

ПРОЄКТУВАННЯ БАГАТОПРОДУКТОВИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ З ДИСКРЕТНИМИ ПОТОКАМИ МАГІСТРАЛЬНИХ ДАНИХ

Анотація. Стаття зосереджується на аналізі існуючих досліджень і публікацій у цій галузі, звертаючи увагу на внесок закордонних та вітчизняних вчених у розробку моделей та методів управління мережевими ресурсами. Більшість досліджень фокусується на детермінованих моделях та моделях, що базуються на математичних засадах теорій масового обслуговування та випадкових марківських процесів. Автор вказує на недостатність існуючого математичного інструментарію для моделювання та аналізу функціонування багатопродуктових мереж з дискретними потоками, що вимагає розробки нових математичних моделей і методів. Метою дослідження є розробка та аналіз ефективних підходів до проєктування багатопродуктових транспортних мереж з особливим фокусом на дискретних потоках магістральних даних. Автор зазначає, що це включає в себе розробку нових підходів та методів для ефективного управління та оптимізації розподілу ресурсів, а також моделювання специфіки дискретних потоків у контексті магістральних транспортних систем. Важливою частиною дослідження є створення ієрархічної структури системи для автоматизованого управління ресурсами та розподілом потоків у великомасштабних мережах. Автор наголошує на необхідності розробки методології, яка інтегрує вже існуючі досягнення у цій галузі та дозволяє ефективно розв'язувати практичні задачі, пов'язані з довгостроковим розвитком, поточним плануванням та оперативним управлінням у масштабних мережах. Така методологія має включати моделі різних рівнів агрегування та бути придатною для всіх рівнів ієрархічної структури мережі. Дослідження також включає розгляд математичних моделей та алгоритмів для моделювання та аналізу функціонування багатопродуктових мереж з дискретними потоками. Ключові слова: транспортні мережі, магістральні дані, клас потоку, кооперація транспортних потоків, математична модель

Постановка проблеми. Транспорт та зв'язок було визначено як ключові сектори для розвитку економіки України. Для підвищення їх ефективності необхідно створити прикладне математичне програмне забезпечення, яке допоможе в оптимізації транспортних процесів та розробці інформаційно-аналітичних систем для покращення управління, обробки та розподілу транспортних потоків. Важливість цієї проблеми для прискорення ринкових транс-

формацій в Україні, особливо у сфері перевезень дрібнопартійних вантажів, призвела до вивчення математичного моделювання та проектування багатопродуктових комунікаційних мереж із дискретними потоками дрібнопартійних відправлень. Сучасні та заплановані комунікаційні мережі зазвичай мають багаторівневу структуру, що визначається адміністративним розподілом території, управлінською ієрархією, технологіями обробки та розподілу вантажів та інформації [7]. Такі мережі, як правило, складаються з верхнього рівня — магістральної розподіленої мережі та нижніх рівнів — зональних та внутрішніх мереж. Проектування багаторівневих комунікаційних мереж має враховувати особливості складних систем, таких як неможливість повної централізації обробки інформації та управління в одній ланці. Це вимагає створення ієрархічної структури системи для автоматизованого управління ресурсами та розподілом потоків у мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У галузі теорії проектування масштабних мережевих структур наука збагатилася значним теоретичним та практичним досвідом у вирішенні завдань структурного аналізу, синтезу, оптимізації та управління потоками в багатопродуктових мережах. Важливий внесок у розробку моделей та методів управління мережевими ресурсами розглянуто в роботах [1, 2, 4, 11]. Більшість досліджень цих авторів фокусується на детермінованих моделях та моделях, заснованих на математичних засадах теорій масового обслуговування та випадкових марківських процесів. У цих роботах зазвичай передбачається, що потоки або детерміновані, або стаціонарні протягом певних часових періодів розподілу ресурсів. Однак реальні потоки не мають цих властивостей. До того ж у більшості випадків потоки та параметри елементів мережі є дискретними величинами [3]. Існуючий математичний інструментарій для моделювання та аналізу функціонування багатопродуктових мереж із дискретними потоками ще недостатньо розвинений. Потрібно створення нових математичних моделей і методів вирішення, що враховують немарківський характер випадкових процесів, неоднорідність, нестационарність та дискретність потоків у таких мережах.

Мета дослідження. Головною метою дослідження у статті є розробка та аналіз ефективних підходів до проектування багатопродуктових транспортних мереж. Особлива увага приділяється мережам, що оперують з дискретними потоками, з акцентом на магістральні дані. Це передбачає вивчення специфіки дискретних потоків в контексті транспортних систем та розробку моделей для оптимізації розподілу ресурсів та управління потоками.

Викладення основного матеріалу дослідження. Важливим стає завдання розробки прикладного інструментарію для проектування багатопродуктових транспортних мереж. Ця методологія має інтегрувати вже існуючі досягнення в цій галузі та надати можливості для ефективного розв'язання різноманітних практичних задач. Особливий акцент робиться на задачах, що стосуються довгострокового розвитку, поточного планування, а також оперативного управління великомасштабними мережами, які оперують з дискретними потоками та мають дискретні параметри своїх елементів. Така розрахункова практика повинна включати моделі різних рівнів агрегування та бути придатною для всіх рівнів ієрархічної структури мережі. Для збереження єдності структури формалізації будемо використовувати для визначення простору транспортних потоків термінологію алгебраїчних систем. Тоді, простір «активних транспортних потоків» в межах багатопродуктової транспортної мережі можна представити у вигляді багатоосновної моделі [6]:

$$S_A = (P_A, C_A, F, T, L, R_A, \Omega_A), \quad (1)$$

де P_A – безліч транспортних потоків, які використовуються при синтезі, C_A – безліч класів транспортних потоків, F – семантичний гіперграф-решітка кооперації, T – безліч типів взаємодії транспортних потоків, L – мова обміну повідомленнями в багатопотоковій системі, R_A – безліч відносин між потоками, Ω_A – безліч операцій, визначених над потоками. Основою системи є об'єднання $P_A \cup C \cup T \cup Z \cup L$.

На цьому рівні формалізації клас потоку можна розглядати синонімом поняття «ролі», взятої на себе потоком. Потік, що розглядається як «активний об'єкт», в процесі синтезу використовується для моделювання об'єктів предметної області, наділених деякими характеристиками, такими, як [8, 11]:

- 1) активність, здатність до організації та реалізації дій;
- 2) реактивність, здатність сприймати стан міжнародного та макроекономічного середовища;
- 3) автономність, відносна незалежність від навколишнього середовища;
- 4) товарицькість, що впливає з необхідності вирішувати свої завдання спільно з іншими учасниками транспортної мережі;
- 5) цілеспрямованість, яка передбачає наявність власних джерел мотивації, а в більш широкому плані, особливих інтенціональних характеристик.

Перераховані характеристики підкреслюють характер потоку як відкритої, активної системи, основна увага в якій приділяється «процесу взаємодії транспортних потоків як причини виникнення системи з новими якістьми» [4]. Потік включає набір властивостей, або якостей, що дозволяють інтерпретувати деякі сутності з моде-

лі предметної області, і набір правил поведінки, що дозволяють потоку робити активні дії для досягнення поставлених цілей. Визначимо елемент безлічі транспортних потоків як окремого потоку:

$$P_A^i = (o_a^i, z_i, c_i, M_a^i, v, O), \quad (2)$$

де o_a^i – вихідна система потоку, що представляє модель об'єкта з предметно-орієнтованої бази або іншого об'єкта з позначеними множинами вхідних і вихідних впливів, представником інтересів якого потік є, в окремому випадку, $o_a^i \in S_E$, z_i – стан потоку, яке визначається як набір значень характеристик o_a^i ; c_i – клас потоку, $c_i \in C_A$; v – показчик положення потоку в просторі, O – процедура переговорів з потоками, які перебувають на тому ж рівні простору v , з метою встановлення комунікацій, або, в більш загальному сенсі, модель кооперації потоку. Потік може представляти як модель мети, окрему підсистему $S_E \in S_E$, так і безліч транспортних потоків, які представляють підсистеми або безлічі інших транспортних потоків [9]. Клас потоку C_A визначимо наступним чином:

$$C_A = (C^N, C^T, M_a). \quad (3)$$

де $C^N = \{c_1, c_2, c_3\}$ – найменування класу, C^T – безліч типів взаємодії, підтримуваних потоками даного класу, M_a – модель ментальних характеристик потоку, тобто опис позиції та прагнень потоку в процесі синтезу, які накладають обмеження на процес встановлення комунікацій з іншими потоками та поведінку потоку в процесі досягнення поставленої мети.

Виділення класів транспортних потоків відповідає визначенню виконуваних потоком ролей і підтримуваних взаємодій. Для вирішення завдань проектування будемо виділяти три класи транспортних потоків [2]: ATA – потік абстрактної мети ($o_a^i = E$), ACA – потік конкретної мети ($o_a^i = \mathcal{G}_\omega$), AP – потік реалізації ($o_a^i = S_E^k$). Ієрархія взаємодії класів транспортних потоків може бути представлена наступною схемою (рис. 1.).

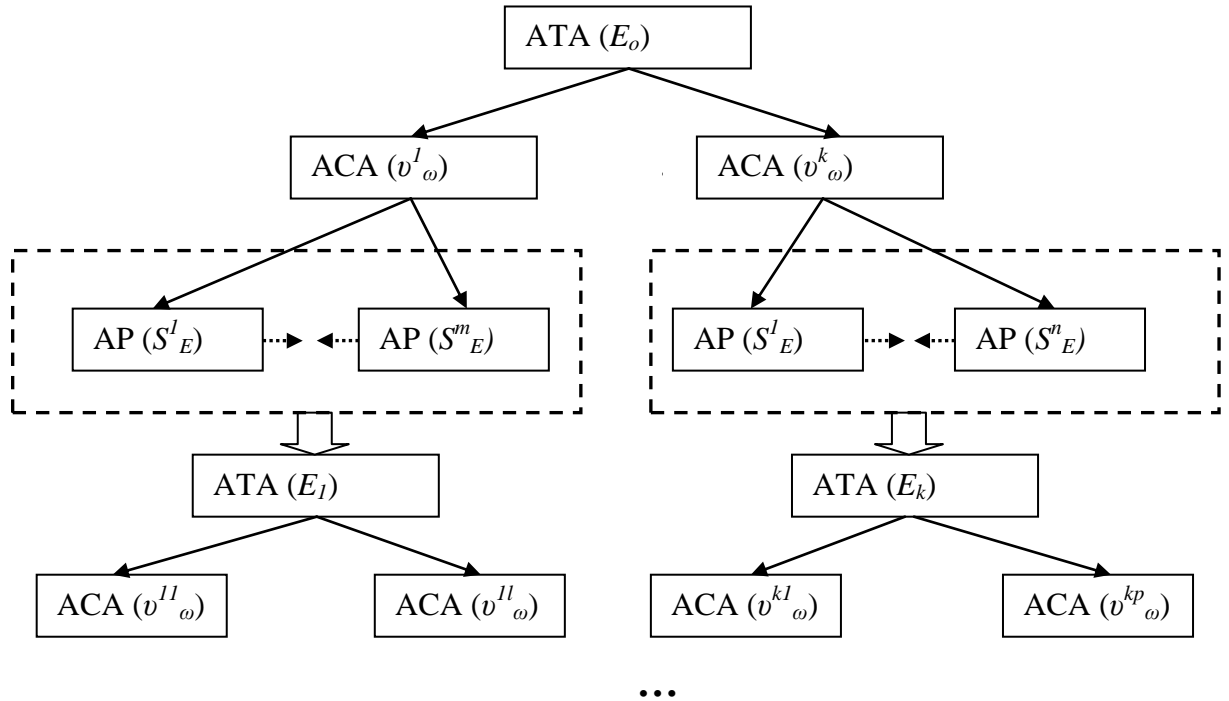


Рисунок 1 - Структура взаємодіючих транспортних потоків у багатопродуктових транспортних мережах

Для визначення ментальних транспортних потоків пропонуємо використовувати семантику можливих світів в СТЛ-логіці. Представляємо модель ментальних характеристик транспортних потоків з підтримкою моделі Крипке:

$$M = (W, E, U, B, G, I, \Phi), \quad (4)$$

де W – необмежена кількість «світів», E – велика кількість типів, U – множина формул, B, G, I – відношення, показують поточну ситуацію на множині «безлічі світів» (переконань, бажань і намірів) транспортних потоків ($B, G, I: w \rightarrow 2^{\Phi}$), Φ – множина атомарних висловлювань.

Елемент з «безліччю світів» дописується четвіркою:

$$w = (T_w, A_w, S_w, F_w) \quad (5)$$

де T_w – великі моменти часу, в яких існує «безліч світів», A_w – частинний порядок на T_w , S_w, F_w задає вказані $T_w \times T_w \rightarrow E$ і визначає результати, пов'язані з тим, що визначаються між двома моментами часу.

У множині відношення R_s визначимо множини нечітких відносин еквівалентностей R і нечітких відношень часткового порядку P на X_s . Важливість виділення саме цих двох класів відносна з точки зору можливостей аналізу отриманих результатів була показана раніше [5]. Відкриття можливо використовувати між елементами всередині виділених підпросторів, так і між елементами різних підпросторів і

безпосередньо між самими приватними просторами, тобто задають топологію [10, 12]. Кожна ітерація змін станції проектування складається з наступних етапів:

1). Кожний з елементів побудованої множини $\{S_E\}_E$ є комбінацією об'єктів і делегує повноваження окремому потоку.

2). Безліч транспортних потоків, що представляють об'єкти даної комбінації $\{S_E\}_{E'}$ створює підпростір g_{ω}^i .

3). Потоки однієї частини простору g_{ω}^i вимагають побудови кооперативної структури відносно поєднання декількох вільних вхідних та вихідних впливів.

4). У випадку неможливості продовження кооперацій, кожний з кооперативних матеріалів породжує модель цілих «активних транспортних потоків».

5). У випадку неможливості участі в кооперативних структурах потік формує нову множину транспортних потоків у відповідності з моделями цілих.

Побудуємо модель ментальних характеристик транспортних потоків, конструктивної послідовності дій за досягненням цілих проектів. Потік може знаходитись в одному з кількох станів:

$$W = \{\text{«Free»}, \text{«Ready»}, \text{«Collaboration process»}, \text{«Installation»}, \text{«Legal Collaboration»}, \text{«Generation»}\}. \quad (6)$$

Модель «активних транспортних потоків» пропонується описувати наступним чином (табл. 1).

В таблиці 2 представлена модель перехідних станів «активних транспортних потоків» при забезпеченні розвитку складних економічних систем.

Між «активними потоками» в межах багатопродуктової транспортної мережі встановлюються взаємодії типу «з'єднання». Для моделювання кооперацій транспортних потоків використовується модифікований протокол контрактних мереж, який відкриває в процесі відбору заявки на запитання, як ініціатор, так і учасник кооперації. Ініціює кооперацію «активний потік», що має власні вільні виходи, який розширює пропозицію всіх інших транспортних потоків у межах системи. Учасники ранжують прийняті заявки та виконують найкращу пропозицію, про що повідомляє ініціатор [1]. Ініціатор ранжує отримані відповіді та піднімає на вищі рівні більш вигідну пропозицію, про що повідомляє учасників.

Опис ментальних характеристик транспортних потоків
в складних транспортних системах

$W = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6\}$	w_1	'free'
	w_2	'ready'
	w_3	'collaboration process'
	w_4	'connection'
	w_5	'end collaboration'
	w_6	'aim generation'
$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$	e_1	'job received'
	e_2	'send request'
	e_3	'request received'
	e_4	'partner selected'
	e_5	'communicate need'
$\Phi = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$	a_1	'model defined'
	a_2	'free impacts'
	a_3	'have a question'
	a_4	'have a request'
	a_5	'cooperation is possible'
U	$B(\text{have}(X, E) \wedge \sim \text{super}(X, E, Y) \rightarrow \text{reject_proposal}(X, E, Y))$	
	$B(\text{have}(X, E) \rightarrow \text{call_proposal}(X, E, Y))$	
	$B(\text{have}(X, E) \wedge \text{propose}(Y, X, E) \rightarrow \text{collect}(X, E, Y))$	
	$B(\text{have}(X, E) \wedge \text{refuse}(Y, X, E) \rightarrow \text{reject}(X, E, Y))$	
	$B(\text{have}(X, E) \wedge \text{super}(X, E, Y) \rightarrow \text{accept_proposal}(X, E, Y))$	
	$B(\text{accept_proposal}(X, E, Y) \rightarrow \text{connect}(X, E, Y))$	
	$I(\text{connect}(X, E, Y))$	
	

Таблиця 2

Модель перехідних станів «активних транспортних потоків» при забезпеченні
розвитку в складних транспортних системах

Поточний стан	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	Новий стан
w_1	t	T	T	t	t	w_2
w_2	t	T	T	t	t	w_3
w_3	t	T	T	t	t	w_4
	$-$	F	$-$	$-$	f	w_5
	$-$	F	$-$	$-$	f	w_5
w_4	t	T	T	f	t	w_3
w_5	t	T	T	t	t	w_6
w_6	$-$	$-$	$-$	$-$	$-$	w_1

Висновки. В межах проведеного дослідження було узагальнено методичний та аналітико-прикладний досвід формального опису процесів концептуального проектування складних багатопродуктових транспортних мереж з дискретними потоками магістральних даних на засадах моделювання та представлення. Було розроблено алгоритмічні варіанти формалізації для побудови інтелектуальної потокової багатопродуктової транспортної мережі, яка одночасно може синтезувати різні економічні сфери або ініціативи за принципом відбору кращих входних параметрів економічних підсистем. Запропоновано формалізований опис «середовища проектування», на основі виділення просторів об'єктів і транспортних потоків. Побудована модель бази знань системи синтезу у вигляді «простору об'єктів», в якій виділяються простір інваріантних понять і простір предметно-орієнтованих понять, що включає базу структурних елементів, які використовуються при синтезі транспортних потоків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Agadaga G.O., Akpan N.P. A Transshipment Model of Seven-Up Bottling Company, Benin Plant, Nigeria. *American Journal of Operations Research*. 2019. 9(3). pp. 129-145. URL: <https://10.4236/ajor.2019.93008> (дата звернення 09.01.2024).
2. Alshamsi A., Diabat, A. A reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*. 2015. №37(3). pp. 589–598.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.006>.
3. Anderluh A., Nolz P.C., Hemmelmayr V.C., Crainic T.G., Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and “grey zone” customers arising in urban logistics. *The European Journal of Operational Research*. 2021. №289. pp. 940–958.
4. Herrera O., Jerez V., Arrieta N., Camacho G. Transshipment and routing model for multi-product planning and distribution at a refreshment company in Bogota, Colombia. *Journal of applied research and technology*. 2022. №20(4). pp. 408-417. DOI: <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.4.1330>.
5. Keshavarz-Ghorabae Mehdi, Amiri Maghsoud, Olfat Laya, Khatami Firouzabadi Ali. Designing a multi-product multi-period supply chain network with reverse logistics and multiple objectives under uncertainty. *Technological and Economic Development of Economy*. 2017. №23. pp. 520-548.
DOI: <https://doi.org/10.3846/20294913.2017.1312630>.
6. Ma R., Yao L., Jin M., Ren P., Lv Z. Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2016. 89. pp. 195–202.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2015.10.028>.

7. Makedon V., Dzeveluk A., Khaustova Y., Bieliakova O., Nazarenko I. Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*. 2021. Volume 29. Issue 1. pp. 73-91.
8. Ruvalcaba Sandoval D., Olivares-Benitez E., Rojas R., Sosa-Gómez G. Matheuristics for the Design of a Multi-Step, Multi-Product Supply Chain with Multimodal Transport. *Applied Science*. 2021. 11. P. 10251.
DOI: <https://doi.org/10.3390/app112110251>.
9. Selsam D., Lamm M., Bunz B., Liang P., de Moura L., Dill D.L. Learning a SAT solver from Single-Bit supervision. 7th International Conference on Learning Representations, ICLR May 6 – 9, 2019. New Orleans, USA. 2019. 278 p.
10. Shaw K., Irfan M. Shankar R. and Yadav S.S. Low carbon chance constrained supply chain network design problem: a benders decomposition based approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2016. №98. pp. 483–497.
11. Shelukhin M., Kupriichuk V., Kyrylko N., Makedon V., Chupryna N. Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. *International Journal of Entrepreneurship*. 2021. Volume 25. Issue 6. URL: <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html> (дата звернення 09.01.2024).
12. Tarvin D.A., Wood R.K., Newman A.M. Benders decomposition: Solving binary master problems by enumeration. *Operations Research Letters*. 2016. №44. pp. 80–85.

REFERENCES

1. Agadaga, G.O., & Akpan, N.P. (2019). A Transshipment Model of Seven-Up Bottling Company, Benin Plant, Nigeria. *American Journal of Operations Research*, 9(3), 129, 129-145. Available at: <https://10.4236/ajor.2019.93008> (accessed January 09, 2024).
2. Alshamsi, A., & Diabat, A. (2015). A reverse logistics network design, *Journal of Manufacturing Systems*, 37(3), 589–598
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.006>.
3. Anderluh, A., Nolz, P.C., Hemmelmayr, V.C. & Crainic, T.G. (2021). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and “grey zone” customers arising in urban logistics. *The European Journal of Operational Research*, 289, 940–958.
4. Herrera, O., Jerez, V., Arrieta, N., & Camacho, G. (2022). Transshipment and routing model for multi-product planning and distribution at a refreshment company in

Bogota, Colombia. *Journal of applied research and technology*, 20(4), 408-417.
DOI: <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.4.1330>.

5. Keshavarz-Ghorabae, Mehdi, Amiri, Maghsoud, Olfat, Laya, & Khatami, Firouzabadi, Ali. (2017). Designing a multi-product multi-period supply chain network with reverse logistics and multiple objectives under uncertainty. *Technological and Economic Development of Economy*, 23, 520-548.

DOI: <https://doi.org/10.3846/20294913.2017.1312630>.

6. Ma, R., Yao, L., Jin, M., Ren, P., & Lv, Z. (2016). Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, Solitons & Fractals*, 89, 195-202.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2015.10.028>.

7. Makedon, V., Dzeveluk, A., Khaustova, Y., Bieliakova, O., & Nazarenko I. (2021). Enterprise multi-level energy efficiency management system development. *International Journal of Energy, Environment, and Economics*, 29(1), 73-91.

8. Ruvalcaba Sandoval, D., Olivares-Benitez, E., Rojas, R., & Sosa-Gómez, G. (2021). Matheuristics for the Design of a Multi-Step, Multi-Product Supply Chain with Multimodal Transport. *Applied Science*, 11, 10251.

DOI <https://doi.org/10.3390/app112110251>.

9. Selsam, D., Lamm, M., Bunz, B., Liang, P., de Moura L., & Dill D.L. (2019). Learning a SAT solver from Single-Bit supervision. 7th International Conference on Learning Representations, ICLR May 6 – 9, 2019. New Orleans, USA.

10. Shaw, K., Irfan, M. Shankar, R. & Yadav, S.S. (2016). Low carbon chance constrained supply chain network design problem: a benders decomposition based approach. *Computers & Industrial Engineering*, 98, 483-497.

11. Shelukhin, M., Kupriichuk, V., Kyrylko, N., Makedon, V., & Chupryna, N. (2021). Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. *International Journal of Entrepreneurship*, 25(6), Available at: <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html> (accessed January 09, 2024).

12. Tarvin, D.A., Wood, R.K., & Newman, A.M. (2016). Benders decomposition: Solving binary master problems by enumeration. *Operations Research Letters*, 44, 80-85.

Received 10.01.2024.

Accepted 15.01.2024.

Design of multi-product transport networks with discrete bus data flows

The article considers the importance of transport and communication as key sectors for the development of the economy of Ukraine, as well as the need to create applied mathematical software for the optimization of transport processes and the development of information and analytical systems. Special attention is paid to the development and study of multi-product communication networks with discrete flows of small

consignments, which have a significant impact on market transformations in Ukraine, especially in the field of transportation of small consignments. The study focuses on modern and future communication networks, which, as a rule, have a multi-level structure determined by the administrative division of the territory, management hierarchy and technologies for the processing and distribution of goods and information. The authors of the article emphasize the need to design multi-level communication networks, which would take into account the complexity of the system, as well as the impossibility of complete centralization of information processing and management in one link. The article also focuses on the analysis of existing research and publications in this field, paying attention to the contribution of foreign and domestic scientists to the development of models and methods of network resource management. Most research focuses on deterministic models and models based on the mathematical foundations of mass service theories and random Markov processes. The authors indicate the inadequacy of the existing mathematical tools for modeling and analyzing the functioning of multi-product networks with discrete flows, which requires the development of new mathematical models and methods. The purpose of the research is the development and analysis of effective approaches to the design of multi-tracks pipeline transport networks with a special focus on discrete trunk data flows. The authors note that this includes the development of new approaches and methods for effective management and optimization of resource allocation, as well as modeling the specifics of discrete flows in the context of trunk transport systems. An important part of the research is the creation of a hierarchical system structure for automated resource management and flow distribution in large-scale networks. The authors emphasize the need to develop a methodology that integrates already existing achievements in this field and allows to effectively solve practical problems related to long-term development, ongoing planning and operational management in large-scale networks. Such a methodology should include models of different levels of aggregation and be suitable for all levels of the network's hierarchical structure. The study also includes consideration of mathematical models and algorithms for modeling and analyzing the functioning of multi-product networks with discrete flows.

Keywords: artificial intelligence, cloud computing, neural networks, fuzzy sets, network parameters, input connections, combinatorial model, reference situations.

Кирилов Сергій Олександрович - кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри математики, фізики та астрономії Одеського національного морського університету.

Kyrylov Serhii - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor of the Mathematics, Physics and Astronomy department Odessa National Maritime University.