіб. Нехай система $\sum\{\sum_v\}$ описується в кожному v-му структурному стані векторними диференціальними рівняннями:

$$\begin{gathered} \overline{x} = f_v(x(t), u(t), t) - \text{ стану,} \\ \overline{y} = \eta_v(\overline{x}(t), t) - \text{ виходу,} \end{gathered} \quad (5)$$

рішенням першого з яких є функція

$$x(t) = \varphi_v(\overline{x}(t), \overline{u}(t), t).$$

Для опису порядку зміни структурних станів у системі $\sum\{\sum_v\}$ використовуємо автомат Мура, зумовлений характеристичними функціями [8; 9]:

$$A_v = \lambda(a_{v-1}, \omega_v) \text{ – перехідною,}$$

$$\beta = \delta(a_v) \text{ – вихідною}$$

і трьома кінцевими множинами: $A = \{a\}$ – станів; $\Omega = \{\omega\}$ – входів; $B = \{\beta\}$ – виходів.

Входами такого автомата A^f є значення предикатних функцій $P(\overline{x}, \overline{u}, q, v, \beta, \tau)$, так що в загальному випадку автомат у ЛДС буде функціонувати за асинхронним принципом. Здійснюючу функцію f_v v-го стану, як першу частину керування (5) представимо у вигляді гібридної функції [4]

$$\overline{x} = a_v^f f_v(\overline{x}(t), \overline{u}(t), t),$$

доповнивши таке рівняння умовами одиничності $a_v \wedge a_v = 0,\quad v \neq \gamma$ і $\bigvee\limits_{v=1}^{N} a_v = 1$. Аналогічно побудуємо рівняння виходу системи $\sum_v$:

$$\bar{y}(t) = a_v^{\eta} \eta_v(\bar{x}(t), t)$$

за тих самих умов одиничності та повноти. Для всієї сукупності структурних станів системи $\sum\{\sum_v\}$ динаміку можна представити з тими ж умовами одиничності та повноти системою логіко-диференціальних рівнянь (5), у яких виходи $\beta_v(.)$ автоматів утворять з векторами входів $\bar{u}(t)$ і станів $\bar{x}(t)$ гібридні функції. Оскільки в завданні керування ЛДС початковий структурний стан $\langle f_1, \varphi_1, \eta_1 \rangle$ завжди визначений, у таких системах автомати Мура повинні бути ініціальними. Тоді припустиме вхідне слово $\eta = (\omega_{\xi 1}, \omega_{\xi 2}, ..., \omega_{\xi k})$ автомата A^f одним способом визначає один із шляхів дискретних переходів $l_{1,N}$ з Σ_1 в Σ_N, упорядковуючи тим самим суми $\sum_{v=1}^{N}$ в обчислювальній схемі (5) функціонування ЛДС. Кожному автоматному слову η^f відповідає функціонал J_m^l, що дозволяє оцінити якість керування ЛДС по шляху $l_{1,N}$ як упорядкованої послідовності станів $\langle f_v, \varphi_v, \eta_v \rangle$. В ієрархічній структурі ЛДС автоматні моделі A^1 використані нами для упорядкування дискретних переходів. Тим самим функції верхнього рівня керування в ЛДС відповідно до прийнятого принципу (крок 2) можна здійснити ініціальним автоматом Мура.

Побудований однозначний зв'язок між множиною припустимих слів $H\{\eta^f\}$ автомата A^f і множиною оцінок якості керування $J_M\{J_M^l\}$ ЛДС дозволяє пов'язати завдання оптимізації багатокрокової ЛДС із задачами синтезу законів функціонування ініціальних автоматів Мура в рамках викладеної вище загальної задачі керування багатокроковою ЛДС. Як відомо, у теорії автоматів подібні задачі досліджувалися відносно проблеми синтезу законів керування [3]; у теорії автоматичного керування робляться лише перші спроби використовувати кінцеві автомати як сучасні засоби керування.

Відзначимо один дуже цікавий наслідок, що випливає з розглянутої задачі. Обмежена досяжність цільової множини, багатоцільове призначення системи і складний характер обмежень вимагали переходу до систем з нестаціонарною структурою в задачі керування. Нестаціонарність пізніше була використана для формування координації як внутрішньої властивості складної ЛДС у задачі керування. Побудувавши області визначення відображення предиката P, $T_\tau \cdot T_\Sigma \cdot T_\psi \cdot T_\beta \to \{0,1\}$, що є логічною умовою дискретної зміни структур $< f_{vk}, \varphi_{vk}, \eta_{vk} >$ з відповідною інтерпретацією, отримано можливість синтезу й оптимізації ієрархічної системи з керованою структурою. У загальному випадку для закону функціонування ЛДС характерна властивість невизначеності структури, яка використана для можливості зміни цілей керування. Її можна виключити із закону функціонування ЛДС, замінивши зв'язний автомат A^f [3] автоматом з єдиним припустимим вхідним словом η^f, що еквівалентна програмному перемикаючому пристрою з єдиною послідовністю вихідних символів. Ця послідовність визначає суть єдиної мети керування. У цьому тривіальному для ЛДС випадку оптимальність системи Σ точно еквівалентна простій сумі оцінок $\sum J_v$, тому автоматично відпадає необхідність у координації [9; 10] і побудові принципу ієрархічного керування (крок 2).

Клас динамічних систем з керованим складом може бути представлено у такий спосіб. Введемо в розгляд узагальнений стан Q_{Vi} підсистеми $\sum_i$, у формі v-го векторного диференціального рівняння

$$Q_{vi} : \dot{\bar{x}} = f_s(\bar{x}, \bar{u}_L, t), \qquad \textbf{(6)}$$

поклавши для даного стану значення логічних змінних:

$$L_s^f = L_s^x = 1, \;\; L_d^f = L_d^x = 0, \;\; s \neq d, \;\; s, d \in S,$$

де v позначає номер узагальненого стану підсистеми в даному режимі.

Оскільки в такій системі $\sum^v$ склад взаємодіючих підсистем $\sum_i$ є змінним і до того ж повинен бути керованим, для опису системи в цілому $\sum^v\{\sum_i\}$ нам потрібна $v \times i$ система диференціальних рівнянь вигляду (5). Тоді вся система взаємодіючих підсистем $\sum^v\{\sum_i\}$ може бути представлена дискретними переходами на кінцевій нескінченності узагальнених станів усієї системи $\sum^v$:

$$Q_\mu^v[i] : \dot{\bar{X}} = F_r(\bar{X}, \bar{U}, t),$$

де μ – порядковий номер стану з нескінченності M, що позначає систему $\sum^v$ з незмінним у даному режимі складом. Індекс $\{I\}$ означає склад взаємодіючих в μ-му загальному стані $Q_{\mu\{I\}}^v$ підсистем $\sum_i, i \in I$. Прикладом систем з керованим складом є сучасний літальний апарат у режимах: стоянка, зліт, політ, посадка; космічний комплекс у груповому польоті, розстикуванні, стикуванні й ін.

Для математичного опису процесу керування структурою складної системи $\sum^v\{\sum_i\}$ введемо основні операції, що представляють відносини між підсистемами $\sum_i$ в усіх можливих логічних законах функціонування. У підсистемах $\sum_i$ із усіх узагальнених станів $Q_i\{q^{vi}\}$ виділяємо початкове (стартове) $q_{(v0)}$ і фінальне q_{Ni} стану. Дві та більше підсистеми $\sum_i ,..., \sum_j \in \sum^v$ можуть функціонувати у взаємодії, досягши фінальних станів $q_{Ni},...,q_{Nj}$ і утворивши групу підсистем $\{\sum_i,...,\sum_j\}$ у цих станах $q_{N\{i,\,...,\,j\}}$. Ця група може бути утворена як кон'юктивне об'єднання підсистем $\sum_i$ і $\sum_j$ у фінальних станах

$$Q_{vr\{i,\,j\}} = q_{Ni} \wedge q_{Nj}$$

або як диз'юнктивне об'єднання

$$Q_{vr\{i,\,j\}} = q_{Ni} \vee q_{Nj},$$

допускаючи одночасну істинність (автономну роботу кожної з підсистем і їх можливе об'єднання) $L_s^{fi} = 1, L_s^{fj} = 1$ в (3), $L_s^{fi} \vee L_s^{fj} = 1$.

Для стислості розглянемо дві підсистеми $\sum_i \sum_j$, що не є, як відомо, обмеженням, тому що ці операції легко поширюються на $n \geq 2$ підсистем.

Введемо також операцію диз'юнктивного альтернативного об'єднання двох підсистем $\sum_i$ і $\sum_j$:

$$Q_{v0}\{i,\overset{\vee\; a}{}j\} = q_{Ni} \vee q_{Ni},$$

що не допускає одночасної істинності $L_s^{fi} = 1$ і $L_s^{fj} = 1$. Це означає, що в початковому стані групи $Q_{v0\{i,\,j\}}$ функціонують або підсистема $\sum_i$, у своєму фінальному стані q_{Ni}, або підсистема $\sum_j$ у q_{Nj}; їх одночасне функціонування ($q_{Ni}\ I\ q_{Nj}$) як елементів системи в цілому виключається.

Доповнює вказаний перелік операцій для представлення зростання мережі (складу) системи $\sum^{v\{\}}\sum_i$ нейтральна операція: дискретний перехід підсистеми $\sum_i$ чи системи в цілому $\sum^v$ до тотожної (незростаючої, неспадаючої) структури з тим самим складом $\{I\}$:

$$Q_{v\{I\}} \to Q_{(v+1)\{I\}}.$$

Динаміка складної системи $\sum^v\{\sum_i\}$ включає поряд зі зростанням мережі операції її спадання. З будь-якого стану $Q_{v\{i\}}$, утвореного операціями кон'юктивного і (чи) диз'юнктивного об'єднання, система $\sum_{\{I\}}^v$ може перейти в стан зі скороченим складом:

$$Q_{v\{I\}} \to Q_{\{v-\lambda\}(\{I\}\setminus\{i,\,j\})},$$

де $\{i,\, j\} \subset I$, $\{I\}\setminus\{i,\, j\}$ – доповнення індексної нескінченості $\{I\}$, що визначає склад системи $\sum^v$.

Основною математичною моделлю систем з керованою структурою прийнято системи логіко-диференціальних рівнянь [6; 7]:

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= \sum_{s\in S} L_s^f f_s(\bar{x}, \bar{u}_L, t),\ f_s \in F; \\ \bar{u}_L(t) &= \sum_{k\in K} L_k^u u_k(t), \bar{u}_k \in U; \qquad (7) \\ L_s^f &\in L^f,\ L_k^u \in L^u,\ L^f L^u \in \{0,1\}. \end{aligned}$$

Їм відповідають математичні аналоги у формі гібридних графів, що поєднують графи потоків сигналів і графи переходів [5–9]. Обчислювальна схема звичайно містить у формалізованому вигляді представлення процесу обчислень у категоріях моделі системи, що дозволяє досліднику одержати деяку числову реалізацію динаміки функціонування системи. Побудова обчислювальної схеми виявилася можлива на основі отриманого доказу умов існування й одиничності рішення системи логіко-диференціальних рівнянь [9; 10]. Ідея доказу ґрунтується на таких математичних фактах.

1. Кінцева множина точок розриву $S\{s\}$ дискретно змінюваної правої частини логіко-диференціального рівняння (7) не «погіршує» модель системи більше, ніж звичайно передбачувані властивості функцій $f_s(\bar{x}, \bar{u}, t)$ у дискретній послідовності

$$\sum_{s\in S} L_s^f f_s(\bar{x}, \bar{u}, t).$$

Остання має властивість R-інтеграції. Цією умовою забезпечується існування рішення системи (7).

2. Одиничність рішення системи (7) забезпечується і задається логічними умовами дискретних переходів $L_s \in L^F$ цілком упорядкованою послідовністю узагальнених станів (6).

3. Множина рішень системи (7) з точністю до початкових умов $\bar{x}(t_0) \in X_{v0}$ і впливів $\bar{u}_k(t) \in U$ однозначно визначено кінцевою множиною можливих шляхів $P_{v0,N}$ дискретних переходів на нескінченності структур системи $Q\{q_v\}_{v0}^N$.

ВИСНОВКИ

Таким чином, побудована аксіоматика ієрархічного об'єднання двох фундаментальних моделей – динамічної диференціальної системи (нижній рівень) і кінцевого автомата (верхній рівень) – одночасно визначає обчислювальну схему для моделювання систем з керованою структурою. Практичне застосування гібридних графів для аналізу такого класу систем забезпечує всю необхідну інформацію для числового моделювання динамічних процесів як на цифрових ЕОМ, так і на цифро-аналогових комплексах. ■

ЛІТЕРАТУРА

1. Стаффорд Б. Кибернетика и управление производством. 2-е изд. М. : Наука, 1965. 391 с.

2. Жук К. Д. Координируемость сложных систем многоцелевого функционирования // В кн. : Вопросы теории и системного проектирования некоторых классов сложных систем управления. Киев : Наукова думка, 1973. С. 34–56.

3. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М. : Мир, 1971. 400 с.

4. Терно О. Р. Гибридные функцииновый метод описания сложных систем. *Известия АН СССР. Сер. : Техническая кибернетика*. 1965. № 6. С. 13–18.

5. Жук К. Д., Путятин В. Г., Тимченко А. А. Логико-динамические модели в задачах синтеза пусковых алгоритмов управления // В кн. : Системотехника. Киев : ИК АН УССР, 1970. С. 72–83.

6. Жук К. Д., Тимченко А. А., Денисенко В. А. Синтез алгоритма управления логико-динамической системой при помощи самонастраивающейся системы // В кн. : Системотехника. Киев : ИК АН УССР, 1971. С. 208–218.

7. Харченко В. С., Скляр В. В., Тарасюк О. М. Методы моделирования и оценки качества и надежности программного обеспечения : учебное пособие. Харьков : ХАИ, 2004. 158 с.

8. Лисогор В. М., Зелінська О. В. Задачі математичного моделювання для оптимізації структур та параметрів технологічних і інформаційних систем. *Науковий збірник ЛНУ ім. Франка. Сер. : Формування ринкової економіки в Україні*. 2012. Вип. 27. С. 179–184.

9. Лисогор В. М., Зелінська О. В. Двохрівнева логіко-динамічна модель управління віброударними пристроями вібраційних машин сільськогосподарського призначення. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. № 6. С. 98–101.

10. Iskovych-Lototsky R. D., Zelinska O. V., Ivanchuk Y. V.,Veselovska N. R. Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. Ser. : Engineering technological systems*. 2017. Vol. 1. No. 1 (85). P. 9–17. Doi: 10.15587/1729-4061.2017.59418.

REFERENCES

Iskovych-Lototsky, R. D. et al. "Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Ser. : Engineering technological systems.* Vol. 1, no. 1 (85) (2017): 9-17; doi: 10.15587/1729-4061. 2017. 59418

Kalman, R., Falb, P., and Arbib, M. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem* [Essays on the mathematical theory of systems]. Moscow: Mir, 1971.

Kharchenko, V. S., Skliar, V. V., and Tarasiuk, O. M. *Metody modelirovaniya i otsenki kachestva i nadezhnosti programmnogo obespecheniya* [Methods for modeling and evaluating the quality and reliability of software]. Kharkiv: KhAI, 2004.

Lysohor, V. M., and Zelinska, O. V. "Dvokhrivneva lohiko-dynamichna model upravlinnia vibroudarnymy prystroiamy vibratsiinykh mashyn silskohospodarskoho pryznachennia" [Two-level logic-dynamic model of control of vibration damping devices of vibration machines of agricultural purpose]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no. 6 (2013): 98-101.

Lysohor, V. M., and Zelinska, O. V. "Zadachi matematychnoho modeliuvannia dlia optymizatsii struktur ta parametriv tekhnolohichnykh i informatsiinykh system" [Problems of mathematical modeling for optimization of structures and parameters of technological and information systems]. *Naukovyi zbirnyk LNU im. Franka. Ser. : Formuvannia rynkovoi ekonomiky v Ukraini*, no. 27 (2012): 179-184.

Stafford, B. *Kibernetika i upravleniye proizvodstvom* [Cybernetics and production management]. Moscow: Nauka, 1965.

Terno, O. R. "Gibridnyye funktsii - novyy metod opisaniya slozhnykh sistem" [Hybrid functions are a new method for describing complex systems]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. : Tekhnicheskaya kibernetika*, no. 6 (1965): 13-18.

Zhuk, K. D. "Koordiniruyemost slozhnykh sistem mnogotselevogo funktsionirovaniya" [Coordination of complex systems of multi-purpose operation]. In *Voprosy teorii i sistemnogo proektirovaniya nekotorykh klassov slozhnykh sistem upravleniya*, 34-56. Kyiv: Naukova dumka, 1973.

Zhuk, K. D., Putyatin, V. G., and Timchenko, A. A. "Logiko-dinamicheskiye modeli v zadachakh sinteza puskovykh algoritmov upravleniya" [Logico-dynamic models in problems of synthesis of start-up control algorithms]. In *Sistemotekhnika*, 72-83. Kyiv: IK AN USSR, 1970.

Zhuk, K. D., Timchenko, A. A., and Denisenko, V. A. "Sintez algoritma upravleniya logiko-dinamicheskoy sistemoy pri pomoshchi samonastraivayushcheysya sistemy" [Synthesis of an algorithm for controlling a logical-dynamic system using a self-adjusting system]. In *Sistemotekhnika*, 208-218. Kyiv: IK AN USSR, 1971.