

УДК 681.518.5

Ю.П. КОНДРАТЕНКО<sup>1,2</sup>, О.В. КОРОБКО<sup>2</sup>, В.Ю. КОНДРАТЕНКО<sup>3</sup>, Д.С. КУРІКША<sup>1</sup><sup>1</sup>Чорноморський державний університет ім. П. Могили, Миколаїв, Україна<sup>2</sup>Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна<sup>3</sup>Колорадський університет, Денвер, США

## СППР ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ВАНТАЖОПОТОКІВ З ГАРАНТОБЕЗПЕЧНОЮ КОРЕКЦІЄЮ МАРШРУТІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Стаття присвячена дослідженню проблеми оптимізації транспортних вантажопотоків при здійсненні технологічних операцій на морських нафтокомплексах з розгалуженою системою резервуарних парків та вантажних трубопроводів. Запропоновані алгоритми функціонування комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень (СППР) забезпечують формування оптимальних маршрутів рідинних вантажів при завантаженні морських танкерів та їх гарантобезпечну корекцію при виникненні аварійних ситуацій на відповідних ділянках вантажних трубопроводів. Синтез та корекція маршрутів транспортних вантажопотоків здійснюється на основі алгоритмів оптимізації на графах. Структура та алгоритми синтезованої СППР дозволяють підвищити гарантобезпечність та ефективність процесів прийняття рішень в реальному часі.

**Ключові слова:** СППР, оптимізація маршрутів вантажопотоків, екстремальні умови, корекція в реальному часі, база даних, розгалужений граф

### Вступ

Нафтотрейдерні компанії та комплекси, що мають власні нафтобази й склади пально-мастильних матеріалів, часто зіштовхуються з тим, що більшість нафтобаз і складів використовують в процесі свого функціонування обладнання й технології, які не забезпечують належний рівень технологічної та екологічної безпеки завантаження, передавання, розвантаження рідинних вантажів й точності обліку нафтопродуктів. Впровадження систем комплексної автоматизації дозволить вирішити ці проблеми, підвищити виробничу й фінансову ефективність об'єктів нафто-перевантажувальних комплексів і скоротити до мінімуму екологічні ризики.

Застарілі технології, крім забруднення навколишнього середовища, призводять до прямих втрат товарної продукції – за рахунок випару, розливів, застосування інформаційно-вимірювальних пристроїв і приладів з суттєвими погрішностями. Створення сучасних автоматизованих систем контролю й обліку продукції дає можливість значно зменшити втрати нафтопродуктів, зокрема, при завантаженні танкерів в морських портах [5,6], перекачці продукції між окремими об'єктами нафтобаз тощо.

Актуальність створення системи підтримки прийняття рішень (СППР) для планування та оптимізації рідинних вантажопотоків зростає пропорцій-

но зростанню кількості замовлень на відвантаження нафтопродуктів з нафтобази, збільшенню кількості резервуарних парків та резервуарів, при переплануванні чи реконструкції трубопроводів. Для ефективного функціонування великих нафтобаз необхідно оптимально вирішувати такі задачі та знаходити найкращий варіант з усіх можливих альтернативних варіантів для виконання конкретного замовлення. Розв'язання такого класу задач може здійснюватись за допомогою комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень (СППР), що дозволяють реалізовувати пошук оптимальних рішень в інтерактивних режимах і призначені для підтримки різних видів діяльності при прийнятті рішень, що стосуються розв'язання слабоструктурованих або неструктурованих проблем.

### 1. Структура СППР та мережі вантажних трубопроводів

Метою даної статті є розробка структури та програмно-алгоритмічного забезпечення СППР, що забезпечує в автоматичному режимі формування оптимального маршруту транспортування відповідного типу нафтопродукту на великих морських нафто-транспортних комплексах. При цьому СППР має забезпечити не тільки синтез та відображення оптимального маршруту для відвантаження нафтопродукту

кту, але й можливість його корекції при виникненні аварійних ситуацій на основі інформації про технологічний нафто-перевантажувальний комплекс та його компоненти, яка зберігається в базі даних (БД) СППР, а також на основі заданих людиною-оператором координат початкової та кінцевої точок передавання рідинного вантажу. СППР за допомогою розгалуженої інформаційно-вимірювальної системи має здійснювати автоматичну перевірку стану системи вантажних трубопроводів та корекцію обраного шляху (маршруту) транспортування у разі виявлення невідповідностей у стані ділянок вантажних трубопроводних ліній.

Структурна схема СППР, що допомагає оператору в інтерактивних режимах обирати оптимальний шлях відвантаження нафтопродуктів, зображена на рис. 1. Слід відзначити, що для гарантобезпечної реалізації оптимального шляху транспортування відповідного рідинного вантажу, СППР повинна здійснювати постійний контроль та аналіз всіх поточних параметрів, що можуть вплинути на ефективність процесу перекачки продукції, в реальному часі.



Рис. 1. Структурна схема СППР для оптимізації рідинних вантажопотоків

Загальну структуру системи трубопроводів на нафтоперевантажувальному комплексі доцільно представляти у вигляді розгалуженого графу з невід'ємною вагою ребер (рис. 2).

Початковими вершинами  $T = \{T_1, T_2, T_3, T_4\}$  даного графу (рис. 2) позначено резервуари нафтового парку з вибраним типом нафтопродукту, а кінцевими вершинами  $P = \{P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}\}$  – місця з'єднання вантажного трубопроводу з транспортною одиницею (пірси, залізничні платформи тощо). Крім того для інших вершин на графі (рис. 2) використовуються наступні позначення:  $B = \{B_1, B_2\}$  – буферні резервуари, що використовуються для тимчасового зберігання рідинного вантажу;  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_{34}\}$  – засувки мережі нафтопроводу.

## 2. Алгоритм синтезу оптимального маршруту

Для пошуку оптимального маршруту відвантаження можна використовувати алгоритми знаходження мінімального шляху між двома вершинами графу. На теперішній час існує значна кількість алгоритмів знаходження найкоротшого шляху на графах [1,10], зокрема, до такого класу алгоритмів відноситься хвильовий алгоритм, алгоритм Форда-Беллмана [10], алгоритм Флойда-Уоршелла [10], алгоритм Дейкстри [9,10,12,14] та їх модифікації.

В подальшому розглянемо реалізацію алгоритму функціонування СППР при вирішенні даної задачі на основі алгоритму Дейкстри [3]. Даний алгоритм забезпечує знаходження найкоротших відстаней від однієї з вершин графа до всіх інших. Алгоритм працює тільки для графів без ребер від'ємної ваги.

Введемо наступні позначення:

$S$  – множина вершин графа,  $S = T \cup V \cup B \cup P$ ;

$w[i, j] \in W$  – вага ребра графа між суміжними вершинами  $i$  та  $j$ ;

$a$  – початкова вершина маршруту,  $a \in (T \cup B)$ ;

$b$  – кінцева вершина маршруту,  $b \in (P \cup T \cup B)$ ;

$U = \{u_k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots$  – множина відвіданих вершин графа на поточному  $i$ -му кроці алгоритму формування оптимального маршруту;

$D[u_k]$  – довжина найкоротшого шляху з вершини  $a$  до вершини  $u_k$ ;

$R_{opt}$  – оптимальний маршрут або множина вершин графа, що знаходяться на найкоротшому шляху з вершини  $a$  до вершини  $u_k$ .

Завдання, яке розв'язує алгоритм Дейкстри, можна сформулювати таким чином:

а) задано простий зважений граф  $G(S, W)$  без петель та дуг від'ємної ваги;

б) знайти найкоротшу відстань від будь-якої вершини  $a$  графа  $G$  до інших вершин цього графа.

Розглянемо більш детально процедуру реалізації алгоритму формування оптимального маршруту для транспортування рідинного вантажу.

На початку алгоритму відстань для початкової вершини  $a$  покладається рівною нулю  $D[a]=0$ , а для всіх інших вершин  $u \in S$ ,  $u \neq a$  відстані  $D[u]$

представляються великим додатним числом, що є більшим максимально можливою довжиною шляху в графі, наприклад,  $D[u]=\infty$ . Масив прапорів, що вказують на завершення процедури пошуку оптимального шляху до відповідної вершини, заповнюється нулями.

Пошук суміжних вершин в алгоритмі здійснюється тільки для вершин, прапор яких дорівнює 0.

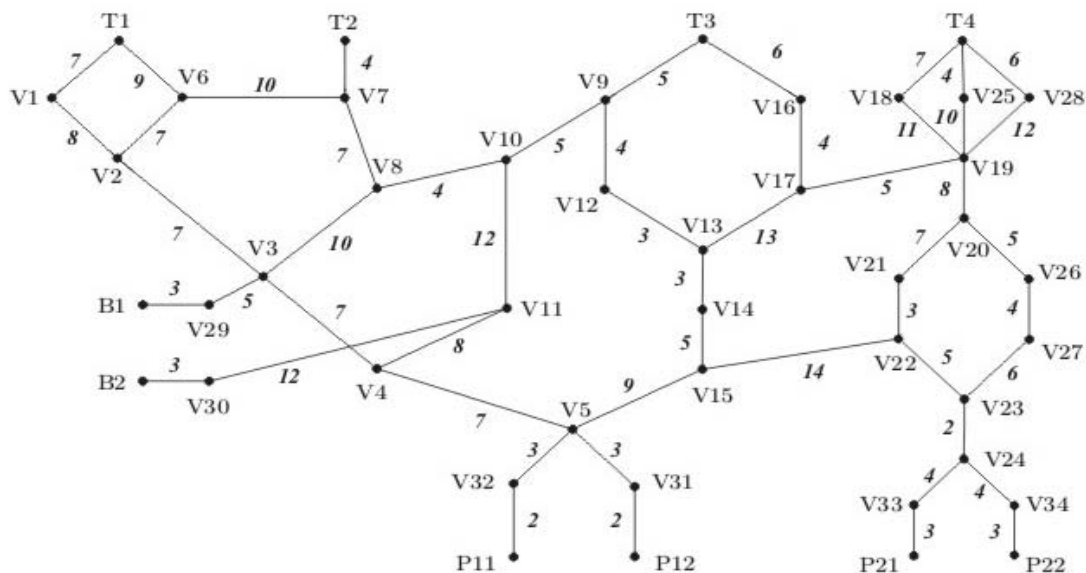


Рис. 2. Граф системи вантажних трубопроводів

Початкова вершина  $a$  стає опорною вершиною ( $a \rightarrow u_1$ ) і вводить до складу маршруту  $R[a] = a$ ,  $U = \{a\}$ .

Потім запускається основний цикл алгоритму.

На кожному кроці циклу відшукується суміжна опорній вершині  $u_1$  з мінімальною відстанню  $D[u_2]$  й прапором, що дорівнює нулю. В подальшому для знайденої суміжної вершини  $u_2$  встановлюється прапор, що дорівнює 1, а даній вершині  $u_2$  присвоюється статус опорної ( $u_2 \rightarrow u_1$ ). При цьому знайдена вершина додається до складу маршруту  $R$  і здійснюється перевірка всіх суміжних з нею вершин. Якщо відстань  $D[u_2]$  до поточної вершини  $u_2$  від вершини  $a$  більша за сумарну відстань, що складається з відстані  $D[u_1]$  до опорної вершини та довжини ребра  $w[u_1, u_2] \in W$  між опорною та поточною вершинами, тобто, якщо

$$D[u_2] > D[u_1] + w[u_1, u_2],$$

то на даному кроці алгоритму відстань  $D[u_1] + w[u_1, u_2]$  до поточної вершини  $u_2$  вважається найкоротшою, а отже:

$$D[u_2] = D[u_1] + w[u_1, u_2].$$

Цикл обчислень завершується, коли в процесі

реалізації алгоритму опорною вершиною стає кінцева вершина маршруту  $b$ .

В розробленій СППР алгоритм Дейкстри реалізовано [3,4,10] на основі застосування матриці суміжностей  $W$ . Елементами даної матриці є довжини окремих ділянок вантажних труболіній між відповідними компонентами нафтопроводу, що складають множину  $S$  вершин графа.

На рис. 3 представлена блок-схема алгоритму формування оптимального маршруту для передавання рідинних вантажів, що покладена в основу розробленого авторами програмного забезпечення СППР (рис. 1) для оптимізації транспортних вантажопотоків.

При реалізації даного алгоритму (рис. 3) на початковому етапі ініціалізації: формується матриця суміжностей графа *connectivityMatrix*, динамічний масив *Route* для збереження сформованого оптимального маршруту  $R_{opt}$ ; задається загальна кількість вершин *numberOfVertexes*; створюється та ініціюється нулями масив прапорів  $x$ ; створюється та ініціюється нескінченностями масив  $t$  довжин шляхів від початкової вершини до всіх інших; формується масив  $h$  для зберігання поточного (часткового) маршруту  $R$ ; ініціюється початкова вершина  $a$ .

### 3. Особливості програмної реалізації СППР

На рис. 4 наведено інтерфейс головного вікна програмної частини розробленої СППР. Процедура пошуку оптимального шляху між двома точками графу здійснюється при натисканні людиною-оператором кнопки «Маршрут» (рис. 4). При цьому початкова та кінцева вершини маршруту вводяться в відповідні поля «Початкова Вершина», «Кінцева Вершина» головного вікна програми.

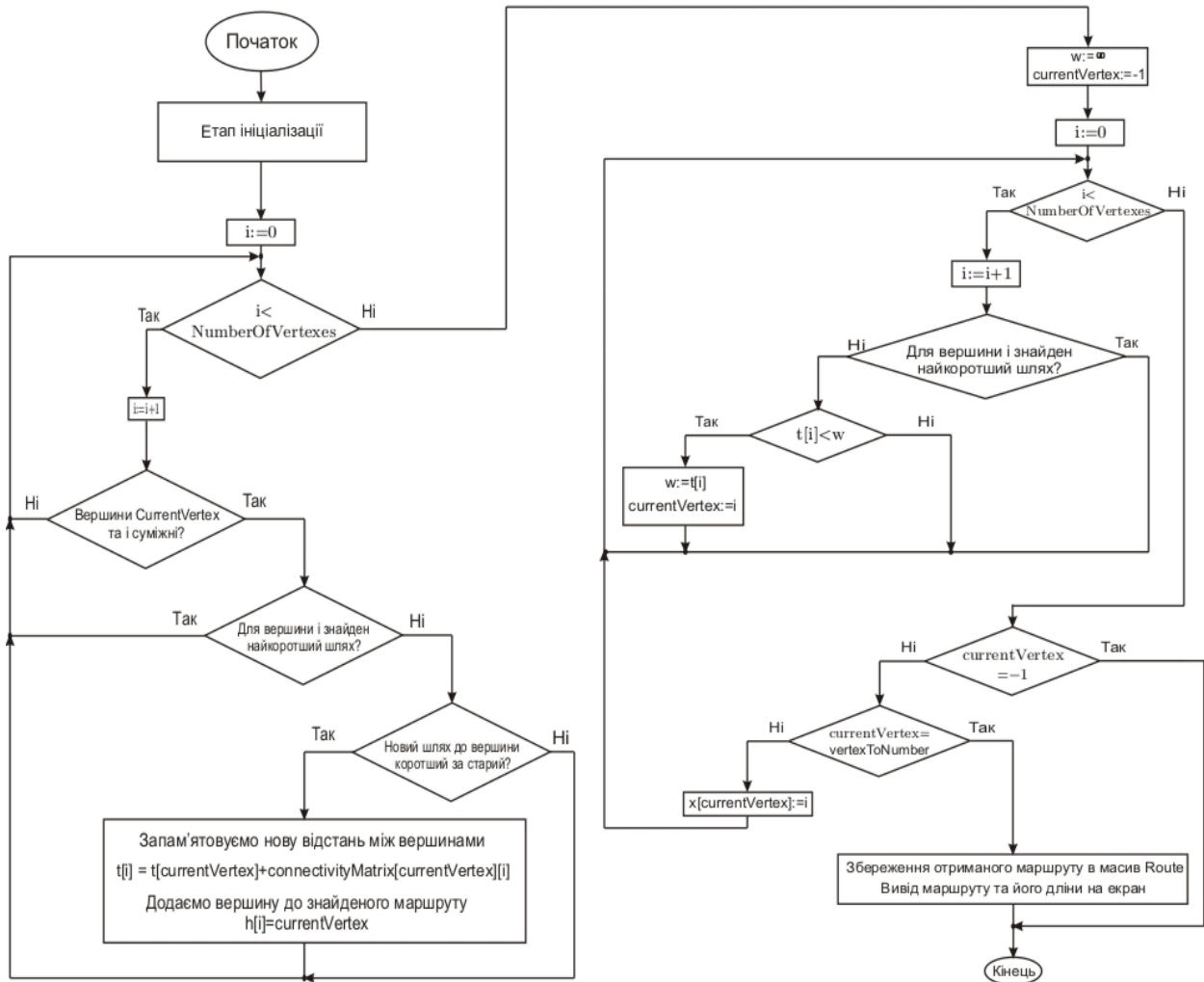


Рис. 3. Алгоритм визначення оптимального шляху між точками графу

За вагу ребра  $w[i, j]$  прийнято об'єм відповідної ланки труболінії, що розділена суміжними вершинами. Вершинами в базі даних представлені резервуари та пірси нафто-перевантажувального комплексу, а також всі засувки системи нафтопроводу.

Розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення та структурно-організаційна побудова (рис. 1) забезпечує ефективне функціонування СППР в двох інтерактивних режимах: автономному (пошук оптимального маршруту) та слідкуючому (автоматичний контроль змін БД в реальному часі).

Результатом реалізації алгоритму є знайдений оптимальний маршрут  $R_{opt}$ , що виводиться на екран у вигляді послідовності відповідних імен вершин графу (рис. 4), що входять до складу  $R_{opt}$ . Також визначається загальна довжина сформованого оптимального маршруту  $D[b]$ .

База даних (БД) СППР створена у середовищі Access пакету MS Office 2003 та містить дві таблиці: таблицю імен та ідентифікаторів вершин графу та таблицю зв'язків між вершинами  $w[i, j] \in W$ .

При здійсненні процесів перевантаження рідких вантажів в реальних умовах можуть виникнути аварійні пошкодження на окремих ділянках трубопроводних ліній, що реєструються інформаційно-вимірною системою (рис. 1).

На основі даних відповідних датчиків корегується база даних системи підтримки прийняття рішень, зокрема таблиця зв'язків.

При реалізації слідкуючого режиму СППР постійно перевіряє стан таблиці зв'язків між вершинами в розробленій базі даних.

У разі виявлення змін в таблиці зв'язків маршруту  $R_{opt}$  корегується в автоматичному режимі. Новий маршрут та попередження про зміну в базі даних виводяться у текстове поле головного вікна (рис. 4).

#### 4. Результати моделювання СППР в аварійних ситуаціях

На рис. 5 наведено результати моделювання СППР при формуванні оптимального маршруту між початковою  $T_2 \rightarrow a$  та кінцевою  $P_{22} \rightarrow b$  вершинами графа, представленого на рис. 2.

Оптимальний для даного випадку маршрут

$$R_{opt} = \{T_2, V_7, V_8, V_{10}, V_9, V_{12}, V_{13}, V_{14}, V_{15}, V_{22}, V_{23}, V_{24}, V_{34}, P_{22}\}$$

проілюстровано пунктирною лінією на рис. 5.

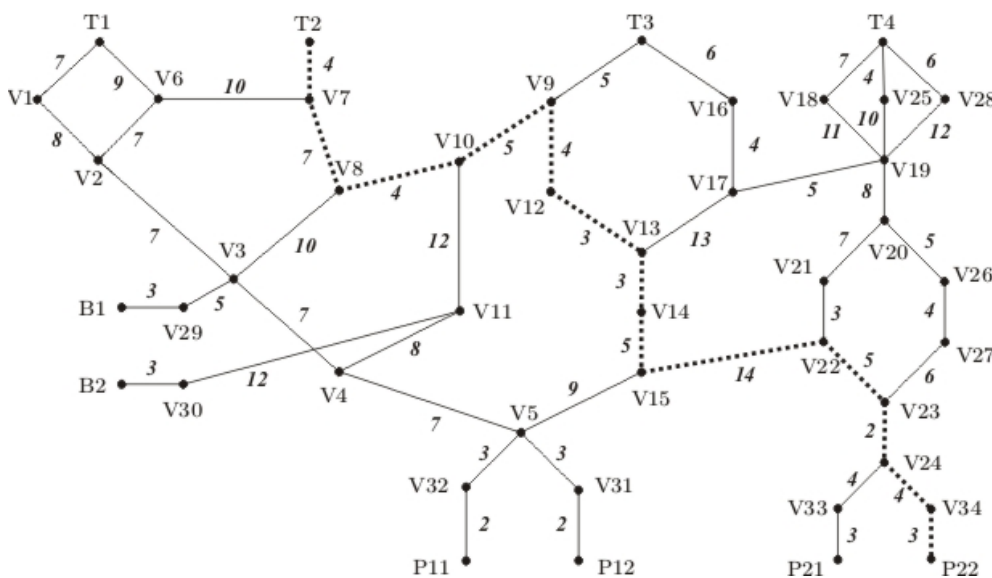


Рис. 5. Оптимальний маршрут на графі

Змоделюємо аварійну ситуацію на ділянці трубопроводу (рис. 2) за допомогою розробленого редактора бази даних (рис. 6) шляхом зміни ваги ребра  $w[V_{13}, V_{14}]$  графу з величини 3 на величину 700.

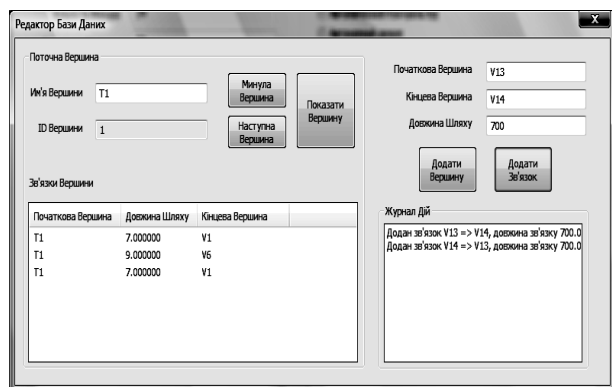


Рис. 6. Вікно редактора бази даних

Загальна довжина оптимального маршруту складає  $D[b] = D[P_{22}] = 63$ .

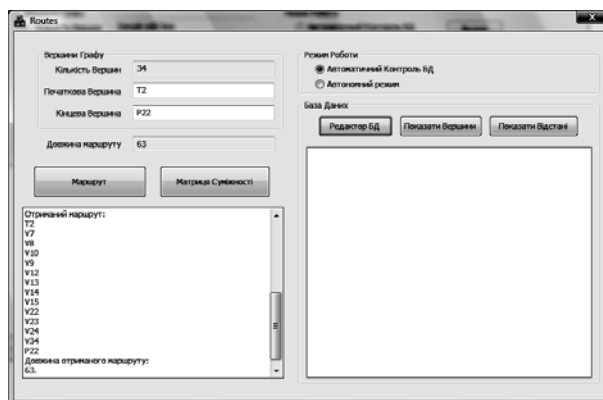


Рис. 4. Головне вікно СППР

Дана зміна може означати, наприклад, аварійне пошкодження ділянки  $V_{13} - V_{14}$  вантажного трубопроводу.

СППР в слідкуючому режимі автоматично ініціює корекцію попередньо знайденого маршруту  $R_{opt}$ . Новий найкоротший маршрут

$$R'_{opt} = \{T_2, V_7, V_8, V_3, V_4, V_5, V_{15}, V_{22}, V_{23}, V_{24}, V_{34}, P_{22}\},$$

сформований СППР з урахуванням аварійної ситуації у вантажному трубопроводі, показано на рис. 7.

Слід зазначити, що довжина нового маршруту  $D[b] = D[P_{22}] = 72$  є більшою, ніж довжина початкового маршруту, а отже новий маршрут є оптимальним лише за умов вище зазначеної аварійної ситуації. Отже, результати моделювання підтверджують гарантоздатність та ефективність програмного забезпечення розробленої СППР.

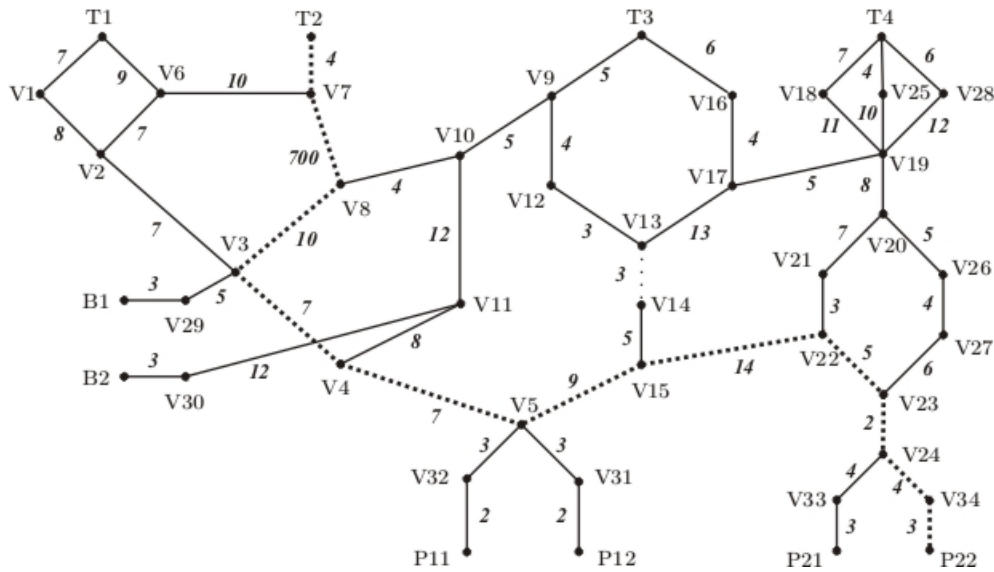


Рис. 7. Скоригований маршрут вантажопотоку

## Висновок

Розроблена СППР дозволяє в інтерактивних режимах розв'язувати проблему оптимізації транспортних вантажопотоків при здійсненні технологічних операцій на морських та комбінованих нафтокомплексах з розгалуженою системою резервуарних парків та вантажних трубопроводів. Запропоновані алгоритми функціонування комп'ютерної СППР забезпечують формування оптимальних маршрутів передавання рідинних вантажів при завантаженні морських танкерів [13] та їх гарантобезпечну корекцію при виникненні аварійних ситуацій на відповідних ділянках вантажних трубопроводів. Синтез та корекція маршрутів транспортних вантажопотоків здійснюється на основі алгоритмів оптимізації на графах. Структура та алгоритми синтезованої СППР дозволяють підвищити гарантобезпечність та ефективність процесів прийняття рішень в реальному часі, в т.ч. в екстремальних умовах.

Розроблене програмне забезпечення СППР, запропоновані алгоритми та методи моделювання можуть бути використані в реальних системах автоматизованого керування нафтокомплексами. При цьому необхідно забезпечити умови синхронізації бази даних СППР з сигналами датчиків чи мікроконтролерів, які встановлюються на нафтобазах.

В подальшому доцільно дослідити можливість взаємодії запропонованої СППР з комп'ютеризованими системами керування на основі сучасних SCADA-систем, зокрема TRACE MODE 6 [7], що забезпечують диспетчерське керування, збір та обробку даних, керувану взаємодію всіх компонентів технологічного процесу в реальному часі, поточний контроль технологічних параметрів та формування Alarm-сигналів для попередження аварійних ситуацій [7,8].

## Література

1. Асанов М.О. Дискретная математика: графы матроиды, алгоритмы / М.О. Асанов, В.А. Баранский, В.В. Расин. – Ижевск: НИЦ"РХД", 2001. – 228 с.
2. Ахо А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – М.: Мир, 1979. – 536 с.
3. Глибовець М.М. Основи комп'ютерних алгоритмів / М.М. Глибовець. – К.: Вид. дім «КМ Академія», 2003. – 452 с.
4. Иванов Б.Н. Дискретная математика. Алгоритмы и программы / Б.Н. Иванов. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 288 с.
5. Кондратенко Ю.П. Математична модель для формування оптимального плану перевантаження нафти в морських портах / Ю.П. Кондратенко, І.В. Тимченко // Матеріали XIV Міжн. конф. з автоматичного управління, Севастополь, 2007, Ч. 2. – С. 193-195.
6. Кондратенко Ю.П. Система автоматизованого контролю параметрів рідинних вантажів в морських портах / Ю.П. Кондратенко, В.Л. Тимченко, І.В. Тимченко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Спецвипуск. – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – С. 46-49.
7. Коробко О.В. Особливості застосування SCADA TRACE MODE для автоматизації технологічних процесів / О.В. Коробко, Махмуд Мохаммед Салем Аль-Суод // Інформаційно-керуючі системи і комплекси: Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2008. – С. 21-25.
8. Коробко А.В. Расчет истечения высоковязкой жидкости при переменном уровне / А.В. Коробко, Д.С. Курикия, Д.Н. Подопрыгора, Аль Массарвех М. // Електроніка і електромеханіка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю. – Миколаїв: НУК, 2007. – С. 90-94.

9. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М.: Мир, 1978. – 432 с.
10. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Э. Майника. – М.: Мир, 1981. – 324 с.
11. Окулов С.М. Программирование в алгоритмах / С.М. Окулов. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004. – 341 с.
12. Шикин Е.В. Исследование операций / Е.В. Шикин, Г.Е. Шикина. – М.: ТК Велби, Проспект, 2006. – 280 с.

13. Kondratenko Y.P. A New Concept of Decision Support Systems for Control of Bunkering Technological Processes / Y.P. Kondratenko, L.P. Klymenko, D.M. Pidoprygora // The Fifth Intern. Scientific Forum "Aims for Future of Engineering Science", AFES-2004 Proceeding, Paris, France, 2004. – P. 496-501.

14. – Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс] . – Режим доступа к ресурсу: <http://ru.wikipedia.org>.

Надійшла до редакції 18.01.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.Г. Антошук, зав. кафедри інформаційних систем, Одеський національний політехнічний університет, Одеса.

### СППР ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ ГРУЗОПОТОКОВ С ГАРАНТОБЕЗОПАСНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ МАРШРУТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

*Ю.П. Кондратенко, А.В. Коробко, В.Ю. Кондратенко, Д.С. Курикса*

Рассматривается проблема оптимизации транспортных грузопотоков при осуществлении технологических операций на морских нефтяных комплексах с разветвленной системой резервуарных парков и грузовых трубопроводов. Предложены алгоритмы функционирования компьютерной системы поддержки принятия решений (СППР), которые обеспечивают формирование оптимальных маршрутов жидких грузов при загрузке морских танкеров и их безопасную коррекцию при возникновении аварийных ситуаций на соответствующих участках грузовых трубопроводов. Синтез и коррекция маршрутов транспортных грузопотоков осуществляется на основе алгоритмов оптимизации на графах. Структура и алгоритмы синтезированной СППР позволяют повысить гарантобезопасность и эффективность процессов принятия решений в реальном времени.

**Ключевые слова:** СППР, оптимизация маршрутов грузопотоков, экстремальные условия, коррекция в реальном времени, база данных, разветвленный граф.

### DSS FOR OPTIMIZATION OF FREIGHT FLOWS WITH THE SAFE GUARANTEED CORRECTION OF ROUTES IN REAL TIME

*Y.P. Kondratenko, O.V. Korobko, V.Y. Kondratenko, D.S. Kuriksha*

The optimization problem of freight flow is considered in this paper taking into account realization of technological operations on marine oil complexes with the ramified system of reservoirs parks and freight pipelines. This The algorithms of the computer decision support system (DSS) are suggested. DSS provides optimal routes forming for product transportation while the process of lading the marine tankers and their correction in case of occurring emergency situation on the proper areas of freight pipelines. A synthesis and correction of routes are carried out on the basis of optimization algorithms on graphs. A structure and algorithms of synthesized DSS allow improving safety and efficiency of decision-making processes in real time.

**Key words:** DSS, optimization of freight flows, extreme conditions, correction in real time, database, ramified graph.

**Кондратенко Юрій Пантелійович** – доктор техн. наук., професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського державного університету ім. П.Могили, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: [y\\_kondratenko@gambler.ru](mailto:y_kondratenko@gambler.ru).

**Коробко Алексей Владимирович** – бакалавр, студент 5 курсу Інституту автоматики і електротехніки Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: [alexoua@gmail.com](mailto:alexoua@gmail.com).

**Кондратенко Владимир Юрьевич** – бакалавр, студент 5 курсу факультету математики Колорадського університету, Денвер, США, e-mail: [vova\\_k87@inbox.ru](mailto:vova_k87@inbox.ru).

**Курикса Дмитро Сергійович** – магістр, факультет комп'ютерних наук Чорноморського державного університету ім. П.Могили, Миколаїв, Україна, e-mail: [dmitry.kuriksha@gmail.com](mailto:dmitry.kuriksha@gmail.com).