

УДК 656.025.2

В. О. ВДОВИЧЕНКО, Г. О. САМЧУК

**ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНИХ ВУЗЛІВ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ**

Розглядається процес формування моделі функціонування транспортно-пересадочних вузлів. Пропонується використовувати математичне моделювання з метою урахування випадкових величин експлуатаційних параметрів формування умов функціонування транспортно-пересадочних вузлів. Графічно представлені та формалізовані впливи вхідних параметрів і факторів зовнішнього середовища на процеси, що відбуваються у транспортно-пересадочних вузлах, та критерій ефективності їх функціонування. Результати досліджень можуть бути використані при складанні синхронізованих розкладів руху міського пасажирського транспорту та зміні конструктивних параметрів зупиночних пунктів.

**Ключові слова:** транспортно-пересадочний вузол, модель, громадський транспорт, параметри, випадкові величини, сталий розвиток.

Рассматривается процесс формирования модели функционирования транспортно-пересадочных узлов. Предлагается использовать математическое моделирование с целью учета случайных величин эксплуатационных параметров формирования условий функционирования транспортно-пересадочных узлов. Графически представлены и формализованные влияния входных параметров и факторов внешней среды на процессы, происходящие в транспортно-пересадочных узлах, и критерий эффективности их функционирования. Результаты исследований могут быть использованы при составлении синхронизированных расписаний движения городского пассажирского транспорта и изменении конструктивных параметров остановочных пунктов.

**Ключевые слова:** транспортно-пересадочный узел, модель, общественный транспорт, параметры, случайные величины, устойчивое развитие.

The article deals with issues related to the development of a mathematical model of public transport interchanges functioning from a sustainable development perspective.

The results of research are presented graphically effects of input parameters and external factors on processes taking place at transport interchanges, and efficiency criteria of their functioning, and also formalization of listed influences.

As a scientific novelty for the first time it is formulated a mathematical model of public transport interchanges functioning, that includes subprocesses for both urban passenger transport and passengers, and also takes into account technical parameters of stops. The duration of certain subprocesses is considered as random variables.

The practical significance of the model consists in the fact that simulation conducted on its basis will generate an array of statistical data, using which it is possible to obtain and evaluate functional dependencies of the efficiency criterion of on input parameters and choose their optimal value. The obtained results can become the backbone for schedule synchronization and, if necessary, for changes in design parameters of stops to ensure the efficiency of urban transport interchange functioning.

**Keywords:** transport interchange, model, public transport, parameters, random variables, sustainable development.

**Вступ.** Питання забезпечення сталого розвитку [1, 2] та ресурсозбереження стали основою для формування стратегій та відповідних векторів змін у сфері матеріального виробництва та невиробничій сфері, де особливу роль відіграє транспорт. Сьогодні спостерігається вичерпання ресурсів не тільки автошляхів через ріст рівня автомобілізації населення, а і об'єктів інфраструктури міських пасажирських транспортних систем, а саме транспортно-пересадочних вузлів (ТПВ) зі збільшенням інтенсивності руху міського пасажирського транспорту (МПТ). Поряд із екстенсивними методами збільшення пропускної здатності окремих елементів за рахунок їх розбудови, поліпшення організації руху транспортних засобів у зоні ТПВ набуває особливої важливості. За рахунок синхронізації розкладу руху транспортних засобів МПТ можливо значно зменшити витрати пасажирів на очікування у ТПВ, скоротити кількість конфліктних ситуацій між учасниками руху та знизити тривалість знаходження транспортних засобів у ТПВ, що призводить до виникнення додаткових витрат палива, як результат, викидів відпрацьованих газів у довкілля. У сукупності всі зазначені негативні впливи, що мають економічний, соціальний та екологічний характер, порушують сталість функціонування ТПВ.

Вирішити завдання їх мінімізації неможливо без математичного моделювання функціонування ТПВ. Необхідність створення моделі обумовлено неможливістю проведення експериментів на реальних об'єктах пасажирської транспортної системи. Аналітичні мо

делі не дозволяють дослідити функціонування ТПВ у умовах впливів факторів зовнішнього середовища, тому для врахування ймовірнісної природи більшості показників обрано імітаційне моделювання.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Важливим питанням при дослідженні та створенні моделі функціонування ТПВ є аналіз існуючих наукових розробок, що стосуються його складових елементів, якими виступають зупиночні пункти. Автором дисертаційного дослідження [3] розроблена та запропонована комплексна методика розрахунку пропускної здатності зупиночних пунктів з урахуванням непостійного числа місць обслуговування. Робота Димової І. П. [4] направлена на виявлення закономірності функціонування зупиночних пунктів під впливом експлуатаційних і конструктивних факторів, а також закономірності руху транспортних засобів у їх зоні. Кажасєв А. О. встановив, що кількість конфліктних ситуацій на зупиночних пунктах, що утворюються при роботі дублюючих маршрутів, має зворотну залежність від величини суміщених інтервалів руху маршрутного транспорту через пункти зупинки та їх пропускної здатності [5].

Рух транспортних засобів маршрутів МПТ та їх взаємодія у зоні зупиночних пунктів розглядається у дисертаційних дослідженнях Єніна Д. В. [6], Корягина М. Є. [7], Шабалина Б. А. [8], але на практиці у багатьох містах проблема нескоординованого руху та скупчення рухомого складу на зупиночних пунктах все ще залишається невирішеною.

© В. О. Вдовиченко, Г. О. Самчук. 2016

Одним із напрямів підвищення ефективності функціонування ТПВ є удосконалення технологічної форми взаємодії видів транспорту шляхом синхронізації розкладу руху. У статті [9] розроблено модель узгодження графіку підводу рухомого складу МПТ до ТПВ (залізничний вокзал), науковець використав методи еволюційного моделювання, зокрема генетичний алгоритм. Недоліком запропонованої моделі можливо назвати неврахування випадкових величин, а також параметрів зупиночних пунктів.

Питання розробки математичних моделей для синхронізації розкладів руху МПТ з метою мінімізації часу очікування при здійсненні пасажирами пересадки знайшло своє відображення у публікаціях зарубіжних авторів [10, 11].

Аналіз літературних джерел виявив нестачу комплексних досліджень ТПВ, оскільки більшість наукових праць присвячені питанню визначення параметрів окремих елементів або певному аспекту технологічного процесу. Це обумовило необхідність розробки математичної моделі процесу функціонування ТПВ, що стане основою для подальшого виявлення чисельних значень вхідних параметрів, що забезпечать ефективність та сталий розвиток ТПВ.

**Ціль та задачі дослідження.** Об'єктом дослідження виступає процес функціонування ТПВ, а предметом – вплив експлуатаційних параметрів роботи МПТ та технічних параметрів зупиночних пунктів на ефективність функціонування ТПВ.

Метою дослідження є встановити зв'язки між вхідними параметрами, факторами зовнішнього середовища і процесами, що відбуваються у транспортно-пересадочних вузлах, та формалізувати їх впливи на функціонування ТПВ. Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

1. Визначити керуючі параметри та фактори зовнішнього середовища функціонування ТПВ.

2. Формалізувати впливи вхідних параметрів на технологічні підпроцеси, а також критерій ефективності функціонування ТПВ.

**Модель функціонування ТПВ.** Обраний критерій ефективності функціонування ТПВ включає мінімізацію вартісної оцінки негативного впливу на економічну, соціальну та екологічну складові:

$$EFF = \tilde{t}_{пр} \cdot C_{1год} + m \cdot C_e + \tilde{t}_{оч} \cdot C_{пас-год} + n \cdot C_{ДТП} + Q_{CO_2} \cdot C_{CO_2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $EFF$  – вартісна оцінка негативного впливу функціонування ТПВ, грн;  $\tilde{t}_{пр}$  – час простою транспортних засобів у черзі перед зупиночним пунктом, год;  $C_{1год}$  – собівартість однієї години простою транспортного засобу, грн/год;  $m$  – кількість зупиночних пунктів, що потребують зміни конструктивних параметрів, од.;  $C_e$  – витрати на експлуатацію зупиночних пунктів, грн;  $\tilde{t}_{оч}$  – час очікування пасажирів у ТПВ, год;  $C_{пас-год}$  – вартісна оцінка однієї пасажиро-години, грн/год;  $n$  – ймовірна кількість ДТП у зоні ТПВ;  $C_{ДТП}$  – витрати, спричинені одним ДТП, грн;  $Q_{CO_2}$  – об'єм викидів, еквівалентних  $CO_2$ , від транспортних

засобів, що знаходяться у черзі, г;  $C_{CO_2}$  – платежі, пов'язані із компенсацією екологічного забруднення викидами, еквівалентними  $CO_2$ , грн/г.

Кожен компонент інтегрального критерію містить постійну складову ( $C_{1год}$ ,  $C_e$ ,  $C_{пас-год}$ ,  $C_{ДТП}$ ,  $C_{CO_2}$ ), що дозволяє трансформувати обрані індикатори функціонування ТПВ у грошовий еквівалент, а також множину показників, що характеризують технологічний процес та залежать від випадкових величин часу очікування пасажирів або часу простою транспортних засобів маршрутів МПТ у ТПВ. Момент прибуття транспортних засобів у ТПВ, а також технічні характеристики зупиночних пунктів ТПВ, тобто кількість місць обслуговування, є визначальними для величини часу очікування пасажирів та часу простою транспортних засобів. Маршрути, траси яких проходять через ТПВ, розділені на дві групи:  $\mathfrak{Z}$  – номер маршруту, з якого здійснюється пересадка,  $\mathfrak{Z} = \{\mathfrak{Z}_i \mid i = \overline{1, N}\}$ ;  $\mathfrak{R}$  – номер маршруту, на який здійснюється пересадка,  $\mathfrak{R} = \{\mathfrak{R}_j \mid j = \overline{1, K}\}$ ;  $N$  – кількість маршрутів  $\mathfrak{Z}$ , од.;  $K$  – кількість маршрутів  $\mathfrak{R}$ , од.

Момент прибуття транспортних засобів кожного маршруту є функцією від часу відправлення з початкового зупиночного пункту та інтервалу руху на маршруті, обмеженнями до цільової функції є наступні вирази:

$$\begin{cases} t_{\mathfrak{Z}}^{(b)} < t_{\mathfrak{Z}}^{(b')} < t_{\mathfrak{Z}}^{(b)} + I_{\mathfrak{Z}}, & b=1, \dots, B; \\ t_{\mathfrak{Z}}^{(B)} \in T, \end{cases} \quad (2)$$

де  $t_{\mathfrak{Z}}^{(b)}$  – існуючий час відправлення  $b$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$  з початкового зупиночного пункту;  $T$  – розрахунковий період;  $B$  – кількість транспортних засобів маршруту  $\mathfrak{Z}$ , що прибувають у ТПВ за період  $T$ ;  $I_{\mathfrak{Z}}$  – інтервал на маршруті  $\mathfrak{Z}$ ;  $t_{\mathfrak{Z}}^{(b')}$  – змінений час відправлення  $b$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$  з початкового зупиночного пункту.

У обмеженні (2) відображено, що зміна часу відправлення може варіюватися від існуючого часу відправлення у межах значення інтервалу на маршруті. Також відзначено, що час відправлення  $B$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$  повинен належати рамкам розрахункового періоду  $T$ . Обмеження у рівній мірі діє для маршрутів  $\mathfrak{R}$ .

Зменшення значення простою транспортних засобів у ТПВ та загального часу очікування пасажирів, що складається з витрат часу на пересадку між маршрутами  $\mathfrak{Z}$  та  $\mathfrak{R}$  і витрат часу очікування пасажирів у ТПВ, реалізується за рахунок синхронізації розкладу, що є оптимізаційним заходом технологічного характеру. Синхронізація досягається шляхом зміщення часу та частоти відправлення транспортних засобів з початкового зупиночного пункту. Зменшити простій транспортних засобів у ТПВ можливо реалізуючи заходи зі збільшення кількості місць обслуговування на зупиночних пунктах.

Для дослідження функціонування ТПВ виділяємо елементарні підпроцеси для учасників технологічного процесу: процес підходу, очікування, пересадки пасажирів у ТПВ; процес прибуття, простою, відправлення транспортних засобів з ТПВ.

Технічну характеристику ТПВ можливо окреслити за допомогою чисельних значень наступних параметрів:  $\Pi$  – кількість місць обслуговування на зупиночному пункті, од.;  $t_{пер}$  – значення тривалості переходу між лініями маршрутів у ТПВ. У якості вхідних параметрів обрано:

- множину моментів відправлення з початкової зупинки,  $\{t_b\}$ ;
- множину тривалості руху від початкової зупинки до ТПВ,  $\{t_p\}$ ;

- множина інтенсивності підходу пасажирів у ТПВ,  $\{N\}$ ;
- множину пасажирів, що пересаджуються у ТПВ,  $\{Q_{п}\}$ ;
- кількість ДТП за участі МПТ,  $n$ ;
- множина місць обслуговування на зупиночному пункті,  $\{П\}$ ;
- множину інтервалів руху на маршрутах  $\{I\}$ .

Вихідним параметром є вартісна оцінка негативного впливу функціонування ТПВ  $EFF$ .

Зв'язки між вхідними параметрами, факторами зовнішнього середовища та підпроцесами представлені на рис. 1.

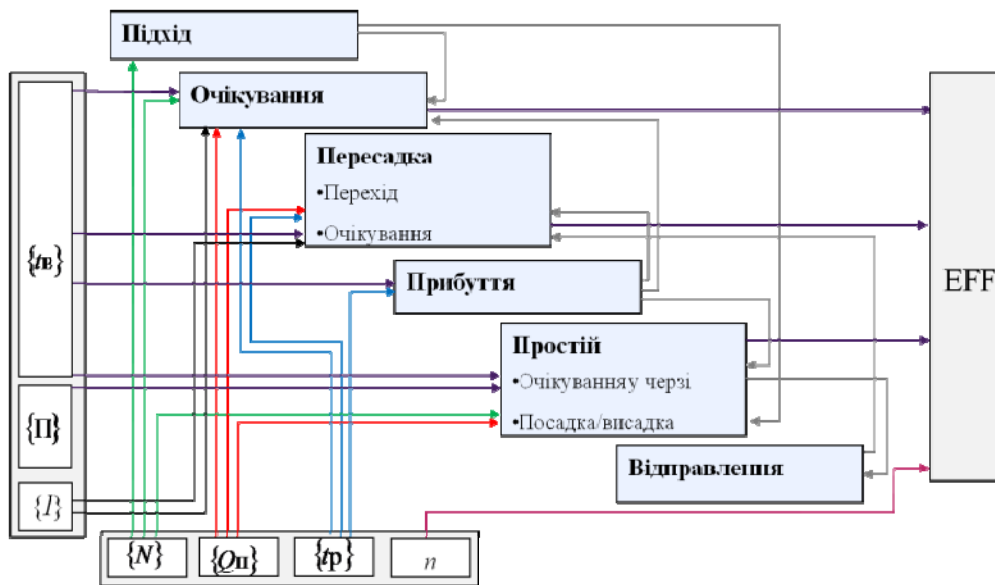


Рис. 1 – Зв'язки між вхідними параметрами, факторами зовнішнього середовища та підпроцесами

У якості керуючих змінних розглядається момент відправлення з початкового зупиночного пункту, кількість місць обслуговування на зупиночному пункті та інтервал на маршрутах МПТ.

Відправлення з початкового зупиночного пункту для  $b$ -го транспортного засобу розраховуємо наступним чином:

$$t_{b3}^{(b)} = \begin{cases} t_{b3}^{(1)}, & \text{при } b=1, \\ t_{b3}^{(b-1)} + I_{\mathfrak{Z}}, & \text{при } b > 1, \end{cases} \quad (3)$$

де  $t_{b3}^{(b)}$  – час відправлення  $b$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$  з початкового зупиночного пункту;  $t_{b3}^{(b-1)}$  – час відправлення попереднього транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$  з початкового зупиночного пункту;  $I_{\mathfrak{Z}}$  – інтервал на маршруті  $\mathfrak{Z}$ .

Другий вираз формули (3) показує, що кожний наступний транспортний засіб  $b$  маршруту повинен відправитися через інтервал, встановлений на маршруті  $\mathfrak{Z}$ .

Момент прибуття транспортних засобів розраховується шляхом додавання до моменту відправлення з початкового зупиночного пункту тривалості руху до ТПВ:

$$\tilde{M}_{пр3}^{(b)} = t_{b3}^{(b)} + \tilde{t}_{р3}^{(b)}, \quad (4)$$

де  $\tilde{M}_{пр3}^{(b)}$  – момент прибуття  $b$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$  у ТПВ;  $t_{b3}^{(b)}$  – відправлення  $b$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$  з початкового зупиночного пункту;  $\tilde{t}_{р3}^{(b)}$  – час руху  $b$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$  від початкового зупиночного пункту до ТПВ.

Аналогічно розраховуємо момент прибуття  $d$ -них транспортних засобів маршруту  $\mathfrak{R}$ .

Простій транспортних засобів у ТПВ складається з непродуктивного простою, тобто простою у черзі та простою, що виникає при пасажирообміні і є частиною технологічного процесу.

$$\tilde{t}_{пр3} = \sum_{b=1}^B (\tilde{t}_{чер3}^{(b)} + \tilde{t}_{пв3}^{(b)}), \quad b=1, \overline{B}; \quad (5)$$

$$\tilde{t}_{пр\mathfrak{R}} = \sum_{d=1}^D (\tilde{t}_{чер\mathfrak{R}}^{(d)} + \tilde{t}_{пв\mathfrak{R}}^{(d)}), \quad d=1, \overline{D}; \quad (6)$$

де  $\tilde{t}_{чер3}^{(b)}$ ,  $\tilde{t}_{чер\mathfrak{R}}^{(d)}$  – час очікування  $b$ -их,  $d$ -их

транспортних засобів у черзі перед зупиночним пунктом;  $\tilde{t}_{пв_{\mathfrak{Z}}}^{(b)}$ ,  $\tilde{t}_{пв_{\mathfrak{R}}}^{(d)}$  – час посадки-висадки пасажирів.

Непродуктивний простій виникає, коли моменти прибуття на зупиночний пункт транспортних засобів співпадають, а кількість транспортних засобів, що одночасно знаходяться у зоні ТПВ, перевищує кількість місць обслуговування на зупиночних пунктах.

Для усунення цієї складової часу перебування транспортних засобів у ТПВ проводиться перевірка умови недопущення скупчення транспортних засобів у ТПВ під час пошуку оптимальних параметрів функціонування ТПВ.

$$M_c \leq \Pi \quad (7)$$

де  $M_c$  – кількість прибуттів транспортних засобів у контрольний час  $t_c$ , од.

$$M_c = \sum_{\mathfrak{Z}} \sum_{b=1}^B \max[1 - |\tilde{M}_{пр_{\mathfrak{Z}}}^{(b)} - t_c|, 0], \quad (8)$$

де  $t_c$  – контрольний час.

Аналогічно перевіряється кількість одночасних прибуттів транспортних засобів маршрутів  $\mathfrak{R}$ .

Шаг (С), з яким здійснюється перевірка наявності одночасного прибуття, залежить від необхідного ступеню деталізації при моделюванні. Приймаємо значення  $C$  з урахуванням мінімального інтервалу між транспортними засобами, що прибувають на зупиночний пункт.

$$X = \begin{cases} 0, & \Delta M < C \\ 1, & \Delta M > C \end{cases}, \quad (9)$$

де  $C$  – шаг, з яким здійснюється перевірка наявності одночасного прибуття.

$$X = \max[1 - |\tilde{M}_{пр_{\mathfrak{Z}}}^{(b)} - t_c|, 0]; \quad (10)$$

$$\Delta M = |\tilde{M}_{пр_{\mathfrak{Z}}}^{(b)} - t_c|. \quad (11)$$

Момент відправлення  $b$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{R}$  розраховується за наступною залежністю:

$$\tilde{M}_{в_{\mathfrak{Z}}}^{(b)} = \tilde{M}_{пр_{\mathfrak{Z}}}^{(b)} + \tilde{t}_{пв_{\mathfrak{Z}}}^{(b)}. \quad (12)$$

Для визначення моменту відправлення  $d$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{R}$  з ТПВ використовуємо аналогічну залежність.

Тривалість процесу пересадки складається з часу, витраченого на перехід та очікування. Витрати часу на очікування пересадки між маршрутами  $\mathfrak{Z}$  та  $\mathfrak{R}$  у ТПВ пропонується визначити як різницю моментів відправлення  $d$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{R}$  та моменту прибуття  $b$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$ , з урахуванням часу переходу між лініями маршрутів  $\mathfrak{Z}$  та  $\mathfrak{R}$ .

$$\tilde{t}_{пер_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}} = \sum_{b=1}^B \sum_{d=1}^D [(\tilde{M}_{в_{\mathfrak{R}}}^{(d)} - (\tilde{M}_{пр_{\mathfrak{Z}}}^{(b)} + \tilde{t}_{пер_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}})) \cdot \tilde{Q}_{п_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}}^{(bd)} \cdot P_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}], \quad (13)$$

де  $\tilde{M}_{в_{\mathfrak{R}}}^{(d)}$  – момент відправлення  $d$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{R}$  з ТПВ;  $\tilde{t}_{пер_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}}$  – час пере-

ходу між лініями маршрутів  $\mathfrak{Z}$  та  $\mathfrak{R}$ ;  $\tilde{Q}_{п_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}}^{(bd)}$  – кількість пасажирів, що здійснюють пересадку між транспортними засобами  $b, d$  маршрутів  $\mathfrak{Z}$  та  $\mathfrak{R}$ ;  $P_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}$  – бінарна величина, що приймає значення 1 при можливості здійснення пересадки між транспортними засобами  $b, d$  маршрутів  $\mathfrak{Z}$  та  $\mathfrak{R}$ , у іншому випадку – 0.

Формування матриці пересадок вимагає аналізу ТПВ для виявлення можливих варіантів пересадки. У матриці заносимо номери маршрутів, що проходять через вузол. Можливі пересадки позначаємо літерами  $a_{ij}$ , індекси – номери строки та стовпця маршрутів, між якими відбувається пересадка. Якщо пересадка не відбувається,  $a_{ij}$  приймає значення 0. Приклад матриці пересадок для ТПВ представлений у табл. 1.

Таблиця 1 – Матриця визначення можливих пересадок між маршрутами  $\mathfrak{Z}$  та  $\mathfrak{R}$

No маршруту	$\mathfrak{Z}_1$	$\mathfrak{Z}_2$	...	$\mathfrak{Z}_N$
$\mathfrak{R}_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1N}$
$\mathfrak{R}_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2N}$
...	...	...	...	...
$\mathfrak{R}_K$	$a_{K1}$	$a_{K2}$	...	$a_{KN}$

Для визначення маршрутів наступним кроком є визначення пар транспортних засобів, між якими здійснюється пересадка. Перевіряється умова відправлення  $d$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{R}$ , пізніше моменту прибуття  $b$ -го транспортного засобу маршруту  $\mathfrak{Z}$  з урахуванням часу на перехід пасажирів між лініями маршрутів. Для забезпечення визначення єдиної пари різниця між відправленням та прибуттям транспортних засобів маршрутів  $\mathfrak{R}$ ,  $\mathfrak{Z}$  не повинна перевищувати інтервал на маршруті  $\mathfrak{R}$ .

$$\begin{cases} \tilde{M}_{пр_{\mathfrak{Z}}}^{(b)} + \tilde{t}_{пер_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}} < \tilde{M}_{в_{\mathfrak{R}}}^{(d)}; \\ \tilde{M}_{в_{\mathfrak{R}}}^{(d)} - (\tilde{M}_{пр_{\mathfrak{Z}}}^{(b)} + \tilde{t}_{пер_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}}) < I_{\mathfrak{R}}. \end{cases} \quad (14)$$

Складаємо окремі матриці для кожної пари обраних маршрутів, номером строки та стовпця виступають порядкові номери транспортних засобів маршрутів  $\mathfrak{Z}$  та  $\mathfrak{R}$ . Якщо виконується умова (14) у клітинку, що знаходиться на перетині строки та стовпця певних  $b$  та  $d$ , вносимо 1, у іншому випадку 0, таким чином визначається значення бінарної величини  $P_{\mathfrak{Z}\mathfrak{R}}$ .

Другою складовою загального часу очікування є час очікування пасажирів, для яких ТПВ є початковим зупиночним пунктом. Для кожного окремого пасажирів час очікування складає різницю моменту його появи у ТПВ та моменту посадки у транспортний засіб:

$$\tilde{t}_{о_{inacc}} = \tilde{M}_{пос} - \tilde{M}_{п}, \quad (15)$$

де  $\tilde{t}_{о_{inacc}}$  – час очікування 1 пасажирів у ТПВ;  $\tilde{M}_{пос}$  – момент посадки пасажирів у транспортний засіб;  $\tilde{M}_{п}$  – момент появи пасажирів у ТПВ.

Наступним етапом є моделювання та встановлення функціональних залежностей критерію ефективності від вхідних параметрів, на основі яких визначаються оптимальні значення вхідних параметрів, що забезпечать ефективне функціонування ТПВ.

### Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що потенціал ТПВ для підвищення привабливості громадського транспорту, який є сталим засобом мобільності, обумовлює важливість їх вивчення. В якості керуючих параметрів виступає час відправлення з початкового зупиночного пункту, кількість місць обслуговування на зупиночному пункті та інтервал руху на маршрутах, що визначає ефективність функціонування ТПВ.

Формалізація внутрішніх та зовнішніх зв'язків дозволила виділити складові елементи та розробити математичну модель, що враховує стохастичну природу технологічних процесів та охоплює громадський транспорт, пасажирів, сукупність зупиночних пунктів.

Запропонована математична модель функціонування ТПВ МПТ у подальшому стане основою для проведення імітаційного моделювання, що дозволить сформулювати масив статистичних даних, на основі якого можливо отримати й оцінити функціональні залежності критерію ефективності від вхідних параметрів, та обрати оптимальні їх значення для забезпечення ефективного функціонування ТПВ.

### Список літератури:

1. UNWCED: United Nations World Commission on Environment and Development. Our Common Future (Brundtland Report) [Text]: Oxford: University Press, 1987. Available at: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
2. Lélé, Sharachchandra M. Sustainable development: A critical review. [Text] / Sharachchandra M. Lélé // World Development. – 1991. – Vol. 19, Issue 6. – P. 607–621.
3. Липенков, А. В. Повышение эффективности функционирования городского пассажирского транспорта на основе управления пропускной способностью остановочных пунктов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Липенков Александр Владимирович. – Нижний Новгород, 2015. – 154 с.
4. Димова, И. П. Повышение эффективности функционирования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта и движения транспортных средств в зоне их влияния [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Димова Ирина Петровна. – Тюмень, 2009. – 167 с.
5. Кажаяв, А. А. Снижение конфликтных ситуаций на остановочных пунктах маршрутных сетей городского пассажирского транспорта [Текст] : автореф. дис. на соиск. научн. степени канд. техн. наук : спец. 05.22.01 «Транспортные и транспортно-технологические системы страны, её регионов и городов, организация производства на транспорте» / Кажаяв Андрей Александрович; МАДИ. – Москва, 2012. – 19 с.
6. Енин, Д. В. Модели и алгоритмы управления городскими пассажирскими перевозками (на примере г. Воронежа) [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.10 / Енин Дмитрий Владимирович. – Воронеж, 2004. – 200 с.
7. Корягин, М. Е. Оптимизация управления городскими пассажирскими перевозками на основе конфликтно-устойчивых решений [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 05.13.10 / Корягин Марк Евгеньевич. – Новокузнецк, 2011. – 345 с.
8. Шабалин, Б. А. Обеспечение надежности исполнения заданного расписанием режима движения автобусов городских маршрутов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Шабалин Борис Аркадьевич. – Москва, 1984. – 134 с.
9. Журба, О. О. Формування моделі узгодження графіку підводу рухомого складу різних видів транспорту до залізничного вокзалу [Текст] / О. О. Журба // ДонІЗТ : зб. наук. праць. – 2010. – Вип. 22. – С. 62–68.
10. Poorjafari, V. A New Mathematical Programming Model for Transit Timetable Synchronization [Text] / V. Poorjafari, W.L. Yue, N. Holyoak // The 32nd Conference of Australian Institutes of Transport Research, University of New South Wales, Sydney, Feb 2014. Available at: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1309706>.
11. Shafahi, Y. A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions [Text] / Y. Shafahi, A. Khani // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2010. – Vol. 44. – Issue 6. – P. 377–389.

### Bibliography (transliterated):

1. UNWCED: United Nations World Commission on Environment and Development (1987). Our Common Future (Brundtland Report). Oxford: Oxford University Press. Retrieved from <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
2. Lélé, S. M. (1991). Sustainable development: A critical review. World development, 19(6), 607–621.
3. Lipenkov, A. V. (2015). Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija gorodskogo passazhirskogo transporta na osnove upravlenija propusknnoj sposobnost'ju ostanovochnyh punktov [Efficiency improvement of urban passenger transport functioning on the basis of stopping points capacity]. Candidate's thesis. Nizhnij Novgorod, 154.
4. Dimova, I. P. (2009). Povyshenie jeffektivnosti funkcionirovanija ostanovochnyh punktov gorodskogo passazhirskogo transporta i dvizhenija transportnyh sredstv v zone ih vlijanija [Efficiency improvement of stopping points functioning of urban passenger transport and vehicle traffic in their zone of influence]. Candidate's thesis. Tjumen', 167.
5. Kazhaev, A. A. (2012). Snizhenie konfliktnyh situacij na ostanovochnyh punktah marshrutnyh setej gorodskogo passazhirskogo transporta [Reducing conflicts at stopping points of urban passenger transport route networks]. Extended abstract of candidate's thesis. Moskva: MADI, 19.
6. Enin, D. V. (2004). Modeli i algoritmy upravlenija gorodskimi passazhirskimi perevozkami (na primere g. Voronezha) [Models and algorithms of urban passenger transportation management (on the Voronezh example)]. Candidate's thesis. Voronezh, 200.
7. Korjagin, M. E. (2011). Optimizacija upravlenija gorodskimi passazhirskimi perevozkami na osnove konfliktno-ustojchivyh reshenij [Optimization of urban passenger transport management on the basis of conflict-resistant solutions]. Doctor's thesis. Novokuzneck, 345.
8. Shabalin, B. A. (1984). Obespechenie nadezhnosti ispolnenija zadannogo raspisaniem rezhima dvizhenija avtobusov gorodskih marshrutov [Ensuring the reliability of the scheduled regime of urban route buses operation]. Candidate's thesis. Moskva, 134.
9. Zhurba, O. O. (2010). Formuvannia modeli uzgodzhennia hrafiku pidvodu rukhomoho skladu riznykh vydiv transportu do zaliznychnoho vokzalu [Development of a model of the schedule coordination of rolling stock of different transport modes arrival to a railway station]. DonIZT: zb. nauk. prats, 22, 62–68.
10. Poorjafari, V. A. (2014). New Mathematical Programming Model for Transit Timetable Synchronization. The 32nd Conference of Australian Institutes of Transport Research, University of New South Wales, Sydney, Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1309706>.
11. Shafahi, Y. (2010). A practical model for transfer optimization in a transit network: Model formulations and solutions. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44 (6), 377–389.

Надійшла (received) 07.03.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Формування математичної моделі функціонування транспортно-пересадочних вузлів міського пасажирського транспорту / В. О. Вдовиченко, Г. О. Самчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.56–61. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Формирование математической модели функционирования транспортно-пересадочных узлов городского пассажирского транспорта / В. А. Вдовиченко, А. А. Самчук // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 17(1189). – С.56–61. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-5459.**

**Development of a mathematical model of public transport interchanges functioning/ V.O. Vdovychenko, G. O. Samchuk // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.56–61. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-5459.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Вдовиченко Володимир Олексійович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри транспортних технологій; вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002; тел.: (057) 707-37-20; e-mail: [vval2301@gmail.com](mailto:vval2301@gmail.com).

**Вдовиченко Владимир Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, доцент кафедры транспортных технологий; ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, 61002; тел.: (057) 707-37-20; e-mail: [vval2301@gmail.com](mailto:vval2301@gmail.com).

**Vdovychenko Volodymyr** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Kharkiv National Automobile and Highway University, Associate Professor at the Department of Transport Technologies; st. Yaroslav Mydrogo, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002; tel.: (057) 707-37-20; e-mail: [vval2301@gmail.com](mailto:vval2301@gmail.com).

**Самчук Ганна Олександрівна** – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, аспірант кафедри транспортних технологій; вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002; тел.: (057) 707-37-20; e-mail: [ganna.samchuk@gmail.com](mailto:ganna.samchuk@gmail.com).

**Самчук Анна Александровна** – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, аспирант кафедры транспортных технологий; ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, 61002; тел.: (057) 707-37-20; e-mail: [ganna.samchuk@gmail.com](mailto:ganna.samchuk@gmail.com).

**Samchuk Ganna** – Kharkiv National Automobile and Highway University, Post Graduate at the Department of Transport Technologies; st. Yaroslav Mydrogo, 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

УДК 004.94; 519.876

**Р. Ю. ЛОПАТКИН, С. А. ПЕТРОВ, С. Н. ИГНАТЕНКО, В. А. ИВАЩЕНКО**

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

В работе рассматриваются фундаментальные аспекты применения имитационного моделирования в задачах автоматизации и управления техническими системами и комплексами, рассмотрены и проанализированы стандарты и существующие протоколы построения подобных систем. Исследован вопрос развития систем имитационного моделирования в разрезе развития науки в области синтеза информационных систем, структурного проектирования, рассматривается связь с системами искусственного интеллекта. Определены принципиальные характеристики систем имитационного моделирования а также обосновывается перспективность применения распределенных, масштабируемых систем на базе мульти-агентного подхода.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, мульти-агентные системы, моделирование управления, агентное моделирование, распределенные агентные системы.

В роботі розглядаються фундаментальні аспекти застосування імітаційного моделювання в задачах автоматизації і керування технічними системами і комплексами. Розглянуто та проаналізовано стандарти та протоколи побудови подібних систем. Досліджено питання розвитку систем імітаційного моделювання в розрізі розвитку науки в галузі синтезу інформаційних систем, структурного проектування та зв'язку з системами штучного інтелекту. Визначені принципові характеристики систем імітаційного моделювання а також обґрунтовується перспектива застосування розподілених систем на базі мульти-агентного підходу що масштабується.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, мульти-агентні системи, моделювання керування, агентне моделювання, розподілені агентні системи

The paper covered the fundamental simulation aspects for automation and control problems in technical systems and complexes. Standards and existing protocols were reviewed to building such systems. Development of the simulation were investigator in scope of information systems synthesis, structural design, considering the connection with artificial intelligence systems. Modern software frameworks and modeling problems classification were analysed in the paper in scope of building complex control systems. The major part in the paper show the advantages of using distributed approach for modeling using the self organised agents and tasks decomposition. Determined the basic characteristics of simulation systems and justified prospects of using the distributed, scalable systems based on multi-agent approach. As a conclusion we demonstrate the intuitive clue for solving different kind of many practical problems from wide range of science.

**Keywords:** simulation, multi-agent systems, management modeling, agent-based modeling, distributed agent systems.