

Розроблення та дослідження методів графо-функціонального моделювання розподілених систем

А. Б. Бойнік, О. М. Прогонний, О. Ю. Каменєв, А. О. Лапко,
В. Ф. Кустов, Д. М. Кузьменко, О. В. Щєбликіна

У процесі дослідження розроблено метод геометричного моделювання розподілених систем і пов'язаних з ними технологічних об'єктів. В основу методу закладено використання функціональних графів. В контексті дослідження основними відмінностями таких графів є: моделювання технологічних об'єктів розподілених систем виключно вершинами, без застосування ребер для відтворення зазначених об'єктів; використання ребер виключно для відтворення зв'язків між об'єктами. Зважування вершин зазначених графів виконується за допомогою призначених функцій або функціоналів з повною відсутністю виваженості ребер.

На відміну від найближчих аналогів, в основу аналітичної інтерпретації сформованих графічних моделей в пропонованому методі закладені не матриці інцидентності, а параметрично-топологічні матриці суміжності. В таких умовах істотно змінюється принципи присвоєння вагових коефіцієнтів елементів графа: замість позиційного розподілу елементів вагових множин між комірками матриць використовується завдання зазначених елементів в якості аргументів функцій у складі функціональних вершин. При зазначеному підході застосований діагональний спосіб прописування функцій або функціоналів вершин в матриці суміжності. Завдання зв'язків між елементами графа при аналітичній інтерпретації виконується по введеному позиційному принципу із застосуванням додатної або від'ємної логіки. При такому підході досягається можливість аналітичного формування множинних зв'язків між вершинами з довільною кількістю і спрямованістю, що раніше не застосовувалося в складі матриць суміжності. Крім цього, присвоєння елементам графа функціональних залежностей дозволяє відтворювати в складі геометричної моделі не тільки статичних, але й динамічних характеристик об'єктів, що моделюються.

Практична цінність пропонованого методу полягає в підвищенні універсальності і спрощенні процедур автоматизованої конфігурації програмного забезпечення систем керування. Досягнення такого результату можливе за рахунок скорочення обсягу даних, що вводяться, і можливості введення додаткових функцій об'єктів керування без правки вихідного коду. Додатково забезпечується вдосконалення формалізованого складання технічних завдань при розробленні технічної документації та апаратного забезпечення розподілених систем. Крім того, можлива інтеграція методу в існуючі системи САЕ і САПР, що забезпечує нарощування можливостей і створення принципово нових таких систем.

Подальший розвиток запропонованого методу полягає у розв'язанні питань, пов'язаних з оптимізацією розподілу аргументів функцій вершин по комірках параметрично-топологічних матриць

Ключові слова: графічна модель, функціональний граф, параметрично-топологічна матриця, вагові параметри, розподілена система

1. Вступ

Важливим напрямком науково-прикладних досліджень у сфері технічних наук і застосування відповідних результатів є моделювання складних систем керування та їхніх технологічних об'єктів. Найбільш розповсюдженою є варіація розподілення таких систем у просторі (з урахуванням як географічних, так і умовних координатних ознак), зокрема – на транспорті, в енергетиці, промисловості тощо [1–3]. Для них зручним і ефективним слід вважати застосування методів геометричного моделювання. Останні базуються, здебільшого, на використанні апарату теорії графів [4, 5]. Аналітична інтерпретація побудованих таким чином графічних моделей виконується із застосуванням топологічних або параметрично-топологічних матриць. В основу зазначених матриць закладаються системні анатомічні властивості графів, як от: інцидентність, суміжність, циклічність тощо [5].

Прикладне застосування графоаналітичних методів моделювання розподілених систем та об'єктів полягає в двох основних напрямках:

– встановлення і дослідження системних властивостей інформаційно-керуючих комплексів, технологічних та інфраструктурних об'єктів з метою подальшого практичного використання (при будівництві, експлуатації, технічному обслуговуванні, ремонті тощо);

– безпосереднє використання, в т. ч. в умовах інтеграції із зовнішніми засобами інтерфейсу користувача, при різних видах автоматизованого проектування інформаційно-керуючих систем, системних складових компонентів різного рівня, інфраструктурних і технологічних об'єктів.

Найбільш практично цінним, затребуваним та перспективним може бути специфічне використання графоаналітичного моделювання. Таке моделювання закладається в основу формування нових систем автоматизованого проектування (САПР) різного призначення та використання у складі відомих систем інженерного аналізу (CAE).

Серед них – ключовими є програмно-технічні засоби, призначені для автоматизованого конфігурування програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем розподіленими об'єктами. Сутність останнього зводиться до формування в системі образу технологічного об'єкта в вигляді геометричної моделі. Зазначена модель, у свою чергу, має повністю відтворювати властивості об'єкта в межах функціонального призначення системи [6, 7].

За останні роки теорія і методологія графоаналітичного моделювання отримала суттєвий розвиток. Це пояснюється, перш за все, інтенсифікацією розповсюдження та підвищенням обсягу (масиву) функціональних можливостей інформаційних технологій в усіх сферах життєдіяльності, особливо – в сфері керування відповідальними технологічними процесами. Не

дивлячись на це, існуючі методи та засоби графоаналітичного моделювання мають ряд суттєвих недоліків і обмежень щодо ефективності застосування. Серед них найбільш критичними є: складність та громіздкість аналітичної інтерпретації моделей розподілених систем великої розмірності та обмеженість щодо відтворення динамічних характеристик прототипів моделей.

Таким чином, актуальним стає дослідження, що спрямоване на спрощення графоаналітичного відтворення розподілених систем та скорочення його обмежень. Гіпотетично вирішення поставленої проблеми має відбуватися із використанням властивостей функціональних графів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідженню методів та засобів використання теорії графів та топологічних матриць при моделюванні технологічних систем та об'єктів присвячено немало праць. Результати відповідних досліджень оперуються, перш за все, саме об'єктами, розподіленими на площині або в просторі (залізничні станції, взаємопов'язані технологічні агрегати тощо). Прикладна тематика досліджень останніх років зводиться, здебільшого, до впровадження програмованої обробки математичних моделей обчислювальними засобами.

Одне із останніх досліджень, пов'язане із використанням графічного моделювання розподілених систем, опубліковано в роботі [8]. В ній використовується ациклічний граф для моделювання спрямованих зв'язків між компонентами розподіленої системи. Відтворення динамічних характеристик об'єктів розподіленої структури в роботі базується на використанні методів диференціальної топології. На її основі для кожного елемента графа встановлюється змінна вага, що залежить від поточного стану нелінійної системи. На підставі застосування різних законів розподілу випадкових величин, до яких відносяться вагові коефіцієнти графічної моделі, відтворюється сукупність її статичних та динамічних властивостей. Проте результати такого дослідження можуть бути застосовані лише для «нечітких» (стохастичних) систем, використання яких обмежене при керуванні відповідальними технологічними процесами.

Схожий підхід, але по відношенню до електронних схем, запропоновано в роботі [9]. Реалізовані в ній графічні моделі на підставі нечіткої ознаки відтворюють і змінюють зв'язки між елементами залежно від поточного стану електронних ключів (транзисторів). Таким чином, динамічна конвертація графа зв'язків визначає роботу електронної схеми в різних режимах.

Використання графоаналітичного моделювання для формування кліткових автоматів, що відтворюють роботу складних розподілених систем, розглянуто в роботі [10]. В ній враховано змінний характер переходів між елементами графа на підставі динамічних станів кліткових автоматів, що реалізовано на прикладі регулювання транспортних потоків. Аналітична інтерпретація графів виконана на основі класичних матриць суміжності та матриць маршрутів. Повне відтворення елементів графічної моделі виконується за допомогою пари таких матриць, що ускладнює програмовану обробку моделі.

В аспекті використання графоаналітичного моделювання як фундаментальної основи автоматизованого проектування технічних систем опубліковано відповідне дослідження в праці [11]. В ній запропоновано застосування графічних мов програмування, що закладаються у відповідні САПР складних систем. Але при цьому пропонується використання типових інтерфейсів, що не можуть врахувати специфічність кожної окремої системи, а також відсутнє аналітичне представлення створених моделей.

Використання динамічних графів з метою моделювання та дослідження транспортних потоків розглянуто в роботі [12]. В основу процесу закладається поєднання динамічних графів і гібридних автоматів у єдину геометричну модель. На її підставі за ймовірнісними характеристиками, розрахованими на базі теореми Ляпунова, оцінюється щільність транспортних протоколів у певних елементах транспортної мережі, яка моделюється графічно. Таким чином, запропонована в роботі модель є прототипом функціонального графа, який можна розповсюдити на територіально розподілені мережі із диференційованою щільністю розподілу потоків будь-якого виду (інформації, транспортних одиниць, технологічних рідин тощо).

Схожа задача вирішується в дослідженні, наведеному в роботі [13]. На відміну від роботи [12], у ній за основу береться розподілений стан трафіку рухомих об'єктів замість його точкової щільності. Робота передбачає ієрархічну структуру графічної моделі, що має чотири складових. Кожна з них інтерпретує характеристики потоків, місця зміни напрямків, швидкість і час їх зміни. Результати роботи інтегруються в єдину геометричну модель. Результатом моделі є імітація переміщень рухомих об'єктів із різними кінематичними параметрами, що дає можливість її використання при вирішенні широкого спектру завдань.

Робота [14] оперує використанням індукованих графів у задачах проектування систем, що відтворюються мережами умовних уподобань (CP-мережі). У роботі [14] запропоновано метод обчислення потрібної послідовності індукованого графу CP-мережі. У результаті досягається можливість скорочення розмірності графічних моделей (у частині кількості вершин та ребер) для відтворення технологічних систем та об'єктів довільного призначення.

У роботі [15] розглянуті аспекти використання графічних моделей для проектування та дослідження інформаційно-керуючих систем на залізничному транспорті. Зокрема, запропоновано метод графоаналітичного проектування програмного забезпечення для систем керування шляхом відтворення топологічного розвитку об'єктів транспортної інфраструктури. Метод базується на відтворенні вагових параметрів графічної моделі у параметрично-топологічних матрицях за принципом позиціонування комірок. В подальшому запропоновано спосіб аналітичного відтворення графів великої розмірності шляхом визначення опосередкованих прямих сум матричних блоків. Проте модель спеціалізується на відтворенні виключно статичних характеристик технологічних об'єктів. Динамічні властивості мають бути закладені у незмінному програмному коді.

Схожий підхід, реалізований для діагностики складних динамічних систем на базі зваженого децентралізованого графа запропоновано в роботі [16]. За його допомогою моделюються траєкторії переходу системи у проміжний стан, який виникає після прояву відмов та несправностей. Методом Монте-Карло визначаються ймовірнісні характеристики тих чи інших траєкторій поведінки системи, що моделюється.

Також моделювання та оптимізацію транспортних потоків на основі направлено ациклічного графа запропоновано в роботі [17]. Модель визначає кореляцію між поведінкою учасників дорожнього руху, маючи у собі вкладену модель підтримки прийняття рішень. Це дозволяє підвищити ефективність керування та контролю за динамічною поведінкою розподілених систем.

У роботі [18] пропонується теоретико-множинне представлення розподілених систем на підставі законів нечіткої логіки, що є альтернативою графічного представлення. Визначені таким чином маршрути між компонентами системи фактично є опосередкованою інтерпретацією її графічної моделі. В результаті вдається частково скоротити обсяг обчислень при подібному моделюванні.

Питання вдосконалення матричної інтерпретації геометричних моделей, базованих на випадкових графах, розглянуті в роботі [19]. Аналогічно роботі [15], в ній запропоновано блочне представлення топологічної матриці суцільного графу, проте не розглянуто методики її зворотного синтезу, а також не враховано наділення елементів графу множинними ваговими параметрами. Натомість у моделі частково розкриті функціональні властивості елементів графу за рахунок їх цифрового шифрування.

У роботі [20] запропоновано графічну модель зберігання файлових даних на територіально-розподілених носіях в умовах дедуплікації. Модель передбачає відтворення одночасного використання розподіленого інформаційного контенту, причому вага елементів графа визначає інформаційну завантаженість кожного з розподілених ресурсів. Модель може бути використана для відтворення довільних характеристик розподілених систем в умовах належності відповідних компонентів до класу толерантності.

Узагальнення методів, моделей та алгоритмів графоаналітичного автоматизованого проектування інфраструктурних об'єктів на прикладі залізничних станцій наведено в монографії [21]. Аналогічно тому, як це зроблено в роботі [15], у роботі [21] передбачається геометричне представлення топологічного розвитку інфраструктурного об'єкта, проте аналітичне відтворення виконується не на основі топологічних матриць, а окремих списків інцидентності та вагових параметрів вершин та ребер. Це певним чином знижує універсальність математичної обробки графічних моделей, що є суттєвим недоліком запропонованих підходів.

У монографії [22] певним чином доопрацьовані графоаналітичні методи і моделі, запропоновані в роботі [21] у частині комп'ютерної реалізації та сфери застосування. Зокрема, в ній реалізовані підходи щодо використання зазначених видів моделювання у створенні тренажерів та інших навчальних

комплексів для оперативного персоналу, пов'язаного із керуванням інфраструктурними об'єктами (на прикладі залізничних станцій).

Так чи інакше, слід узагальнити методи, моделі та засоби графоаналітичного моделювання розподілених технологічних систем та об'єктів, викладені у працях [8–22]. В аспекті застосування зазначених категорій з метою дослідження роботи та автоматизованого проектування інформаційно-керуючих систем, можна виділити такі їх загальні обмеження та недоліки:

- відсутність можливості відтворення необхідної повноти динамічних характеристик, що є потрібною для автоматизованого проектування (конфігурування) програмних засобів;

- складність позиціонування вагових параметрів графічних моделей по комірках параметрично-топологічних матриць;

- висока ймовірність помилок складачів моделей для конкретних об'єктів або систем внаслідок громіздкості;

- обмеження щодо співвідношення потужностей множин вагових параметрів елементів графів та розмірності матричних блоків, що відтворюють графічні моделі аналітичним чином.

Отже, подальше вдосконалення графоаналітичних методів моделювання полягає в частковому усуненні зазначених обмежень. Це можливо за рахунок використання функціональних графів, в рамках функціоналів вершин та ребер яких відтворюються як статичні вагові параметри, так і динамічні властивості відтворюваних ними об'єктів.

3. Ціль і задачі дослідження

Метою дослідження є розроблення методу графоаналітичного моделювання територіально-розподілених складних систем та технологічних об'єктів, базованого на використанні функціональних графів. Метод має забезпечити як відтворення динамічних властивостей модельованої системи, так і ущільнювати та спрощувати відображення статичних вагових параметрів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- визначити базову геометричну модель та метод її аналітичної інтерпретації з точки зору топології та врахування властивостей, на підставі якої буде розроблюватися графо-функціональна модель системи;

- визначити спосіб функціонального відтворення статичних та динамічних характеристик, які моделюються елементами графу;

- розробити метод аналітичного відтворення графо-функціональної моделі та розглянути варіації його реалізації;

- сформулювати рекомендації та навести приклади практичного застосування розробленого методу функціонального графоаналітичного моделювання.

4. Матеріали і методи графо-функціонального моделювання розподілених технологічних систем та об'єктів

4.1. Базова геометрична модель розподіленої системи

Для формування базової геометричної моделі розподіленої системи за основу беруться методи та принципи, викладені в роботах [15, 20–22].

На підставі зазначених методів та принципів технологічний об'єкт або система представляється впорядкованими множинами складових компонентів $A = \{a_i\}$, зв'язків між ними $Z = \{z_{i,i+1}\}$ та функціональних властивостей компонентів $U = \{u_{ij}\}$.

При цьому кожному елементу $a_i \in A$ відповідає єдиний елемент $z_{i,i+1} \in Z$, який пов'язує його з іншим елементом $a_{i+1} \in A$. Також кожний елемент $a_i \in A$ пов'язаний з множиною елементів $\{u_{ij}\} \in U$, які задають його властивості:

$$\begin{cases} (\forall a_i \in A) \rightarrow (\exists! z_{i,i+1} \in Z) : a_i(z_{i,i+1})a_{i+1}, \\ (\forall a_i \in A) \rightarrow (\exists \{u_{ij}\} \in U) : a_i(u_{ij})\{f_{ij}\}, \end{cases} \quad (1)$$

де $\{f_{ij}\}$ – множина функцій елемента a_i , яка визначається його властивостями.

Відповідно до формули (1) і теорії відношень [12] елементи $z_{i,i+1}$ задають відношення зв'язку між кожною парою елементів (a_i, a_{i+1}) а підмножини u_{ij} – відношення між окремою властивістю елемента a_i та відповідним йому набором технологічних функцій. Таким чином, множина Z задає відповідне відношення на множині A , а множина U – співвідношення між множинами A та $F = \{f_{ij}\}$:

$$\begin{cases} (a, a) \in Z, Z \subset A \times A, \\ (a, f) \in U, U \subset A \times F. \end{cases} \quad (2)$$

Закономірності та відношення (1) і (2) частково інтерпретуються за допомогою зваженого (p, q) графу $G = (V, E)$ з множиною вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ та множиною ребер $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$.

Множини A та Z , визначені топологією розподіленого технологічного об'єкту, безпосередньо задаються елементами графу (вершинами та ребрами) й топологічними зв'язками між ними (інцидентністю, суміжністю тощо): $Z \subset V \times E$. При поставленні у відповідність вершинам та ребрам властивостей складових об'єкту або системи (множина U) граф G буде відтворювати всю впорядковану множину Y :

$$Y \leftrightarrow G = G_Y(V, E) : (\{A, Z\} \leftrightarrow \{V, E\}) \wedge (U \leftrightarrow \{g(V, E)\}), \quad (3)$$

де $\{g(V, E)\}$ – множина вагових коефіцієнтів вершин та ребер графа G :

$$\{g(V, E)\} = \bigcup_{i=1}^p \bigcup_{k=1}^n g_{ik}(v_i) + \bigcup_{j=1}^q \bigcup_{l=1}^m g_{jl}(e_j), \quad (4)$$

де n і m – відповідно кількість вагових параметрів i -ї вершини та j -го ребра.

З метою раціонального аналітичного відтворення графа G_Y використовується його розділення на складові компоненти двома рівно потужними множинами розрізів $E' \subset E$ та $E'' \subset E$, бієктивне відображення елементів яких характеризується відношенням суміжності відносно визначених опорних вершин v'_i за певним принципом (правилом). У той же час множина $V' = \{v'_i\}$ опорних вершин визначається бієктивним відношенням інцидентності з кожною з множин розрізів $E' = \{e'_i\}$ та $E'' = \{e''_i\}$.

У результаті відбувається розділення графа G_Y на дві впорядковані множини компонент $K(E') = \{G_k^{E'}\}$ та $K(E'') = \{G_k^{E''}\}$, що утворюються відповідними розрізами. Граф G_Y повністю відтворюється множинами $K_H(E') \cap K_H(E'')$ відповідно непарних компонент, утворених розрізом E' , та парних компонент, утворених розрізом E'' .

В якості методу аналітичної інтерпретації геометричної моделі, що береться за основу, слід взяти метод прямих сум, запропонований у роботі [15]. Серед його варіацій доцільним є використання блоків параметрично-топологічних матриць (ПТМ), що поєднують як топологічні, так і параметричні (вагові) властивості геометричних моделей.

4. 2. Спосіб функціонального відтворення статичних та динамічних характеристик розподіленої системи

Як було зазначено вище, всі графоаналітичні моделі розподілених систем, викладені, зокрема, в роботах [15–22], відтворюють статичні властивості модельованих об'єктів. Об'єктні динамічні властивості характеризуються окремими моделями, що інтегруються із статичною складовою на рівні взаємодії прикладного програмного забезпечення та файлів конфігурації. В таких моделях розподілені та взаємопов'язані елементи системи або технологічного об'єкта відтворюються як вершинами, так і ребрами графа (залежно від функціонального призначення). При цьому кожному елементу (вершині та ребру) графа присвоюється впорядкована множина (вектор) вагових коефіцієнтів, що визначають статичні властивості модельованого елемента. Інтеграція топологічних та параметричних властивостей складових геометричної моделі у межах ПТМ виконується за принципом позиціонування – шляхом розподілу вагових коефіцієнтів відповідних векторів по коміркам блоків відповідних матриць:

$$|M_{\text{ПТМ}_k}| = \begin{bmatrix} \overline{m}_{11}^k & \overline{m}_{12}^k & \dots & \overline{m}_{1b}^k \\ \overline{m}_{21}^k & \overline{m}_{22}^k & \dots & \overline{m}_{2b}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{m}_{c1}^k & \overline{m}_{c2}^k & \dots & \overline{m}_{cb}^k \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} i = \overline{1, b}, \quad b \geq 5, \\ j = \overline{1, c}, \quad c \geq 5, \end{matrix} \quad (5)$$

де $|M_{\text{ПТМ}_k}|$ – блок ПТМ, що аналітично відтворює k -ту компоненту графа; \overline{m}_{ij}^k – топологічно-параметричні вектори, які визначаються таким чином:

$$\overline{m}_{ij}^k = \langle n_e, n_v, u^e, u^v, \theta \rangle, \quad (6)$$

де n_e, n_v – номери відповідно ребер та вершин повної ПТМ графа G_Y , яким відповідають рядок та стовпець, в якому розміщений елемент \overline{m}_{ij}^k ; u^e, u^v – вагові параметри відповідних елементу \overline{m}_{ij}^k ребра та вершини; θ – топологічна властивість відповідних елементу \overline{m}_{ij}^k ребра та вершини.

Значення елементів u^e, u^v призначаються за таким правилом:

$$u^e = \begin{cases} u_1^e, \text{ якщо } j = 1 + 5h, \\ u_2^e, \text{ якщо } j = 2 + 5h, \\ u_3^e, \text{ якщо } j = 3 + 5h, \\ u_4^e, \text{ якщо } j = 4 + 5h, \\ u_5^e, \text{ якщо } j = 5 + 5h, \end{cases} \quad u^v = \begin{cases} u_1^v, \text{ якщо } i = 1 + 5s, \\ u_2^v, \text{ якщо } i = 2 + 5s, \\ u_3^v, \text{ якщо } i = 3 + 5s, \\ u_4^v, \text{ якщо } i = 4 + 5s, \\ u_5^v, \text{ якщо } i = 5 + 5s, \end{cases} \quad \begin{matrix} h = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{b}{5} \right\rfloor, \\ s = 0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{c}{5} \right\rfloor, \end{matrix} \quad (7)$$

де u_j^e, u_i^v – вагові параметри ребер та вершин.

Топологічна властивість $\theta = 0 \vee \pm 1$ визначається типом топологічних матриць та відповідає відношенням зв'язку ребра n_e та вершини n_v .

Основними недоліками такого підходу є:

- мінімальне обмеження розмірності блоків ПТМ (та відповідних їм компонент графу) потужностями впорядкованих множин вагових параметрів елементів графу;
- можливість відтворення топологічних та параметричних властивостей геометричної моделі тільки на базі ПТМ, що використовують властивість інцидентності;
- технічна громіздкість та складність формування вихідних блоків ПТМ; відсутність відтворення динамічних властивостей модельованого об'єкта або системи.

Для усунення зазначених недоліків пропонується використання функціонального графа $G_{YF} [V(F), E]$. У ньому передбачається, що складові розподіленої системи або технологічного об'єкта відтворюються функціональними вершинами, вага яких визначається функціоналом $F(\underline{U})$, що відтворює як статичні, так і динамічні властивості складових модельованої системи або об'єкта. З урахуванням виразів (1)–(7) формалізація геометричної інтерпретації модельованої системи (об'єкту) матиме вигляд:

$$Y = A \cap U \cap Z \leftrightarrow G_{YF} \{ [V(F(\underline{U}))], E \}, \quad (8)$$

де $F(\underline{U}) = \bigcup_{i=1}^n f_i(\bar{u}_i)$ – функціонал розподілених складових системи (об'єкту), що кожна з яких наділена технологічною функцією $f_i(\bar{u}_i)$, що визначає динамічні функціональні властивості відповідної складової залежно від її вектору вагових коефіцієнтів (параметрів) \bar{u}_i .

Ребра $E = \{e_j\}$ у складі графу G_{YF} є незваженими. Вони лише визначають взаємозв'язок між вершинами $V(F) = \{v_i [f_i(\bar{u}_i)]\}$. Проте в загальному випадку граф G_{YF} може бути як направленим, так і ненаправленим або змішаним (рис. 1).

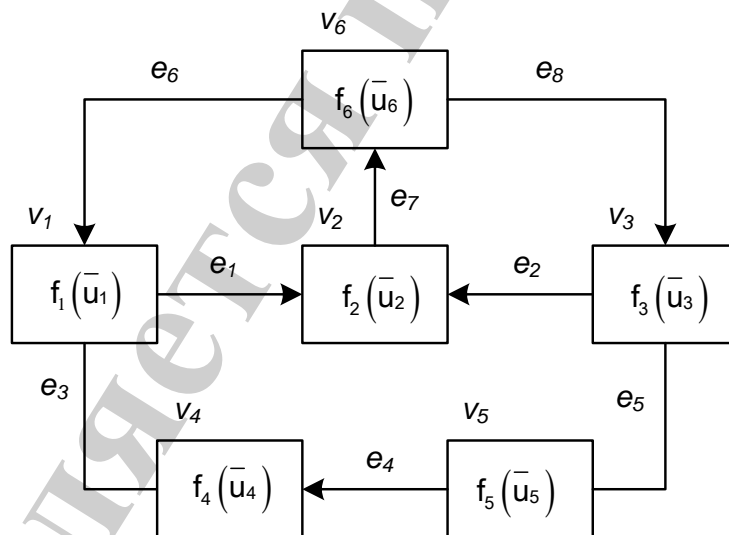


Рис. 1. Приклад графо-функціональної моделі G_{YF} розподіленої системи з потужностями $[V]=6$ та $[E]=8$

Отже, спосіб, закладений в основу графо-функціональної моделі G_{YF} , повністю відтворює в геометричному сенсі всю множину $Y = A \cap U \cap Z$. Граф G_{YF} , на відміну від графу G_Y , спрощує структуру графу G_{YF} за рахунок відсутності зваженості ребер та функціонального завдання вагових параметрів. Крім

того, граф G_{YF} , на відміну від графа G_Y , відтворює динамічні властивості модельованої системи або технологічного об'єкту.

З точки зору параметричних та функціонально-динамічних властивостей кожної складової системи (об'єкту) відповідна функція $f_i(\bar{u}_i)$ має враховувати технологічне призначення складової та логіку його реалізації відповідно до вагових параметрів \bar{u}_i . З позиції анатомії графу ця функція має враховувати ступінь (валентність) відповідної вершини v_i з урахуванням знаку.

Подальше оброблення геометричної моделі G_{YF} з використанням ЕОМ має відбуватися при її аналітичній інтерпретації.

5. Результати запровадження графо-функціонального моделювання розподілених систем

5.1. Метод аналітичного відтворення графо-функціональної моделі

На відміну від графу G_Y геометрична модель G_{YF} не передбачає прямого присвоєння вагових коефіцієнтів вершинам та взагалі не містить таких коефіцієнтів для ребер (через відсутність їхньої зваженості). Такий порядок речей дозволяє відмовитися від обов'язкового застосування базової матриці інцидентності при аналітичному відтворенні моделі. Це пов'язано, по перше, з відсутністю необхідності позиційного розподілу вагових коефіцієнтів (за рахунок використання функцій $f_i(\bar{u}_i)$) та, по друге, з відсутністю моделювання окремих складових системи (об'єкту) за допомогою ребер. Отже, за основу для матричного відтворення графічної моделі G_{YF} у загальному випадку може бути взята будь-яка матриця: інцидентності, суміжності, контурів, маршрутів тощо.

Найбільш наочною та простою з точки зору складання серед топологічних матриць є матриця суміжності. Проте суттєвим її недоліком є неможливість прямого відтворення декількох ребер між двома суміжними вершинами, особливо – коли зазначені ребра мають різний напрямок. Однак у разі шифрування в функції $f_i(\bar{u}_i)$ ступеня (валентності) відповідної вершини з урахуванням її знаку даний недолік повністю нівелюється.

У такому випадку в складі вектора \bar{u}_i передбачається впорядкована підмножина $\bar{d}_i \subset \bar{u}_i$, $\bar{d}_i = \{p_i^+, p_i^-, p_i^0\}$, де p_i^+ , p_i^- та p_i^0 – кількість ребер, інцидентних вершині v_i відповідно із додатною, від'ємною та нейтральною валентністю. Отже, при зазначеному підході функція $f_i(\bar{u}_i)$ буде опосередковано визначати властивості інцидентності між вершинами і ребрами в будь-якій топологічній матриці, зокрема – матриці суміжності.

Враховуючи, що матриця суміжності є симетричною квадратною матрицею, в ній, на відміну від матриці інцидентності, доцільно застосувати не позиційний, а діагональний принцип відтворення функціональних властивостей складових вершин графу G_{YF} .

У такому випадку ПТМ, базована на використанні матриці суміжності (СПТМ), що відтворює за вказаним правилом параметричні та топологічні

властивості графічної моделі G_{YF} (а отже – модельованою нею системи або технологічного об'єкта), матиме такий вигляд:

$$\left| M_{СПТМ_G_{YF}} \right| = \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & \theta_{21} & \theta_{31} & \dots & \theta_{n1} \\ \theta_{12} & f_2(\bar{u}_2) & \theta_{32} & \dots & \theta_{n2} \\ \theta_{13} & \theta_{23} & f_3(\bar{u}_3) & \dots & \theta_{n3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_{1n} & \theta_{2n} & \theta_{3n} & \dots & f_n(\bar{u}_n) \end{vmatrix}, \quad (8)$$

де $\left| M_{СПТМ_G_{YF}} \right|$ – СПТМ графічної моделі G_{YF} ;

$$\theta_{ij} = \theta_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_i \updownarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j, \end{cases}$$

– топологічна властивість наявності (\updownarrow) або відсутності (\parallel) суміжності між i -ю та j -ю вершинами.

Зокрема для графа, зображеного на рис. 1, формула (8) матиме такий вигляд:

$$\left| M_{G_{YF}} \right| = \left| M_{СПТМ_G_{YF}} \right| = \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & f_2(\bar{u}_2) & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & f_3(\bar{u}_3) & & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & f_4(\bar{u}_4) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & f_5(\bar{u}_5) & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & f_6(\bar{u}_6) \end{vmatrix}.$$

Функції $f_i(\bar{u}_i)$ для цього графу відтворюють не тільки параметричні властивості графу, але й частину його анатомічних властивостей за рахунок векторів $\bar{d}_i = \{p_i^+, p_i^-, p_i^0\}$. Враховуючи одиничність маршрутів між будь-якою парою суміжних вершин в даному графі, ці вектори матимуть для нього такі значення: $\bar{d}_1 = \{1, 1, 1\}$, $\bar{d}_2 = \{2, 1, 0\}$, $\bar{d}_3 = \{1, 1, 1\}$, $\bar{d}_4 = \{1, 0, 1\}$, $\bar{d}_5 = \{0, 1, 1\}$, $\bar{d}_6 = \{1, 2, 0\}$.

Для направленного графу альтернативним способом завдання кількості ребер між суміжними вершинами, із урахуванням напрямку, без використання

векторів \bar{d}_i , є шифрування даних відомостей у параметрах θ_{ij} та/або θ_{ji} . Тоді, у загальному випадку, $\theta_{ij} \neq \theta_{ji}$. Значення θ_{ij} та θ_{ji} мають відображати не тільки наявність або відсутність суміжності, але й кількість ребер, що поєднують вершини v_i та v_j з урахуванням їхнього напрямку.

У таких умовах при визначенні субординації між параметрами θ_{ij} та θ_{ji} у виразі (8) має бути взятий за основу принцип базової додатної або від'ємної валентності.

У першому випадку параметр θ_{ji} визначає кількість ребер, інцидентних вершинам v_i та v_j , із додатною валентністю для вершини v_i та від'ємною валентністю для вершини v_j . Навпаки, параметр θ_{ij} визначає кількість ребер, інцидентних тим же вершинам, але із протилежною валентністю. Отже, ці параметри визначатимуться у формулі (8) таким чином:

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^+, v_j^-} \right], & \text{якщо } v_i \uparrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \downarrow v_j, \end{cases}$$

$$\theta_{ji} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^-, v_j^+} \right], & \text{якщо } v_i \downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \uparrow v_j, \end{cases} \quad (9)$$

де $E_{ij}^{v_i^+, v_j^-}$ та $E_{ij}^{v_i^-, v_j^+}$ – множини ребер, інцидентних вершинам v_i та v_j , відповідно із додатною валентністю для вершин v_i та від'ємною для v_j і навпаки; \uparrow , \downarrow – умовні некомутативні символи суміжності із відповідно додатною та від'ємною інцидентністю ребер по відношенню до вершини v_i з боку v_j .

При використанні принципу базової від'ємної валентності у комірці ij СПТМ вказується кількість ребер, інцидентних вершинам v_i та v_j , із від'ємною валентністю для вершини v_i та додатною валентністю для вершини v_j . Навпаки, для комірок ji відповідна валентність має бути реверсивною. Отже, для такого випадку формула (9) перетворюється таким чином:

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^-, v_j^+} \right], & \text{якщо } v_i \downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \uparrow v_j, \end{cases}$$

$$\theta_{ji} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^+, v_j^-} \right], & \text{якщо } v_i \uparrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \downarrow v_j. \end{cases} \quad (10)$$

У випадку ненаправленого графа відсутня необхідність використання як векторі $\bar{d}_i \subset \bar{u}_i$, так і встановлення субординації між параметрами θ_{ij} та θ_{ji} за формулами (9) або (10). В цьому разі достатньо зазначити кількість ненаправлених ребер $\left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right]$, одночасно інцидентних суміжним вершинам v_i та v_j :

$$\theta_{ij} = \theta_{ji} = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right], & \text{якщо } v_i \Downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j. \end{cases} \quad (11)$$

Альтернативою використання векторів $\bar{d}_i \subset \bar{u}_i$ для випадку змішаного графу (рис. 1) є структурний синтез виразів (8), (9), (11) або (8), (10), (11) – залежно від прийнятої базової валентності вершин (додатної в першому та від’ємної в другому випадку).

У таких випадках замість скалярних елементів $\theta_{ij} \neq \theta_{ji}$ використовуються векторні елементи $\bar{\theta}_{ij} \neq \bar{\theta}_{ji}$, що за наявності суміжності між вершинами i та j являють собою двохелементні впорядковані множини. Перший елемент визначається виразом (9) або (10), залежно від обраної базової валентності. Другий елемент визначається за формулою (11).

Для випадку базової додатної валентності вирази для визначення зазначених параметрів матимуть такий вигляд:

$$\bar{\theta}_{ij}^+ = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^+, v_j^-}, \left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right] \right], & \text{якщо } v_i \Uparrow v_j \text{ та/ або } v_i \Downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \Downarrow v_j, \end{cases}$$

$$\bar{\theta}_{ji}^+ = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^-, v_j^+}, \left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right] \right], & \text{якщо } v_i \Downarrow v_j \text{ та/ або } v_i \Downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \Uparrow v_j, \end{cases} \quad (12)$$

а для випадку базової від’ємної валентності:

$$\bar{\theta}_{ij}^- = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^-, v_j^+}, \left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right] \right], & \text{якщо } v_i \Downarrow v_j \text{ та/ або } v_i \Downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \Uparrow v_j, \end{cases}$$

$$\bar{\theta}_{ji}^- = \begin{cases} \left[E_{ij}^{v_i^+, v_j^-}, \left[E_{ij}^{v_i, v_j} \right] \right], & \text{якщо } v_i \Uparrow v_j \text{ та/ або } v_i \Downarrow v_j, \\ 0, & \text{якщо } v_i \parallel v_j \text{ або } v_i \Downarrow v_j. \end{cases} \quad (13)$$

Отже, аналітична інтерпретація графу G_{YF} , зображеного на рис. 1, за формулами (8), (12) із використанням СПТМ має вигляд:

$$\left| M_{G_{YF}}^+ \right| = \left| M_{СПТМ_G_{YF}}^+ \right| =$$

$$= \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & \bar{1,0} & 0 & \bar{0,1} & 0 & 0 \\ 0 & f_2(\bar{u}_2) & 0 & 0 & 0 & \bar{1,0} \\ 0 & \bar{1,0} & f_3(\bar{u}_3) & 0 & \bar{0,1} & 0 \\ \bar{0,1} & 0 & 0 & f_4(\bar{u}_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{0,1} & \bar{1,0} & f_5(\bar{u}_5) & 0 \\ \bar{1,0} & 0 & \bar{1,0} & 0 & 0 & f_6(\bar{u}_6) \end{vmatrix},$$

а за формулами (8) і (13) такий вигляд:

$$\left| M_{G_{YF}}^- \right| = \left| M_{СПТМ_G_{YF}}^- \right| =$$

$$= \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & 0 & 0 & \bar{0,1} & 0 & \bar{1,0} \\ \bar{1,0} & f_2(\bar{u}_2) & \bar{1,0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_3(\bar{u}_3) & 0 & \bar{0,1} & \bar{1,0} \\ \bar{0,1} & 0 & 0 & f_4(\bar{u}_4) & \bar{1,0} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{0,1} & 0 & f_5(\bar{u}_5) & 0 \\ 0 & \bar{1,0} & 0 & 0 & 0 & f_6(\bar{u}_6) \end{vmatrix}.$$

Як видно з отриманих виразів, для графа, будь-яку пару суміжних вершин якого з'єднує тільки одне ребро, відповідні вектори $\bar{\theta}_{ij} \neq \bar{\theta}_{ji}$ містять тільки одиничні або нульові елементи в кожній позиції. Для більш загального випадку змішаного графа (рис. 2) значність відповідних позицій може бути довільною і визначається потужностями відповідних множин.

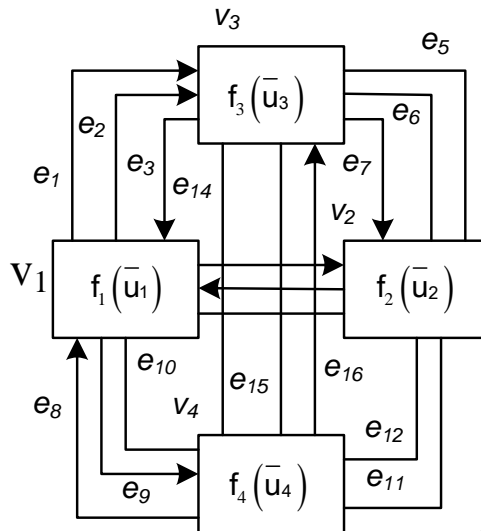


Рис. 2. Узагальнений приклад графо-функціональної моделі G_{YF} розподіленої системи з потужностями $[V]=4$ та $[E]=16$

Для наведеного прикладу вирази СПТМ відповідно за формулами (8), (12) і (8), (13) мають вигляд:

$$|M_{G_{YF}}^+| = \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & \bar{1,1} & \bar{2,0} & \bar{1,1} \\ \bar{1,1} & f_2(\bar{u}_2) & \bar{0,2} & \bar{0,2} \\ \bar{1,0} & \bar{1,2} & f_3(\bar{u}_3) & \bar{0,2} \\ \bar{1,1} & \bar{0,2} & \bar{1,2} & f_4(\bar{u}_4) \end{vmatrix},$$

$$|M_{G_{YF}}^-| = \begin{vmatrix} f_1(\bar{u}_1) & \bar{1,1} & \bar{1,0} & \bar{1,1} \\ \bar{1,1} & f_2(\bar{u}_2) & \bar{1,2} & \bar{0,2} \\ \bar{2,0} & \bar{0,2} & f_3(\bar{u}_3) & \bar{1,2} \\ \bar{1,1} & \bar{0,2} & \bar{0,2} & f_4(\bar{u}_4) \end{vmatrix}.$$

Слід зазначити, що матриці, сформовані за принципом базової валентності (додатної або від'ємної) за формулами (8)–(13), є несиметричними. Це безпосередньо впливає із властивостей суміжності елементів графу за умови направленості ребер між відповідними вершинами.

Шляхом надання відповідним матрицям змістовної надлишковості, комбінуючи різним чином між собою формули (9) і (10), можна призвести їх до симетричного вигляду. При цьому фактично будуть дублюватися анатомічні властивості у двох частинах матриці.

Для відтворення за допомогою розробленого методу розподілених систем або об'єктів великої розмірності слід застосувати метод прямих сум, що був використаний для ПТМ, базованих на матрицях інцидентності, в роботі [15]. Проте з'ясування особливостей його застосування щодо СПТМ потребує окремого ґрунтовного дослідження.

5. 2. Практичне застосування методу графоаналітичного моделювання

Найбільш перспективною сферою застосування розробленого методу графоаналітичного моделювання є автоматизоване проектування (конфігурування) апаратного та програмного забезпечення систем керування розподіленими технологічними об'єктами. Особливо актуальним це питання стосується мікропроцесорних систем керування залізничної автоматики, головним чином – централізації стрілок та сигналів. Технологічним об'єктом таких систем є колійний розвиток залізничних станцій, дослідженню графоаналітичного відтворення якого присвячені праці [15–22].

Окремої уваги заслуговує при цьому вдосконалення методів конфігурування моделей для випробувань таких систем, що мають бути розроблені за окремими процедурами порівняно із основними засобами інформаційно-керуючих систем.

Використання можливостей завдання функцій $f_i(\bar{u}_i)$ дозволяє не тільки адаптувати прикладне програмне забезпечення під оновлену конфігурацію технологічного об'єкта (що дозволяє робити графічна модель G_Y). Зазначені можливості забезпечують також додавання нових типів об'єктів керування та контролю та задавати додаткові динамічні властивості існуючим об'єктам без корегування вихідного програмного коду. Таким чином додатково мінімізуються працезатрати розробників програмного забезпечення при підготовці нового проекту впровадження або при реконструкції автоматизованої системи керування.

Застосування запропонованого методу також можливе про роботі з окремими САЕ програмними комплексами (САПР у широкому тлумаченні). З таких комплексів особливу увагу привертає EPlan [23, 24].

EPlan було розроблено компанією EPLAN Software & Service, як унікальне ПЗ керування даними. Вона являє собою модульну структурну платформу з наступними основними компонентами:

- Electric P8 – створення електротехнічних схем;
- Fluid – створення гідравлічних та пневматичних схем;
- PrePlanning – створення схем автоматизації;
- ProPanel – створення 3-D електрошаф та розподільчих пристроїв.

У EPlan можливо реалізувати наступні основні підходи до формалізації рішень розробника та відповідного створення проектної документації:

1. Створення проекту на основі умовних графічних позначень.
2. Створення проекту на основі виробів з бази даних.
3. Створення проекту на основі визначеної специфікації.

Зокрема при проектуванні мікропроцесорних систем керування EPlan надає широкі можливості для роботи з програмованими логічними контролерами (ПЛК). Програми конфігурації ПЛК и EPlan мають різний порядок представлення даних конфігурації. Коли в EPlan представляються деталі електротехнічного обладнання, в програмах настройки ПЛК використовується логічний порядок представлення для програмування ПЛК. Наприклад, EPlan містить виводів пристроїв ПЛК, які призначені для електроживлення. Ці виводи пристроїв не потрібні в програмі конфігурації ПЛК. У програмах настройки ПЛК, навпаки, міститься інформація про інтерфейс, наприклад інформацію про маршрутизатор, який не потрібний в EPlan. Дані, які програма обробки не знаходить в файлі обміну через те, що інша обробка не розпізнає їх, додаються при імпорті. Отже саме використання запропонованого методу попереднього графоаналітичного моделювання дозволяє на етапі попереднього планування проекту оптимально використовувати можливості EPlan як засобу САЕ (рис. 3).

Ідентифікація пристроїв як в EPlan, так і в програмі настройки ПЛК виконується або з позначенням типу ПЛК, або шляхом вказівки файлу основних даних пристрою. За допомогою цих властивостей також виконується присвоєння продуктів при імпорті файлів налаштування ПЛК.

В структурі дерева діалогового вікна навігатора ПЛК можна вибрати різні види для відображення даних ПЛК. У всіх видах відображаються всі існуючі в проекті дані ПЛК (параметри \bar{u}_i), тобто блоки ПЛК, виводи пристроїв ПЛК та шаблони функцій $f_i(\bar{u}_i)$. При цьому відображені як пусті блоки ПЛК, так і блоки ПЛК, що містять лише шаблони функцій.

Специфічним настройками блоків керування ПЛК систем шин можна створювати обмін з різними програмами настройки ПЛК. Обмін даними ПЛК має в основі окремий файл обміну, який реалізує одну програму оброблення і читає іншу. Цим файлом легко може обмінюватися інженер-проектувальник EPlan та інженер-програміст ПЛК. Налаштування обміну виконується загалом для всього проекту EPlan за допомогою спеціально діалогового інтерфейсу (рис. 4).

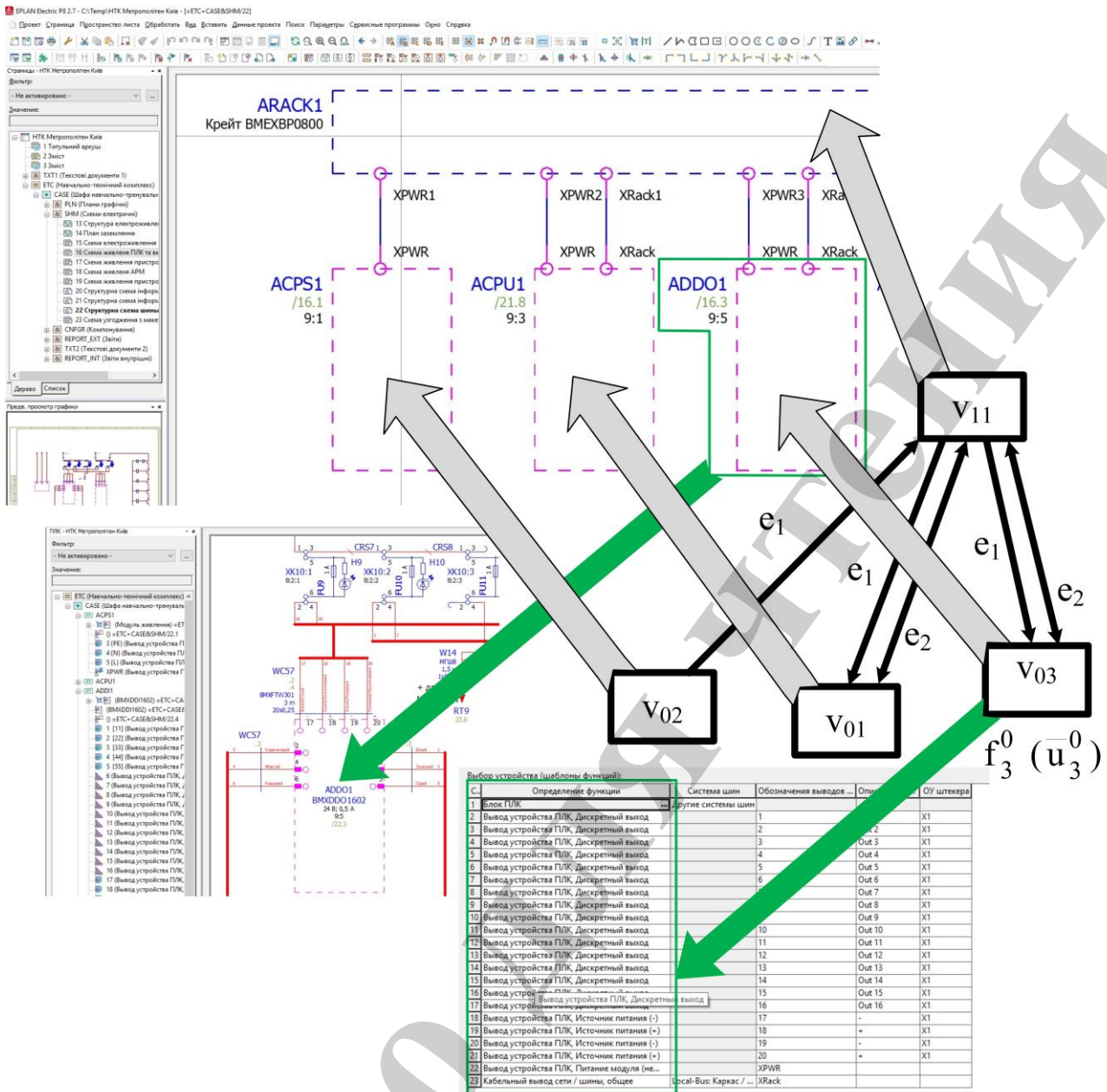


Рис. 3. Приклад конфігурування ПЛК засобами EPlan з використанням методу графоаналітичного моделювання

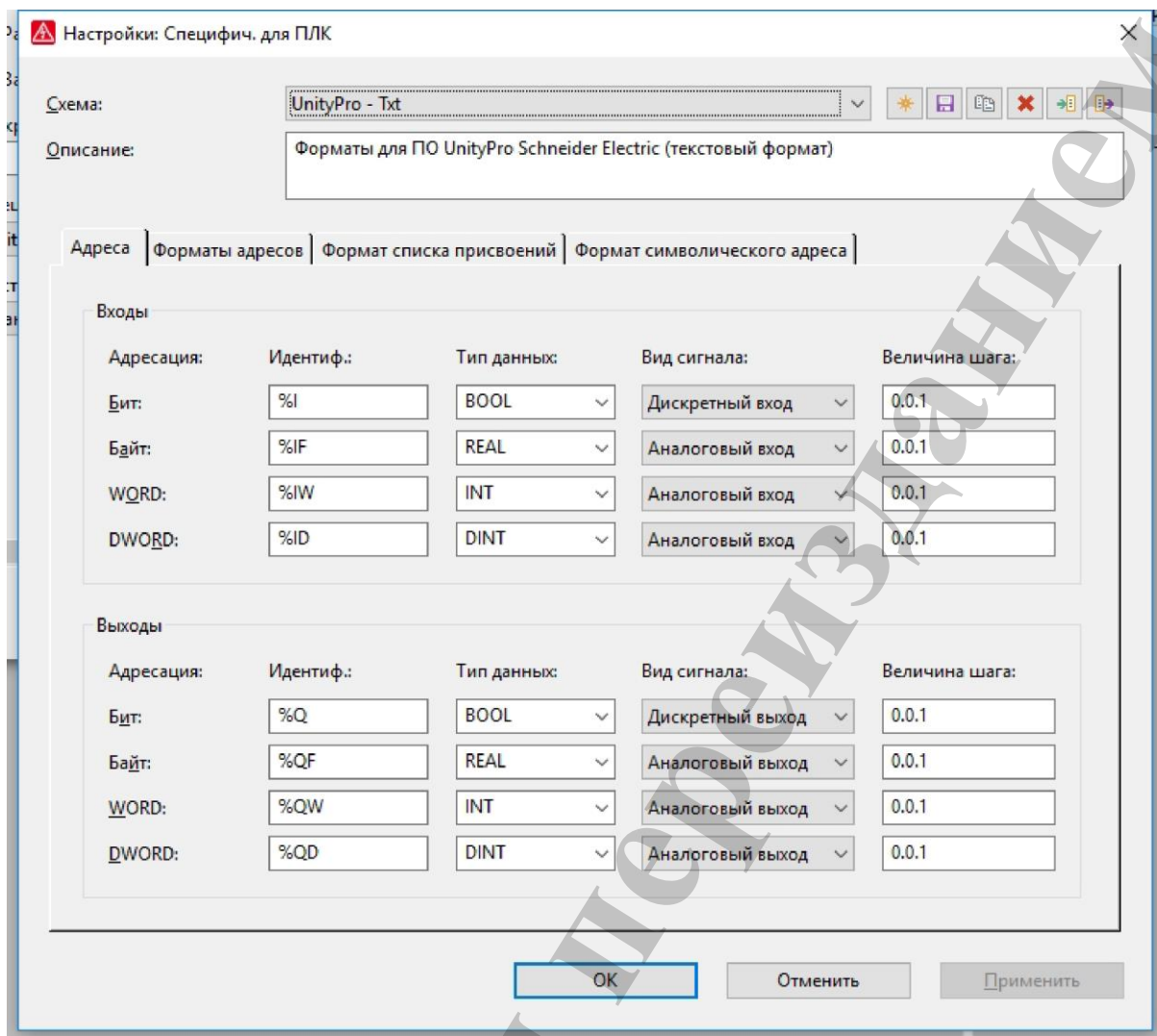


Рис. 4. Одна із форм інтерфейсу налаштування програмного забезпечення проекту на базі функціональної вершини

Загалом зміні можуть підлягати наступні дані конфігурації:

- дані апаратного забезпечення пристроїв, що використовуються;
- створення каркасу з інформацією про вироби;
- таблиця символів (яка може мати назву список присвоєнь, таблиця змін тощо);
- призначення символічної програмної адреси адресі технічного забезпечення.

Таким чином, інтеграція запропонованого методу графо-функціонального моделювання з прикладним пакетом EPlan дозволяє формалізувати процес постановки задач розробникам апаратного та програмного забезпечення. Це робиться шляхом поєднання функціональних вершин із компонентами проектованої системи та відповідними їм інтерфейсними вікнами. Аналогічні підходи можуть бути застосовані до інших систем САЕ або САПР із урахуванням специфіки таких систем.

6. Обговорення запропонованого методу графо-функціонального моделювання

Виходячи з матеріалів проведеного дослідження, запропонований метод графоаналітичного моделювання розподілених систем в цілому базується на світовому досвіді використання графічних моделей при моделюванні систем, об'єктів та явищ. Найбільш близькими моделями, що закладені за основу запропонованій графо-функціональній моделі, є геометричні моделі розподілених об'єктів із різноманітними підходами до аналітичного відтворення. Такі моделі були розроблені в останнє десятиліття фахівцями у галузі залізничного транспорту.

Узагальнено, залежно від функціонального призначення, такі моделі можна розділити на дві основні групи. Перші використані для дослідження технологічних процесів на розподілених об'єктах або системах. Другі використані для структурного синтезу об'єктів, систем або компонентів (програмного забезпечення, технічної документації тощо).

Найбільш близькими до запропонованого методу та сформованих на його основі моделей є графоаналітичний метод прямих сум, що базується на використанні параметрично-топологічних матриць інцидентності. З наукової точки зору основною принциповою відмінністю запропонованого методу є:

- перехід від інтерпретації окремих елементів систем або технологічних об'єктів ребрами графу до повного відтворення відповідних складових функціональними вершинами;

- перехід від позиційного принципу відтворення вагових параметрів елементів графу до застосування таких змінних в якості аргументів функцій, закладених у вершини;

- безпосереднє завдання динамічних властивостей складових системи або об'єкту через вкладені функції вершин графу;

- перехід від використання параметрично-топологічних матриць інцидентності до параметрично-топологічних матриць суміжності при аналітичній інтерпретації геометричних моделей;

- опосередковане завдання зв'язків між складовими системи або об'єкту через цільове призначення окремих полів або комірок параметрично-топологічних матриць.

З практичної точки зору запропонований графоаналітичний метод дозволяє:

- безпосередньо формувати технічні та технологічні формалізовані описи розподілених систем та об'єктів (в якості технічних завдань, технічної документації тощо);

- розробляти та конфігурувати прикладне програмне забезпечення автоматизованих систем керування, формуючи при цьому динамічні властивості об'єктів керування та контролю систем шляхом завдання відповідних функцій вершин графу.

Зокрема, метод дозволяє оптимізувати процес постановки завдань розробникам програмного забезпечення через формалізацію структури проектованої системи керування із використанням стандартних прикладних

засобів САПР. На відміну від найбільш наближеного аналогу (що базується на параметрично-топологічних матрицях інцидентності) метод має такі основні переваги, як:

- можливість безпосереднього завдання нових функцій технологічних об'єктів та впровадження нових типів об'єктів;
- зменшення обсягу даних масиву при програмній реалізації геометричних моделей;
- спрощення процедур синтезу модельованих розподілених систем (об'єктів) та підвищення рівня їх наочності.

При цьому на відміну від класичних підходів, що базуються на відтворенні графів матрицями суміжності, запропонований метод реалізує можливість багатомаршрутних зв'язків між суміжними вершинами із урахуванням напрямку відповідних ребер графу. При цьому існує значна множина варіацій такого завдання зв'язків як на основі додатної, так і від'ємної або змішаної логіки. Ряд прикладів такої реалізації розглянуто в дослідженні, при цьому виявлення повного спектру подібних варіацій вимагає окремих вишукувань в предметній галузі. Зокрема, при подальших дослідженнях можливе частково-позиційне розподілення аргументів функцій по комірках матриць суміжності, інверсне відображення матриць, об'єднання вершин із спільними функціями в окремі групи тощо.

При цьому основними обмеженнями запропонованого методу є пристосованість лише до тих розподілених систем, елементи яких можуть бути відтворені лише вершинами графу.

7. Висновки

1. В якості базової геометричної моделі, що береться за основу методу, сформовано функціональний граф. У його складі зваженими є тільки вершини. Ребра графу визначають тільки зв'язки між вершинами, які інтерпретуються складові технологічні об'єкти розподіленої системи. Замість векторів вагових параметрів, що присвоювалися елементам відомих графічних моделях, у запропонованій вершинам присвоюються об'єктні функції або функціонали, аргументами функцій стають статичні вагові коефіцієнти. Динамічна поведінка відтворюваних об'єктів реалізується характером заданих функцій.

2. Визначено спосіб функціонального відтворення статичних та динамічних характеристик об'єктів системи, що моделюється графічною моделлю. Таке відтворення відбувається за рахунок використання функціональних вершин, вагова наповненість якої здійснюється складачем відповідної моделі.

3. Розроблено метод аналітичного відтворення розробленої графо-функціональної моделі, що базується на використанні параметрично-топологічних матриць інцидентності із опосередкованим завданням зв'язків між вершинами графу. При цьому встановлено ряд варіацій такого завдання шляхом функціонального розподілення окремих полів та комірок параметрично-топологічної матриці.

4. Розроблено рекомендації та наведені приклади практичного застосування методу графо-функціонального моделювання при автоматизованому проектуванні програмного забезпечення автоматизованих систем керування. Зокрема, наведено приклад використання методу з метою формалізованого складання технічних завдань розробникам програмного забезпечення шляхом поєднання графо-функціональної моделі із прикладним пакетом САПР E-Plan.

Таким чином, розроблено і запропоновано більш універсальний та зручний для користувача метод геометричного моделювання розподілених систем. На відміну від найближчих аналогів він використовує функціональні вагові параметри елементів графу та базується на дещо іншому математичному апараті матричної інтерпретації. Це дозволяє спростити процедури формування геометричних моделей та реалізувати динамічні властивості модельованих об'єктів системи.

Подальші дослідження в напрямку графо-функціонального моделювання розподілених систем полягатимуть на встановленні кількості і сутності комбінацій способів опосередкованого завдання зв'язків між об'єктами розподіленої системи. Крім того, в подальшому удосконаленні методу гіпотетично можливим є часткове позиціонування аргументів функцій вершин за комірками матриці суміжності.

Література

1. Глинков Г. М., Маковский В. А. АСУ ТП в чёрной металлургии. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, 1999. 310 с.
2. Рудакова А. В. Проблемы управления большими развивающимися системами // Вестник Херсонского национального технического университета. 2010. № 2. С. 29–33.
3. Кустов В. Ф., Каменев А. Ю. Экспериментально-статические модели распределённых технологических объектов // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. № 2. С. 97–101.
4. Сигорский В. П. Математический аппарат инженера. изд. 2-е, стереотип. К., 1977. 768 с.
5. Гиранова А. К. Разработка пакета программ для проведения экспериментов с реконфигурируемыми вычислениями // Моделювання та інформаційні технології. 2011. Вип. 59. С. 124–129.
6. Improvement of the accuracy of determining movement parameters of cuts on classification humps by methods of video analysis / Panchenko S., Siroklyn I., Lapko A., Kameniev A., Zmii S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4, Issue 3 (82). P. 25–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.76103>
7. Каменев А. Ю. Универсальный метод конфигурирования программного обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами // Наука и производство Урала: Научно-технический и производственный журнал. 2014. № 4. С. 146–150.

8. Cliff O., Prokopenko M., Fitch R. Minimising the Kullback–Leibler Divergence for Model Selection in Distributed Nonlinear Systems // *Entropy*. 2018. Vol. 20, Issue 2. P. 51. doi: <https://doi.org/10.3390/e20020051>
9. Zrafi R., Ghedira S., Besbes K. A Bond Graph Approach for the Modeling and Simulation of a Buck Converter // *Journal of Low Power Electronics and Applications*. 2018. Vol. 8, Issue 1. P. 2. doi: <https://doi.org/10.3390/jlpea8010002>
10. Małecki K. Graph Cellular Automata with Relation-Based Neighbourhoods of Cells for Complex Systems Modelling: A Case of Traffic Simulation // *Symmetry*. 2017. Vol. 9, Issue 12. P. 322. doi: <https://doi.org/10.3390/sym9120322>
11. Model-Based Requirements Management in Gear Systems Design Based On Graph-Based Design Languages / Holder K., Zech A., Ramsaier M., Stetter R., Niedermeier H.-P., Rudolph S., Till M. // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7, Issue 11. P. 1112. doi: <https://doi.org/10.3390/app7111112>
12. Chen Y., Guo Y., Wang Y. Modeling and Density Estimation of an Urban Freeway Network Based on Dynamic Graph Hybrid Automata // *Sensors*. 2017. Vol. 17, Issue 4. P. 716. doi: <https://doi.org/10.3390/s17040716>
13. Zhang H., Lu F. GSMNet: A Hierarchical Graph Model for Moving Objects in Networks // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2017. Vol. 6, Issue 3. P. 71. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi6030071>
14. Liu J., Liu J. The Treewidth of Induced Graphs of Conditional Preference Networks Is Small // *Information*. 2016. Vol. 7, Issue 1. P. 5. doi: <https://doi.org/10.3390/info7010005>
15. Listrovoy S., Panchenko S., Listrova E. Mathematical models in computer control systems railways and parallel computing: monograph. Kharkiv, 2017. 300 p.
16. State Tracking and Fault Diagnosis for Dynamic Systems Using Labeled Uncertainty Graph / Zhou G., Feng W., Zhao Q., Zhao H. // *Sensors*. 2015. Vol. 15, Issue 11. P. 2031–28051. doi: <https://doi.org/10.3390/s151128031>
17. Traffic Behavior Recognition Using the Pachinko Allocation Model / Huynh-The T., Banos O., Le B.-V., Bui D.-M., Yoon Y., Lee S. // *Sensors*. 2015. Vol. 15, Issue 7. P. 16040–16059. doi: <https://doi.org/10.3390/s150716040>
18. Santone A., Vaglini G. Model Checking Properties on Reduced Trace Systems // *Algorithms*. 2014. Vol. 7, Issue 3. P. 339–362. doi: <https://doi.org/10.3390/a7030339>
19. Testing Goodness of Fit of Random Graph Models / Csiszár V., Hussami P., Komlós J., Móri T., Rejtő L., Tusnády G. // *Algorithms*. 2012. Vol. 5, Issue 4. P. 629–635. doi: <https://doi.org/10.3390/a5040629>
20. Lu M., Constantinescu C., Sarkar P. Content Sharing Graphs for Deduplication-Enabled Storage Systems // *Algorithms*. 2012. Vol. 5, Issue 2. P. 236–260. doi: <https://doi.org/10.3390/a5020236>
21. Козаченко Д. Н., Вернигора Р. В., Березовый Н. И. Комплексный анализ железнодорожной инфраструктуры металлургического комбината на основе графоаналитического моделирования // *Збірник наукових праць*

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна «Транспортні системи і технології перевезень». 2012. Вип. 4. С. 55–60.

22. Bobrovskiy V. I., Kozachenko D. N., Vernigora R. V. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata // Transport Problems. 2014. Vol. 9, Issue 3. P. 57–66.

23. Gischel B. EPLAN Electric P8 Reference Handbook. 4th ed. Carl Hanser Verlag, 2015. 672 p. doi: <https://doi.org/10.3139/9781569904992>

24. Computer aided design with Eplan electric P8 educational projektovanje primenom računara kroz prikaz programskog paketa Eplan electric P8 educational / Matić D., Lukač D., Bugarski V., Kulić F., Nikolić P. // Journal on Processing and Energy in Agriculture. 2016. Vol. 20, Issue 2. P. 102–105.

Тільки для читачів