

**Н. А. ПОТАПОВА**

кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри інформаційних технологій  
Донецький національний університет імені Василя Стуса  
ORCID: 0000-0003-4566-4102

**Л. О. ВОЛОНТИР**

кандидат технічних наук, доцент,  
викладач спеціальних дисциплін  
Вінницький технічний фаховий коледж  
ORCID: 0000-0001-9022-9332

**О. В. ЗЕЛІНСЬКА**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри інформаційних технологій  
Донецький національний університет імені Василя Стуса  
ORCID: 0000-0002-9069-1428

## АПРОКСИМАЦІЯ ФУНКЦІЙ ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВИХ ЗВ'ЯЗКІВ МЕТРИК ВИРОБНИЦТВА В АНАЛІЗІ ДАНИХ ГАЛУЗІ ТВАРИННИЦТВА

У статті висвітлюються питання побудови та аналізу математичних моделей отриманих апроксимаційою функцій, що відображують причинно-наслідкові зв'язки метрик виробництва галузі тваринництва економіки сільського господарства. Основна гіпотеза дослідження полягає у визначенні істотності впливу на обсяги виробництва м'яса таких чинників, як-от: приплід телят, приплід поросят та середньорічний удій молока. Підтвердження даної гіпотези є можливим за рахунок наближеного оцінювання функцій, які описують причинно-наслідковий зв'язок між метриками виробництва галузі тваринництва. Сутність причинно-наслідкового зв'язку ідентифікується за допомогою множини метрик на скінченній вибірці статистики даних, отриманій в динаміці за 2010–2020 р.

Набори даних для дослідження попередньо оцінені описовим аналізом статистики, який підтвердив незначний розкид даних навколо очікуваних середніх значень.

Ключовими характеристиками розміру ступеня розсіювання значень обрано коефіцієнт варіації та кореляції. Послідовність впливу метрик оцінено на основі значимості параметрів апроксимованих методом найменших квадратів парних та багатофакторних функцій. Алгоритм запропонованої оцінки показує, яким чином відбувається поетапність визначення істотності впливу метрик та отримання кінцевого значимого результату. Експеримент виявив метрики (приплід телят та середньорічний удій молока), значимість яких не відповідала оцінці *t*-критерію Ст'юдента і в підсумку не становили сутність причинно-наслідкового впливу. Результативність впливу фактору приплід поросят підтверджено оцінкою значимості параметрів апроксимації степеневої функції.

**Ключові слова:** моделювання, наближена оцінка, метрика, апроксимація, причинно-наслідковий зв'язок, значимість.

**N. A. POTAPOVA**

Ph.D. in Economics, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Information Technology  
Vasyl' Stus Donetsk National University  
ORCID: 0000-0003-4566-4102

**L. O. VOLONTYR**

Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
Lecturer of Special Disciplines  
Vinnytsia Technical Applied College  
ORCID: 0000-0001-9022-9332

**O. V. ZELINSKA**

Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Information Technology  
Vasyl' Stus Donetsk National University  
ORCID: 0000-0002-9069-1428

## APPROXIMATION OF FUNCTIONS OF CAUSE-EFFECT RELATIONSHIPS OF PRODUCTION METRICS IN THE ANALYSIS OF DATA IN THE LIVESTOCK INDUSTRY

*The article highlights the issues of building and analyzing mathematical models obtained by approximation of functions that reflect cause-and-effect relationships of production metrics in the livestock sector of the agricultural economy. The main hypothesis of the study is to determine the significance of the influence on the volume of meat production of such factors as: offspring of calves, offspring of piglets, and average annual milk production. Confirmation of this hypothesis is possible due to the approximate evaluation of the functions that describe the cause-and-effect relationship between the production metrics of the livestock industry. The essence of the causal relationship is identified using a set of metrics on a finite sample of data statistics obtained in the dynamics for 2010–2020.*

*The data sets for the study were previously evaluated by descriptive statistics analysis, which confirmed a small scatter of the data around the expected mean values.*

*The coefficient of variation and correlation were chosen as the key characteristics of the size of the degree of dispersion of values. The sequence of metric influence was assessed based on the significance of parameters approximated by the least squares method for paired and multifactor functions. The algorithm of the proposed evaluation demonstrates the step-by-step process of determining the significance of metric impact and obtaining the final meaningful result. The experiment revealed metrics (calf progeny and average annual milk yield), the importance of which did not correspond to the Student's t-test assessment and, as a result, did not constitute the essence of the causal effect. The effectiveness of the influence of the piglet offspring factor was confirmed by the evaluation of the significance of the parameters of the approximation of the power function.*

**Key words:** modeling, approximate estimation, metric, approximation, causality, significance.

### Постановка проблеми

Моделювання є одним із методів аналізу даних, в основу якого закладено процес сприйняття та ідентифікації сукупності процесів прикладної предметної області. Складні закономірності можуть бути оцінені за допомогою моделювання з метою виявлення найбільш дієвих факторів та наслідків їх впливу і є обґрунтуванням для побудови подальших управлінських рішень [1]. Встановлення причинно-наслідкових зв'язків в межах предметної області окреслюється обмеженнями включення факторів, внаслідок яких виникає проблема оцінювання дисперсії та варіації даних. Більшість прикладних задач використовують набори даних, отриманих під час експерименту, або із публічних джерел. Генерація цих даних обумовлена виникненням процесів стохастичної природи і впливає на формалізований опис моделі системи та її аналіз. Тому дослідження підходів щодо апроксимації функцій для встановлення опису форми сукупності даних та їх наближеного оцінювання залишається актуальним, що надає змогу фахівцям різних галузей отримати можливі варіанти чисельних оцінок функцій та використати їх в реальних планах та прогнозах.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Висвітлення питань апроксимації даних знайшло відображення в працях багатьох дослідників [1, 2]. При оцінці використовуються різні форми подання кривих. У роботах [3, 6] приведені підходи та методи алгоритмізації інтерполяції та апроксимації даних. В роботі [4] наведено результати розробки методики та алгоритм визначення параметрів апроксимованих функцій в технологічних процесах, зокрема електронно-променевих технологій для оцінки потенційних можливостей електронного пучка з метою їх подальшого використання в виробничих процесах зварювання та обробки металів.

В роботі [8] виконано апроксимацію логарифмічної та степеневі функцій за методом найменших квадратів для оцінки середніх квадратичних похибок площ земельних ділянок. Проте, розв'язок прикладних задач залишає невирішеними системні питання методики оцінювання, особливо в контексті роботи з даними та їх ідентифікацією в кінцевій специфікації моделі, яка підлягатиме дослідженню.

### Формулювання мети дослідження

Метою статті є розробка концептуальних підходів побудови та методики аналізу математичних моделей отриманих апроксимацією функцій, що відображують причинно-наслідкові зв'язки метрик виробництва галузі тваринництва економіки сільського господарства.

### Викладення основного матеріалу

Ефективність галузі тваринництва суттєво впливає на рівень продовольчої безпеки та ресурсозабезпеченість переробки м'яса. Основними напрямками тваринництва України є: скотарство, свинарство, птахівництво та інші. Основною продукцією галузі скотарства є молочна та м'ясна продукція. В структурі виробництва галузі нараховується 65 % умовного продуктивного поголів'я худоби. Існують різні напрями спеціалізації, як-от: молочний, молочно-м'ясний, м'ясний і м'ясомолочний. Галузь тваринництва на сьогодні є мало ефективною, що обумовлює необхідність використання нових підходів на різних рівнях управління з урахуванням впливу вагомих індикаторів виробництва продукції.

Обсяг виробництва продукції тваринництва один з основних індикаторів галузі тваринництва. Даний фактор є ключовим важелем у формуванні пропозиції на ринку сировини та продукції переробки. Тому доцільним

є ідентифікувати його відповідною метрикою набору даних. Аналіз вибірки даних по цій метриці дозволить виявити додаткові можливості росту обсягів виробництва продукції, поліпшення її асортименту, якості та зменшення втрат. Описовий аналіз даних основних метрик оцінки виробництва м'яса для апроксимації функції причинно-наслідкового зв'язку наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

## Описовий аналіз даних основних метрик виробництва м'яса

№ періоду	у, виробництво м'яса (у живій вазі), тис. т	x <sub>1</sub> , вихід приплоду телят на 100 корів, голів	x <sub>2</sub> , вихід приплоду поросят на 100 основних свиноматок, голів	x <sub>3</sub> , середній річний удій молока від однієї корови, кг
1	2925,4	73	1530	4104
2	3031,8	72	1654	4203
3	3120,9	73	1863	4337
4	3379,6	76	1928	4398
5	3323,5	75	2047	4508
6	3270,4	71	2058	4644
7	3271,6	70	1955	4735
8	3266,9	69	1919	4820
9	3318,1	67	2181	4922
10	3493,6	64	2126	4976
11	3461,7	66	2352	5129
Середнє значення	3260,32	70,55	1964,82	4616,00
Дисперсія	27330,39	12,98	48877,60	101155,27
Середньоквадратичне відхилення	165,32	3,60	221,08	318,05
Коефіцієнт варіації	5,07	5,11	11,25	6,89

Джерело: складено та розраховано авторами на основі [10, 11, 12]

Для оцінки мінливості набору даних використано коефіцієнт варіації. Коефіцієнт варіації застосовується тоді, коли необхідно порівняти мінливість ознак об'єкта, які виражені в різних одиницях вимірювання. Він розраховується за формулою:

$$v = \frac{S_x}{\bar{x}}, \quad (1)$$

де  $S_x$  – середнє квадратичне відхилення даних по метриці  $x$ ,  
 $\bar{x}$  – середнє значення.

Мінливість вважається слабкою, якщо  $v < 10\%$ ; якщо  $v$  від 11–25%, середньою і значною за  $v > 25\%$ . Якщо коефіцієнт варіації менше 33,3%, то статистична вибірка є однорідною. Статистичні вибірки  $y$ ,  $x_1$ ,  $x_3$  мають слабку мінливість, а вибірка змінної  $x_2$  має середню мінливість, тобто вибірка є однорідною.

Обсяг валової продукції тваринництва залежить від ряду факторів. При оцінюванні прихованого стохастичного впливу доцільно використовувати апроксимацію функції, яка описує причинно-наслідковий зв'язок між кількісними факторами виробництва обсягів м'яса з урахуванням різних напрямів спеціалізації. Початковий аналіз даних передбачає побудову та оцінювання парних моделей з використанням функції апроксимації за методом найменших квадратів по наступній специфікації метрик:

$$\begin{aligned} y &= f(x_1) \\ y &= f(x_2) \\ y &= f(x_3) \end{aligned} \quad (2)$$

де  $y$  – метрика оцінки виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України, тис. т;

$x_1$  – метрика оцінки виходу приплоду телят на 100 корів у сільськогосподарських підприємствах, голів;

$x_2$  – метрика оцінки виходу приплоду поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах, голів;

$x_3$  – метрика оцінки середнього річного удою молока від однієї корови, кг.

Розкид початкових масивів даних вказаних метрик доцільно оцінити лінійним коефіцієнтом кореляції та значимістю параметрів функції, розрахованих за методом найменших квадратів (МНК) [7]. Оцінка лінійного коефіцієнту кореляції наступна:

- $r(yx_1) = -0,4921$ , зв'язок між факторами слабкий, напрям – обернений;
- $r(yx_2) = 0,8960$ , зв'язок між факторами сильний, напрям – прямиий;
- $r(yx_3) = 0,8296$ , зв'язок між факторами сильний, напрям – прямиий;

- $r(x_1x_2) = -0,5784$ , зв'язок між факторами слабкий, напрям – обернений;
- $r(x_2x_3) = 0,8965$ , зв'язок між факторами середній, напрям – прямий;
- $r(x_1x_3) = -0,8215$ , зв'язок між факторами сильний, напрям – обернений.

Кореляція по деяких парах значень метрик показує тісний зв'язок між наборами даних. Велику колінеарність викликає метрика  $x_3$ , яка пояснюється її природою. Тобто, технологічно витрати молока на прикорм молодняка є складовою формування основного стада великої рогатої худоби, тому зворотній зв'язок між цими категоріями є очікуваним.

Припущення про мультиколінеарність може спростувати оцінка значимості параметрів функції багатьох змінних. В загальному, множинна модель будується виходячи із припущень специфікації. Зв'язок теоретичної оцінки за побудованою моделлю та фактичним значенням метрик продукції тваринництва описує рівняння:

$$y = \hat{y} + e \tag{3}$$

де  $y$  – фактичне значення обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України, тис. т;

$\hat{y}$  – оцінене наближене значення обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України, тис. т;

$e$  – похибка результатів.

Лінійна форма парної моделі у загальному вигляді наступна:

$$\hat{y} = \hat{b}_{0i} + \hat{b}_{1i}x_i, \quad i = \overline{1,3} \tag{4}$$

де  $\hat{y}$  – метрика обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України оцінена за методом найменших квадратів, тис. т;

$b_i$  – параметр рівняння обчислений за методом найменших квадратів.

Перевірка тісноти загального зв'язку (впливу) незалежних факторів на результуючий здійснюється на основі коефіцієнта детермінації за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{5}$$

Перевірка статистичної значущості моделі здійснюється на основі  $F$ -статистики, яка обчислюється за формулою:

$$F_{\text{експ}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m} \tag{6}$$

Табличне значення  $F(m, n - m - 1, \pm)$  порівнюється з обчисленою  $F$ -статистикою. У випадку коли  $F_{\text{експ}} > F(m, n - m - 1, \pm)$ , то гіпотеза про рівність нулю всіх коефіцієнтів рівняння відхиляється, інакше приймається.

В аналізі даних доцільною є перевірка значимості оцінок параметрів моделі та знаходження їх довірчих інтервалів. За умови що залишки моделі розподілені за нормальним законом розподілу вважаємо, що параметри моделі також задовольняють нормальному закону розподілу. Перевірку гіпотези про значимість оцінок параметрів моделі проводять за  $t$ -критерієм Стьюдента:

$$t_{i\alpha} = \frac{|b_i|}{S_{\hat{b}_i}}, \tag{7}$$

Обчислене значення  $t$ -критерію порівнюється з табличним при вибраному рівні значимості та відповідної кількості ступенів вільності. Якщо  $t_{\text{розрахункове}} > t_{\text{критичного}}$ , то оцінка значимості відповідного параметра моделі є достовірною. На підставі  $t$ -критерію і стандартної помилки встановлюються довірчі інтервали для параметрів моделі  $b_i$ :

$$b_i - t_b S_{\hat{b}_i} \leq b_i \leq b_i + t_b S_{\hat{b}_i} \tag{8}$$

Оцінка впливу значень метрики  $x_1$  на значення метрики  $y$  описується оціненим рівнянням:

$$\hat{y} = 4853.59 - 22.58 \cdot x_1 \tag{9}$$

( $p$ -значення  $b_{0i}=0,0006$ ) ( $p$ -значення  $b_{1i}=0,1241$ )

За отриманими оцінками, збільшення значень метрики  $x_1$  на 1 одиницю вимірювання викликає зменшення значень метрики  $y$  на 22,58 одиниці її вимірності (тобто обсяг виробництва м'яса має зменшитись на 22,58 тис. т) Рівняння має низький рівень значимості оцінюваних параметрів, тобто значимість параметру  $b_{1i}$  оцінено на рівні 12,4%.

При оцінюванні за критерієм Ст'юдента критичне значення t-критерію ( $t_{кр}$ ) при  $f_1=9$  (ступені вільності) дорівнює 2,26. Для даної оцінки  $t_{кр} < t_{розра}$ , розрахунковий t-критерій Ст'юдента ( $t_{розра}$ ) дорівнює -1,6959, тобто даний фактор  $x_1$  не є значимий при оцінці його впливу на метрику у. Лінійний коефіцієнт кореляції 0,49 характеризує низький рівень тісноти зв'язку між наборами даних та обернений напрям. Лінійний коефіцієнт детермінації показує, що набір даних метрики  $x_1$  обумовлений 24,2% варіації впливу у сукупній варіації даних у, тобто 76,8% варіації набору даних метрики у обумовлено іншими складовими специфікації. Оцінка впливу метрики  $x_2$  на метрику у описується рівнянням:

$$\hat{y} = 1943.8 + 0.67 \cdot x_2 \quad (10)$$

(р-значення  $b_{02}=0,000009$ ) (р-значення  $b_{12}=0,0019$ )

За отриманими розрахунками зростання значень метрики  $x_2$  на 1 одиницю вимірності веде до збільшення значень метрики у на 0,67 одиниць її вимірювання. Визначено високий рівень значимості оцінюваних параметрів, тобто значимість параметру  $b_{12}$  оцінено на рівні 0,19%. При оцінюванні за критерієм Ст'юдента показано, що критичне значення t-критерію ( $t_{кр}$ ) при  $f_1=9$  (ступені вільності) дорівнює 2,26. Для даної оцінки параметру  $t_{кр} < t_{розра}$ , розрахунковий t-критерій Ст'юдента ( $t_{розра}$ ) дорівнює 6,05, тобто метрика  $x_2$  є значимою при оцінці її впливу на у (обсяг виробництва м'яса). Лінійний коефіцієнт кореляції 0,89 характеризує високий рівень тісноти зв'язку між наборами даних з прямим напрямом впливу. Лінійний коефіцієнт детермінації показує, що метрика  $x_2$  має 80,3% варіації впливу у сукупній варіації значень метрики у (обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України), тобто 19,7% варіації значень у обумовлено іншими даними.

Оцінка впливу метрики  $x_3$  (середній річний удій молока від однієї корови, кг) на метрику у (обсяг виробництва м'яса у живій вазі) описується рівнянням:

$$\hat{y} = 1269.6 + 0.43 \cdot x_3 \quad (11)$$

(р-значення  $b_{03}=0,019$ ) (р-значення  $b_{13}=0,0016$ )

Отримані розрахунки показали, що зростання значень метрики у на 0,43 одиниць вимірності обумовлено збільшенням значень метрики  $x_3$  на 1 одиницю вимірності. Визначено високий рівень значимості оцінюваних параметрів, тобто значимість параметру  $b_{13}$  оцінено на рівні 0,16%. При оцінюванні за критерієм Ст'юдента показано, що критичне значення t-критерію ( $t_{кр}$ ) при  $f_1=9$  (ступені вільності) дорівнює 2,26. Для даної оцінки параметру  $t_{кр} < t_{розра}$ , розрахунковий t-критерій Ст'юдента ( $t_{розра}$ ) дорівнює 4,46, тобто метрика  $x_3$  є значимою при оцінці її впливу на обсяг виробництва м'яса (метрика у). Лінійний коефіцієнт кореляції 0,83 характеризує високий рівень тісноти зв'язку між даними вказаних метрик з прямим напрямом впливу. Лінійний коефіцієнт детермінації показує, що метрика  $x_3$  має 68,8% варіації впливу у сукупній варіації у (обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України), тобто 32,2% варіації метрики у обумовлено іншими даними.

З урахуванням найбільш значимих метрик  $x_2$  та  $x_3$  двофакторна модель впливу їх значень на метрику у має вигляд:

$$\hat{y} = 1798,5 + 0,58 \cdot x_2 + 0,07 \cdot x_3 \quad (12)$$

За отриманою моделлю маємо характеристику змін показника обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України в тис. т (метрика «у»):

- при зростанні виходу приплоду порослят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах (метрика  $x_2$ ) на 1 голову, обсяг виробництва м'яса у живій вазі збільшиться (метрика у) на 0,58 тис. т;
- при зростанні середнього річного удою молока від однієї корови у сільськогосподарських підприємствах (метрика  $x_3$ ) на 1 кг обсяг виробництва м'яса у живій вазі (метрика у) збільшиться на 0,07 тис. т.

Всі обрані метрики мають позитивний вплив на результативну ознаку і сприяють її зростанню. Отримана модель є значимою, що підтверджується значенням множинного коефіцієнту детермінації  $R^2 = 0,8064$ . Метрики  $x_i$  мають 80,6% впливу на результуючу «у», а інші 19,6% впливу належать метрикам не врахованим у моделі. Множинний коефіцієнт кореляції  $r(y, x_2, x_3)$  дорівнює 0,8980, що свідчить про високий рівень тісноти зв'язку між наборами даних. Модель є адекватною, що підтверджується розрахунком F-статистики Фішера.  $F_{розра} \geq F_{теор}$  ( $\alpha=0,05$ ,  $df_1=2$ ,  $df_2=8$ ), тобто  $16,661 \geq 4,46$ .

Значимість параметрів моделі регресії підтверджується оцінкою t-статистики Ст'юдента при ступенях вільності ( $n-1-2$ ,  $\alpha=0,05$ ), тобто (8,  $\alpha=0,05$ )  $t_{теор} = 2,3060$ . При сумісній оцінці за лінійною формою функції апроксимації дані метрики є не значимими при  $t_{теор}$  (8; 0,05) = 2,3060 [4, 8]:

- $b_0: t_{розра} (4,0489) \geq t_{теор} (2,3060)$  – значимий;
- $b_1: t_{розра} (2,2087) \geq t_{теор} (2,3060)$  – не значимий;
- $b_2: t_{розра} (0,3823) \geq t_{теор} (2,3060)$  – не значимий.

При оцінці нелінійної форми функції апроксимації залежності між метриками отримано рівняння:

$$\hat{y} = 100.5 \cdot x_2^{0,33} \cdot x_3^{0,11} \tag{13}$$

При зведенні функції апроксимації до лінійної форми отримано оцінку коефіцієнту детермінації 0,83, а лінійного коефіцієнту кореляції 0,91. Модель є статистично значимою. Слід зазначити, що сумісний вплив метрик створює ефект нелінійного росту для фактору виробництва м'яса. При зростанні на 1% приплоду поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах ( $x_2$ ) очікується збільшення обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України на 0,33%. При зростанні на 1% середнього річного удою молока від однієї корови у сільськогосподарських підприємствах ( $x_3$ ) на 1% очікується збільшення обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України на 0,11%. Проте за оцінку значимості параметрів отримано:  $b_0$  (100,5), ( $p=0,0004$ ) – значимий;  $b_1$  (0,33), ( $p=0,0371$ ) – значимий;  $b_2$  (0,11), ( $p=0,7521$ ) – не значимий.

Оцінка адекватності за критерієм Фішера показала, що дана модель є адекватною.  $F_{крит}=4,46$  при рівні значимості 0,05, ступенях вільності  $f_1=2$  та  $f_2=8$ .  $F_{розра} = 19,71$ , тобто  $F_{розра} \geq F_{крит}$ . Оцінка відхилень теоретичних та фактичних значень моделі наведена у таблиці 2.

Таблиця 2

Оцінка похибки математичної моделі  $\hat{y} = 100.5 \cdot x_2^{0,33} \cdot x_3^{0,11}$

№ періоду часового періоду (t)	y	$\hat{y}$	$\Delta$ , %
1	2925,4	2963,9	1,315
2	3031,8	3050,2	0,606
3	3120,9	3185,0	2,055
4	3379,6	3226,8	4,521
5	3323,5	3301,1	0,673
6	3270,4	3318,1	1,459
7	3271,6	3268,8	0,085
8	3266,9	3255,1	0,361
9	3318,1	3405,3	2,627
10	3493,6	3380,5	3,238
11	3461,7	3508,4	1,349
Сума	*	*	18,289
МАРЕ:	*	*	1,663

Джерело: складено та розраховано авторами на основі [10, 11, 12]

Абсолютна середня процентна помилка моделі (МАРЕ) [3] становить 1,663%, що підтверджує низький рівень похибки розрахованої моделі. Виходячи із отриманих характеристик довгих інтервалів змін параметрів отриманої моделі, можна визначити, що обсяг виробництва м'яса має незначні коливання.

Проведена оцінка за лінійною формою показала, що серед отриманих параметрів значимим є метрика приплоду поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах ( $x_2$ ), що дозволяє викреслити із кінцевого аналізу даних метрику  $x_3$  (середній річний удій молока від однієї корови у сільськогосподарських підприємствах) і отримати кінцеву парну нелінійну модель в залежності: обсяг виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України (метрика y) ← приплід поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах (метрика  $x_2$ ). Така модель матиме вигляд степеневі функції:

$$\hat{y} = 160,59 \cdot x_2^{0,397} \tag{14}$$

За даною моделлю, при збільшенні на 1% приплоду поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах обсяг виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України зростає на 0,397%. Оцінка довірчих інтервалів на рівні значимості 0,05 показала, що довірчі інтервали отриманих значень мають межі:  $53,52 \leq b_0 \leq 435,23$ ;  $0,26 \leq b_1 \leq 0,54$ . Результати оцінювання наведено у таблиці 3.

Зазначимо, що при проведенні аналізу даних по метриках виробництва продукції тваринництва шляхом поетапного виключення незначимих метрик, була отримана модель пріоритетного впливу технологічного фактору виробництва м'яса свинини на загальний обсяг виробництва м'яса у живій вазі сільськогосподарськими підприємствами. Відносна похибка оцінювання по усій вибірці даних коливається у межах  $0,388\% \leq \Delta \leq 4,102\%$ , тобто менше порогу у 10%. Абсолютна середня процентна помилка моделі МАРЕ дорівнює 1,71%.

Таблиця 3

Оцінка похибки математичної моделі  $\hat{y} = 160,59 \cdot x_2^{0,397}$ 

№	y	x <sub>2</sub>	$\hat{y}$	Δ, %
1	2925,4	1530	2956,6	1,065
2	3031,8	1654	3049,5	0,584
3	3120,9	1863	3197,1	2,442
4	3379,6	1928	3241,0	4,102
5	3323,5	2047	3319,0	0,136
6	3270,4	2058	3326,1	1,702
7	3271,6	1955	3258,9	0,388
8	3266,9	1919	3234,9	0,978
9	3318,1	2181	3403,7	2,578
10	3493,6	2126	3369,3	3,558
11	3461,7	2352	3507,3	1,316
МАРЕ:				1,713557

Джерело: складено та розраховано авторами на основі [10, 11, 12]

### Висновки

Застосування методу апроксимації функцій в прикладних задачах дослідження обумовлено наявністю сформованих наборів даних в ході проведення експериментальних спостережень. Методика отримання подібних оцінок включає поетапне проведення апроксимацій функцій по усіх можливих порівняннях варіантів значимості впливів факторів на ідентифіковану результативну ознаку. Значимість параметрів апроксимованих функцій ґрунтується на математичній теорії підтвердження гіпотез. В межах такого оцінювання в кінцевому варіанті мають залишитись лише ті фактори, метрики яких дозволили отримати статистично значимі параметри апроксимованих функцій. У разі повної статистичної незначимості параметрів необхідним є перехід до повторної ідентифікації факторів в межах специфікації моделі новими метриками і проведення нового етапу аналізу даних.

Дослідження оцінки змін виробництва продукції тваринництва по метриці фактору обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України у розрізі сільськогосподарських підприємств показало, що найбільш результативною оцінкою є вплив приплоду поросят на 100 основних свиноматок. Залежність має нелінійну форму степеневі функції, зміна параметрів якої може залежати від часових збурень та утворених лагів запізнь. Тому, дані задачі можуть бути перспективними для поставки завдань аналізу даних галузі тваринництва.

### Список використаної літератури

1. Потапова Н.А. Економетричний аналіз причинно-наслідкових зв'язків компонентів структури реалізації зернових культур в збутовій агрологістичі. Формування ринкової економіки в Україні: Збірник наукових праць. 2017. Випуск 38. С. 139-145.
2. Потапова Н.А., Волонтир Л.О., Частоколенко І.П., Григоренко М.С. Метод інтерполяції для прогнозування метрик використання хмарних обчислень в статистичному навчанні. Наука і техніка сьогодні. 2024. № 4(32). С. 1192-1205. URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/10943>.
3. Волонтир Л.О., Зелінська О.В., Потапова Н.А., Чіков І.А. Чисельні методи. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 322 с.
4. Мельник І.В., Починок А.В. Порівняльний аналіз методів інтерполяції та апроксимації граничної траєкторії короткофокусного електронного пучка за умови його транспортування в іонізованому газі. Вісник Університету «Україна». Серія: інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. 2020. № 1 (24). С. 106-123.
5. Tolochko O.I., Palis Stefan, Burmelov O.O., Kaluhin D.V. Discrete approximation of continuous objects with Matlab. Applied Aspects of Information Technology. 2021. Vol.4 №.2. pp. 178-191.
6. Бахрушин В.Є. Методи аналізу даних: навчальний посібник для студентів. Запоріжжя: КПУ, 2011. 268 с.
7. Кузьмин В.М., Заліський М.Ю., Климчук В.П. Побудова математичних моделей з використанням полісегментної регресії. Наукоємні технології. 2020. № 1(45). С. 11-18.
8. Рябчий В.В., Трегуб М.В. Апроксимація функцій середніх квадратичних похибок площ земельних ділянок для визначення їх допустимих значень. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2014. Вип. 79. 54-67.
9. Офіційний сайт Державної служби статистики України. [www.ukrstat.gov.ua](http://ukrstat.gov.ua). URL: <http://ukrstat.gov.ua/>.
10. Статистичний збірник «Тваринництво України за 2013». Київ: Державна служба статистики України. 2014. 212 с.
11. Статистичний збірник «Тваринництво України за 2018». Київ: Державна служба статистики України. 2019. 166 с.
12. Статистичний збірник «Тваринництво України за 2018». Київ: Державна служба статистики України. 2021. 160 с.

## References

1. Potapova N.A., Volontyr L.O., Chastokolenko I.P., Hryhorenko M.S. (2024). Metod interpoliatsii dlia prohnozuvannia metryk vykorystannia khmarnykh obchyslen v statystychnomu navchanni [Interpolation method for predicting metrics of the use of cloud computing in statistical learning]. *Nauka i tekhnika sohodni*. no 4(32). pp. 1192-1205. Retrieved from <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/10943>.
2. Volontyr L.O., Zelinska O.V., Potapova N.A., Chikov I.A. (2020) Chyselni metody. Navchalnyi posibnyk [Numerical methods. Study guide]. Vinnytsia: VNAU. [in Ukrainian].
3. Potapova N.A. Ekonometrychnyi analiz prychnynno-naslidkovykh zviazkiv komponentiv struktury realizatsii zernovykh kultur v zbutovii ahrolohistytsi [Econometric analysis of causal-consequence links of the components of grain selling structure in sales agrilogistics]. *Formation of a market economy in Ukraine*. 2017. Vol. 38. S. 139-145.
4. Melnyk I.V., Pochynok A.V. (2020) Porivnialnyi analiz metodiv interpoliatsii ta aproksymatsii hranychoi traiektorii korotkofokusnoho elektronnoho puchka za umovy yoho transportuvannia v ionizovanomu hazi [Comparative analyze of the methods of interpolation and approximation of the boundary trajectory of short-focus electron beam in conditions of its propagation in the ionized gas]. *Visnyk Universytetu «Ukraina». Seriya: informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta kibernetyka*. no 1 (24). pp. 106-123.
5. Tolochko O.I., Palis Stefan, Burmelov O.O., Kaluhin D.V. (2021) Discrete approximation of continuous objects with Matlab. *Applied Aspects of Information Technology*. no 2. pp. 178-191.
6. Bakhrushyn V.Ie. (2011) Metody analizu danykh: navchalnyi posibnyk dlia studentiv [Methods of data analysis: a study guide for students.]. Zaporizhzhia: KPU. [in Ukrainian].
7. Kuzmyn V.M., Zaliskyi M.Iu., Klymchuk V.P. (2020) Pobudova matematychnykh modelei z vykorystanniam polisehmentnoi rehressii. Naukoiemni tekhnolohii [Mathematical models building with polysegmented regression usage]. no1(45). pp. 11-18.
8. Riabchii V.V., Trehub M.V. (2014) Aproksymatsiia funktsii serednikh kvadratnykh pokhybok ploshch zemelnykh dilianok dlia vyznachennia yikh dopustymykh znachen [Approximation of functions of root mean square errors of land parcels areas to determine their allowable value]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*. vol. 79. pp. 54-67.
9. Ofitsiinyi sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy [Official website of the State Statistics Service of Ukraine]. Retrieved from <http://ukrstat.gov.ua/>
10. Statystychnyi zbirnyk «Tvarynnytstvo Ukrainy za 2013» (2014) [Statistical collection «Creatures of Ukraine for 2013»]. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine.
11. Statystychnyi zbirnyk «Tvarynnytstvo Ukrainy za 2018» (2019) [Statistical collection «Creatures of Ukraine for 2018»]. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine. (in Ukrainian).
12. Statystychnyi zbirnyk «Tvarynnytstvo Ukrainy za 2020» (2021). [Statistical collection «Creatures of Ukraine for 2020»]. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine.