

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АНАЛІЗУ ПАСАЖИРОПОТОКІВ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У РОЗУМНОМУ МІСТІ

Юрій Мацелюх¹, Василь Литвин²

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра інформаційних систем та мереж, Львів, Україна
¹ indeed.post@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1721-7703
² vasy1.v.lytvyn@lpnu.ua; ORCID: 0000-0002-9676-0180

© Мацелюх Ю., Литвин В., 2024

У роботі досліджено вплив зростання пасажиропотоків у громадському транспорті на забруднення довкілля, а також здійснено пошук способів зниження обсягів викидів вуглецевмісних сполук, спричинених зростанням населення на планеті, кількості транспорту, що здійснює їх перевезення, та обсягів викидів, які ці транспортні засоби генерують. Об'єктом досліджень є система пасажирських перевезень у розумному місті. У результаті кореляційно-регресійного аналізу пасажиропотоків у обласному місті з населенням менше ніж 1 млн зареєстрованих мешканців підтверджено існування функціональної залежності між обсягами перевезень пасажирів громадським транспортом загального користування та обсягами викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення, до складу яких входять як усі види автомобільного, так і електротранспорту. Встановлено, що оптимізація мережі громадського транспорту відіграє вирішальну роль у здійсненні низьковуглецевих перевезень. Запропоновано концептуальні положення створення інтелектуальної системи організації низьковуглецевих пасажирських перевезень у розумному місті, які відображено за допомогою діаграм активності, станів та розгортання. Оптимізацію маршрутів транспортної системи громадських перевезень запропоновано реалізовувати через концепцію додавання нового пасажирів, доповнення маршруту та адаптування мереж громадського транспорту відповідно до потреб споживачів та попиту на перевезення для досягнення завдань концепції розумного міста – зменшення викидів діоксиду вуглецю в атмосферу. Наукова новизна запропонованої концепції інтелектуальної системи полягає у використанні інтегрованого підходу до оптимізації маршрутів транспортних засобів у розумному місті з метою зменшення викидів діоксиду вуглецю в атмосферу.

Ключові слова: пасажиропотоки; розумне місто; системи низьковуглецевих перевезень; системний аналіз; кореляційно-регресійний аналіз; теорія моделювання систем

Вступ

З розвитком інформаційних технологій зростає кількість доступних методів та засобів, які використовують дослідники для аналізу складних систем. З кожним роком це підвищує рівень складності систем, процесів та завдань, які можна описати і вирішити за допомогою інструментарію системного аналізу [1–5]. Зростає рівень складності систем, збільшується кількість компонент та зв'язків, які вдається успішно врахувати та взаємно узгодити для прийняття ефективних управлінських рішень. Нині стан забруднення атмосфери потребує пошуку способів зниження обсягів викидів вуглецевмісних сполук, спричинених зростанням

населення на планеті, кількості транспорту, що здійснює їх перевезення, та обсягів викидів, які ці транспортні засоби генерують [6–10]. Це обґрунтовує актуальність нашого дослідження.

Постановка проблеми

У зв'язку зі зростанням уваги до екологічних проблем та розробленням концепції розумних міст виникає необхідність розвитку та впровадження низьковуглецевих методів та засобів перевезення, покликаних зменшити викиди парникових газів та поліпшити якість повітря у міських середовищах. Проблема аналізу пасажиропотоків у низьковуглецевих транспортних системах тісно пов'язана із проблемами їх оптимізації, підвищення їх ефективності з метою забезпечення задоволення потреб населення.

Незважаючи на помітний прогрес у розробленні низьковуглецевих транспортних систем, існують виклики, пов'язані з аналізом пасажиропотоків у таких системах у розумних містах. Зокрема, існує потреба в дослідженні та розробленні ефективних методів та засобів для збирання, опрацювання та аналізу даних про пасажиропотоки з урахуванням специфіки низьковуглецевих транспортних систем і концепцій розумного міста. Проблема полягає в тому, як розробити та впровадити інструменти для збирання та аналізування даних, які допоможуть управляти та оптимізувати низьковуглецеві перевезення з урахуванням попиту та потреб пасажирів. Об'єктом досліджень є система пасажирських перевезень у розумному місті, основні складові якої – потоки пасажирів, ефективність маршрутів, вплив технологій та інновацій на транспортну систему та зменшення викидів CO₂. Предметом дослідження є система низьковуглецевих пасажирських перевезень у розумному місті, що покращує показники сталості середовища. Дослідження охоплює аналіз пасажиропотоків, їх вплив на забруднення атмосфери та пошук способів покращення ефективності транспортної інфраструктури через оптимізацію маршрутів, впровадження інформаційних технологій та екологічно чистих видів транспорту для оптимізації системи пасажирських перевезень, яка б відповідала впровадженню стратегії сталого та екологічного транспорту.

Очікується, що результати дослідження сприятимуть розвитку нових методів та засобів аналізу пасажиропотоків у низьковуглецевих системах перевезень під час побудови розумних міст, а також розробленню інструментів ефективного управління роботою таких систем з урахуванням попиту пасажирів та їхніх потреб. Ці результати будуть корисними для органів місцевого управління, транспортних компаній та наукових установ, які прагнуть удосконалити системи управління низьковуглецевими транспортними системами в розумних містах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Під поняттям розумне місто (Smart City), як вважають автори робіт [11–15], потрібно розуміти місто, яке використовує інноваційні технології та сучасну інформаційно-комунікаційну інфраструктуру для покращення якості життя мешканців, оптимізації використання ресурсів та підвищення ефективності управління. Проаналізувавши низку праць [16–20], серед характеристик розумного міста можна виділити вісім основних:

1. Використання технологій Інтернету речей (Internet of Things, IoT), до яких належать давачі та пристрої IoT, встановлені по всьому місту для збирання даних та моніторингу різних параметрів, як-от трафік, якість повітря, використання енергії тощо [21].

2. Інтегрована система управління, яка об'єднує дані та дає змогу управляти різними аспектами міського життя, ураховуючи транспорт, енергію, водопостачання, відходи тощо [22].

3. Забезпечення доступності та рівності, яка покликана врахувати потреби всіх мешканців міста, зокрема людей з обмеженими можливостями та верств населення із низьким рівнем матеріального забезпечення [23].

4. Стале енергозабезпечення, яке передбачає використання відновлюваних джерел енергії та енергоефективних технологій для забезпечення міста [24].

5. Підвищена мобільність та транспортна ефективність, яких досягають, впроваджуючи інтелектуальні транспортні системи, зокрема розумні маршрути громадського транспорту, велосипедні шляхи, розвиток електромобілей тощо [25].

6. Екологічна стійкість та зелені ініціативи, що полягають у збереженні зелених зон, захисті екології та розвитку екологічних ініціатив для зменшення викидів CO₂ та забруднення навколишнього середовища [26].

7. Цифрова інфраструктура та доступ до інформації, які покликані забезпечити доступ мешканців до інформації через високошвидкісний інтернет, розвиток електронних сервісів та діджиталізацію самого міського управління [27].

8. Активна участь громадян, що проявляється у залученні мешканців міста до прийняття рішень, відкритих даних та п'язвортних зв'язках із міською владою [28].

Підсумовуючи аналіз останніх досліджень, бачимо, що проблема успішної імплементації концепції розумних міст потребує комплексного підходу, зокрема технологічних інновацій, партнерства між секторами, участі громадян та сталого розвитку. Тому сьогодні вона все ще залишається не вирішеною у загальній проблемі пошуку ефективних підходів для оптимізації системи організації мереж громадського транспорту, що сприяють зниженню викидів вуглекислого газу в атмосферу для побудови розумних міст.

Формулювання цілі статті

З метою створення ефективнішої, сталої та екологічно чистої транспортної системи у розумному місті, пошуку оптимальних інструментів, спрямованих на її оптимізацію, поставлено завдання проаналізувати пасажирські перевезення в обласному місті із населенням менше ніж 1 млн зареєстрованих мешканців та розвинутою мережею громадського транспорту, що охоплює автобусні, тролейбусні та трамвайні маршрути, а також сформувані концептуальні положення створення інтелектуальної системи організації низьковуглецевих пасажирських перевезень у розумному місті, формалізуючи їх за допомогою відповідних інструментів теорії моделювання систем (діаграм активності, станів та розгортання).

Виклад основного матеріалу

Для дослідження пасажиропотоків громадських перевезень в обласному місті з населенням менше ніж 1 млн зареєстрованих мешканців використовувалися дані за 2007–2021 рр., зібрані Головним управлінням статистики у Львівській області [29]. За даними порталу “Панель міста” [30] перевезення пасажирів транспортом загального користування (пасажиропереvezення громадським транспортом) здійснювали у межах міста в обсягах, наведених у табл. 1.

У табл. 1 наведені дані [29–32] про обсяги перевезень пасажирів громадським транспортом загального користування та обсяги викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення, до складу яких входять всі види як автомобільного, так і електротранспорту. Із даних табл. 1 видно різке зменшення значень цих показників із початком пандемії COVID-19 у 2020 р. З кожним наступним роком зростали як обсяги перевезень пасажирів громадським транспортом загального користування, так і обсяги викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення. Середні значення перевезень пасажирів становлять 199,8 млн осіб, а викидів діоксиду вуглецю – 1,7 млн т, максимальні ж значення цих показників відповідно 255,6 млн осіб (у 2008 р.) і 1,9 млн т (у 2007 р.), мінімальні їх значення відповідно 136,8 млн осіб (у 2020 р.) і 1,3 млн т (у 2020 р.).

Це свідчить про існування функціональної залежності між обсягами перевезень пасажирів громадським транспортом загального користування та обсягами викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення. З метою встановлення такої залежності досліджено основні статистичні показники, серед яких середнє значення, розмір вибірки, мода, медіана, стандартне відхилення, дисперсія вибірки, ексцес, асиметричність, інтервал, максимум, мінімум, сума, коефіцієнт варіації, стандартна помилка тощо (табл. 2).

Таблиця 1

Динаміка основних показників перевезення пасажирів громадським транспортом та викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення

Роки	Перевезення пасажирів транспортом загального користування, млн осіб	Викиди діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення, млн т
2006	240,8	1,8
2007	243,2	1,9
2008	255,6	1,8
2009	239,4	1,7
2010	221,4	1,8
2011	200,8	1,7
2012	203,1	1,8
2013	174,6	1,8
2014	202,0	1,6
2015	198,8	1,5
2016	181,5	1,7
2017	176,2	1,7
2018	179,0	1,8
2019	189,3	1,6
2020	136,8	1,3
2021	153,8	1,6

Побудовано за даними [29–32].

Таблиця 2

Основні показники описової статистики досліджуваних рядів

Назва показника	Значення показника для пасажирських перевезень	Значення показника для викидів діоксиду вуглецю
Розмір вибірки	16,0	16,0
Середнє значення	199,8	1,7
Мода	–	1,8
Медіана	199,8	1,7
Стандартне відхилення	33,5	0,1
Дисперсія вибірки	1125,5	0,0
Ексцес	–0,6	1,5
Асиметричність	0,0	–1,1
Розмах (інтервал)	118,8	0,6
Максимум	255,6	1,9
Мінімум	136,8	1,3
Сума	3196,3	27,2
Коефіцієнт варіації	0,167932825	0,085122
Стандартна помилка	0,1	0,1

Примітка. Власний розрахунок.

Як видно з табл. 2, середні значення моди і медіани для викидів діоксиду вуглецю близькі одна до одної, оскільки їх зміст однаковий – середина розподілу. Для пасажирських перевезень значення моди відсутнє через малий розмір вибірки, порівняно із кількісними значеннями (млн осіб). На ширину діапазону значень вказує інтервал, що є різницею максимального і мінімального

значень вибірки. У нашому випадку розмахи вибірки кожного ряду менші від їх середніх значень, що характерно для вибірок із додатних значень. Коефіцієнт варіації досліджуваних вибірок відображає їх міру мінливості, його розраховують у відсотках, тому для пасажирських перевезень він становить 16,8 %, а для викидів – 8,5 %.

Під час кореляційного аналізу для задачі впливу обсягів пасажирських перевезень на викиди діоксиду вуглецю вирішували завдання виявлення зв'язку, подання його у графічній формі, вимірювання тісноти зв'язку та узагальнення виявленого зв'язку. Отримані результати наведено на рис. 1.

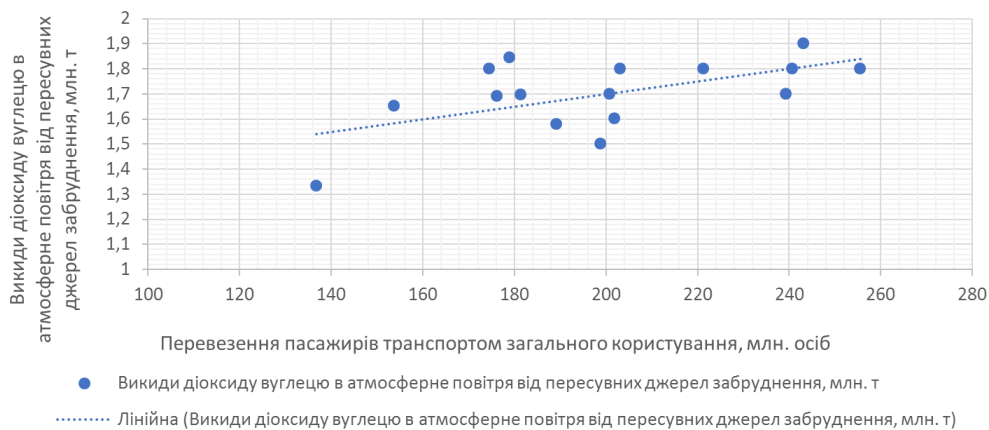


Рис. 1. Результат побудови функціональної залежності досліджуваного набору даних (власний розрахунок)

Для вираження форми аналітичної залежності викидів діоксиду вуглецю, які є результуючою ознакою у від обсягів пасажирських перевезень, що є факторною ознакою x , використано лінійну функцію такого вигляду (1):

$$y = 0,0025x + 1,1973. \quad (1)$$

Коефіцієнт детермінації отриманої залежності становить $R^2 = 0,3397$, а коефіцієнт кореляції – $R = 0,5828038$, що свідчить про наявність такого лінійного зв'язку, однак з недостатнім рівнем його тісноти. Це, звичайно, не виключає існування нелінійного зв'язку з вищою тіснотою (рис. 2).

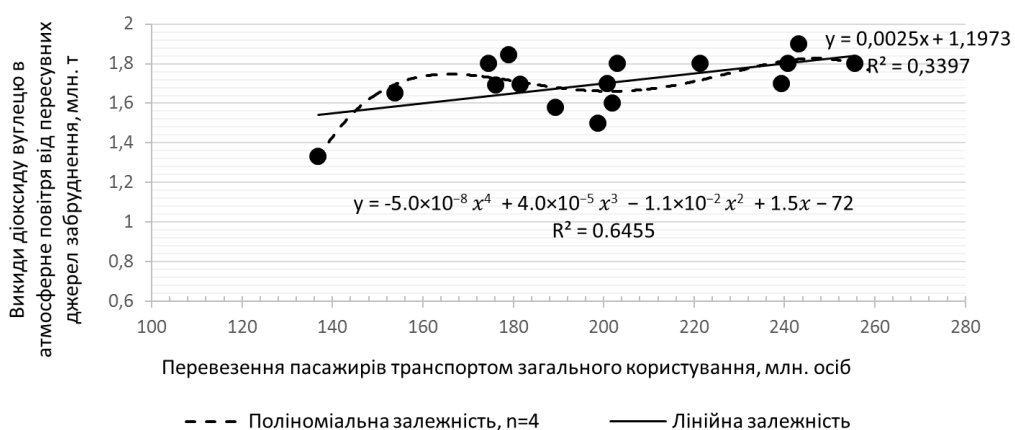


Рис. 2. Результат побудови нелінійної залежності досліджуваного набору даних (власний розрахунок)

Для нелінійної форми аналітичної залежності викидів діоксиду вуглецю від обсягів пасажирських перевезень отримано такий вигляд функції (2):

$$y = -5,0 \times 10^{-8} x^4 + 4,0 \times 10^{-5} x^3 - 1,1 \times 10^{-2} x^2 + 1,5x - 72. \quad (2)$$

Коефіцієнт детермінації одержаної залежності становить $R^2 = 0,6455$, що хоча й удвічі більше за значенням, проте вказує на низьку точність прогнозованих величин (тільки 65 %).

Оскільки коефіцієнт кореляції є статистичним показником, то для правильного трактування кореляційної залежності необхідно ґрунтувати свої висновки на тому, що зростання пасажирських перевезень неможливе без збільшення кількості транспортних засобів. Проте такого збільшення можна досягти не тільки за рахунок автобусних перевезень, а й через збільшення перевезень трамваями і троллейбусами, які спричиняють низькі (майже нульові) викиди діоксиду вуглецю в атмосферу.

Для вирішення поставленого завдання – аналізування пасажирських перевезень в обласному місті з населенням менше ніж 1 млн зареєстрованих мешканців та розвинутою мережею громадського транспорту, в яку входять автобусні, троллейбусні та трамвайні маршрути, досліджено дані щодо складу пасажирських перевезень за видами транспорту (табл. 3). Врахування даних про приватний транспорт та його вплив на зміну показників викидів діоксиду вуглецю в атмосферу не дало жодних позитивних результатів, оскільки спостерігається висока автокореляція даних через зміни з 2010 р. у розрахунках викидів діоксиду, які за новою міжнародною методикою розраховують на основі даних про кінцеве використання палива автомобільним транспортом, що наведені у енергетичному балансі України.

Таблиця 3

Динаміка основних показників громадських перевезень пасажирів троллейбусами, трамваями та автомобільним транспортом

Роки	Перевезення пасажирів троллейбусами, тис. осіб	Перевезення пасажирів трамваями, тис. осіб	Перевезення пасажирів автомобільним транспортом, млн осіб
2010	25876,4	49603,1	145,9
2011	22453,5	36892,2	141,4
2012	25012,2	43287,0	134,8
2013	22904,5	35935,2	115,8
2014	26397,5	50549,3	125,1
2015	29518,3	59572,5	109,7
2016	31575,2	56555,9	93,3
2017	31765,9	54018,6	90,4
2018	31220,1	58808,4	89,0
2019	36409,5	63122,5	89,8
2020	29676,8	34711,2	50,9
2021	32555,7	36427,7	69,0

Побудовано за даними [29–32].

Розглянемо залежності викидів діоксиду вуглецю від обсягів перевезення пасажирів автомобільним транспортом, який активно використовують для перевезень у громадському транспорті у досліджуваному населеному пункті (рис. 3). Наведені залежності вказують на існування функціональної залежності між обсягами перевезень пасажирів автобусами (рис. 3), троллейбусами і трамваями (рис. 4).

Для випадку нелінійної форми аналітичної залежності викидів діоксиду вуглецю від обсягів пасажирських перевезень автобусами отримано такий вигляд функції:

$$y = -5,0 \times 10^{-8}x^4 + 2,0 \times 10^{-5}x^3 - 3,7 \times 10^{-3}x^2 + 2,6 \times 10^{-1}x - 5,2. \quad (3)$$

Коефіцієнт детермінації нелінійної залежності становить $R^2 = 0.6001$ і майже удвічі більший за коефіцієнт детермінації лінійної залежності ($R^2 = 0.3087$), проте точність апроксимованих величин залишається низькою (60 %).

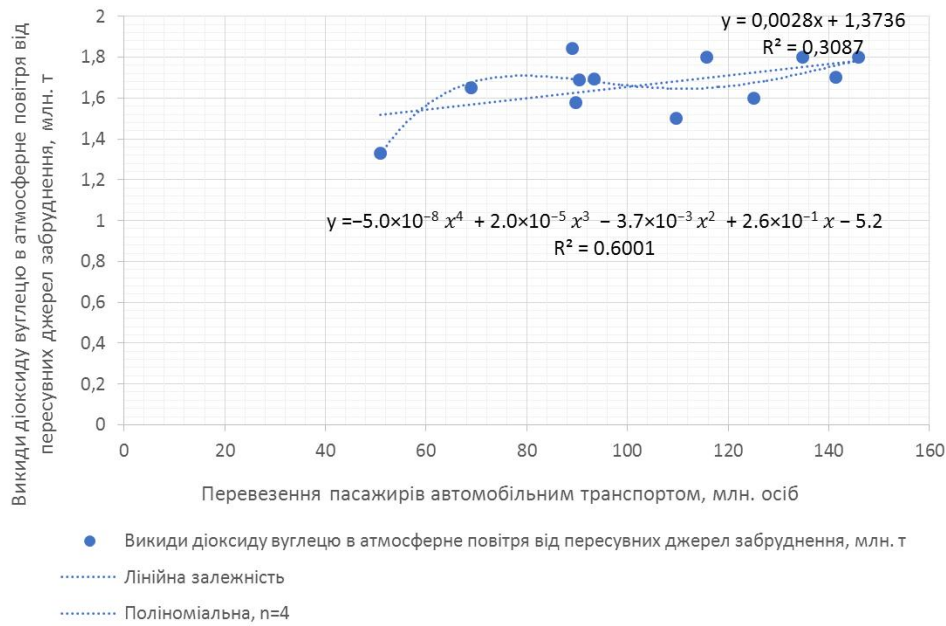


Рис. 3. Результат побудови залежностей викидів діоксиду вуглецю від обсягів громадських перевезень пасажирів у автобусах (власний розрахунок)

На рис. 4 наведено залежності викидів діоксиду вуглецю від обсягів перевезення пасажирів електротранспортом, а саме тролейбусами (рис. 4, а) і трамваями (рис. 4, б).

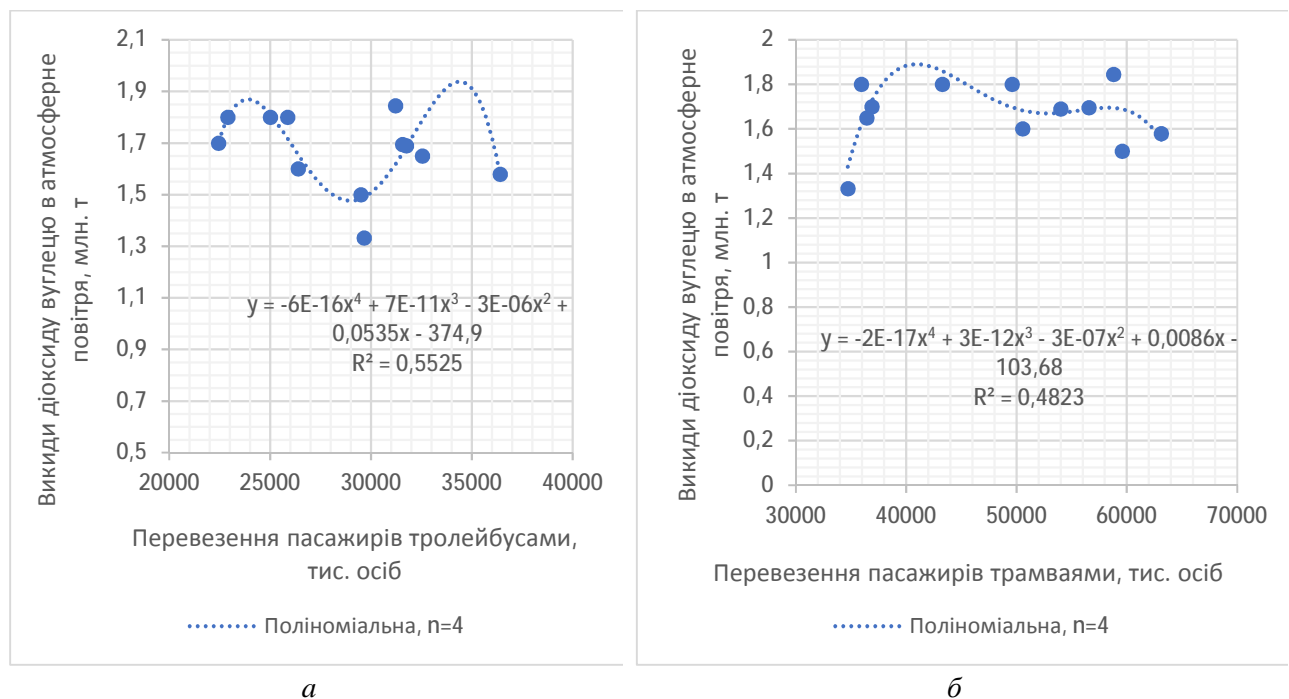


Рис. 4. Залежності викидів діоксиду вуглецю від обсягів громадських перевезень пасажирів тролейбусами (а) та трамваями (б) (власний розрахунок)

Досліджуючи викиди діоксиду вуглецю від обсягів пасажирських перевезень тролейбусами, ми отримали нелінійну аналітичну залежність такої форми:

$$y = -6,0 \times 10^{-16} x^4 + 7,0 \times 10^{-11} x^3 - 3,0 \times 10^{-6} x^2 + 5,4 \times 10^{-2} x - 374,9. \quad (4)$$

Для викидів діоксиду вуглецю від обсягів пасажирських перевезень трамваями ми одержали залежність у такій формі:

$$y = -2,0 \times 10^{-17}x^4 + 3,0 \times 10^{-12}x^3 - 3,0 \times 10^{-7}x^2 + 8,6 \times 10^{-2}x - 103,7. \quad (5)$$

Коефіцієнт детермінації залежності викидів діоксиду вуглецю від обсягів пасажирських перевезень тролейбусами становить $R^2 = 0,5525$, обсягів пасажирських перевезень трамваями $R^2 = 0,4823$, що свідчить про низьку точність апроксимованих величин (близько 50 %).

Коефіцієнти кореляцій залежності викидів діоксиду вуглецю від обсягів пасажирських перевезень тролейбусами, трамваями та автобусами наведено в табл. 4. Отримані значення коефіцієнтів кореляції вказують на існування залежностей між досліджуваними величинами. У нашому випадку вибірковий коефіцієнт кореляції R за абсолютним значенням не перевищує одиниці, а саме $R = 0,874509$ для перевезень автобусами, $R = -0,27069$ для перевезень трамваями і $R = -0,86314$ для перевезень тролейбусами. Тому це дає нам змогу побудувати регресійну залежність для досліджуваних рядів даних, яку подамо формулою:

$$y = -0,107219478x_1 + 0,001797901x_2 + 0,015417971x_3 + 2,236437009, \quad (6)$$

де x_1 – перевезення пасажирів тролейбусами, млн осіб; x_2 – перевезення пасажирів трамваями, млн осіб; x_3 – перевезення пасажирів автомобільним транспортом, млн осіб

Таблиця 4

Матриця кореляції показників викидів діоксиду вуглецю від обсягів пасажирських перевезень тролейбусами, трамваями та автобусами

	Викиди діоксиду вуглецю в атмосферне повітря	Перевезення пасажирів тролейбусами	Перевезення пасажирів трамваями	Перевезення пасажирів автобусами
Викиди діоксиду вуглецю	1			
Перевезення тролейбусами	-0,86314	1		
Перевезення трамваями	-0,27069	0,582555	1	
Перевезення автобусами	0,874509	-0,71623	0,012608	1

Отримана залежність вказує на тенденцію до зниження викидів діоксиду вуглецю зі зростанням перевезень пасажирів тролейбусами та їх збільшення зі зростанням перевезень автобусами, що є логічним та підтверджує той факт, що у досліджуваному населеному пункті всі автобуси є транспортними засобами з дизельними (переважна більшість) та бензиновими двигунами. Залишок доволі великий, що теж підтверджується тим, що значну частину викидів (близько 40 % і 30 %) становлять викиди від автомобільного приватного та вантажного транспорту. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,880018241$, що свідчить про достатній рівень точності отриманої залежності (88 %).

Отже, враховуючи сутнісні характеристики досліджуваного процесу викидів у докільля від пересувних джерел забруднення, можна стверджувати, що така залежність існує, проте не є лінійною. З огляду на це запропоновано такі основні способи вирішення проблеми у розумному місті: надання пріоритетності громадському транспорту, здійснення гібридизації та електризації транспортних засобів для заміни засобів із дизельними або бензиновими двигунами, використання спільного транспорту замість приватного, формування мережі швидкісних трамваїв або метрополітенів, упровадження сучасних інформаційних технологій для оптимізації маршрутів та моніторингу транспортних потоків, а також використання динамічного ціноутворення на квитки залежно від заповнення транспортного засобу та попиту на такі послуги.

Діаграма активності інтелектуальної системи оптимізації маршруту для кожного пасажиря може містити такі етапи (рис. 5).

- Збирання даних про рух транспорту та про посадку/висадку пасажирів на зупинках.
- Аналіз даних для визначення поточної ситуації на дорогах та навантаження на транспортні засоби.

- Визначення найоптимальнішого маршруту для кожного пасажирів на основі його місцезнаходження та місця призначення.
- Розрахунок прогнозованого часу прибуття до місця призначення та розроблення індивідуального графіка поїздки для кожного пасажирів.
- Відправлення інформації про оптимальний маршрут та графік поїздки до пасажирів за допомогою мобільного застосунку або іншої форми сповіщення.
- Аналіз даних про виконання розкладу та поточної ситуації на дорогах для корекції розкладу руху маршрутів транспорту.

Система виконує оптимізацію маршруту для кожного пасажирів:

- система виконує першу ітерацію оптимізації, вибираючи найближчі до початкової точки пасажирів зупинку та маршрут до кінцевої зупинки;
- система перевіряє час прибуття на кінцеву зупинку та порівнює із часом, який вказав пасажир;
- якщо час прибуття більший від вказаного пасажиром, система вибирає інший маршрут з урахуванням розкладу руху транспорту та зупинок, які забезпечать вчасне прибуття;
- система виводить оптимальний маршрут для кожного пасажирів із вказаним часом відправлення та прибуття на кінцеву зупинку.

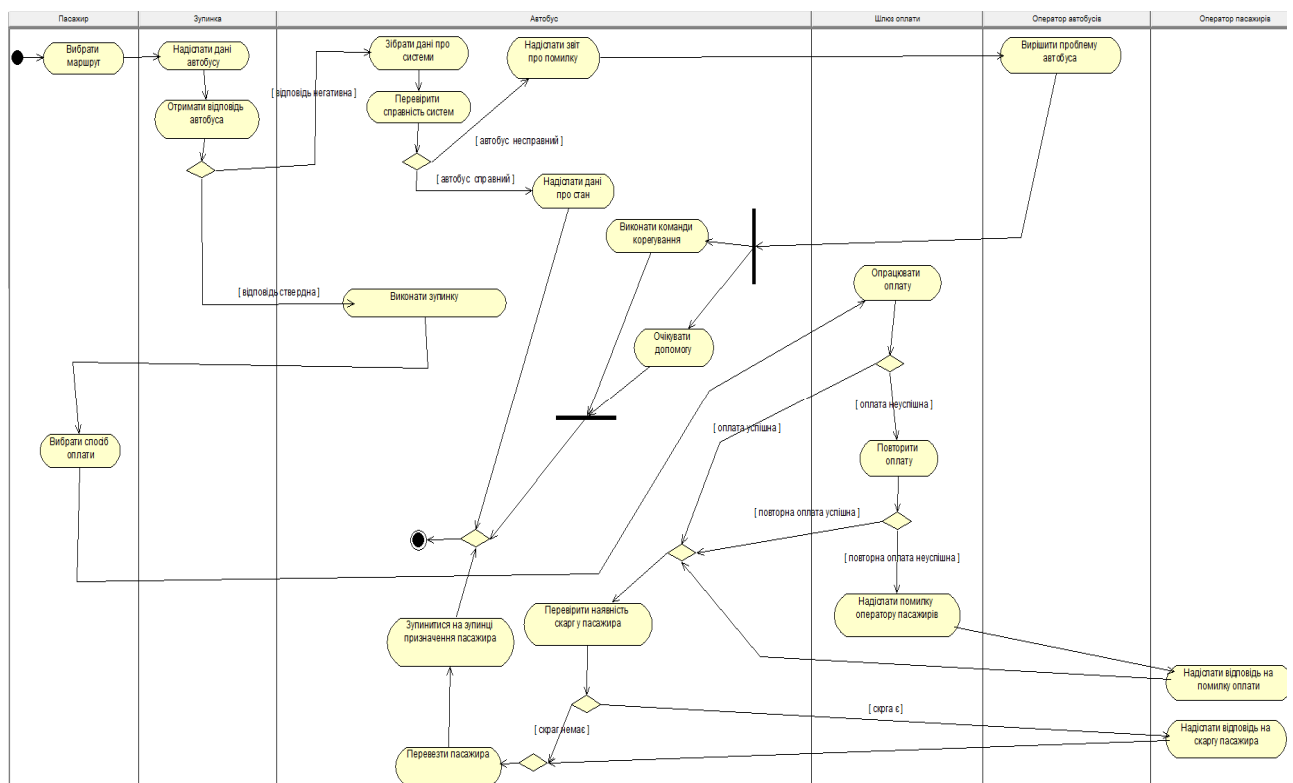


Рис. 5. Результат побудови діаграми активності із застосуванням засобу IBM Rational Rose

Система надсилає оптимальні маршрути для кожного пасажирів на їх мобільні пристрої.

Пасажири використовують оптимальний маршрут, вказаний системою, для переміщення з початкової до кінцевої точки.

Система отримує дані про маршрути, які використовують пасажирів, та виконує аналіз цих даних для подальшої оптимізації маршрутів та планування розкладу руху транспорту.

Система надсилає дані про використання маршрутів та розкладу руху транспорту до диспетчерської служби для подальшої координації та планування роботи транспорту.

Одержавши рекомендований маршрут, система повідомляє пасажиру відповідну інформацію, зокрема час відправлення, маршрут та прогнозований час прибуття до місця призначення.

Пасажир може підтвердити рекомендований маршрут або попросити інший варіант.

Якщо пасажир підтвердив рекомендований маршрут, інформація про це передається до водія транспортного засобу або системи управління транспортним потоком.

Водій транспортного засобу отримує відповідне повідомлення про рекомендований маршрут та навігаційну інформацію, щоб доправити пасажирів до місця призначення.

Система постійно оновлюється, щоб враховувати нові дані про транспортний потік та розклади руху транспортних засобів, що дає змогу пропонувати оптимальні маршрути навіть у разі зміни умов руху.

На діаграмі станів (рис. 6) відображено основні етапи роботи системи: отримання даних від пасажирів, пошук оптимального маршруту, підтвердження вибору маршруту пасажиром та передавання інформації про маршрут водію транспортного засобу. Діаграма також демонструє, що система постійно оновлюється для урахування нових даних про транспортний потік та забезпечення найоптимальнішого маршруту для кожного пасажирів. Пріоритетними критеріями є час, витрачений на дорогу (менше – краще), вартість поїздки (менше – краще) та комфортність подорожі (заповненість салону громадського транспорту пасажирів). Трафік і затори теж важливо враховувати. Для спілкування із пасажиром можна використовувати його мобільний пристрій, сенсорні табло у салоні чи інші сучасні пристрої.

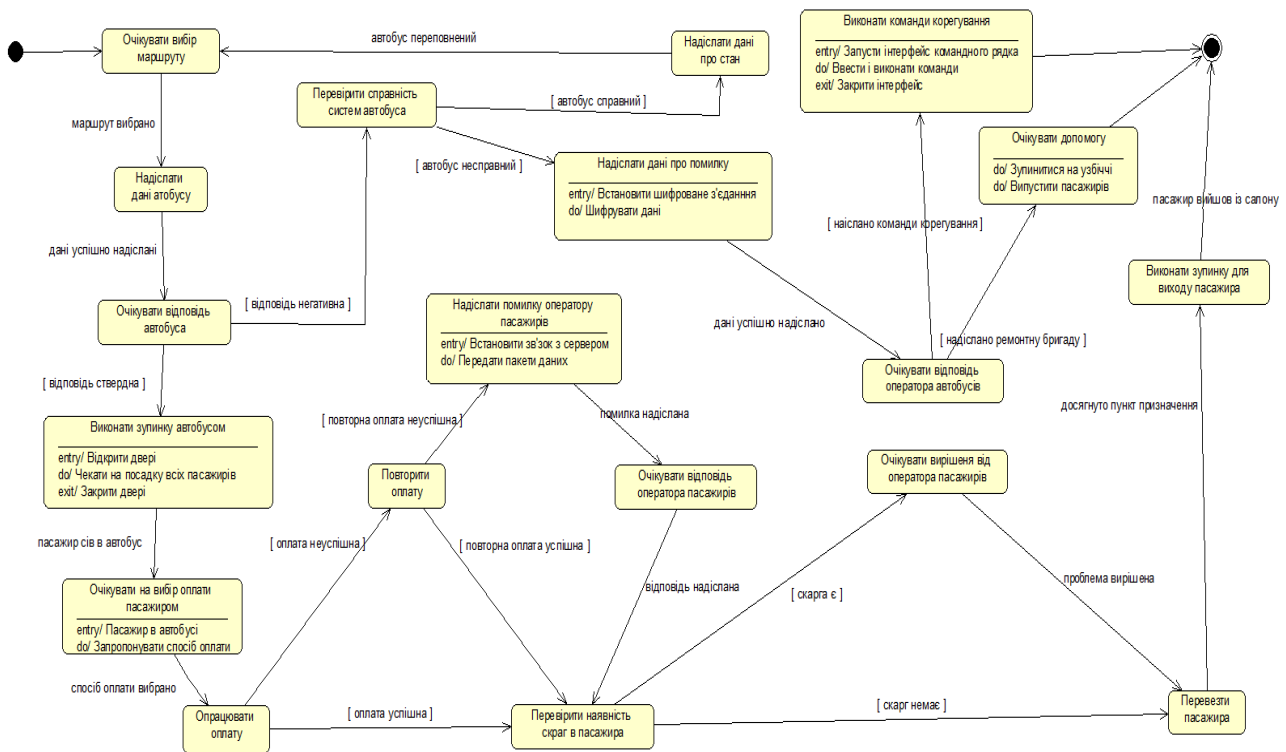


Рис. 6. Результат побудови діаграми станів із застосуванням засобу IBM Rational Rose

На діаграмі зображено стани системи та перехід між ними. Початковий стан – очікування, поки пасажир введе поточне місце розташування та пункт призначення. Після отримання цієї інформації система переходить у стан “Аналіз поточної ситуації”, у якому вона збирає та аналізує дані про трафік, розташування та рух громадського транспорту, вартість поїздки та заповненість салону.

На основі цих даних система переходить у стан “Оптимізація маршруту”: розробляє найкращий маршрут з урахуванням пріоритетних критеріїв. Якщо знайдений маршрут відповідає вимогам

пасажира, система переходить у стан “Повідомлення пасажиру”: повідомляє про оптимальний маршрут та відображає його на мобільному пристрої пасажира, на табло у салоні громадського транспорту або через інші сучасні пристрої.

Якщо запропонований маршрут не влаштовує пасажира, система переходить у стан “Редагування параметрів”, у якому пасажир може відредагувати свої пріоритетні критерії та вибрати відповідніший маршрут. Після цього система повторяє аналіз та оптимізацію маршруту, відтак переходить у відповідний стан.

Для оптимізації маршруту кожного пасажира можна використовувати алгоритми машинного навчання, які працюватимуть на основі даних про рух транспорту в реальному часі, наявність вільних місць у транспорті та інших параметрів.

Для цього інтелектуальна система оптимізації маршруту повинна мати доступ до таких даних. Зокрема, можна використовувати дані, які надають GPS-трекери в транспорті, відкриті джерела даних про трафік та інші розроблені рішення.

Крім того, для забезпечення оптимального маршруту для кожного пасажира система повинна враховувати його особисті уподобання. Наприклад, якщо пасажир хоче швидко дістатися до місця призначення, система пропонуватиме маршрути, які дадуть змогу це зробити. Якщо ж пасажира більше цікавить комфорт подорожі, система пропонуватиме маршрути з меншою кількістю пересадок або з комфортнішим транспортом.

Отже, інтелектуальна система оптимізації маршруту повинна мати можливість збирати, аналізувати та використовувати різноманітні дані для вирішення завдання надання оптимальних маршрутів для кожного пасажира громадського транспорту в реальному часі.

Якщо на дорозі з’являється затор або змінюється розташування громадського транспорту, інтелектуальна система повинна здійснювати динамічну корекцію маршрутів. Для цього їй потрібен доступ до поточної інформації про трафік, затори та розташування громадського транспорту, наприклад, за допомогою GPS-модулів і мережі датчиків, розміщених на дорогах.

Коли інтелектуальна система отримує оновлену інформацію про стан дороги та розташування громадського транспорту, вона повинна вирішувати, чи залишати пасажира на поточному маршруті, чи запропонувати альтернативний маршрут для досягнення мети з максимальною швидкістю та комфортом.

У разі затору чи зміни розташування громадського транспорту інтелектуальна система повинна швидко виконати розрахунки та запропонувати оптимальний маршрут. Інформація про затори та інші перешкоди повинна відображатися на табло в салоні громадського транспорту та на мобільному пристрої пасажира, щоб пасажир міг зробити свій вибір щодо оптимального маршруту.

У цій діаграмі станів нові стани відображаються як підмножини стану “Шлях до пункту призначення”, оскільки затор або зміна розташування транспорту можуть змінити оптимальний маршрут до пункту призначення. Коли стан “Затор” або “Зміна розташування транспорту” активний, система розраховує новий оптимальний маршрут до пункту призначення на основі актуальної інформації про трафік та розташування громадського транспорту. Після цього система повертається до стану “Рух до пункту призначення” і продовжує виконувати свої основні функції.

Deployment-діаграма відображає архітектурну структуру системи та взаємодію між її компонентами на рівні ресурсів (рис. 7). У контексті оптимізації маршрутів громадського транспорту діаграма деплоюменту може містити такі компоненти.

Сервер маршрутизації – компонент, який відповідає за оптимізацію маршрутів і надсилання інформації про маршрут до водіїв громадського транспорту. Цей компонент може бути встановлений на окремому сервері або в хмарному сервісі.

База даних – компонент, який зберігає інформацію про маршрути, розклади та інші дані, використовувані для оптимізації маршрутів.

Мобільний додаток – компонент, який використовують пасажири для отримання інформації про розклади, маршрути та зміни в русі громадського транспорту.

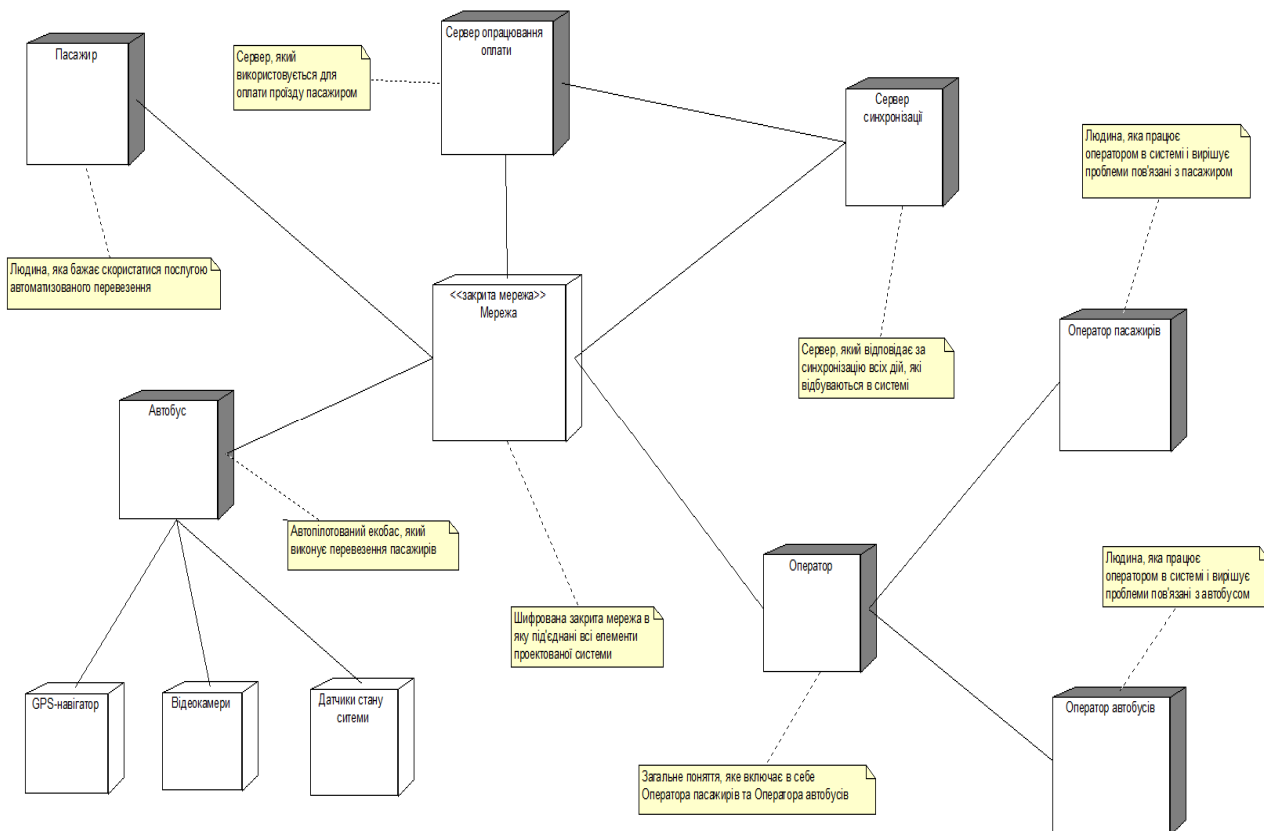


Рис. 7. Результат побудови діаграми розгортання із застосуванням засобу IBM Rational Rose

Водійський додаток – компонент, який використовують водії громадського транспорту для одержання інформації про маршрути, зміни в русі та іншої важливої інформації.

Давач руху транспорту – компонент, який збирає дані про рух громадського транспорту та передає їх на сервер маршрутизації для оптимізації маршрутів.

Інтернет-з'єднання – компонент, який забезпечує зв'язок між компонентами системи та дає змогу передавати дані між ними.

Система оповіщення – компонент, який відповідає за надсилання сповіщень пасажиром про зміни в русі громадського транспорту або про затримки.

Моніторинг відстані

Для діаграми деплоювання необхідно вказати, на яких фізичних пристроях розгортається система, а також які зовнішні системи взаємодіють з цією системою. У цьому випадку на фізичних пристроях можуть бути розгорнуті сервери, що забезпечують роботу інформаційної системи для оптимізації маршрутів громадського транспорту, а також сенсори, що вимірюють показники руху громадського транспорту. Зовнішніми системами можуть бути система оплати проїзду, моніторингу трафіку і контролю заторів на дорогах, GPS-системи водіїв громадського транспорту тощо.

На цій діаграмі бачимо, що система для оптимізації маршрутів розгорнута на двох серверах, розташованих у різних місцях міста. Система взаємодіє зі смартфонами пасажирів та водіїв громадського транспорту, а також із системою оплати проїзду та системою моніторингу трафіку і контролю заторів на дорогах. Водії громадського транспорту використовують GPS-системи, що надсилають інформацію про рух до системи для оптимізації маршрутів. Зібрані дані аналізують і система розраховує оптимальний маршрут для кожного громадського транспортного засобу в режимі реального часу.

У діаграмі станів можна використовувати нейронну мережу для додаткового покращення процесу оптимізації маршруту та передбачення трафіку на дорозі.

У запропонованій системі також необхідно враховувати обмежену кількість транспортних засобів, оскільки кожне місто, навіть розумне, має обмежену кількість ресурсів: автобусів, тролейбусів чи трамваїв. Тому в системі потрібно розраховувати максимальну кількість доступних транспортних засобів на певний період, які можна розподілити між різними маршрутами з урахуванням попиту на перевезення. Загалом, обмеження кількості транспортних засобів необхідно ввести для підвищення ефективності використання ресурсів, уникнення перевантажень чи забезпечення раціональнішої експлуатації транспортної системи розумного міста. Також потрібно враховувати ситуацію, коли недостатня кількість транспортних засобів виникає у пікові години або на популярних маршрутах. Тут важливо балансувати кількість транспортних засобів відповідно до попиту і здійснювати ретельне планування ресурсів для забезпечення ефективної роботи системи пасажирських перевезень протягом усього періоду перевезень пасажирів.

Додавання нового пасажирів до системи необхідно розглядати за різними сценаріями зміни маршруту громадського транспорту (удосконалення старого, створення нового тощо). Для прикладу, така ситуація виникатиме, коли наявний маршрут не забезпечує зручного з'єднання з пунктом призначення нового пасажирів або коли попит на пасажирські перевезення на певній ділянці маршруту значно перевищує розраховані (очікувані). Загалом, у разі додавання нового пасажирів пропонуємо алгоритм процесу доповнення маршруту, що складатиметься з п'яти етапів:

1. Отримання інформації про нового пасажирів. На цьому етапі важливо одержати від пасажирів інформацію про точку відправлення та точку призначення.

2. Оцінювання наявних маршрутів. Цей етап охоплює два підетапи:

2.1. Аналіз доступних маршрутів із точки відправлення до точки призначення.

2.2. Оцінювання часу подорожі, вартості та зручності кожного маршруту.

3. Вибір найоптимальнішого маршруту. Цей етап пропонуємо теж поділити на два кроки:

3.1. Вибір маршруту, який найбільше відповідає потребам нового пасажирів (найшвидший, найзручніший або найменш вартісний).

3.2. У випадку відсутності такого маршруту система переходить до наступного етапу.

4. Доповнення наявного маршруту або створення нового. На цьому етапі важливо виконати такі кроки:

4.1. Додавання нової зупинки на наявний маршрут, яка задовольняє потреби нового пасажирів.

4.2. Якщо неможливо додати нову зупинку на наявний маршрут, система переходить до створення нового маршруту, який обслуговуватиме точки відправлення та призначення нового пасажирів.

5. Оновлення графіка та розкладу. На цьому етапі важливо оновити графік та розклад руху транспортного засобу з урахуванням затримки на новій зупинці чи просто побудувати новий графік та розклад руху нового маршруту.

Для розуміння логіки алгоритму та його кроків візуалізовано цей процес та кроки вибору маршруту та його доповнення для залучення нового пасажирів (рис. 8).

Природно, що в умовах звичайного міста збільшення довжини маршруту негативно впливатиме на довкілля. В умовах концепції розумного міста запропоновану систему розробляють і впроваджують, щоб зі збільшенням довжини маршруту транспортного засобу відбувалося відповідно зменшення кількості викидів діоксиду вуглецю в атмосферу. Для цього пропонуємо такі підходи до досягнення поставленої мети.

1. Оптимізація маршруту. Якщо потрібно продовжити маршрут, необхідно оптимізувати маршрути на інших ділянках з урахуванням попиту на перевезення пасажирів, наприклад, зменшити кількість

транспортних засобів, використовуваних для обслуговування пасажирів відповідно до їх потреб. Це сприятиме зменшенню викидів CO₂ пропорційно до кількості скорочених транспортних засобів, а також поступово замінювати їх на низьковуглецеві електробуси.

2. Підвищення енергоефективності транспорту. Необхідно розширювати транспортну мережу, закупаючи екологічно чистіші транспортні засоби, такі як електричні або гібридні автобуси із меншими викидами CO₂ порівняно з традиційними транспортними засобами з двигунами внутрішнього згорання.

3. Стимулювання використання громадського транспорту. Продовження маршруту, навпаки, сприятиме зростанню зручності та доступності громадського транспорту, що зменшуватиме потребу мешканців використовувати приватні автомобілі на вулицях міста, адже їм треба ще знайти місце, де запаркувати його, оплатити час перебування на паркінгу для автотранспорту.

4. Ефективне використання ресурсів. Продовжувати маршрут необхідно так, щоб забезпечувати ефективніше використання транспортних засобів, які вже перебувають на маршруті, зменшуючи час, який вони їздять порожніми чи очікують на кінцевих зупинках. Загалом, оптимізація експлуатації транспортних засобів є дієвим чинником зменшення викидів діоксиду вуглецю.



Рис. 8. Візуалізація запропонованого алгоритму процесу додавання нового пасажир

Отже, на підставі результатів кореляційно-регресійного аналізу залежностей викидів діоксиду вуглецю в атмосферу, які генерують пересувні джерела забруднення, до складу яких входять громадські транспортні засоби (автобуси, тролейбуси та трамваї), запропоновані концептуальні положення створення інтелектуальної системи організації низьковуглецевих пасажирських перевезень у розумному місті відображено за допомогою діаграм активності, станів та розгортання. Для оптимізації маршрутів транспортної системи громадських перевезень вперше запропоновано її реалізацію через концепцію додавання нового пасажир, доповнення маршруту та адаптування мереж гро-

мадського транспорту відповідно до потреб споживачів та попиту на перевезення для досягнення завдань концепції розумного міста – зменшення викидів діоксиду вуглецю в атмосферу. Наукова новизна запропонованої концепції інтелектуальної системи полягає у використанні інтегрованого підходу до оптимізації маршрутів транспортних засобів у розумному місті з метою зменшення викидів діоксиду вуглецю в атмосферу. Використання інтегрованого підходу дало змогу у запропонованій системі поєднати методи та засоби з різних галузей, таких як транспортна логістика, оптимізація маршрутів, екологічна сталість, технології інформаційного забезпечення тощо. Цей інтегрований підхід забезпечує комплексний погляд на вирішення проблеми зменшення викидів CO₂. Також система орієнтується на концепцію розумного міста, що зумовлює використання передових інноваційних технологій до аналізу даних для підвищення ефективності та сталості транспортних систем. Система акцентує на екологічно сталому розвитку транспортних систем, спрямовуючи зусилля на зменшення викидів CO₂ та інших шкідливих речовин у повітря. До складу системи входять сучасні технології, аналітичні методи та інтелектуальні інструменти, покликані оптимізувати маршрути громадського транспорту та забезпечити її зручність та доступність для пасажирів. Окрім цього, система аналізує великий обсяг інформації про пасажиропотоки, трафік, погодні умови тощо, що дає змогу приймати ефективні та оптимальні рішення з погляду екологічної сталості.

Висновки

Результати дослідження підтверджують існування функціональної залежності між обсягами перевезень пасажирів громадським транспортом загального користування та обсягами викидів діоксиду вуглецю в атмосферне повітря від пересувних джерел забруднення, до складу яких входять всі види як автомобільного, так і електротранспорту. Оскільки об'єктом для статистичного аналізу були пасажирські перевезення в обласному місті з населенням менше ніж 1 млн зареєстрованих мешканців та розвиненою мережею громадського транспорту, рекомендовано для зниження викидів вуглекислого газу в транспортному секторі спиратися на концепцію сталого розвитку міст та впроваджувати принципи концепції розумного міста, згідно із якою оптимізація мережі громадського транспорту покликана сформувати для мешканців привабливішу альтернативу водіння транспортного засобу. Перспективою подальших досліджень є розроблення програмних модулів для реалізації інтелектуальної системи організації низьковуглецевих пасажирських перевезень у розумному місті.

Список літератури

1. Hoffer, J., George, J., & Valacich, J. S. (2013). *Modern Systems Analysis and Design*. Pearson Education, Ltd.
2. Katrenko, I., Krislata, O., Veres, O., Oborska, T., Basyuk, A., Vasyliuk, I., Rishnyak, N., Demyanovskyi, O., & Meh, I. (2020). Development of traffic flows and smart parking system for smart city. *CEUR Workshop Proceedings, 2604*, 730–745.
3. Bublyk, M., Udovychenko, T., & Medvid, R. (2019). Concept of smart specialization in the context of the development of Ukraine's economy. *Economics. Ecology. Socium, 3*(2), 55–61.
4. Lytvyn, V., Bublyk, M., Vysotska, V., & Matseliukh, Y. (2022). Visual simulation technology for passenger flows in the public transport field at Smart City. *Radio Electronics, Computer Science, Control, 4*(4), 106–21. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10>.
5. Lim, Y., Edelenbos, J., & Gianoli, A. (2023). What is the impact of smart city development? Empirical evidence from a Smart City Impact Index. *Urban Governance, 4*, 104–122. <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2023.11.003>.
6. Lin, H., Wang, W., Zou, Y., & Chen, H. (2023). An evaluation model for smart grids in support of smart cities based on the Hierarchy of Needs Theory. *Global Energy Interconnection, 6*(5), 634–644. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.10.009>.
7. Koshtura, D., Bublyk, M., Matseliukh, Y., Dosyn, D., Chyrun, L., Lozynska, O., Karpov, I., Peleshchak, I., Maslak, M., & Sachenko, O. (2020). Analysis of the demand for bicycle use in a smart city based on machine learning. *CEUR workshop proceedings, 2631*, 172–183. <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper13.pdf>.

8. Boreiko, O., & Teslyuk, V. (2016). Structural model of passenger counting and public transport tracking system of smart city. *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, Proceedings of International Conference*, 124–126. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2016.7507533>.
9. Bublyk, M. (2013). Economic evaluation of technogenic losses of business entities on fuzzy logic based opportunities. *Zarządzanie organizacja w warunkach niepewności teoria i praktyka*, 19–29. <https://www.ibuk.pl/fiszka/76/zarzadzanie-w-warunkach-niepewnosci.html>.
10. Wang, H., & Wang, Y. (2024). Smart Cities Net Zero Planning considering renewable energy landscape design in Digital Twin. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 63, 103629. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103629>.
11. Wolniak, R., & Jonek-Kowalska, I. (2021). The level of the quality of life in the city and its monitoring. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 34(3), 376–398. <https://doi.org/10.1080/13511610.2020.1828049>
12. Бублик, М. (2012). Механізм регулювання техногенних збитків промислових підприємств: логістика рециркулювання як інструмент його застосування. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. “Логістика”*, (749), 530–537.
13. Guenduez, A., Mergel, I., Schedler, K., Fuchs, S., & Douillet, C. (2024). Institutional work in smart cities: Interviews with smart city managers. *Urban Governance*, 2(1), 104–122. <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.01.003>.
14. Bublyk, M., Kowalska-Styczeń, A., Lytvyn, V., & Vysotska, V. (2021). The Ukrainian economy transformation into the circular based on fuzzy-logic cluster analysis. *Energies*, 14(18), 5951. <https://doi.org/10.3390/en14185951>.
15. Dai, Y., Hasanefendic, S., & Bossink, B. (2024). A systematic literature review of the smart city transformation process: The role and interaction of stakeholders and technology. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105112. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105112>.
16. Bublyk, M., & Matseliukh, Y. (2021). Small-batteries utilization analysis based on mathematical statistical methods in challenges of circular economy. *CEUR workshop proceedings*, 2870, 1594–1603.
17. Vanli, T., & Akan, T. (2023). Mapping synergies and trade-offs between smart city dimensions: A network analysis. *Cities*, 142, 104527. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104527>
18. Jonek-Kowalska, I. (2022). Towards the reduction of CO₂ emissions. paths of pro-ecological transformation of energy mixes in european countries with an above-average share of coal in energy consumption. *Resources Policy*, 77, 102701. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102701>.
19. Matseliukh, Y., Vysotska, V., & Bublyk, M. (2020). Intelligent system of visual simulation of passenger flows. *CEUR Workshop Proceedings*, 2604, 906–920.
20. Kim, J. S., & Feng, Y. (2024). Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China. *Cities*, 147, 104832. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104832>.
21. Nath, N., Nitnai, R., Manabe, R., & Murayama, A. (2023). A global-scale review of smart city practice and research focusing on residential neighbourhoods. *Habitat International*, 142, 102963. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102963>.
22. Nguyen, H., Nawara, D., & Kashef, R. (2024). Connecting the indispensable roles of iot and artificial intelligence in smart cities: a survey, *Journal of Information and Intelligence*. <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2024.01.003>
23. Podlesna, L., Bublyk, M., Grybyk, I., Matseliukh, Y., Burov, Y., Kravets, P., Lozynska, O., Karpov, I., Peleshchak, I., & Peleshchak, R. (2020). Optimization model of the buses number on the route based on queueing theory in a Smart City. *CEUR Workshop Proceedings*, 2631, 502–515. <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper37.pdf>.
24. Sharifi, A., Allam, Z., Bibri, S., & Khavarian-Garmsir, A. (2024). Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs. *Cities*, 146, 104659. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104659>.
25. Shiu, S. (2024). Ageing in a smart city poses concerns on sustainability from a model perspective. *Aging and Health Research*, 4(1), 100179. <https://doi.org/10.1016/j.ahr.2023.100179>.
26. Spicer, Z., Goodman, N., & Wolfe, D. A. (2023). How “smart” are smart cities? Resident attitudes towards smart city design. *Cities*, 141, 104442. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104442>
27. Tang, J., Li, Y. (2024). Study on the impact of smart energy on carbon emissions in smart cities from single and holistic perspectives – Empirical evidence from China. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105145>.

28. Chen, Y., Chen, S., & Miao, J. (2023). Does smart city pilot improve urban green economic efficiency: Accelerator or inhibitor, *Environmental Impact Assessment Review*, 104, 107328. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107328>.
29. Головне управління статистики у Львівській області <https://www.lv.ukrstat.gov.ua/>
30. Портал “Панель міста”. https://dashboard.city-adm.lviv.ua/perevezennya_pasazhyriv_miskym_transportom
31. Дія. Відкриті дані Центр компетенцій в сфері відкритих даних <https://data.gov.ua/organization/4218ee10-9c89-4e12-8df5-1734bdb4790e>
32. Показники роботи громадського транспорту. Набір даних <https://data.gov.ua/dataset/pokaznyky-roboty-hromadskoho-transportu>

Reference

1. Hoffer, J., George, J., & Valacich, J. S. (2013). *Modern Systems Analysis and Design*. Pearson Education, Ltd.
2. Katrenko, I., Krislata, O., Veres, O., Oborska, T. Basyuk, A., Vasyliuk, I., Rishnyak, N., Demyanovskyi, O., & Meh, I. (2020). Development of traffic flows and smart parking system for smart city. *CEUR Workshop Proceedings*, 2604, 730–745.
3. Bublyk, M., Udovychenko, T., & Medvid, R. (2019). Concept of smart specialization in the context of the development of Ukraine's economy. *Economics. Ecology. Socium*, 3(2), 55–61.
4. Lytvyn, V., Bublyk, M., Vysotska, V., & Matseliukh, Y. (2022). Visual simulation technology for passenger flows in the public transport field at Smart City. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 106–121. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10>.
5. Lim, Y., Edelenbos, J., & Gianoli, A. (2023). What is the impact of smart city development? Empirical evidence from a Smart City Impact Index. *Urban Governance*, 4, 104–122. <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2023.11.003>.
6. Lin, H., Wang, W., Zou, Y., & Chen, H. (2023). An evaluation model for smart grids in support of smart cities based on the Hierarchy of Needs Theory. *Global Energy Interconnection*, 6(5), 634–644. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2023.10.009>.
7. Koshtura, D., Bublyk, M., Matseliukh, Y., Dosyn, D., Chyrun, L., Lozynska, O., Karpov, I., Peleshchak, I., Maslak, M., & Sachenko, O. (2020). Analysis of the demand for bicycle use in a smart city based on machine learning. *CEUR workshop proceedings*, 2631, 172–183. <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper13.pdf>.
8. Boreiko, O., & Teslyuk, V. (2016). Structural model of passenger counting and public transport tracking system of smart city. *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, Proceedings of International Conference*, 124–126. <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2016.7507533>.
9. Bublyk, M. (2013). Economic evaluation of technogenic losses of business entities on fuzzy logic based opportunities. *Zarządzanie organizacja w warunkach niepewności teoria i praktyka*, 19–29. <https://www.ibuk.pl/fizyka/76/zarzadzanie-w-warunkach-niepewnosci.html>.
10. Wang, H., & Wang, Y. (2024). Smart Cities Net Zero Planning considering renewable energy landscape design in Digital Twin. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 63, 103629. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103629>.
11. Wolniak, R., & Jonek-Kowalska, I., (2021). The level of the quality of life in the city and its monitoring. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 34(3), 376–398. <https://doi.org/10.1080/13511610.2020.1828049>
12. Bublyk, M.I. (2012). Mechanism to regulate the technogenic damage of industrial enterprises: recycling logistics as an instrument of its application. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University, Logistics*, 749, 530–537.
13. Guenduez, A., Mergel, I., Schedler, K., Fuchs, S., & Douillet, C. (2024). Institutional work in smart cities: Interviews with smart city managers. *Urban Governance*, 2(1), 104–122. <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.01.003>.
14. Bublyk, M., Kowalska-Styczeń, A., Lytvyn, V., & Vysotska, V. (2021). The Ukrainian economy transformation into the circular based on fuzzy-logic cluster analysis. *Energies*, 14(18), 5951. <https://doi.org/10.3390/en14185951>.
15. Dai, Y., Hasanefendic, S., & Bossink, B. (2024). A systematic literature review of the smart city transformation process: The role and interaction of stakeholders and technology. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105112. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105112>.

16. Bublyk, M., & Matseliukh, Y. (2021). Small-batteries utilization analysis based on mathematical statistical methods in challenges of circular economy. *CEUR workshop proceedings*, 2870, 1594–1603.
17. Vanli, T., & Akan, T. (2023). Mapping synergies and trade-offs between smart city dimensions: A network analysis. *Cities*, 142, 104527. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104527>
18. Jonek-Kowalska, I. (2022). Towards the reduction of CO₂ emissions. paths of pro-ecological transformation of energy mixes in european countries with an above-average share of coal in energy consumption. *Resources Policy*, 77, 102701. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102701>.
19. Matseliukh, Y., Vysotska, V., & Bublyk, M. (2020). Intelligent system of visual simulation of passenger flows. *CEUR Workshop Proceedings*, 2604, 906–920.
20. Kim, J. S., & Feng, Y. (2024). Understanding complex viewpoints in smart sustainable cities: The experience of Suzhou, China. *Cities*, 147, 104832. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104832>.
21. Nath, N., Nitanaï, R., Manabe, R., & Murayama, A. (2023). A global-scale review of smart city practice and research focusing on residential neighbourhoods. *Habitat International*, 142, 102963. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102963>.
22. Nguyen, H., Nawara, D., & Kashef, R. (2024). Connecting the indispensable roles of iot and artificial intelligence in smart cities: a survey, *Journal of Information and Intelligence*. <https://doi.org/10.1016/j.jiixd.2024.01.003>
23. Podlesna, L., Bublyk, M., Grybyk, I., Matseliukh, Y., Burov, Y., Kravets, P., Lozynska, O., Karpov, I., Peleshchak, I., & Peleshchak, R. (2020). Optimization model of the buses number on the route based on queueing theory in a Smart City. *CEUR Workshop Proceedings*, 2631, 502–515. <https://ceur-ws.org/Vol-2631/paper37.pdf>.
24. Sharifi, A., Allam, Z., Bibri, S., & Khavarian-Garmsir, A. (2024). Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs. *Cities*, 146, 104659. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104659>.
25. Shiu, S. (2024). Ageing in a smart city poses concerns on sustainability from a model perspective. *Aging and Health Research*, 4(1), 100179. <https://doi.org/10.1016/j.ahr.2023.100179>.
26. Spicer, Z., Goodman, N., & Wolfe, D. A. (2023). How “smart” are smart cities? Resident attitudes towards smart city design. *Cities*, 141, 104442. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104442>
27. Tang, J., & Li, Y. (2024). Study on the impact of smart energy on carbon emissions in smart cities from single and holistic perspectives – Empirical evidence from China. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105145>.
28. Chen, Y., Chen, S., & Miao, J. (2023). Does smart city pilot improve urban green economic efficiency: Accelerator or inhibitor, *Environmental Impact Assessment Review*. 104, 107328. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107328>.
29. Main Department of Statistics in Lviv Region <https://www.lv.ukrstat.gov.ua/>
30. City Panel portal https://dashboard.city-adm.lviv.ua/perevezennya_pasazhyriv_miskym_transportom
31. Action. Open data Competence center in the field of open data <https://data.gov.ua/organization/4218ee10-9c89-4e12-8df5-1734bdb4790e>
32. Performance indicators of public transport. Data set <https://data.gov.ua/dataset/pokaznyky-roboty-hromadskoho-transportu>

**MODELING OF PASSENGER FLOWS ANALYSIS SYSTEM
OF LOW-CARBON TRANSPORTATION IN A SMART CITY****Yurii Matseliukh¹, Vasyl Lytvyn²**

Lviv Polytechnic National University,
Information Systems and Networks Department,
Lviv, Ukraine

¹ indeed.post@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1721-7703

² vasy.l.v.lytvyn@lpnu.ua; ORCID: 0000-0002-9676-0180

© *Matseliukh Y., Lytvyn V., 2024*

The paper examines the impact of the increase in passenger traffic in public transport on environmental pollution, as well as the search for ways to reduce emissions of carbon-containing compounds caused by the growth of the planet's population, the number of vehicles that transport them, and the amount of emissions that these vehicles generate. The object of research is the system of passenger transportation in a smart city. Through correlation-regression analysis of passenger flows in a regional city with a population of fewer than 1 million registered residents, the paper identifies a functional dependence between the volume of passenger transportation by public transport and the volume of carbon dioxide emissions into the atmospheric air from mobile sources of pollution, which include all types of automobile and electric transport. It was established that the optimization of the public transport network plays a decisive role in the implementation of low-carbon transportation. Conceptual provisions for the creation of an intelligent system for the organization of low-carbon passenger transportation in a smart city were proposed, which were displayed using activity, state, and deployment diagrams. The optimization of the routes of the public transport system is proposed to be implemented through the concept of adding a new passenger, supplementing the route, and adapting public transport networks to the needs of consumers and the demand for transport to achieve the goals of the concept of a smart city - reducing carbon dioxide emissions into the atmosphere. The scientific novelty of the proposed intelligent system concept consists of the use of an integrated approach to the optimization of vehicle routes in a smart city to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere.

Key words: passenger traffic; smart city; low-carbon transportation system; system analysis; correlation-regression analysis; theory of systems modeling