

## УДК 656.222.3

А. В. ПРОХОРЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Українська державна академія залізничного транспорту, майдан Фейєрбаха, 7, Харків, Україна, 61166, тел. +38 (057) 730 19 88, ел. пошта railwayhub@yandex.ua, ORCID 0000-0003-3123-5024

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТІ МАСШТАБНОЇ ІНВАРІАНТНОСТІ СИСТЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ПОЇЗДОПОТОКІВ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПЕРКОЛЯЦІЇ

**Мета.** Робота присвячена питанню дослідження властивості масштабної інваріантності системи організації поїздопотоків на залізницях України. **Методика.** Для доказу належності реальної мережі призначень плану формування поїздів (ПФП) до типу так званих масштабно-інваріантних мереж запропоновано згенерувати різної розмірності безмасштабну мережу типу Барабаші-Альберта з параметрами, які має реальна мережа призначень ПФП. Досліджено також їх структуру на живучість за допомогою процедури перколяції вузлів. Процес перколяції запропоновано розглядати як зміну варіанту просторового переміщення вагонів на мережі при збільшенні кількості залізничних станцій, що втратили здатність виконувати основну функцію щодо пропуску вагонів за призначеннями ПФП в умовах несприятливих впливів (аварійна ситуація, перевантаження). **Результати.** Порівняльний аналіз результатів перколяції при випадковому та цілеспрямованому деструктивному впливі на вузли мережі показав співпадіння з результатами перколяції реальної мережі призначень ПФП, що доводить існування властивості самоподібності. Порівняльними показниками при перколяції були: відсоток видалених станцій в мережі, при якому виникає фрагментація мережі, середній інверсний шлях між вузлами мережі, діаметр графової структури, значення розміру другого за величиною кластера в мережі від кроків руйнування. **Наукова новизна.** Вперше підтверджена гіпотеза про існування властивості масштабної інваріантності в графі призначень ПФП на залізницях України, що дозволяє віднести граф до класу безмасштабних мереж. Існуючі знання в області теорії безмасштабних мереж можуть бути використані для опису живучості системи перевезень на залізницях України. **Практична значимість.** Спираючись на виявлені властивості системи направлення поїздопотоків, в подальшому можливим є створення математичної моделі, що дозволить спрогнозувати поведінку системи перевезень із мережевою структурою. Аналіз властивості живучості системи організації поїздопотоків дозволить оптимізувати використання капітальних інвестицій для підвищення пропускної спроможності мережі за рахунок виявлення найбільш критичних ділянок та станцій, які системно впливають на ефективність роботи мережі в цілому.

*Ключові слова:* масштабно-інваріантна мережа; план формування поїздів; перколяція; живучість; граф; залізнична мережа

### Вступ

Ця робота є продовженням досліджень фундаментальних властивостей системи організації вагонопотоків у поїзди на залізницях України [1, 3]. Існуючі підходи до аналізу системи організації поїздопотоків не дозволяють на макрорівні дослідити закономірності функціонування системи перевезень. Це вимагає впровадження нових методів досліджень, що засновані на системному підході. З цієї точки зору, перспективним є застосування сучасного напрямку досліджень на основі концепції статистичної фізики складних мереж. Цей підхід добре зарекомендував себе під час дослідження структурних властивостей соціальних мереж знайомств між людьми, технологічних мереж ліній високовольт-

них електропередач, інтернету та громадського автотранспорту [5, 8]. Проте у жодній з робіт не досліджували під час застосування цієї концепції мережу призначень плану формування поїздів (ПФП) на залізницях України. За таких умов актуальним є аналіз процесів, що відбуваються в мережі призначень ПФП. Виявлена у ході дослідження структурних властивостей мережі призначень ПФП гіпотеза про належність мережі до типу масштабно-інваріантних структур [12] потребує додаткового підтвердження. Таким структурам властива масштабна *інваріантність*, тобто явище самоподібності [6], або інваріантність під час зміни масштабу мережі. Доведення гіпотези про існування самоподібності в мережі надасть можливість спростити вивчен-

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ня загальносистемних властивостей системи організації вагонопотоків у поїзди на залізницях України за рахунок застосування заздалегідь виявлених та вивчених явищ і закономірностей в мережах подібного типу. Тому в роботі запропоновано дослідити властивість безмасштабності системи перевезень із сітьовою структурою на основі аналізу її живучості. Відповідно до відомого визначення [2] та специфіки вирішення поставленого завдання в роботі, під живучістю системи організації вагонопотоків розуміється її властивість, що забезпечує здатність виконання функції з просторового переміщення вагонів за умови дотримання строків доставки вантажів за наявності відмов на залізничних станціях, після яких відправлення вагонів за призначеннями плану формування поїздів (ПФП) неможливе. В межах дослідження живучості мережаної структури основний інтерес складає доведення існування самоподібності її перколяційного кластера [6].

### Мета

Основною метою дослідження є підтвердження гіпотези про існування властивості масштабної інваріантності в мережі призначень плану формування поїздів України та використання нових знань для підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту. Результати дослідження дозволять спростити розуміння процесів, які відбуваються в системі та можуть бути застосовані під час аналізу живучості системи перевезень на залізницях України.

### Методика

Для вирішення зазначеної проблеми в роботі запропоновано згенерувати різної розмірності безмасштабну мережу з параметрами, які має реальна мережа призначень ПФП та дослідити її структуру на живучість за допомогою процедури перколяції. Спираючись на висунуту гіпотезу про належність мережі призначень ПФП до типу так званих масштабно-інваріантних мереж (англ., *scale-free networks*) [9], що мають степеневий розподіл зв'язності вузлів [13], запропоновано використати для генерації мереж модель Барабаші-Альберта (англ., *Barabási-Albert model*) [8].

Ця модель є однією із найбільш поширених моделей генерації випадкових безмасштабних мереж з використанням принципу збільшення

росту та переважного приєднання (англ., *preferential attachment*) [8]. Генерація мережі починається з початкової зв'язної мережі  $m_0$ . Важливою є умова, за якої  $m_0 \geq 2$  і ступінь  $k_i$  кожного вузла  $i$  в початковій мережі повинен бути не менше 1, інакше вона завжди буде відділена від іншої частини мережі. Принцип зростання забезпечується приєднанням на кожному кроці нового вузла. Кожен новий вузол з'єднується з існуючим вузлом  $i$  з ймовірністю  $p_i$ , що пропорційна кількості зв'язків цих вузлів

$$p_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j},$$

де  $k_i$  – ступінь вузла  $i$ ;  $k_j$  – ступінь всіх існуючих вузлів  $j$  в мережі, ( $i, j \in R$ ). В деякий момент часу  $t$  до мережі додається новий вузол із заданою кількістю нових зв'язків  $n$ ,  $n \leq m_0$ . На рис. 1 наведено приклад генерації мережі із п'яти кроків за допомогою моделі Барабаші-Альберта.

В межах завдання дослідження живучості структури мережі призначень ПФП запропоновано використати процедуру перколяції вузлів (англ., *site percolation problem*) [14]. Процес перколяції запропоновано розглядати як зміну варіанта просторового переміщення вагонів на мережі під час збільшення кількості залізничних станцій, що втратили здатність виконувати основну функцію щодо пропуску вагонів за призначеннями ПФП в умовах несприятливих впливів (аварійна ситуація, перевантаження).

Беручи до уваги відомі дослідження [6, 7], в роботі запропоновано проводити перколяцію в умовах випадкових відмов станцій в мережі (випадкова перколяція) та при так званих запланованих відмовах (корельована перколяція), коли деструктивний вплив здійснюється цілеспрямовано послідовно на станції з найбільшим вихідним ступенем зв'язності.

Для порівняння результатів протікання мережі призначень ПФП згідно з дослідженнями [4] запропоновано дослідити критичний стан двох випадково згенерованих за допомогою моделі Барабаші-Альберта мереж з параметрами степеневого розподілу зв'язності вузлів, що відповідають реальній мережі [12].

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

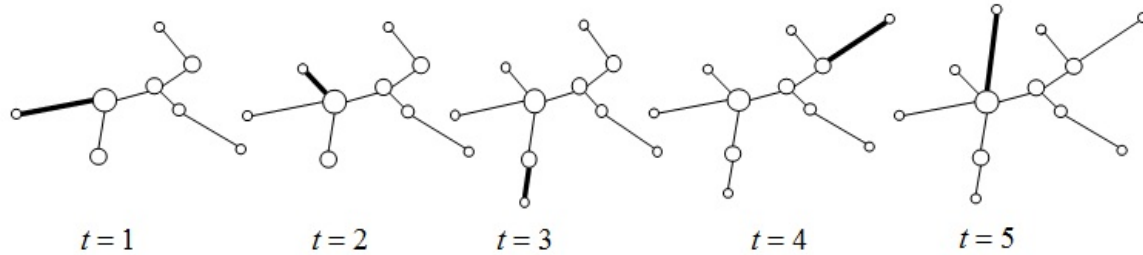


Рис. 1. Генерація мережі призначень ПФП за допомогою моделі Барабаші–Альберта при початковій мережі  $m_0 = 7$  та додаванні нового вузла на кожному кроці  $t$  із кількістю ребер  $n = 1$

Fig. 1. Generating networks of TFP destination using the model Barabash-Albert at an initial network of  $m_0 = 7$  and adding a new node at each step  $t$  of the number of edges  $n = 1$

Таблиця 1

## Результати моделювання повного руйнування мереж за двома варіантами перколяції

Table 1

## The simulation results of the complete destruction of networks in two variants of percolation

Реальна мережа 181 вершина; 372 зв'язки		Модельна мережа 181 вершина; 363 зв'язки		Модельна мережа 362 вершина; 846 зв'язки	
випадкова перколяція: повне руйнування мережі					
170 крок	94 %	179 крок	99 %	339 крок	94 %
корельована перколяція: повне руйнування мережі					
81 крок	45 %	58 крок	32 %	117 крок	32 %

Реальна мережа призначень ПФП, що була побудована відповідно до інформації з книги «Порядок направлення вагонопотоків та організації їх у вантажні поїзди на залізницях України на 2012–2013 роки», має 181 вузол та 372 зв'язки. Слід зазначити, для можливості виконання порівняльного аналізу з мережами Барабаші–Альберта, граф реальної мережі був перетворений у ненаправлений за допомогою програмного пакету RAJEK [10]. Генерація першої модельної мережі, що має 181 вузол та 363 зв'язки, здійснено на основі початкової зв'язної мережі при  $m_0 = 7$ . Тоді як друга модельна мережа була створена на основі початкової структури реальної мережі при  $m_0 = 181$  та збільшена в розмірі приблизно у два рази до 362 вершини та 846 зв'язків.

## Результати

Виконання експериментальних досліджень фазових переходів при перколяції в системі організації вагонопотоків у поїзди виявило, що при випадковій перколяції повне руйнування

мережі відбувається майже за однакових умов (рис. 2). Результати моделювання повного руйнування мереж наведено у табл. 1. Руйнування реальної мережі відбувається у разі видалення 94 % станцій від загальної їх кількості, тоді як руйнування першої і другої мереж відбувається у разі видалення 99 % та 94 % від загальної кількості станцій відповідно.

При послідовному видаленні вузлів з найбільшим середнім ступенем фрагментація в реальній мережі виникає на 81 кроці, що становить 45 % станцій від існуючих, тоді як руйнування першої і другої мереж виникає у разі видалення 32 % усіх станцій.

Для перевірки відповідності системи організації вагонопотоків її призначенню запропоновано на кожному кроці моделювання здійснювати розрахунок таких показників, як середній інверсний шлях між вузлами мережі [4] та діаметр графової структури [16] (див. рис. 3). Результати моделювання повного руйнування мереж за двома варіантами перколяції наведено у табл. 2.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

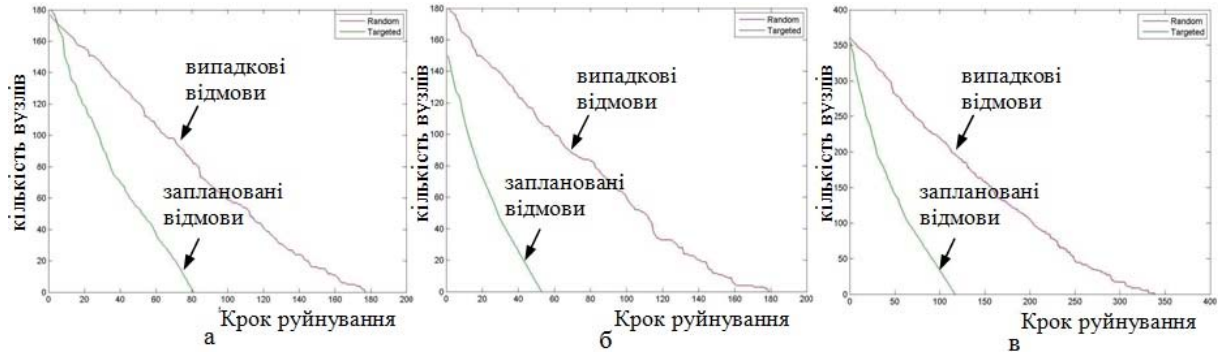


Рис. 2. Графік залежності кількості діючих вузлів в мережі призначень ПФП від кроків руйнування за двома варіантами перколяції:  
*a* – реальна мережа; *б* – перша модельна мережа; *в* – друга модельна мережа

Fig. 2. Dependence diagram of the number of active nodes in the networks of TFP destination from destruction steps by percolation of two options:  
*a* – real network; *б* – the first network model; *в* – the second network model

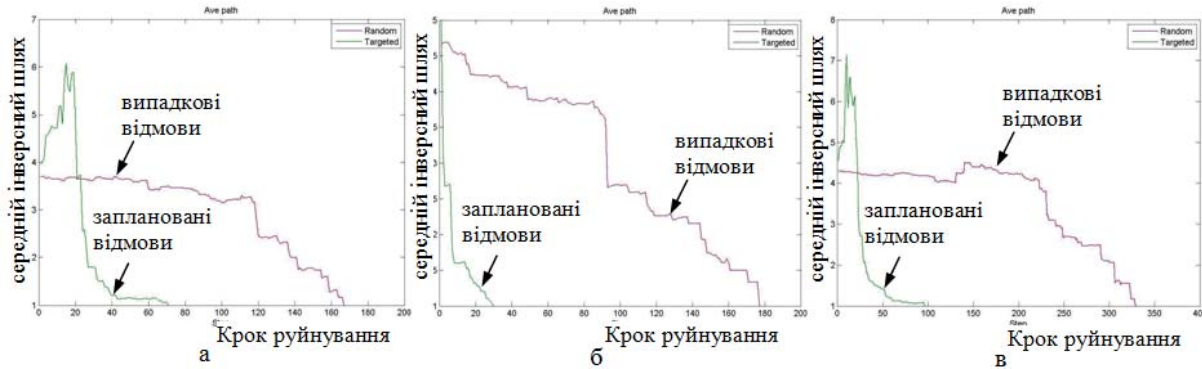


Рис. 3. Графік залежності середнього інверсного шляху в мережі призначень ПФП від кроків руйнування за двома варіантами перколяції:  
*a* – реальна мережа; *б* – перша модельна мережа; *в* – друга модельна мережа

Fig. 3. Dependence diagram of the average inverse path in the network of TFP destinations from destruction steps by percolation of two options:  
*a* – real network; *б* – the first network model; *в* – the second network model

Таблиця 2

**Результати моделювання різкої зміни показника середнього інверсного шляху та діаметра мереж за двома варіантами перколяції**

Table 2

**Simulation results of abrupt change of the average inverse path and the networks diameter in two variants of percolation**

Реальна мережа 181 вершина; 372 зв'язки		Модельна мережа 181 вершина; 363 зв'язки		Модельна мережа 362 вершина; 846 зв'язки	
випадкова перколяція:					
зміна показника середнього інверсного шляху між вузлами мережі					
130 крок	2,83	92 крок	3,611	231 крок	3,23
діаметр графової структури					
130 крок	7	92 крок	6	231 крок	9

Реальна мережа 181 вершина; 372 зв'язки		Модельна мережа 181 вершина; 363 зв'язки		Модельна мережа 362 вершина; 846 зв'язки	
корельована перколяція:					
зміна показника середнього інверсного шляху між вузлами мережі					
15 крок	6,08	1 крок	4,984	10 крок	7,148
діаметр графової структури					
15 крок	16	1 крок	10	10 крок	21

Аналіз зміни середнього інверсного шляху між вузлами мережі виявив існування фазового переходу першого роду [5, 16]. Так, за три кроки відбувається його падіння на 22,8 % у реальній мережі, тоді як перша мережа також має спад на 22,7 % з подальшою тенденцією спаду, що характеризує повне руйнування мережі.

Більш повільний спад показника спостерігається у другій модельній мережі, так за чотири кроки відбувається падіння показника на 18,6 %, тоді як за 12 кроків досягається відносно падіння на 23,9 % з подальшою тенденцією спаду. Аналіз залежності показника діаметра графа від кроків руйнування дзеркально відображає таку ж саму тенденцію.

Неоднакові результати стійкості мереж під час цілеспрямованого деструктивного впливу. Реальна мережа та друга модельна мережа продемонстрували приблизно однакові результати стійкості. Так показник середнього інверсного шляху досягає свого максимуму у реальній мережі на 15 кроці та становить 6,08 переформувань, тоді як у другій мережі максимум досягається на 10 кроці та становить 7,148 переформувань. Майже однакові результати різкого падіння показника після досягнення максимальних значень: так за 14 кроків відбувається різке падіння показника на 70,6 % у реальній мережі та 60,14 % у другій модельній мережі.

Відмінні від інших результати стійкості у першій модельній мережі. Показник середнього інверсного шляху на першому кроці має максимальне значення 4,984 переформувань, після чого на 8 кроці відбувається різке падіння показника на 67,8 % від максимального.

Можна констатувати, що перша модельна мережа при корельованій перколяції є нестійкою.

Відповідно до результатів перколяції мережі поріг протікання під час випадкового переван-

таження залізничних станцій в мережі виникає у реальній мережі при відмові 71,8 % станцій, у першій мережі – 50,8 %, у другій мережі – 63,8 %. При корельованій перколяції поріг протікання мережі ПФП виникає для реальної мережі під час руйнування 8,2 % станцій від загальної кількості; для першої модельної мережі на першому кроці – 0,6 %; для другої модельної мережі під час руйнування 5,5 % станцій.

Для підтвердження значень порогу протікання в мережі призначень ПФП на рис. 4 побудовані залежності розміру другого за величиною кластера в мережі [11, 15] від кроків руйнування за двома варіантами перколяції. Одразу можна спостерігати фазовий перехід в системі при досягненні максимального значення розміру другого за величиною кластера (рис. 4). При корельованій перколяції максимальне значення розміру другого за величиною кластера досягається у реальній мережі на 15 кроці; для першої модельної мережі на 2 кроці; для другої модельної мережі на 11 кроці. Так як і в попередніх результатах, відмінним є лише результат першої модельної мережі. При випадковій перколяції фазовий перехід в системі при досягненні максимального значення другої сильно зв'язної компоненти подібний у всіх мереж. Результати моделювання при досягненні максимального значення розміру другого за величиною кластера від кроків руйнування мереж за двома варіантами перколяції наведено у табл. 3.

### Наукова новизна та практична значимість

Відповідно до виконаних розрахунків протікання модельних мереж їх стійкість до випадкових відмов та чутливість до скоординованих збоїв дозволяє стверджувати про їх структурну схожість з реальною мережею призначень ПФП.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

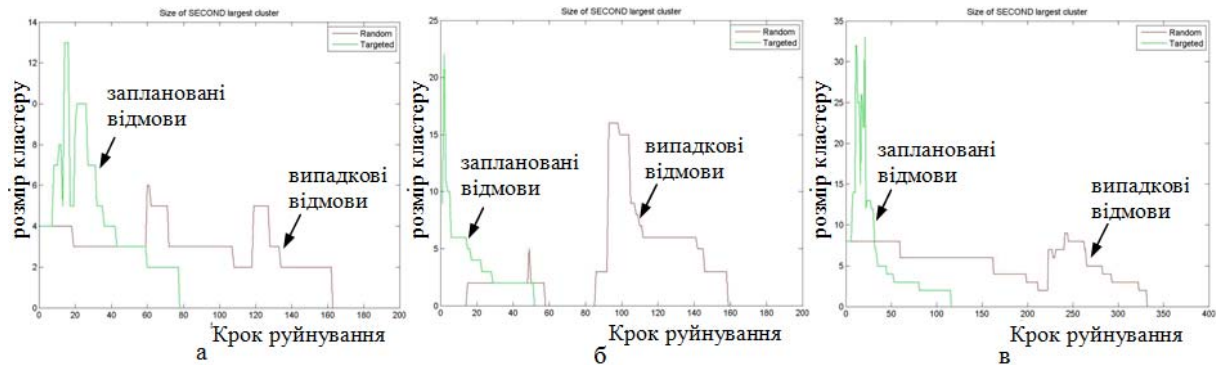


Рис. 4. Графік залежності розміру другого за величиною кластера в мережі від кроків руйнування: *a* – реальна мережа; *б* – перша модельна мережа; *в* – друга модельна мережа

Fig. 4. Dependence diagram of the size of the second largest cluster in a network from destruction steps: *a* – real network; *б* – the first network model; *в* – the second network model

Таблиця 3

**Результати моделювання залежності розміру другого за величиною кластера в мережі від кроків руйнування мереж за двома варіантами перколяції**

Table 3

**Simulation results depending on the size of the second largest cluster in a network from destruction steps in two variants of percolation**

Реальна мережа 181 вершина; 372 зв'язки		Модельна мережа 181 вершина; 363 зв'язки		Модельна мережа 362 вершина; 846 зв'язки	
випадкова перколяція: максимальне значення розміру другого за величиною кластера в мережі					
130 крок	8 станцій	93 крок	16 станцій	241 крок	9 станцій
корельована перколяція: максимальне значення розміру другого за величиною кластера в мережі					
15 крок	13 станцій	2 крок	22 станцій	11 крок	32 станцій

Отримані результати перколяції мереж різної розмірності підтверджують, що їх перколяційні кластери самоподібні або незалежні від масштабу. Відповідно до вище описаних досліджень в роботі вперше підтверджена гіпотеза про існування властивості масштабної інваріантності в мережі призначень плану формування поїздів на залізницях України. З практичної точки зору, спираючись на виявлені властивості системи направлення поїздопотоків, в подальшому можливим є створення математичної моделі, що дозволить спрогнозувати поведінку системи перевезень з сітьовою структурою на залізничному транспорті.

### Висновки

Слід зазначити, нульовий поріг протікання для першої модельної мережі при корельованій

перколяції відрізняється від результатів стійкості реальної мережі з причини складності реалізації на практиці генерування мережі, яка була б ідентична реальній. Все ж таки підхід на основі моделі Барабаші-Альберт є найпростішим, а тому для більшого наближення до реальних даних необхідним є удосконалення процедури генерування мережі призначень ПФП. Однак, навіть за таким спрощеним підходом майже всі основні результати перколяції більшості порівняльних показників співпадають з результатами реальної мережі призначень ПФП, що є підставою для ствердження про існування властивості безмасштабності в системі організації поїздопотоків та належності реальної мережі призначень ПФП до типу так званих масштабно-інваріантних мереж.

## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бобровский, В. И. Совершенствование технологии формирования многогруппных составов / В. И. Бобровский, И. Я. Сковрон // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 19. – С. 88–93.
- Державний стандарт України ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Введено вперше ; надано чинності 1996-01-01. – К. : Держстандарт України, 1994. – 33 с.
- Марценюк, Л. В. Вдосконалення процесу вантажних перевезень та механізму управління ними / Л. В. Марценюк, А. В. Вишнякова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2014. – № 2 (50). – С. 41–48.
- Прохорченко, А. В. Аналіз живучості системи організації поїздопотоків на основі теорії перколяції / А. В. Прохорченко // Восточно-европ. журн. передових технологій. – 2013. – Т. 6. – № 3 (66). – С. 7–10.
- Складні мережі / Ю. Головач, О. Олемской, К. фон Фербер та ін. // Журн. фіз. дослідж. – 2006. – Т. 10. – № 4. – С. 247–289.
- Тарасевич, Ю. Ю. Перколяція: теорія, приложенія, алгоритми : учеб. пособие / Ю. Ю. Тарасевич. – М. : Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
- Albert, R. Error and attack tolerance of complex networks / R. Albert, H. Jeong, A. Barabasi // Nature. – 2000. – Vol. 406. – P. 378–382. doi: 10.1038/35019019
- Albert, R. Statistical mechanics of complex networks / R. Albert, A. L. Barabási // Reviews of Modern Physics. – 2002. – Vol. 74. – P. 47–97.
- Barabási, A. L. Emergence of scaling in random networks / A. L. Barabási, R. Albert // Science. – 1999. – Vol. 286. – P. 509–512. doi: 10.1126/science.286.5439.509.
- Batagelj, V. Pajek: Package for Large Networks. Version 1.10 / V. Batagelj, A. Mrvar. – Ljubljana : University of Ljubljana, 2005. – 10 p.
- Broadbent, S. R. Percolation processes: I. Crystals and Mazes / S. R. Broadbent, J. M. Hammersley // Mathematical Proc. of the Cambridge Philosophical Society. – 1957. – Vol. 53. – Iss. 03. – P. 629–641.
- But'ko, T. Investigation into Train Flow System on Ukraine's Railways with Methods of Complex Network Analysis / T. But'ko, A. Prokhorchenko // American J. of Industrial Engineering. – 2013. – Vol. 1 (3). – P. 41–45.
- Clauset, A. Power-law distributions in empirical data / A. Clauset, C. R. Shalizi, M. E. J. Newman // SIAM Review. – 2009. – № 51 (4). – P. 661–703. doi: 10.1137/070710111.
- Measures of critical exponents in the four dimensional site percolation / H. G. Ballesteros, L. A. Fer-nández, V. Martin-Mayor et al. // Physics Letters. – 1997. – Vol. B 400 (3). – P. 346–351. doi: 10.1016/s0370-2693(97)00337-7.
- Newman, M. E. J. Scaling and percolation in the small-world network model / M. E. J. Newman, D. J. Watts // Phys. Rev. E. – 1999. – Vol. E. – № 60 (6). – P. 7332–7342. doi: 10.1103/physreve.60.7332.
- Wasserman, S. Social Network Analysis: Methods and Applications / S. Wasserman, K. Faust. – Cambridge : Cambridge University Press, 1994. – 827 p.

А. В. ПРОХОРЧЕНКО<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Управление эксплуатационной работой», Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, площадь Фейербаха, 7, 61166, Харьков, Украина, тел. +38 (057) 730 19 88, эл. почта railwayhub@yandex.ua, ORCID 0000-0003-3123-5024

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВА МАСШТАБНОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПОЕЗДОПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ

**Цель.** Работа посвящена вопросу исследования свойства масштабной инвариантности системы организации поездопотоків на железных дорогах Украины. **Методика.** Для доказательства принадлежности реальной сети назначений плана формирования поездов (ПФП) к типу так называемых масштабнo-инвариантных сетей предложено сгенерировать различной размерности безмасштабные сети типа Барабаши-Альберта с параметрами, которые имеет реальная сеть назначений ПФП. Исследована также структура на живучесть с помощью процедуры перколяции узлов. Процесс перколяции предложено рассматривать как изменение варианта пространственного перемещения вагонов на сети при увеличении количества железнодорожных станций, которые потеряли способность выполнять основную функцию по пропуску вагонов по назначениям ПФП в условиях неблагоприятных воздействий (аварийная ситуация, перегрузка). **Результаты.** Сравнительный анализ результатов перколяции при случайном и целенаправленном деструктивном воздействии на

Doi 10.15802/stp2014/30471

© А. В. Прохорченко, 2014



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

узлы сети показал совпадение с результатами перколяции реальной сети назначений ПФП, что доказывает существование свойства самоподобия. Сравнительными показателями при перколяции были: процент удаленных станций в сети, при котором возникает фрагментация сети, средний инверсный путь между узлами сети, диаметр графовой структуры, значение размера второго по величине кластера в сети от шагов разрушения. **Научная новизна.** Впервые подтверждена гипотеза о существовании свойства масштабной инвариантности в графе назначений ПФП на железных дорогах Украины, что позволяет отнести граф к классу безмасштабных сетей. Существующие знания в области теории безмасштабных сетей могут быть использованы для описания живучести системы перевозок на железных дорогах Украины. **Практическая значимость.** Опираясь на выявленные свойства системы направления поездопотоков, в дальнейшем возможным является создание математической модели, что позволит спрогнозировать поведение системы перевозок с сетевой структурой. Анализ свойства живучести системы организации поездопотоков позволит оптимизировать использование капитальных инвестиций для повышения пропускной способности сети за счет выявления наиболее критических участков и станций, которые системно влияют на эффективность работы сети в целом.

*Ключевые слова:* масштабно-инвариантная сеть; план формирования поездов; перколяция; живучесть; граф; железнодорожная сеть

A. V. PROKHORCHENKO<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Operational Work Management», Ukrainian State Academy of Railway Transport, Feuerbach Sq., 7, Kharkiv, Ukraine, 61166, tel. +38 (057) 730 19 88, e-mail railwayhub@yandex.ua, ORCID 0000-0003-3123-5024

## INVESTIGATION OF SCALE-INVARIANT PROPERTY OF ORGANIZATION SYSTEM OF TRAIN TRAFFIC VOLUME BASED ON THE PERCOLATION THEORY

**Purpose.** The work is devoted to the study the property of scaling invariance of the organization system of train traffic volume on Ukrainian railways. **Methodology.** To prove the real network origin of Trains Formation Plan (TFP) destination to the type of so-called scale-invariant networks it is proposed to generate scale-free networks with different dimensions, Barabási–Albert type with parameters that real networks of TFP destination has and to investigate their structure on survivability using the procedure of percolation nodes. Percolation process is proposed to be considered as a modified version of the spatial movement of cars on the network by increasing the number of railway stations, which have lost the ability to perform the basic function to pass cars on TFP destination in terms of adverse effects (an accident, overload). **Findings.** Comparative analysis of percolation at random and targeted destructive impact on network nodes has shown matching with the results of real network percolation of TFP destination, which proves the existence of self-similarity. Comparable figures in percolation were: percentage of remote stations in the network, in which the network fragmentation occurs, the average inverse path between network nodes, the diameter of the graph structure, the size meaning of the second largest cluster in the network from the steps of destruction. **Originality.** For the first time the hypothesis of the existence of scaling invariance properties of the graph TFP destinations on the railways of Ukraine, which can be attributed to a class of the graph scale-free networks was confirmed. Existing knowledge in the field theory of scale-free networks can be used to describe the survivability of system transportation on the railways of Ukraine. **Practical value.** Based on the identified properties of system directions of train traffic volumes, it is possible to create a mathematical model in the future that will predict the behavior of the transportation system with network structure. Properties analysis of system survivability of train traffic volumes will optimize the use of capital investments to increase network capacity by identifying the most critical lines and stations that systematically affect the efficiency of the network as a whole.

*Keywords:* scale-invariant networks; trains' formation plan; percolation; survivability; graph; railway network

### REFERENCES

1. Bobrovskiy V.I., Skovron I.Ya. Sovershenstvovaniye tekhnologii formirovaniya mnogogruppnykh sostavov [Improving the technology of multigroup compositions formation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 19, pp. 88-93.
2. DSTU 2860-94. *Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia* [State Standard of Ukraine 2860-94. Reliability of technique. Terms and Definitions]. Kyiv, Derzhstandart Ukrainy Publ., 1994. 33 p.



## ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

3. Martseniuk L.V., Vyshniakova A.V. Vdoskonalennia protsesu vantazhnykh perevezen ta mekhanizmu upravlinnia nymy [Improving of freight transportation process and mechanism of their management]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2014, no. 2 (50), pp. 41-48.
4. Prokhorchenko A.V. Analiz zhyvuchosti systemy orhanizatsii poizdopotokiv na osnovi teorii perkoliatsii [Analysis of survivability of the organisation system of train traffic volumes on the percolation theory]. *Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – Eastern-European Journal of Innovative Technologies*, 2013, vol. 6, no. 3 (66), pp. 7-10.
5. Holovach Yu., Oliemskoi O., fon Ferber K., Holovach T., Mryhlod O., Olemskoi I., Palchykov V. Skladni merezhi [Complex networks]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen – Journal of Physical Studies*, 2006, vol. 10, no. 4, pp. 247-289.
6. Tarasevich Yu.Yu. *Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy* [Percolation: theory, applications, algorithms]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2002. 112 p.
7. Albert R., Jeong H., Barabasi A. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 2000, vol. 406, pp. 378–382. doi: 10.1038/35019019
8. Albert R., Barabási A.-L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 2002, vol. 74, pp. 47-97.
9. Barabási A.-L., Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, vol. 286, pp. 509-512. doi: 10.1126/science.286.5439.509.
10. Batagelj V., Mrvar A. Pajek: Package for Large Networks, Version 1.10. Ljubljana, University of Ljubljana Publ., 2005. 10 p.
11. Broadbent S.R., Hammersley J.M. Percolation processes: I. Crystals and Mazes. *Mathematical Proc. of the Cambridge Philosophical Society*, 1957, vol. 53, pp. 629-641.
12. But'ko T., Prokhorchenko A. Investigation into Train Flow System on Ukraine's Railways with Methods of Complex Network Analysis. *American Journal of Industrial Engineering*, 2013, vol. 1 (3), pp. 41-45.
13. Clauset A., Clauset A., Shalizi C.R., Newman M.E.J. Power-law distributions in empirical data. *SIAM Review*, 2009, vol. 51 (4), pp. 661-703. doi: 10.1137/070710111.
14. Ballesteros H.G., Fernández L.A., Martin-Mayor V., Parisi G., Ruiz-Lorenzo J.J. Measures of critical exponents in the four dimensional site percolation. *Physics Letters*, 1997, vol. 400 (3) B, pp. 346-351. doi: 10.1016/s0370-2693(97)00337-7.
15. Newman M.E.J., Watts D.J. Scaling and percolation in the small-world network model. *Phys. Rev. E.*, 1999, vol. E 60 (6), pp. 7332-7342. doi: 10.1103/physreve.60.7332.
16. Wasserman, S., Faust K. *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Cambridge, Cambridge University Press Publ., 1994. 827 p.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Т. В. Бут'ко (Україна); д.т.н., проф. Д. М. Козаченком (Україна)

Надійшла до редколегії: 16.07.2014

Прийнята до друку: 29.09.2014