

УДК 338.1

DOI: <https://doi.org/10.32840/2522-4263/2022-2-12>**Романовський І.Г.***кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри економіки та підприємництва  
Українського державного університету науки і технологій***Romanovskiy Igor***Candidate of Sciences (Technics), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Entrepreneurship and Economics  
Ukrainian State University of Science and Technologies*

## ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА ВИНИКНЕННЯ РИЗИКІВ В ЛАНЦЮГАХ ПОСТАЧАННЯ

### ASSESSMENT OF THE IMPACT OF UNCERTAINTY ON THE RISK IN SUPPLY CHAINS

#### АНОТАЦІЯ

Метою досліджень є визначення та апробація підходу урахування впливу невизначеності на виникнення ризиків, з якими зіштовхуються при плануванні роботи ланцюгів постачання. При здійсненні досліджень в умовах виробничого підприємства визначено задачу прогнозування замовлень спеціальних профілів прокату для автомобільних доріг. Поєднання байєвського підходу для детермінації задач невизначеності з ітеративним алгоритмом імпутації відсутніх даних дало можливість сформулювати рекомендації для вирішення подібних задач в практичних умовах. На підставі рівняння множинної регресії створено математичну модель, яка визначає потребу в продукції підприємства. Визначено прогнозні замовлення продукції підприємства. Залучення запропонованої моделі забезпечує скорочення економічних ризиків при роботі підприємства як ланки ланцюга постачання. Статистична оцінка результатів свідчить про їх надійність.

**Ключові слова:** невизначеність, ризик, ланцюг постачання, втрати, сценарій, ланка.

#### ANNOTATION

Russian aggression has destroyed much of Ukraine's infrastructure. The mechanism of functioning of supply chains has become unbalanced. Rapid response to challenges and identification of measures to prevent them is identified as a component of the Ukrainian economy in the struggle for victory. Uncertainty is understood as a situation when the probability of a certain event is not fully known. The import of missing data is considered to be a main approach to deal with the issue. The existence of uncertainty means the impossibility of clearly defining the future outcome and the need to respond to a threat that is likely to be an economic risk. The application of Monte Carlo methods in economics is not always acceptable to measure uncertainty. Classical probability theory has certain limitations for practical application to treat uncertainty. The Bayesian theory is applied as a preferable toolkit to address the issue. In practical terms, the main difficulty is to reduce the initial uncertainty given the results of statistical observations. The main approach to solving problems of uncertainty – imputation – enables to substitute the missing data with values determined by a certain algorithm. The main types of imputation are examined in the article. The goal of the research is to set forth an approach dealing with the impact of uncertainties on the economic risk of a supply chain link. The research was performed on the basis of a manufacturing enterprise. The task was to forecast orders for the supply of special metal shapes to fix the roads destroyed during the war. Due to the need to make decisions when potential consumers of its products have not yet decided on their orders for the supply of its products, the company faces uncertainty challenges. To solve this problem, the Expectation-Maximization algorithm was ap-

plied to treat to predict initially missed data. By obtaining full data due to the EM-algorithm under the uncertainty, an equation was obtained to predict the relationship between the technological parameters of roads and the future demand for the company's products. The equation obtained enables to determine the forecast output of special profiles required to meet the need in rolled shapes. The statistical evaluation of research results testifies to their reliability.

**Key words:** uncertainty, supply chain, imputation, missing data, algorithm.

**Постановка проблеми.** Повномасштабна російська агресія призвела до руйнування більш 25% української інфраструктури. Механізм функціонування ланцюгів постачання, які забезпечували функціонування економіки, став розбалансованим або зруйнованим. У зв'язку із постійними загостреннями ситуації підвищуються вимоги до реагування на ризики, з якими зіштовхується інфраструктура України. Вчасне реагування на виклики і визначення заходів щодо їх передбачення і запобігання є важливою складовою української економіки в боротьбі за перемогу. В процесі визначення ризиків складним питанням є урахування невизначеності, правильне рішення якого підвищує надійність підходів визначення і оцінки економічних ризиків.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Концепція невизначеності широко використовується в економіці: ця категорія розуміється як ситуація, коли вірогідність певної події не є повністю відомою, як визначають R. Little і D. Rubin [1]. Це свідчить про непередбачуваність або недосконалість передбачення майбутніх подій.

В практичному сенсі невизначеність пов'язується з відсутністю окремої частини первинних даних, що впливає на кінцевий результат. Зазвичай, на думку Heij, De Boer, Franses, Kloek, and Van Dijk підходом для вирішення такої проблеми є імпорт відсутніх даних. Це обумовлено тим, різні статистичні програми інтерпретують відсутність даних по-різному.

Існування невизначеності означає неможливість чіткого визначення майбутнього результату і необхідність реагування на загрозу, ймовірності реалізації якої є економічним ризиком.

Heij De Boer, Franses, Kloek, Van Dijk [3], Jaunes ET [4] для оцінки впливу невизначеності пропонують методи Монте-Карло. На наш погляд, застосування в економіці методів, які були створені для моделювання лише рандомних параметрів в ігровому бізнесі, не є завжди припустимим.

На думку Р. Congdon, традиційні підходи до невизначеності засновуються на теорії ймовірності і полягають у визначеності розподілу ймовірностей, внаслідок чого обирається алгоритм дій, що забезпечує зменшення ризиків [5]. Втім, класична теорія ймовірності має певні обмеження для практичного застосування. А. Gelman, J. Carlin, H. Stern, D. Rubin [6] рекомендують апарат прикладної статистики, теорію прийняття рішень, де ймовірнісне вимірювання є мірою надійності на підставі існуючої бази неповних даних.

У зв'язку із складністю теоретичного рішення задачі, для практичних умов доцільно використовувати методи прикладної статистики, які дозволяють максимально враховувати особливості первинної бази даних.

Основний підхід до вирішення проблем невизначеності прикладними методами має назву імпутація. Згідно з V. Azur [7], імпутація – це процес встановлення відсутніх даних іншими значеннями, які визначаються за певним алгоритмом.

В прикладній статистиці визначаються три основні аспекти, які пов'язані з необхідністю імпутації відсутніх даних:

1. Відсутність даних обумовлює значну кількість упередженості, яка ускладнює аналіз даних.

2. Імпутація розглядається як спосіб уникнути помилок, пов'язаних із значущими випадками, які мають відсутні значення.

3. Імпутація розповсюджується на всі види відсутніх даних, замінюючи їх на приблизне значення на основі доступної інформації. Після цього сукупність (вибірка) піддається аналізу за допомогою стандартних методів для отримання повних даних. Незважаючи на те, що існує значна кількість теорій для пояснення відсутніх даних, абсолютна більшість із них формують упереджене ставлення до відсутніх даних.

До основних різновидів цього методу відносять імпутацію гарячої та холодної дек; спискове та попарне видалення; середню імпутацію; невід'ємну матричну факторізацію; регресійну імпутацію; перенесення останнього спостереження; стохастичну імпутацію тощо, як стверджує Р. Lee [8].

Серед цих видів найбільш широке розповсюдження отримали методи імпутації гарячої деки (Hot-Deck Imputation) – метод, при застосуванні якого здійснюється випадковий вибір відсутнього значення з набору пов'язаних і подібних

змінних та метод імпутації холодної деки (Cold-Deck Imputation) – систематичний вибір відсутніх в сукупності А значень із сукупності В, яка має подібні значення інших змінних.

Статистичні алгоритми обробки відсутніх даних, як-от середня імпутація та регресійна імпутація, дозволяють враховувати вплив відсутніх даних шляхом імпортування одного значення для кожної відсутньої комірки даних. Їх недоліком є те, що похибка цих обчислень не враховується. Тому усі регресійні імпутації лежать безпосередньо на лінії регресії, і не враховують дисперсію помилок.

Іншим недоліком одиничних методів імпутації є те, що не виконується оцінку ступеню невизначеності, пов'язаною з відсутніми значеннями [8]. Окремі методи імпутації, визначає J. Kalbfleisch [9], вирішують цю проблему шляхом випадкового виведення кількох значень із розподілу обчислень, або введення додаткової дисперсії помилки для кожного з алгоритмів.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** З вищезгаданого можна зробити висновок про те, що теоретичні підходи до рішення проблеми невизначеності є складними для практичних розрахунків і вимагають надмірних зусиль і вагомої первинної бази. Практичні статистичні методи, в свою чергу, не завжди враховують особливості процесу, що досліджується і вимагають, в окремих випадках, адаптації до специфічних умов об'єкта дослідження.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є визначення та апробація підходу щодо урахування впливу факторів невизначеності на виникнення ризиків для окремих ланок ланцюгів постачання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Дослідження здійснювались на базі виробничого підприємства, яке є складовою ланкою ланцюга постачання. Задача полягає в прогнозуванні замовлень постачання спеціальних профілів для поновлення зруйнованих протягом війни автомобільних доріг. Строки виконання замовлення є обмеженими, замовники набувають контракти для здійснення будівництва доріг на державному тендері, а однією з головних умов для отримання перемоги на державному тендері є вчасність виконання замовлень. Затримка в виконанні неприпустима, оскільки замовлення буде оформлено у конкурентів.

Крім того, підприємство, маючи через відкриті джерела інформації доступ до даних тендерів будівництва окремих ділянок доріг, не має повної інформації щодо технічних характеристик замовлень. Таким чином, воно зіштовхується із невизначеністю: при здійсненні своєї діяльності виникає необхідність прийняття рішення, коли потенціальні споживачі його продукції ще не визначились із своїми замовленнями на постачання його продукції.

На підставі історичних баз даних, які мають приховану або невідому інформацію, ви-

сока ймовірність прогнозування майбутніх замовлень забезпечує мінімізацію економічних ризиків як в плані неприпустимого зриву виготовлення потрібних спеціальних профілів в необхідний період часу, так і в плані попереднього замовлення та купівлі сировини та матеріалів, які можуть залишитись неліквідними у разі невикористання у виробничому процесі (підрядник-будівельник доріг не замовить спеціальні профілі за несприятливих умов).

Для досягнення мети автор залучає інструментарій, який використовується для дослідження невизначеності – теорію рішення Байеса, що розглядає невизначені події як певні підмножини  $\Omega$  параметричного простору, які належать окремій  $\mathcal{B}$ -алгебрі при оцінюванні міри ймовірності  $P(\theta)$  на імовірнісному просторі  $(\Omega, \mathcal{B}_\Omega)$ . Для спрощення рішення передбачається неперервний розподіл [6], який характеризується функцією щільності  $p(\theta)$ .

В практичному сенсі виникає необхідність зменшення початкової невизначеності, заданої  $P(\theta)$ , за допомогою результатів статистичних спостережень. Такі спостереження відкривають простір для асимптотичного переходу від невизначеності до визначеності: створюється математична модель, що визначає умовну міру ймовірності  $P(x|\theta)$  над простором  $(X, \mathcal{B}_x)$ .

Залишкова невизначеність параметра  $\theta$  на  $i$ -том етапі розрахунків згідно з теоремою Байеса слід визначати як:

$$p(\theta | x_1, x_2, \dots, x_i) \propto p(\theta | x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) f(x_i | \theta, x_1, x_2, \dots, x_{i-1}). \quad (1)$$

де константа пропорційності визначається за умови, що функція  $p(\theta | x_1, x_2, \dots, x_i)$  є функцією щільності, тобто інтегрує одиницю по мірі  $\mu(\theta)$ .

У випадку незалежності спостережень  $x_1, x_2, \dots, x_n$  можливо спрощення формули (1) до вигляду:

$$p(\theta | x_1, x_2, \dots, x_i) \propto p(\theta | x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) f(x_i | \theta). \quad (2)$$

Головною перевагою вимірювання невизначеності за допомогою ймовірнісної підходу Байеса є логічна послідовність інструментарію, яка спрощує застосування комп'ютерної техніки для розрахунків.

Щільність прогнозування ймовірності майбутньої величини  $T(x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_{n+m})$ , для  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  визначається згідно з результатами досліджень як [5]:

$$f(t|x) = \int_{\Omega} t(\theta) p(\theta|x) d\mu(\theta), \quad (3)$$

Таким чином, для  $D$  множини можливих сценаріїв розвитку ситуації оптимальне рішення для невизначеної події  $\theta \in D$  визначається як рішення якої оптимізаційної задачі:

$$\max_{d \in D} \int u(d, \theta) p(\theta|x) d\mu(\theta), \quad (4)$$

де  $u(d, \theta)$  – корисність наслідків,

–  $p(\theta | x)$  – апостеріорна щільність ймовірності.

Для практичного рішення задачі залучено EM-алгоритм (Expectation-Maximization algorithm), який забезпечує знаходження оцінок максимальної схожості параметрів ймовірних моделей, у випадку залежності математичної моделі від деяких прихованих змінних [10].

Кожна ітерація алгоритму складається з двох кроків. На E-кроці (expectation – очікування), де визначається очікуване значення функції правдоподібності, на M-кроці (maximization) – забезпечується максимальна схожість результату, який було отримано на попередньому кроці ітерації. Далі це значення використовується для E-кроку наступної ітерації. Розрахунки за алгоритмом виконуються до моменту досягнення визначених заздалегідь умов збіжності.

В основу EM-алгоритму закладено підхід ітераційного визначення невідомих параметрів на підставі сукупності тих даних, для яких всі параметри відомі. Так, для сукупності двох параметрів – параметра  $Y$ , який залежить від  $X$ , окремі значення якого невідомі – за допомогою ітераційних розрахунків в межах кожної ітерації визначаються невідомі значення  $x$ , які задовольняють рівнянню:

$$y_i = \bar{y} + r \frac{S_y}{S_x} (x_i - \bar{x}), \quad (5)$$

де  $S_y, S_x$  – стандартні відхилення параметрів  $y$  та  $x$ ;

$r$  – коефіцієнт кореляції.

Пошук рішення максимальної правдоподібності вимагає прийняття похідних функції правдоподібності по відношенню до всіх невідомих значень і одночасно вирішення отриманих рівнянь [11].

Алгоритм EM виходить з спостереження, що існує спосіб чисельного вирішення цих двох множин рівнянь. Можна вибирати довільні значення для одного з двох наборів невідомих, використовувати їх для оцінки другого набору, а потім використовувати ці нові значення, щоб знайти кращу оцінку першого набору, з подальшим розрахунком до сходження до фіксованих точок.

Загалом, при розрахунках можливо виникнення множинних максимумів за умов, що глобальний максимум буде знайдено.

Необхідною умовою для застосування EM-алгоритму є наявність достатньої бази первинної «історичної» інформації, яка має бути репрезентативною для генеральної сукупності (множини) параметрів, що аналізується.

Таким чином, на підставі первинної бази показників за тривалий період отримуємо можливість знаходження невизначених параметрів, потрібних для планування подальшої діяльності.

Базова інформація щодо замовлень споживачами спеціальних профілів прокату для будівництва доріг наведена в таблиці 1.

Параметри  $x_1, x_2, x_3$  характеризують технічні характеристики дільниць доріг, для бу-

дівництва яких підприємство постачало спеціальні профілі проката в кількості  $Y$ , тон. Вони є технологічними параметрами, які застосовуються при будівництві доріг і мають такий зміст.

$X_1$  – площа дільниць капітальної дороги (монолітні і збірні; цементобетонні, асфальтобетонні) укладка якої відбувається у теплому і гарячому стані. На автомобільних дорогах такого типу використовуються одно- та двосторонні дорожні спеціальні профілі.

$X_2$  – площа дільниць полегшеної дороги, яка складається з щєбєневих і гравійних матеріалів, оброблених органічними та неорганічними в'язучими, а також з холодного асфальтобетону. На автомобільних дорогах такого типу використовуються тільки односторонні дорожні спеціальні профілі.

$X_3$  – площа дільниць перехідної дороги – тобто щєбєневі, гравійні, шлакові, з ґрунтів, укріплених в'язучими матеріалами. На автомобільних дорогах такого типу використовуються одно- та двосторонні мостові спеціальні профілі, а на закруглених дільницях доріг використовуються односторонні дорожні спеціальні профілі зроблені із тоншого металу.

За допомогою ЕМ-алгоритму визначено невідомі значення параметрів  $x_1, x_2, x_3$ , які заносимо в таблицю 1.

Завдяки отриманню повних даних із залученням ЕМ-алгоритму для урахування впливу невизначеності, отримано рівняння, яке описує взаємозв'язок між технологічними параметрами доріг та потребою в спеціальних профілях прокату:

$$Y = 6.653 + 5.071x_1 - 0.196x_2 + 1.727x_3, \quad (6)$$

Отримання рівняння (6) дало можливість визначати прогностні обсяги спеціальних профілів, які необхідні для побудови и комплектування автомобільних доріг, замовлення на які реалізуються через відкриті тендери.

Рівняння (6) визначає обсяг споживання спеціальних профілів виробництва в умовах невизначеності з ймовірністю 95%.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** На підставі масиву інформації, який містить відсутні дані, створено математичну модель для визначення потреби в продукції підприємства – ланки ланцюга постачання. Відмінною особливістю отриманого результату є формат поєднання параметрів невизначеності і чіткої ймовірнісної оцінки економічних ризиків. На відміну від складних для практичного використання теоретичних рекомендацій інших дослідників, таке суміщення дає можливість застосовувати отримані автором результати для економічних розрахунків.

Таблиця 1

Характеристики дільниць доріг у базовому періоді

Характеристики дільниць доріг з відсутніми даними			Характеристики дільниць доріг, визначені за допомогою ЕМ-алгоритму			Потреба в профілях, т
x1	x2	x3	x1	x2	x3	Y
2.82	0.78	4.08	2.82	0.78	4.08	33.98
2.73	0.80	4.11	2.73	0.8	4.11	20.59
4.59		8.24	4.59	2.680479	8.24	43.49
6.06	3.87	10.32	6.06	3.87	10.32	55.18
6.19	4.22	11.50	6.19	4.22	11.5	52.05
	5.71	14.48	7.7025	5.71	14.48	70.54
9.24	7.00	16.56	9.24	7	16.56	82.23
	5.07		7.079911	5.07	13.090791	61.84
5.27	3.13	8.76	5.27	3.13	8.76	41.93
	1.13	4.71	3.176098	1.13	4.71	26.23
4.63	2.72	8.24	4.63	2.72	8.24	43.49
5.09	3.04	8.96	5.09	3.04	8.96	46.55
3.05		4.56	3.05	1.03036	4.56	23.65
2.37	0.35	3.12	2.37	0.35	3.12	17.77
4.36	2.29	7.20	4.36	2.29	7.2	71.76
	3.10	9.28	4.948336	3.1	9.28	51.65
5.30	3.27	9.51	5.3	3.27	9.51	45.12
7.64	5.42		7.64	5.42	13.491773	62.38
6.64	4.45	11.50	6.64	4.45	11.5	59.87
8.80		17.60	8.8	7.01581	17.6	79.92
5.25	3.60		5.25	3.6	10.56806	49.61
6.64		12.55	6.64	4.727565	12.55	61.91
	2.53	7.84	4.49208	2.53	7.84	43.08
4.51	2.66	7.92	4.51	2.66	7.92	45.06
Загалом	78.41	75.52	160.54	1189.89		

**Висновки.** Здійснено аналіз математичного та статистичного інструментарію, щодо вирішення питань невизначеності в умовах промислового підприємства. Визначено, що методом, який найбільш придатним до умов підприємства є ЕМ-алгоритм, зміст якого полягає знаходженні оцінок максимальної схожості параметрів ймовірних моделей, у випадку, коли модель залежить від деяких прихованих змінних. Залучення ітераційного підходу ЕМ-алгоритму, який в рамках кожної ітерації передбачає визначення значення функції правдоподібності і виконання оцінки максимальної схожості, дало можливість отримати надійні результати, які апробовані в умовах підприємства. Розрахунки виконано в умовах невизначеності з ймовірністю 95%. Високі значення коефіцієнтів регресії та детермінації свідчать про надійність цього рівняння та його репрезентативність. В якості подальшого розвитку досліджень автор визначає розширення підходу статистики Баєса для визначення та мінімізації економічних ризиків в умовах динамічної невизначеності.

---

#### REFERENCES:

1. Little, R. J. A. and Rubin, D. B. (1987), *Statistical Analysis with Missing Data*, New York: John Wiley & Sons, Inc, 480 p.
2. Gupta, R. K. (2019) *Numeric methods: Fundamentals and applications*. Cambridge University Press, 824 p.
3. Heij, De Boer, Franses, Kloek, and Van Dijk (2004) *Econometric methods with applications in business and economics*. Oxford University Press, 816 p.
4. Jaynes E. T. (2003) *Probability theory. Cambridge University Press, Cambridge, the logic of science*, Edited and with a foreword by G. Larry Bretthorst. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511790423>.
5. Congdon P. (2003) *Applied Bayesian modelling*. Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 456 p.
6. Gelman A., Carlin J. B., Stern H. S., Rubin D. B. (2004) *Bayesian data analysis*, 2nd edn. Texts in Statistical Science Series, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL,
7. Azur, M. J., Stuart, E. A., Frangakis, C., and Leaf, P. J. (2012) Multivariate imputation by chained equations: what is it and how does it work? *Int J Methods Psychiatr Res.* Mar 1, no. 20(1), pp. 40–49.
8. Lee, P. M. (2012) *Bayesian statistics an introduction*. 4th Ed. Wiley.
9. Kalbfleisch, J. G. (1985) *Probability and Statistical Inference, Volume 2: Statistical Inference, Second Edition*, Springer-Verlag, New York, 360 p.
10. McLachan, G. J. and Krishnan, T (1997) *The EM Algorithm and Extensions*, New York: Wiley, 274 p.
11. Fox, J. (2005) *Maximum-likelihood estimation of the logistic regression model*. UCLA/CCPR Notes.