

УДК 004.4.7

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.19

ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ ТА ОЦІНКИ ПАСАЖИРОПОТОКУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Бондаренко Д. О., Ушакова І. О.

Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця

Анотація. Однією з актуальних проблем функціонування транспортних систем є створення автоматизованої системи масового обслуговування пасажиропотоків, зокрема в метрополітені. Аналіз пасажиропотоків з використанням автоматизованої системи дозволить вирішити багато завдань проектування, експлуатації, планування роботи метро, скоротити час на обслуговування пасажирів й оптимізувати пасажирські потоки. Розроблення функціональної моделі аналізу та оцінки пасажиропотоку громадського транспорту спрямоване на створення програмного продукту, який дозволяє оптимізувати роботу як вже наявних станцій метрополітену, так і тих, що будуть зведені в майбутньому.

Ключові слова: функціональна модель, система масового обслуговування, програмний продукт, аналіз даних, пасажиропотік.

Вступ

Міський пасажирський транспорт здійснює важливу функцію в економіці будь-якої країни, регіону або міста, оскільки саме маршрутний транспорт є основним способом переміщення пасажирів, де спостерігається високий попит пасажиропотоку.

Пасажиропотік – впорядковане транспортною мережею переміщення пасажирів, кількісно виражене в обсязі перевезених пасажирів на будь-яких видах громадського (наземний, підземний, повітряний тощо) або індивідуального транспорту за одиницю часу (годину, добу, місяць або рік).

Метрополітен (метро) – вид міського (звичай) громадського транспорту. Будівництво метрополітену вимагає великих капіталовкладень, тому економічно виправдане лише в містах із великими пасажиропотоками [1].

Велике завантаження метрополітену не тільки погіршує умови перевезення пасажирів, але й скорочує терміни функціонування рухомого складу й негативно позначається на надійності його роботи. Це в майбутньому може викликати збої у роботі рухомого складу.

Організація пасажирських перевезень на метрополітені залежить від розмірів і закономірностей пасажиропотоків. Саме пасажиропотоки зумовлюють розвиток мережі метрополітену, потужність технічного оснащення, кількість транспортних засобів, розміри депо й заводів з ремонту транспортних засобів, час ремонту з найменшими економічними втратами тощо.

Відповідно до пасажиропотоків розподіляються транспортні засоби вздовж ліній, регулюється випуск транспортних засобів за годинами доби, встановлюється режим роботи станцій та ескалаторів тощо.

Аналіз пасажиропотоків метрополітену є однією з найважливіших і актуальних проблем, оскільки на підставі даних про пасажиропотоки вирішуються завдання проектування, експлуатації та планування роботи метрополітену.

Аналіз публікацій

Дослідження пасажиропотоку метрополітену для вирішення найважливіших завдань ґрунтується на побудові його математичної моделі. На сьогодні для забезпечення роботи метрополітену використовуються детерміновані моделі [2, 3], але досить важко оцінити їхню точність і надійність [5]. Прогнозування пасажиропотоку здійснюється за середнім значенням вхідного пасажиропотоку попередніх років, що значно збільшує похибку, тому що не враховується той факт, що пасажиропотік є випадковим процесом.

У нашій роботі процес пасажироперевезень у Харківському метрополітені моделюється системою масового обслуговування [6].

Мета та постановка завдання

Метою є розроблення функціональної моделі програмного продукту, основним призначенням якої є вивчення пасажиропотоку станції метрополітену та надання рекомендацій щодо її експлуатації. Програмний продукт має бути системою оброблення даних

дослідження пасажиропотоку однієї зі станцій метро. Користувачем системи є фахівець з аналізу й прогнозування процесів обслуговування пасажирів на метрополітені.

Виклад основного матеріалу

Модель станції метро має декілька систем масового обслуговування з чергами: квиткові каси, турнікети, металошукачі, ескалатори, вестибюлі та платформи станції метро (два вестибюлі з двома входами та двома виходами, а також дві платформи, на які прибувають потяги).

Пасажири потрапляють до вестибюля через один з двох входів, проходять крізь металошукачі (якщо вони встановлені на станції), потім є три варіанти дій:

- пасажир вже має квиток, тому він йде до турнікетів;
- у пасажирів немає квитка, він купує квиток у касі (або в автоматі з продажу квитків);
- пасажир прямує на вихід з вестибюля – це люди, які переходять дорогу під землею.

На цьому етапі пасажирів з певною ймовірністю може бути запропоновано пройти персональний огляд ще до проходження турнікетів.

Наступний етап – проходження пасажирів крізь турнікети, після цього вони потрапляють на ескалатори. Після спуску ескалаторами пасажирів вишиковуються для очікування поїзда (одного з двох), після завершення певного терміну часу здійснюється посадка до поїзда і пасажирів залишають платформу, зайдшовши до поїзда.

Ця модель, крім посадки пасажирів, також реалізує їхній вихід з поїзда. Після прибуття поїзда пасажирів виходять з нього, утворюють два потоки, прямуючи до одного з двох виходів зі станції, і прямують до ескалаторів, проходять крізь турнікети та виходять з вестибюля.

Також в моделі враховані пасажирів, які виходять з одного поїзда і заходять до іншого (приклад ситуації, коли людина випадково проїхала свою зупинку). Пасажирів, які після виходу з поїзда залишаються певний час на платформі не враховані в моделі, оскільки вони суттєво не впливають на загальну модель.

Моделювання трафіка систем масового обслуговування (СМО) на прикладі пасажиропотоку однієї станції метро за допомогою середовища імітаційного моделювання

ANYLOGIC з урахуванням логіки поведінки пасажирів для різної інтенсивності пасажиропотоку наведено на рис. 1. Модель станції метро має декілька систем масового обслуговування з чергами: це автомати з продажу квитків, турнікети, ескалатори тощо.

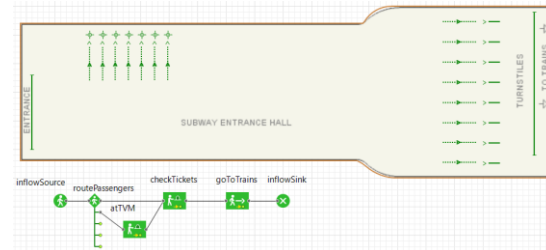


Рис. 1. Загальний вид моделі

Пасажирів потрапляють до станції метро крізь вхід, позначений на схемі написом ENTRANCE, далі мають два варіанти дій: пройти крізь турнікети, що позначені пунктирними лініями зі стрілками в правій частині рисунка (TURNSTILES), якщо вони мають картку метрополітену; або спочатку купити квиток в автоматах, що наведені на схемі зліва та позначені пунктирними лініями з точкою вкінці.

Вибравши один з наведених варіантів, пасажир проходить крізь турнікети та прямує до потрібного поїзда (TO TRAINS).

Модель логіки поведінки пасажирів, що здійснюють переміщення вздовж станції метро, наведена на рис. 2 (вона є процесною діаграмою – загальною конструкцією, що використовується для визначення процесів у дискретно-подієвому моделюванні).

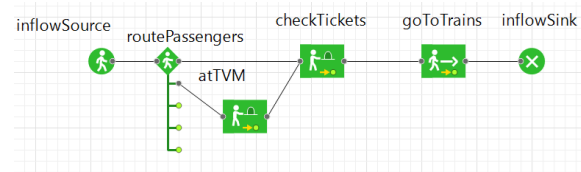


Рис. 2. Логіка поведінки пасажирів

На рис. 1.2 використані такі позначки:

inflowSource – вхід до станції метрополітену; routePassengers – розгалуження логіки; atTVM – купівля квитка в автоматі та наступна його перевірка в системі турнікета; checkTickets – проходження турнікета за наявності постійної карти метрополітену або заздалегідь купленого квитка; goToTrains – вихід до потягів; inflowSink – вихід.

Під час запуску моделі з заданою інтенсивністю n_1 люд/год і в процесі її роботи не

створюється ніяких «заторів» серед пасажиропотоку протягом будь-якого відрізка часу (рис. 3).

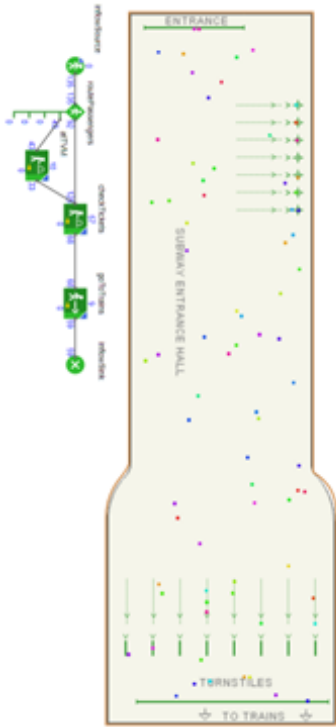


Рис. 3. Запуск моделі за інтенсивності пасажиропотоку в n_1 люд/год

У разі збільшення інтенсивності пасажиропотоку вдвічі з боку входу завантаженість станції збільшується, але заторів не відбувається (рис. 4).

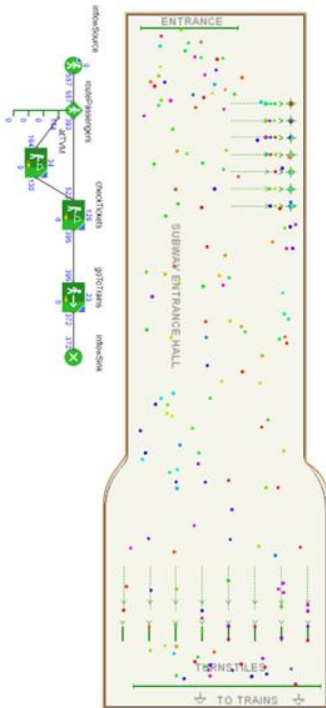


Рис. 4. Запуск моделі за інтенсивності пасажиропотоку в n_2 люд/год

Діаграма варіантів використання в UML – це діаграма, яка відображає відносини між акторами та прецедентами і є складовою частиною моделі прецедентів, що дозволяє описати систему на концептуальному рівні [6].

Для опису функціональної моделі процесу діяльності автоматизованої системи моделювання пасажиропотоку в метро побудовано діаграму використання (рис. 5).

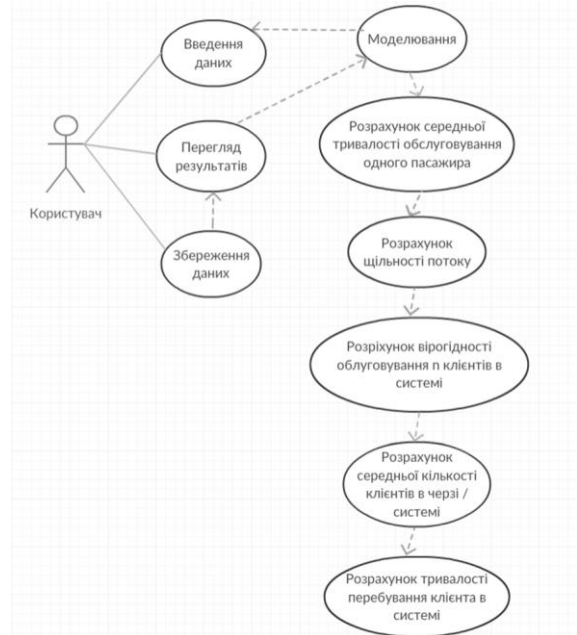


Рис. 5. Діаграма використання

Кожна система масового обслуговування (СМО) складається з певної кількості одиниць обслуговування (приладів, пристроїв, пунктів, станцій), які називаються каналами обслуговування. Це можуть бути лінії зв'язку, робочі точки, обчислювальні машини, продавці тощо.

Вхідними даними автоматизованої системи моделювання пасажиропотоку є такі елементи:

- інтенсивність вхідного потоку: вхідний потік є сукупністю вимог, які надходять до системи та потребують обслуговування; вхідний потік вимог визначається з метою встановлення його закономірностей і подальшого поліпшення якості обслуговування [7]; не може бути від'ємним та має бути більше ніж 0;
- інтенсивність вихідного потоку: сукупність обслужених і втрачених заявок у системі; не може бути від'ємним та має бути більше ніж 0;

– кількість каналів обслуговування: обслуговувальний пристрій або засіб (наприклад, людина), що здатні в кожний момент часу обслуговувати тільки одну вимогу; пропускна спроможність каналу – один з визначальних параметрів для вирішення завдань масового обслуговування; не може бути від'ємним та має бути більше ніж 0;

– можлива кількість пасажирів за годину: приблизна кількість заяв на обслуговування, що будуть надходити до системи в часовий проміжок, що становить годину; не може бути від'ємним та має бути більше ніж 0.

Вхідний потік – це найпростіший потік заявок, що має властивості стаціонарності, ординарності та відсутності наслідку.

1. Властивість стаціонарності виражає незмінність імовірного режиму потоку за часом. Це означає, що кількість вимог, що надходять до системи в однакові проміжки часу, має бути постійною. Наприклад, кількість вагонів, що надходять під навантаження в середньому на добу, має бути однаковою для різних періодів часу.

2. Відсутність наслідку, яке обслуговує взаємозалежність надходження тієї чи іншої кількості вимог на обслуговування в непересічні проміжки часу. Це означає, що кількість вимог, що надходять у конкретний відрізок часу, не залежить від кількості вимог, що обслуговувались у попередній проміжок часу.

3. Властивість ординарності, яка виражає практичну неможливість одночасної дії двох або більше вимог (ймовірність такої події незмірно мала щодо проміжку часу, який розглядався, коли останній спрямовують до нуля).

Вихідний потік – це потік вимог, які залишають систему, вимоги в ньому можуть бути як обслужені, так і не обслужені. Структура потоку може мати більше значення для багатофазних систем, де цей потік стає вхідним для наступної фази обслуговування. Розподіл вимог у вихідному потоці в часі залежить від щільності вхідного потоку і характеристик роботи пристроїв обслуговування.

Вихідними даними автоматизованої системи моделювання пасажиропотоку в метро є результати математичних обчислень, що здійснювалися на підставі початкових даних.

Таким чином, вихідними даними є такі елементи:

– щільність потоку – середня кількість подій на одиницю часу;

– вірогідність того, що в системі масового обслуговування n клієнтів знаходяться на обслуговуванні – розрахункова вірогідність знаходження заданої кількості клієнтів у системі на обслуговуванні;

– середня кількість клієнтів (пасажирів) у черзі на обслуговування – розрахункове приблизне значення середньої кількості клієнтів, що очікують на обслуговування;

– середня тривалість перебування клієнта (заяви) в черзі на обслуговування – приблизна часовий проміжок, що визначає тривалість перебування клієнта системи в черзі, очікуючи на своє обслуговування;

– середня тривалість перебування клієнта в системі масового обслуговування – приблизна часовий проміжок, що визначає середню тривалість знаходження клієнта в черзі та на обслуговуванні (в системі загалом).

Базою даних розроблюваного програмного застосунку є текстовий файл типу .doc, де зберігаються вхідні та вихідні дані системи.

Всього в текстовому файлі записується 22 рядка, що зберігають в собі назву того розрахунку, що наведено в числах, та самі результати цього розрахунку:

1 значення вхідного потоку (λ) – кількість людей на обслуговуванні в системі; тип integer;

2 значення вихідного потоку (μ) – кількість людей, що залишають систему після обслуговування; тип integer;

3 кількість каналів обслуговування (C) – кількість каналів обслуговування, що знаходяться в цій системі; тип integer;

4 можлива кількість пасажирів на годину (n) – приблизна кількість пасажирів системи, що обслуговуються за одиницю часу – годину; тип integer;

5 щільність потоку (ρ): для розрахування використовуються λ та μ , типом даних є float;

6 вірогідність того, що в системі масового обслуговування n клієнтів знаходяться на обслуговуванні (P_n): для розрахування використовуються значення n , C та ρ , типом даних є float;

7 середня кількість пасажирів у черзі на обслуговування ($L_{оч}$): для розрахування використовуються значення ρ та n , типом даних є float;

8 середня кількість пасажирів, що знаходяться в системі масового обслуговування ($L_{сист}$): для розрахування використовуються значення $L_{оч}$ та ρ , типом даних є float;

9 середня тривалість перебування клієнта (заяви на обслуговування) в черзі ($T_{оч}$):

для розрахування використовуються значення $L_{оч}$ та λ , типом даних є float;

10 середня тривалість перебування клієнта в системі масового обслуговування ($T_{сист}$): для розрахування використовуються значення $L_{сист}$ та λ , типом даних є float.

Неможливо навести жорстку схему алгоритму проектування, яка поширювалася б без змін на всі об'єкти проектування. Однак системний підхід до процесу проектування дозволив розробити процедурну модель процесу проектування, за допомогою якої можна визначити основні процедури й операції проектування, завдання та методи їхнього вирішення, джерела інформації [8].

Цей підхід для моделювання та реалізації автоматизованої системи був вибраний, оскільки система моделювання пасажиропотоку метрополітену здійснює деякі математичні обчислення, не застосовує інтернет, а лише обробляє помірну кількість числової інформації, працюючи з базою даних. Розв'язання такої задачі потребує написання лише невеликої кількості процедур, які здійснювалися б програмою. Тобто для створення повної функціональної бібліотеки немає потреби ускладнювати реалізацію, використовуючи об'єктно-орієнтоване програмування, і будувати відповідну модель, оскільки процедурна реалізація є більш придатною для цього виду розроблення [9].

Систему метрополітену можна визначити як систему масового обслуговування, де:

- вхідний потік пасажирів на станції випадковий і підпорядковується деякому статистичному закону розподілу;
- проїзд пасажирів до потрібної станції є поетапним його обслуговуванням службами метрополітену – пропуск на станцію, спуск ескалатором, очікування поїзда на пероні, посадка, поїздка до потрібної станції, вихід або пересадка на іншу лінію з повторенням всіх дій;
- вихідний потік пасажирів на станціях також випадковий;
- кожен пасажир сплачує вартість проїзду, що є прибутком метрополітену, а функціонування метро – це витрати на його обслуговування.

Блок-схема алгоритму роботи застосунку наведена на рис. 6.

Таким чином, у процесі розроблення програмного продукту будуть вирішені такі завдання:

- автоматизація процесу моделювання пасажиропотоку в метро за допомогою розробленого програмного продукту;
- оброблення інформації про вхідні та вихідні потоки пасажирів;
- визначення часу перебування пасажирів у чергах, біля автоматів з квитками, на ескалаторах.

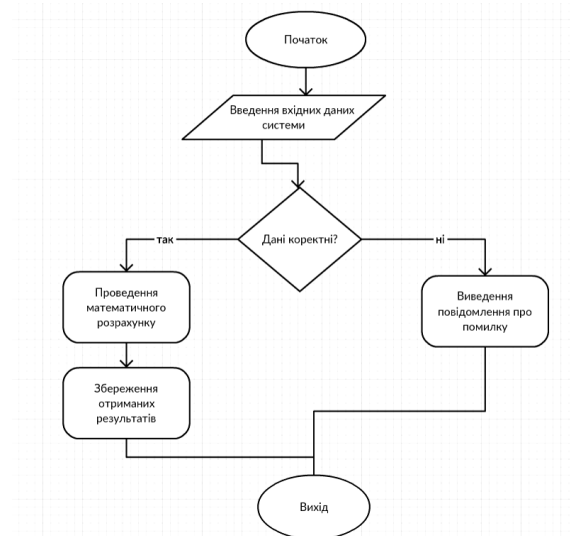


Рис. 6. Блок-схема алгоритму роботи програми

Програма призначена для роботи з користувачем в діалоговому режимі, тому має містити дружній інтерфейс.

Висновки

Наведена характеристика пасажиропотоку, його особливості для метрополітену, визначені основні моделі дослідження пасажиропотоку, які подані як системи масового обслуговування.

Проаналізовано науково-методичну літературу щодо визначення завдань масового обслуговування, методів розв'язання багатоканальних моделей.

Зазначено, що в моделі станції метро наявні декілька систем масового обслуговування з чергами: це автомати з продажу квитків, турнікети, ескалатори тощо.

Наведено графічний опис процесу діяльності метрополітену, побудовано діаграми діяльності та використання за допомогою уніфікованої мови моделювання UML (Unified Modeling Language), що наочно демонструють послідовність дій під час роботи метрополітену.

Література

1. Більченко А. В. Будівництво транспортних тунелів і метрополітенів: навч. посібник, 2012. 183 с.
2. Sztrik J. Basic Queueing Theory. Debrecen: University of Debrecen, Faculty of Informatics, 2012. 193 p.
3. Frode B. Queueing systems: modeling, analysis and simulation. Oslo: Department of Informatics, University of Oslo, 1998. 53 p.
4. Al-Matar N. Theories and applications related to queueing systems. International Journal of Advances in Electronics and Computer Science, 2017. V. 4.1. 2. P. 7–10.
5. Kleinrock L. Queueing Systems. Published by Wiley-Interscience, 1975. 417 p.
6. UML для бізнес-моделювання. 2019. URL: <https://evergreens.com.ua/ua/articles/uml-diagrams.html> (дата звернення: 18.02.2023).
7. Saaty Thomas L. Elements of Queueing Theory: With Applications. Dover Pubns, 1983. 423 p.
8. Walkenbach J. Power Programming with VBA. Wiley, 2013. 1104 p.
9. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування: навч. посібник / В. Б. Толубко та ін. Київ, 2018. 175 с.

References

1. Bil'chenko A. V. Budivnytstvo transportnykh tuneliv i metropoliteniv: navch. posibnyk, 2012. 183 s.
2. Sztrik J. Basic Queueing Theory. Debrecen: University of Debrecen, Faculty of Informatics, 2012. 193 p.
3. Frode B. Queueing systems: modeling, analysis and simulation. Oslo: Department of Informatics, University of Oslo, 1998. 53 p.
4. Al-Matar N. Theories and applications related to queueing systems. International Journal of Advances in Electronics and Computer Science, 2017. V. 4.1. 2. P. 7–10.
5. Kleinrock L. Queueing Systems. Published by Wiley-Interscience, 1975. 417 p.
6. UML dlya biznes-modelyuvannya. 2019. URL: <https://evergreens.com.ua/ua/articles/uml-diagrams.html> (accessed: 18.02.2023).
7. Saaty Thomas L. Elements of Queueing Theo-ry: With Applications. Dover Pubns, 1983. 423 p.
8. Walkenbach J. Power Programming with VBA. Wiley, 2013. 1104 p.
9. Imitatsiyne modelyuvannya system masovoho obsluhovuvannya: navch. posibnyk / V. B. Tolubko. Kyiv, 2018. 175 s.

Бондаренко Дмитро Олександрович, к.т.н., доц. каф. інформаційних систем, тел. +380 50 262 14 48, dmytro.bondarenko@hneu.net

Ушакова Ірина Олексіївна, к.е.н., доц. каф. інформаційних систем, тел. +38 066-785-09-92, iryna.ushakova@hneu.net, Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, пр. Науки, 9А, м. Харків, 61001, Україна.

Functional model of public transport passenger flow analysis and assessment

Abstract. Problem. The operation of transport systems of a large city must ensure a continuous flow of passengers. The subway occupies a special place in the city's transport system. The constant increase in the loading of the subway not only worsens the conditions of passenger transportation, but also shortens the service life of the rolling stock and negatively affects the reliability of its operation. In the future, this may cause failures of the rolling stock, which means work failures. The main factor in the development of subway systems is passenger traffic, which determines the development of the subway network, the capacity of technical equipment, the number of vehicles, the size of depots and vehicle repair plants, and the time of repair with the least economic losses. Thus, one of the urgent tasks of the functioning of transport systems is the creation of an automated system of mass passenger service, in particular in the subway. **Goal.** The tasks of this study are the analysis of the subject area, the design of the information system according to the task, the selection of the necessary tools for this development, and the methods of software implementation. Analysis of passenger flows using an automated system will allow to solve many problems of design, operation, and planning of metro work, will allow to reduce the time for passenger service and optimize passenger flows. **Methodology.** Research methods are the methods of mass service systems. **Results.** The creation of a functional model will make it possible to develop a software product for the analysis and assessment of public transport passenger traffic. **Originality. Practical value.** The software product created on the basis of the developed functional model will enable the user not only to analyze, but also to optimize the work of both existing and future metro stations.

Keywords: functional model, mass service system, software product, data analysis, passenger flow.

Bondarenko Dmytro, Ph.D., Assoc. Prof. Informaton System Department, tel. +380 50 262 14 48, dmytro.bondarenko@hneu.net, **Ushakova Iryna**, Ph.D., Assoc. Prof. Informaton System Department tel. +38 066-785-09-92, iryna.ushakova@hneu.net, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Nauky Ave., 9-A, Kharkiv, 61166, Ukraine.