

УДК 656.2.073-027.15

О. І. ХАРЧЕНКО^{1*}

^{1*} Дніпровський Національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, т. +380507342743, e-mail: olesiakh100@gmail.com, ORCID 0000-0003-2068-0640

АДЕКВАТНІСТЬ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ КАПІТАЛОВКЛАДЕНЬ

Мета. Моделювання на сьогодні є одним із популярних методів досліджень, пов'язаних із підвищенням ефективності функціонування підрозділів залізничного транспорту, бо модель – замісник оригінального об'єкту, який допомагає вивчати його властивості. Відповідність результатів, отриманих за допомогою моделі, поведінці реального об'єкту є важливим питанням для моделювання, тому перевірка на адекватність є невід'ємною частиною даного процесу. Тож, метою даної статті є представлення методики перевірки адекватності моделі визначення раціональних капіталовкладень за позиціями сталого розвитку. **Методика.** Для моделей залежності функції еластичності капіталовкладень за напрямками сталого розвитку від характеристик попиту на послуги підрозділів проведена перевірка на адекватність на основі критерія Фішера. Для чого була сформована нуль-гіпотеза про рівність дисперсії неадекватності та дисперсії експерименту. **Результати.** Перевірка моделей на адекватність показала, що залежності функцій еластичності капіталовкладень за напрямками сталого розвитку від параметрів попиту на послуги адекватно описують експериментальні результати. **Практична значимість.** Виконана перевірка адекватності моделей підтвердила доцільність практичного використання моделей при управлінні підрозділами залізничного транспорту залежностей функцій еластичності капіталовкладень за напрямками сталого розвитку від характеристик попиту на послуги підрозділів.

Ключові слова: адекватність моделі; сталий розвиток; залізничний транспорт; підрозділи залізничного транспорту

Вступ

Складною системою є система, що включає в себе велику кількість взаємодіючих елементів та забезпечує рішення достатньо складної задачі. До таких систем відносяться інформаційні мережі, транспортно-логістичні системи, виробничо-технологічні процеси, системи управління складними динамічними об'єктами. Виходячи з наведеного визначення підрозділи залізничного транспорту відносяться до складних систем за всіма їх ознаками, а це унеможливорює проведення експериментальних досліджень на реальних об'єктах чи їх фізичних моделях. Тому на допомогу приходять математичні моделі, які дають змогу оцінювати показники функціонування підрозділів залізничного транспорту.

Огляд попередніх публікацій

Математичне моделювання як метод дослідження складних систем останнім часом набуває широкого застосування для вирішення різного роду задач. Саме відповідність результатів, отриманих на моделі, поведінці реального об'єкту дає право говорити про науковість дослідження та адекватність моделі.

Для повного розуміння поняття адекватність моделі для початку розкриємо поняття модель. За даними деяких джерел модель має наступні визначення:

Модель – це спрощене, можна сказати «упаковане» знання, що несе цілком певну обмежену інформацію про предмет (явищі), відображає ті або інші його властивості [1].

Модель – об'єкт-заступник об'єкту-оригіналу, що забезпечує вивчення деяких властивостей оригіналу [2].

Модель – що реально існує або в думках представляється система, яка, заміщаючи і відображаючи оригінал з певною метою, знаходиться з ним у відносинах подібності (схожості) [3].

Тому загальне поняття моделі зводиться до того, що модель – аналог оригінального об'єкту, що дозволяє вивчити деякі його властивості.

Особливістю математичних моделей є те, що отримання за їх допомогою яких-небудь результатів пов'язане з обчисленням, тобто з отриманням результатів обчислювального експерименту [4]. Враховуючи вищезазначене можна сказати, що адекватність математичної моделі є відповідність результатів обчислювального експерименту поведінці реального об'єкту.

Моделювання на сьогодні є одним із популярних методів досліджень, пов'язаних із підвищенням ефективності функціонування підрозділів залізничного транспорту. Дослідженнями, пов'язаними з підвищенням ефективності функціонування підрозділів залізничного транспорту шляхом удосконалення роботи окремих елементів транспортних складних систем, встановленням зв'язків між елементами та створенням моделей функціонування, як окремих підсистем, так і їх комплексів проводилися багатьма вченими. Далі наведено аналіз декількох робіт з точки зору адекватності моделей підвищення ефективності функціонування підрозділів залізничного транспорту.

Автори статті [5] пропонують дворівневу модель, що містить оптимізаційні задачі для першого рівня – управління роботою кожного виду транспорту, та для другого рівня (координуючого центру) – на базі єдиної системи управління парком вантажних вагонів. Математичний апарат, що використовується при розробці моделі управління, є характерним для групи робіт [6,7,8,9], що використовували методи лінійного програмування при управлінні підрозділами залізниці. Наведена дворівнева модель може бути використана в процесі управління взаємодією різних підрозділів залізничного транспорту, але основним недоліком такої моделі є використання у якості вихідних даних детермінованих показників попиту та економічно-технологічних показників. Як відмічається у [10], така особливість значно знижає адекватність моделей й, як наслідок, коректність результатів їх використання при управлінні залізницями.

Більш адекватно описує реальні процеси функціонування залізниць комплекс моделей стохастичного програмування, що запропоновано у роботі [11]. На відміну від традиційних, запропонований підхід передбачає визначення оптимальної маси вантажу на маршруті й мінімізацію об'єму вантажу на «колесах» з розробкою рекомендацій відносно формування єдиної технології функціонування інфраструктури залізниць у відповідності зі зміною вантажопотоків.

Автор роботи [12] при управлінні залізницями пропонує використовувати імітаційне моделювання для вирішення задач прогнозування тривалості обороту контейнерів при альтернативних способах організації логістичних ланцюжків, а також задач прогнозування часу знаходження контейнеру в регіональній транспортно-логістичній системі з врахуванням пропускної спроможності термінальної інфраструктури, а також альтернативних способів організації

просування матеріального потоку. Тут слід відмітити, що імітаційне моделювання як методологія рішення задач управління роботою транспорту набуло широкого розповсюдження в теоретичних розробках [13-16]. Основною перевагою даної методології, крім безпосереднього обліку природи технологічних процесів, є можливість деталізації існуючих моделей, їх безпервне удосконалення при управлінні складними динамічними системами з метою підвищення їх адекватності.

Мета

Метою статті є представлення методики перевірки адекватності моделі визначення раціональних капіталовкладень за позиціями сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу

Сталий розвиток підрозділів залізничного транспорту пропонується оцінювати на підставі критерія ефективності $F_{ц}$, запропонованого у роботі [17]

$$F_{ц} = \frac{E_i}{C_{сп}} = \delta_{тех} \cdot \epsilon_{тех} + \delta_{ек} \cdot \epsilon_{ек} + \delta_{соц} \cdot \epsilon_{соц} + \delta_{як} \cdot \epsilon_{як} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де $\delta_{тех}$, $\delta_{ек}$, $\delta_{соц}$, $\delta_{як}$ – частка грошових коштів у загальному об'ємі за напрямками сталого розвитку удосконалення технологій, зниження шкідливого впливу на навколишнє середовище, забезпечення соціальної складової функціонування та підвищення якості обслуговування клієнтури відповідно;

$\epsilon_{тех}$, $\epsilon_{ек}$, $\epsilon_{соц}$, $\epsilon_{як}$ – функції еластичності витрат ресурсів за напрямками розвитку удосконалення технологій, зниження шкідливого впливу на довкілля, забезпечення соціальної складової функціонування та підвищення якості обслуговування клієнтури відповідно.

Оптимізація цільової функції (1) відносно змінних $\delta_{тех}$, $\delta_{ек}$, $\delta_{соц}$, $\delta_{як}$ повинно виконуватись з врахуванням сукупності обмежень

$$\begin{cases} \delta_{тех} + \delta_{ек} + \delta_{соц} + \delta_{як} = 1 \\ \delta_{тех} \geq \delta_{тех}^{\min} \\ \delta_{ек} \geq \delta_{ек}^{\min} \\ \delta_{соц} \geq \delta_{соц}^{\min} \\ \delta_{як} \geq \delta_{як}^{\min} \end{cases} \quad (2)$$

де δ_i^{\min} – встановлена нижня межа частки ресурсів для забезпечення i -ого напрямку сталого розвитку.

Для проведення експериментальних досліджень в області підвищення функціонування підрозділів залізничного транспорту було використано імітаційну модель для залізничних станцій Придніпровської залізниці, яка містить оптимізаційні функції (оптимізації розподілу вантажної роботи по станціям, розрахунку оптимальної кількості обслуговуючих механізмів, а також оптимального розподілу ресурсів за напрямками сталого розвитку).

Необхідність проведення імітаційного моделювання на базі програмної моделі залізничних станцій Придніпровської залізниці обумовлена стохастичністю попиту на транспортні засоби, а також ймовірнісною природою технологічного процесу обслуговування вагонопотоку. Чисельні значення часток ресурсів, які виділяються на забезпечення відповідних напрямків сталого розвитку, визначаються на основі чисельних значень параметрів попиту. Таким чином, виникла необхідність у визначенні функціональних залежностей значень $\delta_{\text{тех}}$, $\delta_{\text{ек}}$ та $\delta_{\text{як}}$ від характеристик стохастичного попиту на транспортні засоби, оскільки значення часток ресурсів, які виділяються на забезпечення сталого розвитку, у конкретній ситуації на ринку коректно можуть бути оцінені тільки на базі таких залежностей.

У якості основних чисельних параметрів, які дозволяють описати ймовірнісний попит на транспортні засоби, у розробленій програмній моделі виділені реалізації випадкових величин інтенсивності поїздопотоків на транспортній мережі, а також кількості вагонів у складі поїздів. Для проведення експериментальних досліджень з метою визначення функціональної залежності показників еластичності витрат ресурсів за напрямками сталого розвитку від характеристик попиту на транспортні засоби розглядалося математичне очікування інтенсивності поїздопотоків μ_ζ та математичне очікування кількості вагонів μ_ψ у складі одного вантажного поїзду. Таким чином, метою проведення імітаційного моделювання є визначення наступних функціональних залежностей

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{тех}} = f(\mu_\zeta, \mu_\psi) \\ \varepsilon_{\text{ек}} = f(\mu_\zeta, \mu_\psi) \\ \varepsilon_{\text{як}} = f(\mu_\zeta, \mu_\psi) \end{cases} \quad (3)$$

Для обробки результатів експериментальних досліджень та визначення функціональних

залежностей функцій еластичності витрат ресурсів від параметрів попиту була використана методологія регресійного аналізу отриманих у результаті експерименту вибірок.

Таким чином, функції еластичності витрат ресурсів за напрямками сталого розвитку в залежності від параметрів попиту на транспортні засоби визначаються як наступна сукупність:

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{тех}} = \mu_\zeta^{0,477} \cdot \mu_\psi^{0,043} \\ \varepsilon_{\text{ек}} = 0,370 \cdot \mu_\zeta + 0,206 \cdot \ln(\mu_\psi) \\ \varepsilon_{\text{як}} = 0,054 \cdot \mu_\zeta + 0,268 \cdot \ln(\mu_\psi) \end{cases} \quad (4)$$

Отримані залежності є основою для вирішення задачі оптимізації розподілу коштів за напрямками сталого розвитку підрозділів залізничного транспорту.

Для підтвердження доцільності практичного використання при управлінні підрозділами залізничного транспорту отриманих моделей залежності функції еластичності капіталовкладень за напрямками сталого розвитку від характеристик попиту на послуги підрозділів необхідно перевірити гіпотези про адекватність даних моделей. Перевірку рівнянь будемо проводити на підставі критерія Фішера [18].

Для перевірки адекватності моделей формується нуль-гіпотеза про рівність дисперсії неадекватності $\sigma_{\text{на}}^2$ і дисперсії експерименту $\sigma_{\text{експ}}^2$

$$H_0 : \sigma_{\text{на}}^2 = \sigma_{\text{експ}}^2 \quad (5)$$

Дисперсія експерименту розраховується як співвідношення суми квадратів відхилень, які пов'язані із повторенням опитів та вимірів, до числа ступенів свободи даної суми

$$\sigma_{\text{експ}}^2 = \frac{1}{m \cdot n - n} \cdot \sum_{v=1}^n \sum_{w=1}^m (y_{vww} - \bar{y}_{vw})^2, \quad (6)$$

де \bar{y}_{vw} – середньо арифметичне значення функції відгуку в серії експерименту.

Істинність гіпотези (5) перевіряється по значенню критерія Фішера F_a , який визначається за формулою

$$F_a = \frac{\sigma_{\text{на}}^2}{\sigma_{\text{експ}}^2}. \quad (7)$$

Гіпотеза є істинною, якщо виконується наступна нерівність

$$F_a < F_{\text{табл}}. \quad (8)$$

Результати розрахунків критерія Фішера при перевірці адекватності отриманих моделей наведені у табл. 1.

Таблиця 1
Перевірка гіпотези про адекватність регресійних моделей

Модель	$\sigma_{\text{експ}}^2$	$\sigma_{\text{на}}^2$	F_a
$\varepsilon_{\text{тех}} = \mu_{\zeta}^{0,477} \cdot \mu_{\psi}^{0,043}$	1,489	0,206	0,14
$\varepsilon_{\text{ек}} = 0,370 \cdot \mu_{\zeta} + 0,206 \cdot \ln(\mu_{\psi})$	8,916	0,145	0,02
$\varepsilon_{\text{як}} = 0,054 \cdot \mu_{\zeta} + 0,268 \cdot \ln(\mu_{\psi})$	0,085	0,104	1,23

При визначенні табличного значення критерію прийнят діалогон значень для $f_2 = \infty$. Серед відповідних значень для кількості ступенів свободи f_1 відомим є значення критерія $F(f_1 = 10) = 2,54$.

У відповідності із проведеними розрахунками значення F_a для запропонованих моделей складає від 0,20 до 0,51, що менше відповідного табличного значення, тобто є нерівність (8) виконується для всіх отриманих моделей, це говорить про істинність гіпотези (5). Таким чином, можна стверджувати, що залежності функцій еластичності капіталовкладень за напрямками сталого розвитку від параметрів попиту на послуги підрозділів залізничного транспорту адекватно описують експериментальні результати, тобто отримані на основі моделей дані будуть за точністю не гірше експериментальних.

Висновки

Отримані моделі (4) залежності функцій еластичності капіталовкладень від параметрів попиту є основою для вирішення задачі оптимізації розподілу коштів за напрямками сталого розвитку підрозділів залізничного транспорту. Використання отриманих моделей для оцінювання коефіцієнтів при визначенні критерію ефективності функціонування підрозділів залізничного транспорту дозволяє враховувати параметри стохастичного попиту на послуги підрозділів залізничного транспорту при формуванні стратегії його сталого розвитку. Виконана перевірка адекватності моделей підтвердила доцільність практичного використання моделей при управлінні підрозділами залізничного транспорту залежностей функцій еластичності капіталовкладень за напрямками сталого розвитку від характеристик попиту на послуги підрозділів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Кузьмин В. В. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения: учебник для вузов / В. В. Кузьмин [и др.]. – Москва: Высшая школа, 2008. – 279 с.
2. Ашихмин В. Н. Введение в математическое моделирование: учебное пособие / В. Н. Ашихмин [и др.]; под ред. П. В. Трусова. – Москва: ЛОГОС, 2005. – 440 с.
3. Советов Б. Я. Моделирование систем: учебник для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. 3-е изд., перераб и доп. Москва: Высшая школа, 2001. – 343 с.
4. Кубланов М.С. Проверка адекватности математических моделей / М.С. Кубланов // Научный вестник МГТУ. – 2015. – № 2. – С. 29-36.
5. Полішко Т.В. Управління витратами підприємств залізничного транспорту: автореф. дис. канд. екон. наук, 08.02.03 – організація управління, планування та регулювання економікою. – Харків: ХНУ, 2004. – 24 с.
6. Огороков А.М. Удосконалення управління транспортними вантажними комплексами в транспортних вузлах: автореф. дис. канд. техн. наук, 05.22.01 – транспортні системи. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. – 21 с.
7. Нагорний Є.В. Модель логістичної системи доставки вантажів між Україною та Білоруссю / Є.В. Нагорний, В.С. Наумов, А.В. Іванченко // Транспортні системи та технології перевезень. – 2012. – Вип. 4. – С. 70–74
8. Панова Н.В. Повышение эффективности работы структурных подразделений железнодорожного транспорта на основе совершенствования системы экономических нормативов на предприятиях железной дороги: дисс. канд. екон. наук, 08.00.05 – экономика и управление народным хозяйством. – Новосибирск: СГУПС, 2001. – 169 с.
9. Тітов М.Ф. Підвищення ефективності функціонування технічних прикордонних передавальних станцій залізниць України: автореф. дис. канд. техн. наук, 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 1999. – 22 с.
10. Troelsen A. Pro C# 2010 and the .NET 4 Platform / A. Troelsen. – NY: Springer, 2010. – 1749 p.
11. Куделя В.І. Шляхи підвищення ефективності роботи залізничного транспорту в умовах ринкової економіки: дис. канд. екон. наук, 08.07.04 – економіка транспорту і зв'язку. – Харків: УкрДАЗТ, 2006. – 379 с.
12. Наумов В.С. Транспортно-экспедиционное обслуживание в логистических системах: Монография / В.С. Наумов. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – 220 с.
13. Пасічник В.І. Економічна стратегія розвитку експлуатаційної діяльності залізничного транспорту: автореф. дис. докт. екон. наук, 08.07.04 – економіка транспорту і зв'язку. – Київ: НАУ, 2004. – 25 с. Чеховська М.М. Організаційно-економічний механізм удосконалення природоохоронної діяльності на залізничному транспорті України: автореф. дис. канд. екон.

наук, 08.08.01 – економіка природокористування і охорони навколишнього середовища. – Київ: НАН України, 2003. – 22 с.

14. Антонюк У.В. Правове забезпечення екологічної безпеки у діяльності залізничного транспорту: автореф. дис. канд. юрид. наук, 12.00.06 – земельне право; аграрне право; екологічне право; природоресурсне право. – Київ: НУБіПУ, 2009. – 26 с.

15. Пономарев В.Н. Методы и средства повышения безопасности и устойчивости функционирования железнодорожного транспорта в чрезвычайных ситуациях: дис. докт. техн. наук, 05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях. – Москва: МГУПС(МИИТ), 2011. – 416 с.

16. Харченко О.І. Підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів залізниць шляхом

раціонального розподілу ресурсів: автореф. дис. канд. техн. наук, 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2015. – 24 с.

17. Вознесенский В.А. Принятие решений по статистическим моделям / В.А. Вознесенский, А.Ф. Ковальчук. – М.: Статистика, 1978. – 192 с.

Надійшла в редколегію 22.05.2021

Прийнята до друку 07.06.2021

О. И. ХАРЧЕНКО

АДЕКВАТНОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЙ

Цель. Моделирование на сегодня является одним из популярных методов исследований, связанных с повышением эффективности функционирования подразделений железнодорожного транспорта, так как модель – заменитель оригинального объекта, который помогает изучать его свойства. Соответствие результатов, полученных с помощью модели, поведение реального объекта является важным вопросом для моделирования, поэтому проверка на адекватность является неотъемлемой частью данного процесса. В этой связи целью данной статьи является представление методики проверки адекватности модели определения рациональных капиталовложений по позициям устойчивого развития. **Методика.** Для моделей зависимости функции эластичности капиталовложений по направлениям устойчивого развития от спроса на услуги подразделений проведена проверка на адекватность на основе критерия Фишера. Для чего была сформирована нуль-гипотеза о равенстве дисперсии неадекватности и дисперсии эксперимента. **Результаты.** Проверка моделей на адекватность показала, что зависимости функций эластичности капиталовложений по направлениям устойчивого развития от параметров спроса на услуги адекватно описывают экспериментальные результаты. **Практическая значимость.** Выполненная проверка адекватности моделей подтвердила целесообразность практического использования моделей при управлении подразделениями железнодорожного транспорта зависимостей функций эластичности капиталовложений по направлениям устойчивого развития от спроса на услуги подразделений.

Ключевые слова: адекватность модели; устойчивое развитие; железнодорожный транспорт; подразделения железнодорожного транспорта

ADEQUACY OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING RATIONAL CAPITAL INVESTMENTS

Purpose. Modeling today is one of the popular research methods related to increasing the efficiency of the functioning of rail transport units, because the model is a substitute for the original object that helps to study its properties. Compliance with the results obtained by model, the behavior of a real object is an important issue for modeling, so the adequacy verification is an integral part of this process. Therefore, the purpose of this article is to present a method for verifying the adequacy of the model of determination of rational investments in terms of sustainable development.

Methodology. For models of dependence of the function of elasticity of investments in the directions of sustainable development on the characteristics of demand for services, checking for the adequacy on the basis of Fisher's criterion was carried out. For what zero hypothesis was formed on the equality of dispersion of inadequacy and dispersion of the experiment. **Findings.** The verification of models on adequacy has shown that the dependence of the functions of elasticity of investments in the areas of sustainable development from the parameters of demand for services adequately describes experimental results. **Practical value.** The performance of the adequacy of models confirmed the expediency of practical use of models in the management of railway transport depending units of the functions of elasticity of investments in the directions of sustainable development on the characteristics of demand for services of departments.

Keywords: model adequacy; sustainable development; rail transport; rail transport units