

УДК 519.81

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2021/2.15>

Д.І. Симонов<sup>1</sup>, аспірант

D.I. Symonov<sup>1</sup>, PhD Student.

**Алгоритм визначення оптимального потоку в ланцюгах постачання з урахуванням багатокритеріальних умов та стохастичності процесів**

**Algorithm for determining the optimal flow in Supply Chains, considering multi-criteria conditions and stochastic processes**

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 03187, Україна, м. Київ, пр-т Академіка Глушкова, 40  
e-mail: denys.symonov@gmail.com

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 03187, Ukraine, Kyiv, Academician Glushkov Avenue, 40  
e-mail: denys.symonov@gmail.com

*У роботі розглядається алгоритм розрахунку оптимального значення потоку в ланцюгах постачання з урахуванням вимог та сподівань ключових зацікавлених сторін процесу постачання. Алгоритм передбачає пошук балансу між «вимогами» та «очікуваннями» за допомогою математичного моделювання багатокритеріальної задачі для кожної сторони процесу постачання. Отримані параметри розрахунків багатокритеріальних задач пропонується використовувати в якості «вхідних» даних для ітераційного алгоритму пошуку оптимального значення потоку. Пропонована модель дозволяє врахувати імовірнісні коливання в процесах за допомогою використання стохастичного програмування, та передбачає можливість розглядати сторонам процесу поставки альтернативні пропозиції перш ніж формулювати обов'язки за контрактом, тобто ґрунтуючись на залишкових можливостях після обрання найкращої альтернативи.*

*Ключові слова: потік, ланцюг постачання, граф ланцюга постачання, багатокритеріальна задача, стохастичне програмування, алгоритм пошуку максимального потоку в ланцюгу постачання.*

*One of the main criteria for planning and evaluating supply chains is the indicator of the flow capacity, which affects the structure of the supply graph, terms of supply, risks, opportunities and the need to differentiate supply channels. The paper analyse an algorithm for calculating the optimal value of the flow in supply chains, taking into account the requirements and expectations of key stakeholders in the supply process. The algorithm provides for finding a balance between "requirements" and "expectations" by mathematical modelling of a multicriteria problem for each side of the supply process. It proposed to use the obtained parameters for calculating multicriteria problems as "input" data for an iterative algorithm for finding the optimal flow value. The proposed model allows one to take into account probabilistic fluctuations in processes by using stochastic programming. The model allows the parties to the procurement process to consider alternative proposals before the formation of contractual obligations, that is, based on residual capacity after choosing the best alternative.*

*Key Words: flow, Supply Chain, Supply Chain graph, multicriteria problem, stochastic programming, algorithm for finding the maximum flow in the Supply Chain.*

**Вступ**

Організації, функціонування яких пов'язано з виробництвом товарів і послуг, мають необхідність концентрувати свою увагу на якість ланцюгів постачання. Ефективність функціонування ланцюгів впливає на конкурентоспроможність

організації та перспективу розвитку ринків споживання вироблених ними товарів і послуг. Контрагенти в рамках ланцюга постачання виконують такі завдання, як: проектування характеристик продукту або послуги; закупівля сировини та матеріалів; обробка матеріалів та виробництво продукції; розподіл продукції та гарантійне

обслуговування [1]. Отже, ланцюг постачання об'єднує кілька організацій через скоординовані висхідні і низхідні потоки матеріалів, інформації та фінансів таким чином, щоб задовольнити потреби контрагентів і споживачів [2].

### Потік в ланцюгах постачання

Одними з основних критеріїв для планування і оцінки ланцюгів постачання є показник пропускної здатності потоку.

Потік – це вимірний показник руху матеріальних і не матеріальних цінностей від постачальника до споживача, виражений в умовних одиницях виміру (штуки, послуги, метри, кілограми, долари, обсяг інформації та інш.). Успіх функціонування організації залежить від її здатності інтегрувати і координувати складну мережу ділових відносин між партнерами по ланцюгу постачання [3].

Для моделювання процесу аналізу пропускної здатності потоку необхідно виконати декомпозицію ланцюгів постачання за видами ресурсів (конкретного товару або послуги). В межах цієї статті не передбачено детальний аналіз впливу зриву графіку постачання одного товару або послуги на необхідність коригування програми виробництва та перегляд програми постачання інших товарів, необхідних для виробництва готової продукції або послуги.

На кожному етапі ланцюга постачання необхідно фіксувати параметри змінних (як фактичні, так і прогнозні значення), щоб мати можливість використовувати їх значення для виявлення обмежень в математичних моделях існуючої системи постачання, та мати можливість виявити стохастичність процесів. Кількісні дані не завжди можуть бути легко доступні, тому для планування і аналізу може бути досить описової інформації або альтернативних даних [4].

В межах ланцюгів постачання прагнуть інтегрувати всі необхідні процеси для підвищення ефективності і результативності потоків матеріалів, інформації та активів [5]. Сучасні умови глобалізації сприяють

поступовому глобальному розподілу виробничо-збутових операцій, між різними країнами. Ланцюги будуються за принципом спеціалізації, виробничої орієнтації і доступності сировинної бази в кожній конкретній країні [6]. Сучасні організації в значній мірі залежать від широкого спектру продуктів і послуг, вироблених на глобальному конкурентному ринку, для організації власної діяльності [7]. Мережі поставок зазвичай пов'язані з іншими мережами, в тому числі покупців, постачальників, продавців, дистриб'юторів, роздрібних торговців, транспортних компаній та інших посередників, що вимагає використовувати інструменти для аналізу альтернатив.

Ланцюги постачання мають відповідати за стабільність потоку матеріалів, інформації та фінансових елементів, необхідних у виробничому процесі [8]. Це вимагає аналізувати багатовимірні параметри, що впливають на кінцевий результат. Ланцюг постачання є інтегрованою системою, яка синхронізує ряд взаємопов'язаних процесів, з метою [9]:

- створити попит на продукти або послуги;
- купувати сировину, матеріали та інші ресурси;
- перетворити придбану сировину і матеріали в готову продукцію;
- підвищити цінність продуктів, що виробляються;
- поширити вироблені продукти роздрібним торговцям або покупцям;
- сприяти обміну інформацією між різними ланками ланцюга.

В якості двох основних процесів організації можна виділити управління вхідним потоком, коли організація виступає в ролі покупця, і управління вихідним потоком, коли організація виступає в якості продавця (рисунки 1). Уздовж ланцюга постачання може бути кілька зацікавлених сторін: декілька постачальників, виробників, дистриб'юторів, постачальників логістичних послуг, регулюючих органів, роздрібних продавців та клієнтів.

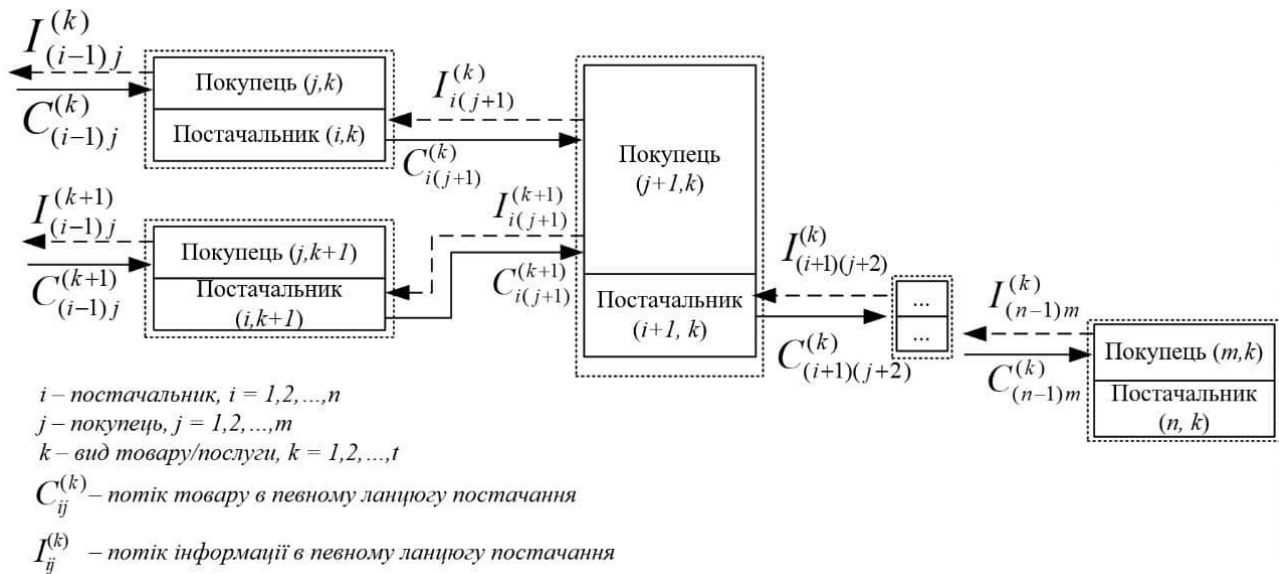


Рис.1 Розподіл потоків всередині ланцюга постачання

Як можна побачити на рисунку 1, кожна ланка ланцюга може мати кілька вхідних і кілька вихідних потоків, що впливає на пропускну здатність потоку з конкретним контрагентом в ланцюзі. Потоки всередині ланцюга постачання включають в себе всі логістичні операції, пов'язані з обслуговуванням клієнтів і дії, пов'язані з обслуговуванням контрактів: прийом і обробка замовлень, планування поставок, управління запасами, зберігання, ціноутворення, комунікації з постачальниками і споживачами, повернення товару, гарантійне обслуговування та інше. Визначення пропускну здатності потоку є вкрай важливим для будь-якої організації, що обумовлено необхідністю наявності інформації про доступність ресурсу, його характеристик та умов постачання. Наприклад, через наявність високого рівня пропускну здатності потоку матеріали певного типу часто можливо придбати великими партіями зі значною економією, а стандартизація операцій дозволяє знизити час обробки, але це може негативно вплинути на час обробки запасів, що вплине на обсяг складських запасів і пов'язані з цим витрати [10]. З іншого боку, зростання факторів невизначеності (виникнення форс-мажорних обставин) в ланцюгах з низьким запасом пропускну здатності з боку постачальника тягне до виникнення зривів в програмах

виробництва по всьому ланцюгу. Прикладом є ситуація з дефіцитом чіпів на ринку автомобілебудування, яка виникла літом 2021 року [11].

### Постановка задачі визначення потоку

Для визначення максимальної продуктивності ланцюга постачання, тобто оптимального потоку, який задовольняє обидві зацікавлені сторони (постачальник і покупець) та для спрощення розуміння завдання представимо ланку ланцюга постачання у вигляді графа з одним джерелом (з боку постачальника) і з одним стоком (з боку покупця) [12].

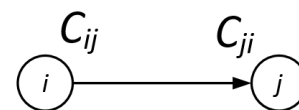


Рис.2 Фрагмент графа ланцюга постачання

На рисунку 2 представлена прямий зв'язок від  $i$  (постачальник) до  $j$  (покупець), де в якості параметра  $C_{ij}$  - пропускну здатність генерувати потік поставки товару,  $C_{ji}$  - пропускну здатність приймати потік товарів.

Перш ніж переходити процесу пошуку максимального потоку на певній ділянці ланцюга поставок необхідно визначити  $C_{ij}$  і  $C_{ji}$ . Кожен з компонентів ланцюга балансує в системі вимог та обмежень, що зводить задачу

пошуку максимального потоку на певній ділянці до багатокритеріальної задачі аналізу альтернатив та прийняття рішень. Отже, для кожної ланки ланцюга постачання (мається на увазі детермінований процес постачання між постачальником та покупцем) необхідно сформулювати математичну модель багатокритеріальної задачі прийняття рішень.

Визначимо цільову функцію сукупності вимог:

$$C_{ij} = \begin{cases} f_i(a) \rightarrow \max \\ f_i(a) \rightarrow \min \end{cases}, i = \overline{1, n} \quad (1)$$

або

$$C_{ji} = \begin{cases} f_i(a) \rightarrow \max \\ f_i(a) \rightarrow \min \end{cases}, i = \overline{1, n} \quad (2)$$

при обмеженнях:

$$\begin{cases} A_{ij}x_i = B_j \\ x_i \geq 0, i = \overline{1, n} \end{cases} \quad (3)$$

де  $f_i(a)$  – функція  $i$ -ї умови, за якою здійснюється оцінка альтернативи.

Для розв'язку багатокритеріальної задачі можливо використовувати метод обмежень. Функцій нормованих відносних витрат  $\omega_i$  матимуть наступний вигляд [13]:

- для цільової функції, що необхідно максимізувати:

$$\omega_i(f_i(x)) = \frac{f_i^0 - f_i(x)}{f_i^0 - f_{i(\min)}}; i = \overline{1, n} \quad (4)$$

- для цільової функції, що необхідно мінімізувати:

$$\omega_i(f_i(x)) = \frac{f_i(x) - f_i^0}{f_{i(\max)} - f_i^0}; i = \overline{1, n} \quad (5)$$

де  $f_i^0$  – оптимальне значення  $i$ -ї цільової функції,  $f_{i(\min)}$  – найменше значення, що максимізується,  $f_{i(\max)}$  – найбільше значення, що мінімізується.

Відповідно, компромісним розв'язкам на певній ділянці ланцюга постачання буде ефективний розв'язок для  $x_i$ , що відповідає умовам:

$$k_1\omega_1 = k_2\omega_2 = \dots = k_n\omega_n$$

де  $k_i$  – вектор (коефіцієнт) переваг рішення, до якого існують наступні обмеження:

$$k = \{k_i: k_i > 0, i = \overline{1, n}, \sum_{i=1}^n k_i = 1\} \quad (5)$$

Отже, отримає рішення має бути оптимальним балансом вимог та обмежень, розраховане для кожної сторони процесу постачання, та бути «вхідним» параметром для пошуку контрагентів і прийняттю рішення про поставку.

### Стохастичність обмежень при пошуку оптимального значення потоку

Вважаючи що властивості попиту та пропозиції мають тенденцію до волатильності, тобто змінність характеристик в межах коридору параметрів, то бажаним є використання стохастичного програмування для пошуку значень змінних коефіцієнтів рівнянь обмежень математичної моделі.

Розглянемо процес моделювання математичної моделі обмежень в межах однієї з цільових функції загальної задачі оптимізації ланцюга постачання з позиції покупця (1). Необхідно відмітити, що математична задача зі сторони постачальника (продавця) буде мати ідентичні процеси, але з урахування індивідуальних умов постачальника. Тобто розглянутий метод формування математичної моделі буде мати загальний характер як для покупця, так і для постачальника.

Отже, цільова функція:

$$f_i(\alpha_i) \rightarrow \max$$

при обмеженнях:

$$P\{\sum_{i=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i\} \geq \alpha_i, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n} \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq 0$$

де  $\alpha_i$  – імовірність виконання, встановлюється в межах не менш ніж  $1 - \alpha_i$ , та  $\{\alpha_i | 0 \leq \alpha_i \leq 1\}$ .

Випадкова величина  $a_{ij}$  має нормальний розподіл [14]. Введемо додаткову змінну  $u_i$ ,

яка, відповідно, також буде мати нормальний розподіл.

$$y_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j; \quad (7)$$

Математичне сподівання буде:

$$\mu_i\{y_i\} = \sum_{j=1}^n \mu\{a_{ij}\} x_j; \quad (8)$$

Дисперсія становить:

$$\sigma_i^2\{y_i\} = \sum_{j=1}^n \sigma^2\{a_{ij}\} x_j^2; \quad (9)$$

Відповідно, випадкова величина  $y_i$  має наступні властивості:

$$y_i \in N(x_j; \mu_i\{y_i\}, \sigma_i^2\{y_i\}) \quad (10)$$

Необхідні умови (6) можливо записати в наступному вигляді:

$$P\{y_i \leq b_i\} \geq \alpha_i; \quad (10)$$

Вважаючи, що функція нормального розподілу становить [15]:

$$F(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt; \quad (11)$$

отримаємо:

$$P\{y_i \leq b_i\} = \Phi\left\{\frac{b_i - \mu_i(y_i)}{\sqrt{\sigma_i(y_i)}}\right\}; \quad (12)$$

де  $\Phi$  – функція розподілу стандартного нормального розподілу.

Звідси:

$$\frac{b_i - \mu_i(y_i)}{\sqrt{\sigma_i(y_i)}} \geq 1 - \alpha_i; \quad (13)$$

Для зручності розрахунків введемо додаткову змінну  $\alpha_0$ , яка дорівнює:

$$\alpha_0 = 1 - \alpha_i; \quad (14)$$

В результаті перетворень отримаємо наступний вигляд детермінованого нелінійного обмеження:

$$\sum_{j=1}^n \mu_i\{y_i\} + \Phi(\alpha_0) \sqrt{\sum_{j=1}^n \sigma_i\{y_i\}} \leq b_i; \quad (15)$$

або,

$$\sum_{j=1}^n \mu_i\{a_{ij}\} x_j + \Phi(\alpha_0) \sqrt{\sum_{j=1}^n \sigma_i^2\{a_{ij}\} x_j^2} \leq b_i \quad (16)$$

Грунтуючись на вище наведеному, зведемо математичну модель очікувань зацікавленої сторони (певного ланцюга) незалежно від її ролі в процесі постачання.

Цільова функція:

$$C_{ij} = \begin{cases} f_i(a) \rightarrow \max \\ f_i(a) \rightarrow \min \end{cases}, i = \overline{1, n}$$

при обмеженнях:

$$\sum_{j=1}^n \mu_i\{a_{ij}\} x_j + \Phi(\alpha_0) \sqrt{\sum_{j=1}^n \sigma_i^2\{a_{ij}\} x_j^2} \leq b_i,$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m},$$

$$x_{ij} \geq 0.$$

За допомогою рішення багатокритеріальної задачі, отримаємо інформацію про необхідні властивості параметрів контракту на постачання товару або послуг. Цю інформацію використовують для пошуку постачальника, то розрахунку максимально можливого потоку постачання по контракту. Параметри, отримані на даному етапі також являють собою обмеження для вибору альтернатив каналів постачання.

### Алгоритм пошуку максимального потоку в ланцюгу постачання

Виконавши розрахунки цільових функцій обох зацікавлених сторін в певній ланці ланцюга постачання (рисунок 2), та отримавши значення  $C_{ij}$  та  $C_{ji}$ , переходимо до пошуку максимального потоку в певному напрямку. На рівень (потужність) потоку впливає наявність альтернативного попиту та пропозиції, що впливає на кількість конкурентних ланок в проектованому графі.

На рівень складності графа також впливає кількість проміжних ланок у ланцюгу постачання від  $i$  до  $j$ .

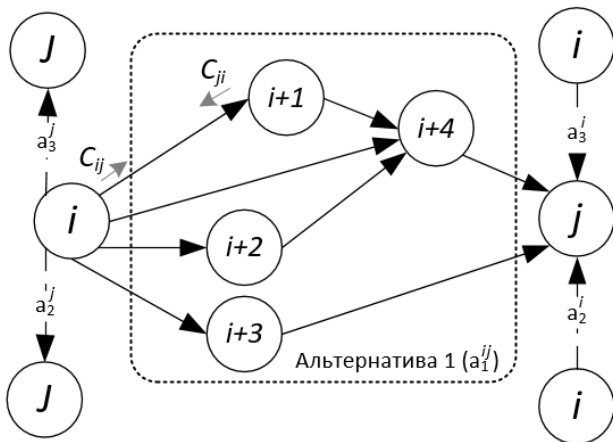


Рис.3 – Граф ланцюга постачання

На рисунку 3 наведено узагальнену схему ланцюга постачання де  $i + n$  – це певна ланка в ланцюгу постачання (склад, посередник, виконавець послуг та інше),  $a_n^i$  – існуючі альтернативи постачальника,  $a_n^j$  – існуючі альтернативи покупця,  $C_{ij}$  – об'єм потоку від постачальника до покупця на певній ланці ланцюга постачання,  $C_{ji}$  – наявність резерву для постачання по певній ланці ланцюга постачання.

Функціонування потоку передбачає наявності умови зацікавленості як постачальника, так і покупця в наявності руху товару або послуги за маршрутом в обсязі, що задовольняє умови певної альтернативи.

Пошук максимального потоку передбачає наявність ітераційного процесу пошуку напрямків переміщення, що задовольняють умові:  $C_{ij} \geq 0$ . Сумарний обсяг товару (послуги) від постачальника до покупця може бути переміщено як за допомогою одного напрямку потоку, так і розподілено між альтернативними потоками в залежності від параметрів мережі.

Розрахунок напрямку потоку виконується з урахуванням залишкової пропускної здатності ланки, яка змінюється в момент надходження товару (послуги) в цю ланку, в тому числі з альтернативних шляхів.

Задачу пошуку максимального потоку можливо вирішити за допомогою

динамічного програмування. Для рішення задачі призначимо маркер вузла  $[a_n^{ij}; p_j]$ , де  $a_n^{ij}$  – напрямок альтернативного потоку от вузла  $i$  до вузла  $j$ ,  $p_j$  – величина потоку от вузла  $i$  до вузла  $j$ ,  $j$  – номер вузла покупця в графі ланцюга постачання (визначається, як  $j = i + n$ , де  $n$  – кількість ланок в ланцюгу).

Алгоритм пошуку рішення передбачає виконання наступних етапів [12]:

1. Визначаємо пропускну властивість для кожної ланки ланцюга постачання для всіх ребер  $[a_n^{i,i+1}; p_j]$ , зробимо певне припущення, то для зручності демонстрації роботи алгоритму прийемо позначення на проміжних ланках ланцюга постачання  $a_n^{i,i+1} = a_n^{i,j}$ . Для початкового вузла  $[a_n^i; p_j]$  зробимо припущення, що аналізуємо першу альтернативу постачання, тобто  $n = 1$ , та призначимо метку  $[a_1^0; \infty, -]$ . Переходимо до наступного етапу.

2. Формуємо множину альтернативних переходів з поточного вузла в бік вузла  $j$  (покупця), яку визначимо як  $M_i$ . Необхідна умова і достатня умова:  $C_{ij} \geq 0, \forall j \in M_i$ . Якщо на даному етапі  $M_i \neq \emptyset$ , то переходимо до наступного етапу. Якщо  $M_i = \emptyset$ , то третій етап пропускаємо, та переходимо до етапу чотири.

3. Аналізуємо множину альтернативних переходів  $M_i$  з метою визначення  $v = i + n$ , вузла для якого виконується умова:

$$C_{ij}^v = \max_{j \in M_i} \{C_{ij}\}; \quad (17)$$

Якщо обрано в якості найкращої альтернативи вузол з індексом стоку (тобто індекс покупця, остання ланка в ланцюгу постачання), то алгоритм передбачає перехід на п'ятий етап, в іншому випадку виконується повернення на другий етап.

4. Операція повернення. Якщо  $i = 0$ , то рішення немає і виконання алгоритму необхідно перервати. В іншому випадку, повертаємося на попередній вузол, в якому було знайдено найкраще рішення на попередньої ітерації алгоритму, та починаємо виконання алгоритму з другого етапу,

попередньо виключивши з альтернатив ланку, з якої виконується операція повернення.

5. Визначимо оптимальний маршрут за наявністю максимального потоку. Для цього визначимо множину  $V_p = \{1, v_1, v_2, \dots, n\}$ , елементи якої позначають компоненти знайденого оптимального маршруту від постачальника (вузол  $i$ ) до покупця (вузол  $j$ ).

Таким чином, максимальний потік, що проходить шляхом компонентів множини  $V_p$ , можливо розрахувати за допомогою формули:

$$F_p = \min\{p_1, p_2, \dots, p_n\}; \quad (18)$$

Залишкові (профіцитні) пропускні можливості кожної ланки ланцюга постачання, тобто ребер, які складають оптимальний шлях (множина  $V_p$ ), зменшуються на розмір  $F_p$  в напрямку переміщення потоку та збільшуються на розмір  $F_p$  в протилежному напрямку.

Таким чином, для ребра графа  $[a_n^{i,i+1}; p_j]$ , який є складовою частиною оптимального шляху (множина  $V_p$ ), поточні залишкові пропускні можливості змінюються наступним чином:

$$\begin{cases} (1): (C_{ij} - F_p, C_{ji} + F_p) \\ (2): (C_{ij} + F_p, C_{ji} - F_p) \end{cases}; \quad (19)$$

де (1) – якщо потік в напрямку від  $i$  до  $j$ , (2) – якщо потік в напрямку від  $j$  до  $i$ .

Відновлюємо всі ланки, що були видалені на четвертому етапі, та робимо припущення, що  $i = 0$  і переходимо до другого етапу нової ітерації.

6. Формулювання оптимального рішення.

Максимальний потік розраховується за формулою:

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_m; \quad (20)$$

Якщо мати значення початкових параметрів кожного ребра ( $C_{ij}, C_{ji}$ ) та значень після перетворень (кінцевих розрахунків) – ( $C'_{ij}, C'_{ji}$ ), то можливо розрахувати пропускну властивість певної ланки (ребра). Алгоритм розрахунку передбачає визначення значення  $(a_1, a_2) = (C_{ij} - C'_{ij}, C_{ji} - C'_{ji})$ . Якщо  $a_1 < 0$ , то потік через ребро дорівнює  $a_1$ . Якщо  $a_2 > 0$ , то потік в зворотному напрямку через ребро дорівнює  $a_2$ .

Отже, після проходження декілька ітерацій по алгоритму можливо отримати оптимальний потік з максимальним значенням пропускної здатності.

Задачу пошуку максимального потоку також можливо звести до багатокритеріального варіанту, за допомогою якого при обранні шляху, що дозволяє максимізувати потік, враховувати додаткові параметри, які потрібно максимізувати, або мінімізувати.

## Висновки

В роботі розглянуто алгоритм ітераційного процесу пошуку оптимального потоку в ланцюгах постачання з урахуванням багатокритеріальних умов та стохастичності процесів. Запропонований алгоритм дозволяє мінімізувати ризики зриву контрактних зобов'язань за рахунок попереднього аналізу інтересів зацікавлених сторін – учасників процесу постачання, їх потреб і можливостей, та аналізу ризиків.

## Список використаних джерел

1. SU Y-F, YANG C. (2010) Why are enterprise resource planning systems indispensable to supply chain management? *European Journal of Operational Research*. 203(1), p.81-94.
2. STADTLER H. (2005) Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*. 163(3), p.575-588.
3. DOUGLAS M LAMBERT, MARTHA C COOPER. (2000) Issues in supply chain management. *Industrial marketing management*. Elsevier. 29(1), p. 65-83.

4. ALAN RUSHTON, PHIL CROUCHER and PETER BAKER. (2014) *The Handbook of Logistics and Distribution Management: Understanding the Supply Chain*. 5th Ed. London: Kogan Page Ltd.
5. COSTINOT, A., J. VOGEL, and S. WANG. (2013) An Elementary Theory of Global Supply Chains. *The Review of Economic Studies*, 80(1), p.109-144.
6. SUKATI I, HAMID A.B., BAHARUN R., and YUSOFF R.M. (2012) The study of supply chain management strategy and practices on supply chain performance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 40(1), p.225-233.
7. JACK MEREDITH, SCOTT SHAFER. (2016) *Operations and Supply Chain Management for MBAs*. 6th Ed. Hoboken: John Wiley & Sons
8. JORGE LUIS GARCÍA-ALCARAZ, CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ-RAMÍREZ, LILIANA AVELAR-SOSA, and GINER ALOR-HERNÁNDEZ. (2020). *Techniques, Tools and Methodologies Applied to Global Supply Chain Ecosystems*. Cham: Springer International Publishing.
9. HOKEY MIN. (2015) *Essentials of Supply Chain Management, The: New Business Concepts and Applications*. Hoboken: Pearson FT Press.
10. ADEBISI ADEWOLE, JOHN J. STRUTHERS. (2019). *Logistics and Global Value Chains in Africa. The Impact on Trade and Development*. Cham: Palgrave Macmillan.
11. IDC. (2021) *The PC Shipment Wave Continues as Volumes Are Forecast to Grow 18.2% in 2021 with a 5-Year CAGR of 2.5%, According to IDC*. [Online] Available from: [https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS47523121&utm\\_medium=rss\\_feed&utm\\_source=alert&utm\\_campaign=rss\\_syndication](https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS47523121&utm_medium=rss_feed&utm_source=alert&utm_campaign=rss_syndication). [Accessed: 19th September 2021].
12. HAMDY A. TAHA. (2017) *Operations Research: An Introduction*. 10th Ed. NJ: Pearson Education Inc.
13. Зайченко О.Ю., Зайченко Ю.П. Дослідження операцій. Збірник задач. -Київ: Видавничий Дім «Слово», 2007. - 472 с.
14. HOSANG JUNG, FENGSHAN FRANK CHEN, AND BONGJU JEONG. (2007) *Trends in Supply Chain Design and Management*. Berlin: Springer.
15. Кобзарь А.И. «Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников». - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 816 с.

Надійшла до редакції 20.07.2021