

О.І. ІВАНЕШКІНМіжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
НАН та МОН України, Київ, Україна, e-mail: al.ivaneshkin@gmail.com.**НЕОРІЄНТОВАНІ ГРАФИ ВИДУ ЗМІШАНОГО ЛІСУ.
ПОБУДОВА ІЗОМОРФНИХ АНАЛОГІВ
ТА СЕЛЕКТИВНЕ ПАКУВАННЯ СТРУКТУРИ**

Анотація. Розроблено методи й алгоритми, що дали змогу значно розширити функціональні можливості та сферу практичного застосування створюваної нової інформаційної software-технології. Всі вони реалізовані у 32 програмних модулях та призначені для максимально оперативної побудови найрізноманітніших ізоморфних аналогів об'єктів, які є різновидом довільної структури неорієнтованих графів і є видом змішаного лісу, а також для одномоментного вилучення з них сукупностей селективно вибраних вершин і гілок. Для ефективної роботи на об'єктах, що включають до 65536 вершин, які можна розмістити на 6400 віртуальних X-рівнях екрана монітора, технологія потребує лише 4 байти інформації щодо кожної вершини з урахуванням її власного номера, який є натуральним числом з інтервалу $[0; 65535]$. Розроблено та реалізовано метод, що дає змогу адаптувати технологію до роботи з об'єктами, які мають до $4 \cdot 10^{19}$ вершин і які він здатний розпізнавати.

Ключові слова: граф-дерево, неорієнтоване дерево, саджанець, змішаний ліс, комплекс програмних засобів (КПЗ).

ВСТУП

Протягом багаторічного еволюційного розвитку людства накопичено величезний досвід класифікації різноманітних об'єктів. Він є переконливим доказом того, що розподіл об'єктів за групами на основі сукупностей виділених властивостей або ознак $\{P_l\}_{l=1}^L$ є невід'ємною та надзвичайно корисною складовою досліджень у більшості науково-теоретичних та виробничо-прикладних галузей людської діяльності.

Можна навести достатньо прикладів із різних галузей знань, які свідчать про помітне зростання ефективності проведених досліджень внаслідок здійснення класифікації об'єктів. Зауважимо, що класифікація об'єктів, які є змішаними лісами $MF(T_I; S_J)$ [1], не є винятком. Більше того, у багатьох випадках здійснення операції попереднього розподілу за групами всіх або частини компонентів $\{t_i\}_{i=1}^I = T_I$ і $\{s_j\}_{j=1}^J = S_J$, що входять до складу тимчасово неорієнтованого $MF(T_I; S_J)$, є не лише бажаним, але й необхідним.

Вагомими аргументами на користь наявності цього типу операцій у номенклатурі створюваної універсальної software-технології є кілька причин. Найпринциповішими є такі:

— головною метою розроблення будь-якої, тим паче універсальної технології є інтеграція в ній засобів, які створюють всі необхідні та достатні умови для максимально оперативної роботи з найбільш широкою сукупністю об'єктів і забезпечують максимально високу якість кінцевих результатів;

— попередньо виконаний розподіл компонентів $MF(T_I; S_J)$ за групами дає змогу істотно скоротити загальний час пошуку у $H = T_I \cup S_J$ представників, що мають конкретні властивості, для подальшого виконання над ними сукупності строго регламентованих операцій;

© О.І. Іванешкін, 2023

— достовірно встановлено, що створення та подальше використання у роботі з об'єктами виду t_r та $MF(T_I; S_J)$ операцій, розроблених на основі методів, способів та підходів, які не здатні адаптуватися до розподілених за групами компонентів, призводить до невиправдано високих витрат технічних ресурсів та часу. До того ж, ці витрати принципово залежать від кількості вершин N досліджуваного об'єкта;

— завжди бажано, щоб будь-які технології, створені «з нуля» або вдосконалені під час експлуатації, містили операції, які є цілеспрямовано орієнтованими на роботу з розподіленими за групами об'єктами. Це забезпечує максимальну оперативність та ефективність виконуваних досліджень та підвищує якість отриманого кінцевого результату.

Наведені у цій статті матеріали отримано на черговому, логічно закономірному етапі проведених досліджень, з метою та початковими результатами яких можна ознайомитись у роботах [1–3].

Метою цієї роботи є розширення сфери застосування створюваної універсальної інформаційної software-технології, яку реалізовано у вигляді багатофункціонального, інтегрованого, легкого в опануванні користувацького середовища. Ця технологія забезпечує максимальні можливості роботи з об'єктами найбільш загального вигляду (порівняно з традиційними зв'язними деревами). Цими об'єктами є тимчасово неорієнтовані змішані ліси $MF(T_I; S_J)$ [1]. Їхня структура може мати до 65535 вершин, яким дозволено розміщення на 6400 віртуальних X -рівнях екрана монітора.

ОПИС ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕНЬ І ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Наведені у цій статті результати стосуються розроблення та програмної реалізації сукупності важливих та корисних з практичного погляду операцій. Ці операції орієнтовані на побудову об'єктів, структура яких *de facto* є ізоморфною вибраному для досліджень об'єкту виду $MF(T_I; S_J)$, а також на вибіркве видалення з його структури низки елементів (вершин та гілок) та (або) компонентів (дерева, саджанці).

Усі результати реалізовано у повністю налагоджених програмних модулях. В останню версію комплексу програмних засобів (КПЗ) включено лише ті, що безпосередньо пов'язані з цілеспрямованим відбором з робочого $MF(T_I; S_J)$ сукупностей компонентів $\{t_r\}_{r=1}^R \subseteq \{t_i\}_{i=1}^I$ та $\{s_q\}_{q=1}^Q \subseteq \{s_j\}_{j=1}^J$, чий структури слід врахувати під час розв'язання таких задач:

а) створення засобів побудови ізоморфних аналогів будь-яких тимчасово неорієнтованих $MF(T_I; S_J)$ для подальшого розв'язання задач оцінювання ізоморфності їхніх структур, а також структур окремих, (не) належних їм компонентів, як між собою, так із отриманим ззовні деревом t^* ;

б) одномоментне спільне вилучення із $MF(T_I; S_J)$ сукупності всіх (або частини) промаркованих і непромаркованих вершин, що задовольняють сукупність сформульованих для цього умов селективного відбору.

Для зручності викладу матеріалу введемо кілька визначень:

— **робочий** — будь-який об'єкт виду $MF(T_I; S_J)$, ($1 \leq I, 0 \leq J$), побудований «з нуля» або вибраний із сукупності раніше створених для виконання над ним будь-якої операції у поточний момент часу;

— **еталон** — робочий об'єкт виду $MF(T_I; S_J)$, структура якого залишається незмінною протягом заданого проміжку часу його використання у роботі;

— **тестований** — робочий об'єкт, який аналізують на ізоморфність з еталоном.

— **зовнішні (відносно t_r або s_q) компоненти** — будь-які $t_i (i \neq r)$ та $s_j (j \neq q)$, що беруть участь у роботі. Аналогічно можна визначити зовнішні відносно $MF(T_I; S_J)$ об'єкти;

— **ізоморфний аналог (прототип, представник)** — будь-який $MF^*(T_I^*; S_J^*)$, отриманий внаслідок впливу на робочий $MF(T_I; S_J)$ генератора ізоморфних структур або функціонально еквівалентних йому за призначенням засобів комплексу.

Означення 1. Об'єкти $MF(T_I; S_J)$ та $MF(T_R; S_Q)$ виду неорієнтованого змішаного лісу називатимемо структурно-ізоморфними, якщо $I \equiv R$ та $J \equiv Q$ і для кожного $t_i \in T_i (1 \leq i \leq I)$ знайдеться свій $t_r \in T_R (1 \leq r \leq R)$, який є йому ізоморфним.

Ізоморфізм орієнтованих графів (лісів) називатимемо функціональним. Для розширення сфери подальших досліджень доцільно констатувати таке. Наявність у $MF(T_I; S_J)$ не пов'язаних один з одним компонентів $\{t_i\}_{i=1}^I$ та $\{s_j\}_{j=1}^J$ дає змогу ввести на множині $\{MF(T_{I_q}; S_{J_q})\}_q$ таку пару операцій, відносно яких зазначена множина є замкнутою. Цими операціями є такі:

attach — приєднання (прикріплення) один до одного пари об'єктів $MF(T_I; S_J)$ та $MF(T_K; S_L)$ з об'єднанням у спільному файлі всіх даних, що їм належать. Ця операція є аналогом операції конкатенації у мовах програмування.

detach — від'єднання (відокремлення) від структури $MF(T_I; S_J)$ вибраних відповідно до заданих умов компонентів $\{t_r\}_{r=1}^R \subset T_I$ та $\{s_q\}_{q=1}^Q \subset S_J$ зі збереженням їхніх даних в одному спільному файлі.

Якщо під час розв'язання задач, пов'язаних з ізоморфістю об'єктів виду змішаних лісів, комутативність attach-операції є очевидною, то в інших випадках це потрібно спеціально обумовити. У разі комутативності розумно вимагати, щоб початковий порядок запису у файли збережених даних об'єктів, отриманих після виконання цієї пари операцій, збігався з порядком їхнього слідування у файлах вихідних робочих об'єктів.

Як символи, що позначають ці операції, зручно використовувати відомі з теорії множин знаки $\cup$ та $/$. При цьому сама суть ізоморфного перетворення і трактування одержуваного після його виконання результату дає змогу застосувати термін «ізоморфний аналог» і до будь-яких t_r з $MF(*, *) = \cup_q MF(T_{I_q}; S_{J_q})$, і до самостійних (зовнішніх) об'єктів виду $MF(T_1; 0) \notin MF(*, *)$.

На рис. 1 наведено 9-компонентний об'єкт $MF(T_2; S_7)$ (2 дерева та 7 саджанців). Його використано для демонстрації результатів виконання над ним деяких розроблених та описаних у цій статті операцій. Для кращого розуміння їхньої суті значення власних номерів всіх вершин графу, починаючи з тієї, що має нульовий порядковий номер (Node № 0), попередньо впорядковано шляхом виконання над об'єктом операції, яка в інтерфейсі користувача має номер 10.

Побудова ізоморфних аналогів об'єктів виду змішаного лісу. Автор цієї статті прагнув створити максимально універсальну інформаційну software-технологію і поширити її практичне застосування на об'єкти виду $MF(T_I; S_J)$, які мають більш загальний структурно-функціональний характер порівняно з t_q . Для цього здійснено суттєву модифікацію генератора ізоморфних структур, раніше розробленого винятково для t_q . Фактично створений наново, він набув здатності виконувати на $MF(T_I; S_J)$ такі чотири основні види операцій ізоморфної реконфігурації.

1. Компонентна реконфігурація. Виконується групою операцій, пов'язаних з клавішею меню № 7. Застосування цих операцій до саджанців $s^* \in \{s_j\}_{j=1}^J \in$ неможливим через наявність в їхній структурі лише єдиної вершини-кореня. Відносно дерев $t_q \in \{t_i\}_{i=1}^I = T_I$ її реалізують, застосовуючи початкову версію генератора ізоморфних структур [2], функціональні можливості якого були істотно розширені.

Конкретизацію t_q для ізоморфної реконфігурації структури здійснюють шляхом маркування будь-якої вершини, що входить до його складу. За бажанням користувача, остання може стати або новим коренем усього створюваного на основі t_q ізоморфного аналога t_q^* , або залишитися коренем породженої нею та ізоморфно модифікованої гілки. Зміну місць розташування окремих елементів (вершин і гілок) t_q , яка зберігає його ізоморфність з прототипом t_q^* , отримуваним в результаті виконання операції, можна забезпечити за допомогою вперше реалізованих у комплексі методів [1–3] або їхніх різновидів. Останні будуть цілеспрямовано створені та упроваджені у КПЗ під час удосконалення його функціональних можливостей.

2. Однотипно-групова реконфігурація. У разі застосування цього типу ізоморфної реконфігурації компоненти $t_i \in T_I$ та $s_j \in S_J$ розглядають як цілісні. У цьому випадку виключені будь-які модифікації і включення елементів їхньої структури у будь-які зовнішні компоненти.

Перед виконанням цієї операції всі $\{t_i\}_{i=1}^I$ та $\{s_j\}_{j=1}^J$, або частину з них розподіляють за K ($1 < K$) групами G^k ($1 \leq k \leq K$), $G^k = T_R^k \cup S_Q^k$, $T_R^k = \{t_r^k\}_{r=1}^R \subseteq T_I$, $S_Q^k = \{s_q^k\}_{q=1}^Q \subseteq S_J$, $G^k \cap G^d = \emptyset$ ($k \neq d$), що містять умовно однотипні компоненти. При цьому компоненти $\{t_r^k\}$ і $\{s_q^k\}$, що містяться у відповідному єдиному T_R^K і S_Q^K вважають однотипними, якщо для будь-якого l ($1 \leq l \leq L$) їхні значення P_r^l та P_q^l аналогічних ознак належать одному й тому самому інтервалу $[a_l, b_l]$.

Сформовані у такий спосіб групи G^k розташовуються одна під одною на віртуальній Y -осі екрана монітора згідно з правилом, описаним у вибраному пункті меню. Загальна кількість варіантів таких розміщень характеризується величиною $Z = K!$. Кількість груп K , їхні розміри, склад і характер розміщення на Y -осі екрана може змінюватися під час розв'язання практичної задачі, пов'язаної з виконанням на $MF(T_I; S_J)$ різних операцій. Компоненти $F = (T_I \cup S_J) / \bigcup_k G^k$, що не увійшли до груп, можуть мати свій варіант візуального розміщення на осі Y , зокрема, між раніше сформованими групами та їхніми окремими компонентами.

Якщо розв'язувана задача не має додаткових умов або обмежень, то візуально відображуваний Y -порядок слідування компонентів $\{t_r^k\}_{r=1}^R$ і $\{s_q^k\}_{q=1}^Q$ у групах G^k може бути довільним. Оскільки цей етап досліджень пов'язаний з побудовою ізоморфних аналогів задля подальшого їхнього використання, порядок розташування компонентів у зазначених групах не має принципового значення. Тому можна обгрунтовано вважати, що у початково сформованих групах G^k він є

ідентичним порядку їхнього взаємного розташування у вертикальній Y -площині структури робочого об'єкта, виведеної на екран монітора.

Приклад 1. Один з варіантів такого розподілу всіх компонентів за групами реалізовано у програмний спосіб у складі КПЗ та описано нижче. Він стосується випадку, коли кількість цих груп дорівнює чотирьом. Практична реалізація цього варіанта є доцільною тому, що його безпосередньо застосовують у розв'язанні задач з аналізу ізоморфності та селективного пакування структур $MF(T_I; S_J)$. Задачу пакування, яка часто виникає в різних прикладних галузях наукових знань, розглянемо нижче, а зараз наведемо корисний приклад розподілу компонентів за групами.

Відомо, що структурним елементом саджанця $s_j \in S_J$ є корінь. Тому, з міркувань практичної доцільності, як основні показники належності t_i та s_j конкретним групам G^* вибрано тип компонента (дерево/саджанець) та наявність у його кореня ознаки маркування. Згідно з [3], цю ознаку може мати будь-яка вершина $MF(T_I; S_J)$. На екрані монітора вона має вигляд рамки червоного кольору у прямокутника, що зображує вершину. На чорно-білих рисунках, наведених у статтях, цією ознакою є потовщена рамка. При цьому конкретними групами є такі:

- група $T^+ = \{t_i^+\}_i \subseteq T_I$. Містить усі дерева $t_i \in MF(T_I; S_J)$, корені яких мають ознаку маркування;
- група $T^- = \{t_i^-\}_i \subseteq T_I$. Містить усі дерева $t_i \in MF(T_I; S_J)$, корені яких не мають ознаки маркування;
- група $S^+ = \{s_j^+\}_j \subseteq S_J$. Містить усі саджанці $s_j \in MF(T_I; S_J)$ з промаркованим коренем;
- група $S^- = \{s_j^-\}_j \subseteq S_J$. Містить усі саджанці $s_j \in MF(T_I; S_J)$, корені яких не мають ознаки маркування.

Строга бінарність використовуваного критерію розподілу компонентів за групами дає змогу стверджувати, що $T^+ \cap T^- = \emptyset$ та $S^+ \cap S^- = \emptyset$.

У результаті дослідження цього варіанта групування компонентів створено єдиний, універсальний, ситуативно налаштовуваний програмний модуль, що дає змогу реалізувати будь-який з 24 варіантів цього виду ізоморфної реконфігурації структури робочого $MF(T_I; S_J)$. Ці варіанти представлено окремими темами у меню типу ComboBox, що містить 24 теми. Вони враховують усі можливі варіанти групування компонентів, загальна кількість яких дорівнює кількості перестановок 4-х елементів ($4! = 24$). В кінці зазначеного списку тем додано ще один пункт. Пов'язана з ним операція є закономірним та логічно природним доповненням перших 24-х і має назву «RAND-упорядкування груп однотипних компонентів». У разі вибору цього пункту КПЗ здійснює побудову ізоморфного аналога $MF(T_I; S_J)$ з використанням датчика псевдовипадкових чисел під час генерації унікальних порядкових номерів k_q ($q = 0, 1, 2, 3$) місць Y -розміщення чотирьох зазначених груп компонентів. У разі інших варіантів розподілу компонентів $MF(T_I; S_J)$ загальну кількість варіантів Y -розміщень Q груп оцінюють величиною $Q!$.

Через функціональну спільність і для зручності посилань 25 розглянутих операцій названо «табличними».

Приклад 2. Другим варіантом практично важливого групування компонентів змішаного лісу може бути приклад з роботи [2], відповідно інтерпретований на випадок об'єктів виду змішаного лісу. Метою цього групування є прискорення

пошуку в $MF(T_I; S_J)$ аналога, який є ізоморфним деякому t^* , шляхом попереднього формування та візуального відображення у верхній частині головного вікна інтерфейсу групи компонентів $T^\sim = \{t_r^\sim\}_r \subseteq T_I$, які задовольняють усі умови відбору, сформульовані у зазначеній статті. Програмні засоби реалізації цих умов відбору вже є в комплексі, їхню роботу описано в [2]. Тому за потреби достатньо обмежитися лише їхньою низьковитратною модифікацією.

Розглянутий варіант групування набуває особливого статусу, оскільки його безпосередньо застосовують у розв'язанні низки задач. Тут зазначимо лише ті задачі, які мають бути розв'язані найближчим часом та пов'язані з:

- встановленням факту наявності ізоморфних аналогів серед компонентів $\{t_i\}_{i=1}^I$ заданого $MF(T_I; S_J)$;
- пошуком у заданому $MF(T_I; S_J)$ компонентів, ізоморфних деякій сукупності дерев $\{t_q\}_q: t_q \notin MF(T_I; S_J)$, що йому не належать;
- оцінюванням ізоморфності пари змішаних лісів $MF(T_K^0; S_L^0)$ і $MF(T_I^1; S_J^1)$.

Цей варіант групування дає змогу цілеспрямовано та оперативно скоротити загальну кількість об'єктів з T_I , що підлягають аналізу, та у разі скоротити загальні витрати технічних ресурсів і часу під час розв'язання всіх зазначених та інших задач.

На рис. 2, а наведено ізоморфний аналог, який є результатом послідовного виконання над об'єктом з рис. 1 таких операцій:

- заміна власних номерів усіх вершин (за допомогою кнопки № 10 інтерфейсу), починаючи з тієї, що займає верхню позицію в головному репрезентативному вікні (Node № 0);
- однотипно-групову ізоморфну реконфігурацію з використанням наведеного у прикладі 1 групування компонентів $S^+ \rightarrow T^- \rightarrow T^+ \rightarrow S^-$ та порядком розміщення груп на Y-осі екрана монітора;
- компонентна реконфігурація дерева (TREE ROOT № 1) шляхом заміни його «старої» кореневої вершини з власним номером 2 на «нову» вершину з номером 10.

Для кращого розуміння поля кнопок операцій, використаних під час модифікації структури, виділено темнішим кольором, а Radio Buttons — хрестиком.

3. Компонентно-повна реконфігурація. Цей вид ізоморфної реконфігурації виконують одночасно над усіма $(I + J)$ компонентами $\{t_i\}_{i=1}^I \cup \{s_j\}_{j=1}^J = T_I \cup S_J = H$, що входять до $MF(T_I; S_J)$. Ці компоненти розглядають як цілісні утворення та не здійснюють їхній розподіл за групами. Тут використовують вбудований у програмний модуль датчик псевдовипадкових чисел для отримання випадкового (з можливих $(I + J)!$) варіанта розміщення компонентів на віртуальній Y-осі екрана монітора.

4. Інтегральна реконфігурація. Це найуніверсальніший та найбільш трудомісткий і ресурсовитратний вид ізоморфної реконфігурації. Він є комбінацією трьох описаних вище та функціонально незалежних видів реконфігурації. Не накладає жодних обмежень на порядок виконання операцій, пов'язаних із цими видами, та кількість повторень кожної з них. Загалом, дає змогу отримати всю множину можливих ізоморфних аналогів $MF(T_I; S_J)$, які іноді збігаються під час моделювання і підлягають відсіванню.

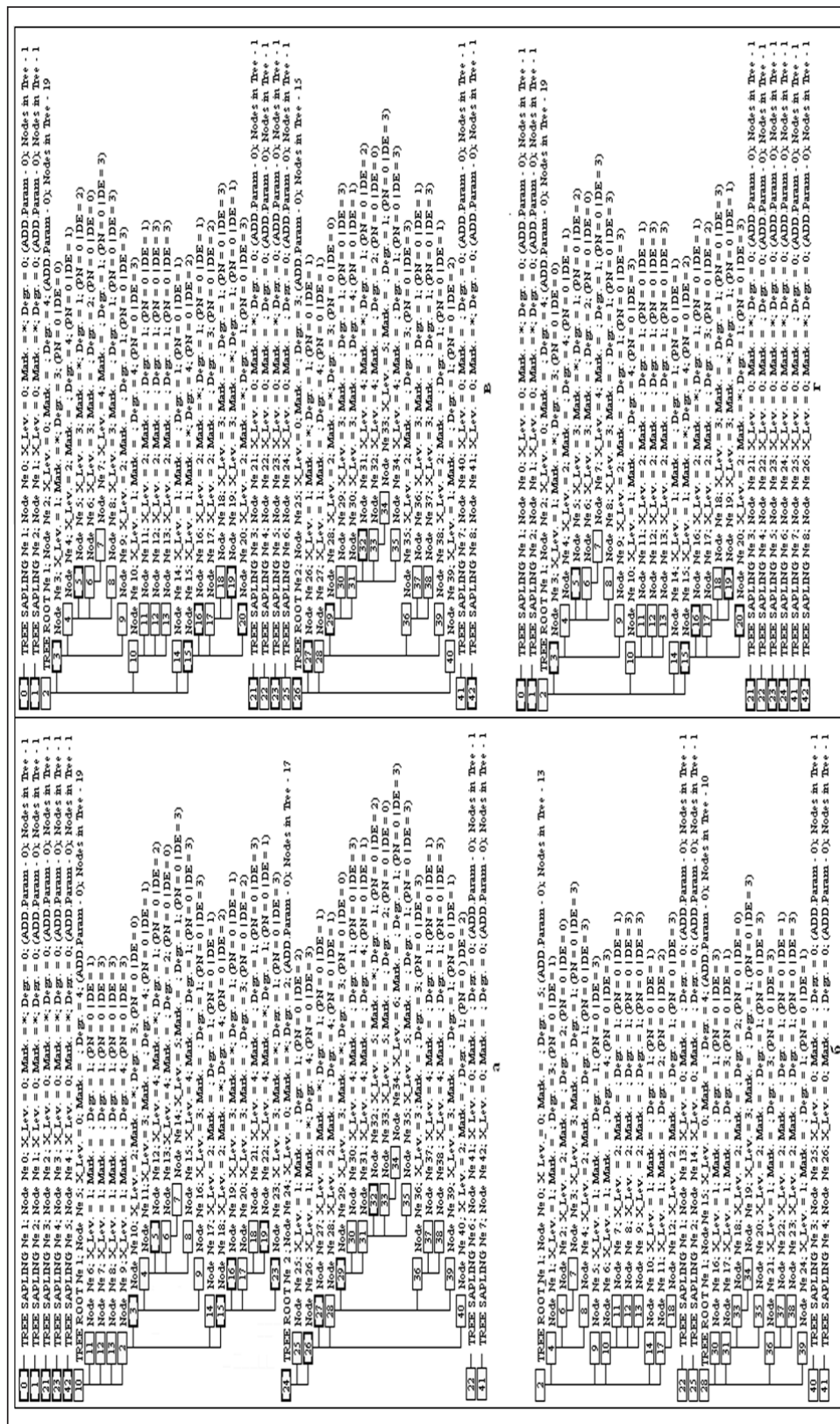


Рис. 2. Результати виконання операцій побудови ізоморфного аналога робочого об'єкта $MF(T_2; S_7)$ та різних видів його пакування: побудова методом інтегральної реконфігурації (а), пакування з використанням операції 1) (б), пакування з використанням операції 2) (в), пакування з використанням операції 8) (г)

Усі модифіковані або розроблені операції, пов'язані з ізоморфною реконфігурацією, об'єднано загальним заголовком «Ізоморфна реконфігурація (модифікація) структури графу». При цьому назви 25 описаних операцій мають вигляд тем загального ComboBox-меню, що розкривається після активізації. На полі цього меню є напис «Варіанти ізоморфної реконфігурації об'єктів виду «Змішаний ліс»».

Селективне пакування структури графу змішаного лісу. Перш ніж представляти сукупність нових операцій, розроблених і доданих до КПЗ, що зазнає постійної модифікації, зауважимо таке. По-перше, під терміном «селективне пакування» розумітимемо модифікацію об'єкта $MF(T_I; S_J)$ шляхом видалення з його структури цілої сукупності елементів, які задовольняють лише ті умови відбору, які обумовлені у конкретній операції, виконуваний у цей момент часу. По-друге, операція пакування, що входила до складу раніше створених версій КПЗ, працювала виключно з об'єктами виду $MF(T_I; S_0)$ і була здатна видаляти з них тільки всі промарковані вершини.

У новій версії комплексу цей варіант пакування реалізовано в одній із семи ($2 \div 8$) нових операцій селективного пакування, описаних нижче і включених до комплексу. Кожна з семи операцій істотно розширює номенклатуру практично корисних видів пакування структури робочого об'єкта та призначена для одномоментного видалення із вказаного t_i (або всього $MF(T_I; S_J)$) цілих сукупностей (не)промаркованих вершин та породжених ними гілок, які задовольняють умови селективного відбору, обумовлені у кожній операції.

Доцільно виділити два важливі з практичного погляду моменти.

1. Порушити зв'язність будь-якого t_i з $MF(T_R; 0)$ (а отже, будь-якого t_i з $MF(T_I; S_J)$) і трансформувати його в об'єкт виду $MF(T_Q; S_P)$ з компонентами $\{t_q\}_{q=1}^Q$ і $\{s_p\}_{p=1}^P$, $0 \leq P$ може тільки та операція пакування, якій наказано видалити (не)промаркований корінь, причому степінь цього кореня d задовольняє умову $1 < d$. Якщо хоча б одна з цих умов не виконується, компонент t_i , що піддається пакуванню, збереже зв'язність.

2. Розв'язуючи за допомогою вбудованих засобів перепідпорядкування вершин задачу зв'язності компонентів $\{t_q\}_{q=1}^Q$ в упакованому $MF(T_Q; S_P)$, всі розроблені операції унеможливають подальше вставлення раніше вилучених з $MF(T_I; S_J)$ елементів і компонентів або частини з них в будь-якому місці його структури.

Навряд чи доцільно докладно описувати кожний новий вид пакування, що був розроблений, програмно реалізований та включений до складу комплексу (кнопка № 10). Для розуміння суті та сенсу кожного з них достатньо восьми наведених нижче назв операцій. Вони є такими:

1) пакування $MF(T_I; S_J)$ шляхом видалення з його структури всіх промаркованих вершин, включаючи корені дерев та саджанці.

2) пакування $MF(T_I; S_J)$ або вибраного з нього t_i шляхом видалення тільки промаркованих коренів;

3) пакування $MF(T_I; S_J)$ або вибраного з нього t_i шляхом видалення всіх промаркованих вершин, але зі збереженням промаркованих коренів;

4) пакування $MF(T_I; S_J)$ шляхом видалення з його структури лише всіх промаркованих коренів та саджанців;

5) пакування $MF(T_I; S_J)$ шляхом видалення з його структури всіх промаркованих вершин за винятком промаркованих коренів та саджанців;

6) пакування $MF(T_I; S_J)$ шляхом видалення з його структури лише всіх промаркованих саджанців;

7) пакування $MF(T_I; S_J)$ шляхом видалення з його структури всіх промаркованих коренів компонентів t_i зі збереженням породжених ними гілок;

8) пакування $MF(T_I; S_J)$ шляхом видалення з його структури всіх породжених промаркованими коренями дерев зі збереженням власне промаркованих коренів (аналог селективного вирубування під час лісовпорядкування).

На рис. 2, б–г наведено структури, отримані після виконання над робочим $MF(T_I; S_J)$ трьох варіантів операцій пакування, що мають номери 1), 2) та 8).

Неважко побачити наявність зв'язку низки операцій пакування з другим (однотипно-груповим) видом ізоморфної реконфігурації. Цей зв'язок виявляється у тому, що іноді для контролю коректності і оперативності виконання операцій варто виконати попереднє групування компонентів $MF(T_I; S_J)$, що підлягають пакуванню. Це дасть змогу помітно скоротити обсяг використовуваних технічних ресурсів і загальний час розв'язання задачі.

Операцію № 3 із заголовком «Вирізати промарковану вершину (гілку)», модифіковану для описуваної версії КПЗ, також можна вважати різновидом операції пакування, якщо не враховувати її зв'язок з операціями № 5 та № 6, об'єднаними спільним заголовком «Вибір місця вставлення кореня вирізаного (скопійованого) компонента у структуру графу». Підставою для цього є те, що включена ще до початкової версії КПЗ [3], операція № 3 призначалася тільки для роботи зі зв'язними деревами t^* (у нинішній інтерпретації це об'єкти $MF(T_I; S_0)$) і слугувала для видалення з їхньої структури або будь-якої поодинокі вершини, або вершини разом із породженою нею гілкою.

Після модифікації цю операцію можна виконувати на будь-яких компонентах $t_i \in T_I$ та $s_j \in S_J$. Як і раніше, вона слугує для вирізання (не)промаркованих вершин і вершин з породженими ними гілками з конкретних t_i , які вибирає користувач. До того ж, ця операція зберегла раніше закладену в ній властивість залишати незмінною топологію структури і зберігати всі дані елементів, що вилучаються з t_i . Тому вона (на відміну від нових операцій) дає змогу багато разів вставляти останні у будь-які компоненти $t_r (s_q)$ робочого $MF(T_I; S_J)$ на будь-які вказані місця.

Розроблення, програмну реалізацію, включення до складу комплексу інших варіантів ізоморфної реконфігурації та формування груп, а також Y -порядків розміщення самих груп і компонентів, що входять до них, буде здійснено з удосконаленням КПЗ для розширення його функціональних можливостей і номенклатури розв'язуваних задач.

ВИСНОВКИ

У статті наведено результати розроблення сукупності важливих з практичного погляду операцій, пов'язаних з побудовою об'єктів, структура яких *de facto* є ізоморфною структурі вибраного для досліджень об'єкта $MF(T_I; S_J)$ виду змішаного лісу, та селективним видаленням з його структури сукупностей елементів (вершин та гілок), що задовольняють умови відбору, прописані у кожній конкретній операції.

Всі результати реалізовано мовою MS VISUAL C++ 6 у вигляді повністю налагоджених програмних модулів. Частину з них включено до складу останньої версії створеної універсальної інформаційної software-технології.

Цю технологію створено у вигляді багатофункціонального, інтегрованого, легкого в опануванні користувацького середовища. Вона потребує лише 4 байти інформації щодо кожної вершини і забезпечує максимальні можливості роботи з неорієнтованими графами виду змішаного лісу найбільш загального вигляду, які мають до 65536 вершин, розміщених на 6400 віртуальних X -рівнях екрана монітора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ivaneshkin A.I. Universal information software technology for non-oriented mixed forests. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 3. P. 465–472. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00477-8>.
2. Ivaneshkin A.I. The solution of the question of the isomorphism of non-oriented trees by the method of generating isomorphic structures. *Automation and Information Sciences*. 2020. Vol. 52, N 4. P. 68–79.
3. Ivaneshkin A.I. A new approach to operating with undirected trees. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57, № 1. P. 124–132. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00335-z>.

A.I. Ivaneshkin

UNDIRECTED MIXED-FOREST GRAPHS. CONSTRUCTION OF ISOMORPHIC ANALOGS AND SELECTIVE STRUCTURE PACKING

Abstract. Methods and algorithms have been developed that have made it possible to significantly expand the functionality and scope of the new universal information software technology being created. All of them are implemented in 32 software modules and are designed for the most efficient construction of isomorphic analogs of the undirected mixed-forest graphs of arbitrary structure and simultaneous removal of selectively chosen sets of nodes and branches from them. To work effectively on objects containing up to 65,536 nodes, which can be placed on 6400 virtual X -levels of the monitor screen, the technology requires only 4 bytes of information for each node, taking into account its number, which is a natural number from the interval $[0; 65535]$. A method has been developed and implemented that allows adapting the technology to work with objects with up to $4 \cdot 10^{19}$ nodes that it can recognize.

Keywords: graph tree, undirected tree, sapling, mixed forest, set of software tools.

Надійшла до редакції 25.08.2022