

УДК 519.86

DOI [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2023.43\(2\).107-118](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2023.43(2).107-118)**Н. В. Ічанська¹, М. В. Лисенко²**

¹ Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка»,
доцент кафедри вищої математики,
кандидат фізико-математичних наук
itm.ichanska@nupr.edu.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5963-9288>

² Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка»,
доцент кафедри комп'ютерних технологій та інформаційних систем,
кандидат фізико-математичних наук
lysenkop1@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0995-2991>

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВИДОБУТКУ ВУГІЛЛЯ В УКРАЇНІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті досліджено динаміку видобутку вугілля в Україні, розглянуто різні підходи до моделювання життєвого циклу процесу експлуатації вуглеводневих покладів. Шляхом використання елементів математичного моделювання, авторами розв'язано задачу апроксимації за допомогою моделі Хольта та методів експоненційного вирівнювання й множинної лінійної регресії. Авторами проаналізовано кожен з цих методів з точки зору ефективності його застосування до розв'язання задач розвитку паливно-енергетичного комплексу України.

Використання адаптивних моделей у прикладних дослідженнях дає можливість працювати зі складними та нестабільними даними. У роботі застосовано методи нечіткого моделювання для прогнозування обсягів видобутку вугілля. Це дозволяє моделювати залежність даного процесу від змінних умов і параметрів вугільного ринку, що сприяє підвищенню точності прогнозування. Запропоноване авторами моделювання дозволяє відобразити прогноз у вигляді трикутного нечіткого числа, а саме вказати можливі очікувані значення.

Ключові слова: методи нечіткого прогнозування, критерії Фішера і Стьюдента, адаптивні моделі, метод експоненційного вирівнювання, рівняння множинної лінійної регресії, модель Хольта, трикутне нечітке число.

1. Вступ. Ключову роль у економіці України виконує енергетичний сектор, він є важливою сферою для забезпечення рівня життя населення й розвитку промисловості країни. Це пояснюється тим, що енергетика забезпечує якісне функціонування міст і сіл, діяльність промислових підприємств, здійснює опалення житлових будинків, що особливо важливо з точки зору шляхів відновлення повоєнної України.

Сучасна енергетична парадигма визначається структурними змінами в споживанні та виробництві енергії, що обумовлюють необхідність переходу до більш сталого, ефективного та екологічно чистого енергетичного комплексу. В умовах зростаючих вимог до енергоефективності та сталого розвитку, прогнозування обсягів видобутку вугілля стає критичним елементом для забезпечення стабільності та оптимізації енергетичного комплексу країни.

Питанням розвитку промислового комплексу України присвячено багато наукових робіт. Це праці таких вчених, як О. І. Амоша, В. П. Вишневецький,

І. О. Галиця, Ю. В. Кіндзерський, О. Й. Лесько, А. Д. Олійник, О. В. Пирог, І. В. Причепа, А. В. Шевченко, Т. М. Юсупова, М. Ю. Сушко, М. М. Якубовський та ін. [1, 2]. Основною метою цих досліджень є побудова шляхів ефективної діяльності та вдосконалення видобувних процесів паливної промисловості, що підвищує конкурентоспроможність економіки країни. Використання наукового підходу до проблем розвитку промислового сектору України сприяє виявленню ефективних рішень для розв'язання важких завдань, пов'язаних із зменшенням обсягів виробництва.

Використання адаптивних моделей до розв'язання задач апроксимації є ефективним та дозволяє підвищити точність прогнозування. Засновниками засад використання апарату адаптивного моделювання соціально-економічних процесів є Г. Браун [3], А. Тейл, С. Вейдж [4], П. Вінтерс [5]. Актуальність теми адаптивного моделювання виробничих процесів та прогнозування економічних показників підприємства залишається важливою як на міжнародному, так і на внутрішньому рівнях. Активно проводять дослідження в цій області з метою удосконалення методів та підвищення ефективності їх використання у практичній діяльності такі вчені як: В. Тінякова, О. Г. Ніколаєва, Т. С. Клебанова, В. В. Давніс, О. В. Стогній, Макаров, Ю. П. Корчевой, Г. Г. Півняк та інші [6–10]. Отримані результати досліджень цих вчених сприяють удосконаленню методів адаптивного моделювання і їх застосуванню для прогнозування економічних показників підприємств, підвищенню ефективності виробничих процесів та раціональному використанню ресурсів.

Авторами у роботі [11] проведено наукове дослідження щодо прогнозування видобутку нафти за допомогою елементів математичного моделювання. У роботі [12] проведено аналіз обсягів видобутку вугілля за допомогою методів прогнозування, побудовано та описано моделі лінійної, параболічної та гіперболічної регресії, що апроксимують дані обсягів видобутку вугілля. На відміну від [12], у даній роботі авторами використано методи експоненційного вирівнювання й множинної лінійної регресії та модель Хольта до процесу моделювання експлуатаційних вуглеводневих покладів. Використання цих методів у прогнозуванні видобутку вугілля дозволяє зробити прогнози більш точними та надійними, що сприяє ефективному використанню паливних ресурсів.

2. Постановка задачі. У сучасних дослідженнях математичне моделювання визнано як надзвичайно перспективний напрям, який виявляє ефективність у численних галузях: науці, техніці, економіці, соціології та інших сферах (див., наприклад [13–16]).

Математичні моделі є потужним інструментом для проведення аналізу та вивчення різних природних процесів і явищ. Дослідження адаптивних моделей сприяє розумінню їх природи та поведінки та здійсненню прогнозів.

Основною метою математичного моделювання є побудова якнайбільш точної математичної моделі, на основі якої можна передбачити майбутні результати розвитку процесу. Після дослідження динаміки видобутку вугілля за 2003–2020 роки, авторами у цій роботі розв'язано задачу побудови найбільш точно апроксимуючих моделей за допомогою використання методів нечіткого прогнозування. Авторами проведено верифікацію отриманих модеелй, перевірено їх точність та адекватність, наведено порівняльний аналіз апроксимованих та заданих значень. Тому побудовані в роботі моделі можна використовувати для

опису і уточнення майбутньої динаміки видобутку вугілля в Україні.

Мета статті — апроксимація життєвого циклу видобутку вугілля з використанням методів математичного моделювання та нечіткого прогнозування, а також порівняльний аналіз застосованих методів.

3. Основний результат. Під час розробки стратегічних програм для розвитку вуглевидобувної промисловості України важливо мати науково обґрунтовані прогнози щодо зміни показників, які відображають стан цієї галузі економіки. Такі прогнози дозволяють виявити тенденції в розвитку галузі і створюють основу для ефективного стратегічного планування.

Використання адаптивного моделювання у прогнозуванні видобутку вугілля має важливе практичне значення для вирішення задач оптимізації та управління видобувною галуззю України в умовах сучасних викликів.

Проведене в цій роботі дослідження побудоване на базі даних обсягів видобутку вугілля, яку взято із сайту державної служби статистики України, з розділу “Економічна статистика та економічна діяльність”, у підрозділі “Промисловість” і пункті “Виробництво окремих видів промислової продукції” [17].

Важливу роль в плануванні розвитку вугледобувної галузі відіграють прогнози, засновані на науковому аналізі показників добування вугілля в країні протягом певного ретроспективного періоду. Такі прогнози, зроблені на основі математичних моделей, складають основу для розроблення конкретних заходів щодо розвитку даної галузі економіки.

Для одержання науково обґрунтованого прогнозу видобутку вугілля подано дані за ретроспективний період 2003–2020 роки [17] у вигляді таблиці 1, через t позначимо номер року.

В 2003–2013 роках періоди зростання видобутку чергуються із періодами його зменшення. Середній річний видобуток за цей період складає 60,23 тис. т., а середнє квадратичне відхилення — 3,37 тис. т., тобто 5,6% від середнього значення. В 2014 та 2015 роках видобуток вугілля значно зменшився: в 2014 році на 28,7% порівняно із попереднім роком, а в 2015 році ще на 34,2%. В 2015–2020 роках середній річний видобуток період складає 27 тис. т., а середнє квадратичне відхилення — 3,16 тис. т., тобто 11,7% від середнього значення.

Щоб одержати обґрунтований прогноз обсягів видобування вугілля необхідно використати кілька різних методів прогнозування, що дасть можливість одержати результуючий прогноз у формі трикутного нечіткого числа. Методи прогнозування вибираємо, беручи до уваги особливості динаміки прогнозованого показника. Такими методами є прогнозування за допомогою рівняння множинної лінійної регресії, метод експоненційного вирівнювання та адаптивний метод на основі моделі Хольта.

Позначимо кількість видобутого вугілля в t -тий рік ретроспективного періоду через $Y(t)$. При використанні множинної лінійної регресії для апроксимації функції $Y(t)$ використовуємо рівність

$$Y(t) = a_0 + a_1 X_1(t) + a_2 X_2(t),$$

де $X_1(t)$ визначає номер року в ретроспективному періоді, тобто $X_1(t) = t$, а $X_2(t)$ — це штучна змінна, що визначає особливості динаміки змінної $Y(t)$. При зміні t від 1 до 13 приймаємо $X_2(t) = 1$, а при зміні t від 14 до 18 вважаємо, що $X_2(t) = 0$.

Таблиця 1.

Видобуток вугілля в Україні протягом 2003–2020 років.

t	Рік	Видобуто вугілля (тис. т.)
1	2003	59,8
2	2004	59,4
3	2005	60,4
4	2006	61,7
5	2007	58,9
6	2008	59,5
7	2009	55
8	2010	55
9	2011	62,7
10	2012	65,7
11	2013	64,4
12	2014	45,9
13	2015	30,2
14	2016	31,6
15	2017	24,2
16	2018	26,3
17	2019	25,5
18	2020	24,2

Щоб визначити коефіцієнти a_i використаємо матрицю $K = (k_{ij})$ розмірності $T \times 3$, де T — тривалість ретроспективного періоду ($T = 18$), елементи якої визначаються за формулами:

$$k_{t1} = 1, \quad k_{t2} = X_1(t) = t, \quad k_{t3} = X_2(t).$$

Матриця A , що містить коефіцієнти a_i , визначається із рівності

$$A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = (\tilde{K}K)^{-1}\tilde{K}Y,$$

де \tilde{K} — матриця, транспонована до матриці K , а Y — матриця-стовпець, що складається із значень $Y(t)$.

В результаті виконаних розрахунків одержимо такі матриці $(\tilde{K}K)^{-1}$ та A

$$(\tilde{K}K)^{-1} = \begin{pmatrix} 1,53333 & -0,08333 & -0,95000 \\ -0,08333 & 0,00521 & 0,04688 \\ -0,95000 & 0,04688 & 0,69880 \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} 45,31833 \\ -1,18490 \\ 19,79132 \end{pmatrix}.$$

Таким чином рівняння множинної лінійної регресії для апроксимації функції $Y(t)$ має вигляд

$$Y(t) = 45,31833 - 1,18490X_1(t) + 19,79132X_2(t).$$

Використовувати одержане рівняння для прогнозування обсягів видобування вугілля в майбутні роки можна лише за умови його адекватності початковим

даним та значимості його коефіцієнтів. Для перевірки адекватності рівняння регресії початковим даним визначаємо із цього рівняння теоретичні значення $Y_r(t) = a_0 + a_1X_1(t) + a_2X_2(t)$ змінної $Y(t)$ та обчислюємо квадрати різниць $(Y(t) - Y_r(t))^2$ між фактичними і одержаними теоретичними значеннями. На основі одержаних результатів визначаємо коефіцієнт детермінації за формулою

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Y(t) - Y_r(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Y(t) - \bar{Y})^2},$$

де \bar{Y} – середнє значення змінної $Y(t)$ протягом ретроспективного періоду ($\bar{Y} = 48,4$).

Дані для обчислення коефіцієнту детермінації наведено в таблиці 2.

Таблиця 2.

Обчислення коефіцієнту детермінації для рівняння множинної лінійної регресії.

Рік	t	X ₁ (t)	X ₂ (t)	Y(t)	Y _r (t)	(Y(t)-Y _r (t))	(Y(t)-Y _r (t)) ²	(Y(t)- \bar{Y}) ²
2003	1	1	1	59,8	63,92476	-4,12476	17,01364	0,00010
2004	2	2	1	59,4	62,73986	-3,33986	11,15469	0,16810
2005	3	3	1	60,4	61,55497	-1,15497	1,33395	0,34810
2006	4	4	1	61,7	60,37007	1,32993	1,76871	3,57210
2007	5	5	1	58,9	59,18518	-0,28518	0,08133	0,82810
2008	6	6	1	59,5	58,00028	1,49972	2,24916	0,09610
2009	7	7	1	55	56,81538	-1,81538	3,29562	23,13610
2010	8	8	1	55	55,63049	-0,63049	0,39752	23,13610
2011	9	9	1	62,7	54,44559	8,25441	68,13524	8,35210
2012	10	10	1	65,7	53,26070	12,43930	154,73626	34,69210
2013	11	11	1	64,4	52,07580	12,32420	151,88587	21,06810
2014	12	12	1	45,9	50,89091	-4,99091	24,90914	193,48810
2015	13	13	1	30,2	49,70601	-19,50601	380,48441	876,75210
2016	14	14	0	31,6	28,72979	2,87021	8,23810	795,80410
2017	15	15	0	24,2	27,54490	-3,34490	11,18833	1268,07210
2018	16	16	0	26,3	26,36000	-0,06000	0,00360	1122,92010
2019	17	17	0	25,5	25,17510	0,32490	0,10556	1177,17610
2020	18	18	0	24,2	23,99021	0,20979	0,04401	1268,07210
Всього		171	13	870,4	870,40000	0,00000	837,02512	6817,68180

Визначаємо коефіцієнт детермінації

$$R^2 = 1 - \frac{837,02512}{6817,68180} = 0,8122.$$

Перевірка адекватності моделі здійснюється на основі критерію Фішера. Якщо фактичне значення критерію Фішера більше табличного, то рівняння регресії адекватне реальним даним. Фактичне значення критерію Фішера визначаємо за формулою

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{T - 3}{2} = \frac{0,8122 \cdot 15}{0,1878 \cdot 2} = 32,42.$$

Табличне значення критерію Фішера $F(\alpha, k_1, k_2)$ визначаємо за наступними параметрами: довірна імовірність $\alpha = 0,95$, ступені свободи $k_1 = 2$, $k_2 = T - 3 = 15$. Одержимо значення $F(\alpha, k_1, k_2) = 3,7$. Отже, одержане рівняння

множинної лінійної регресії є адекватним початковим даним. Перевіримо значимість коефіцієнтів даного рівняння регресії. Для цього визначаємо дисперсію адекватності

$$S^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (Y(t) - Y_r(t))^2}{T - 3} = \frac{837,02512}{15} = 55,8.$$

Для коефіцієнтів a_1 та a_2 рівняння регресії обчислюємо середні квадратичні відхилення їх оцінок за формулою

$$\sigma_j = \sqrt{w_{jj}S^2},$$

де w_{jj} — елементи головної діагоналі матриці $(XTX)^{-1}$, та відповідні t -статистики за формулою

$$t_{jj} = \frac{|a_j|}{\sigma_j}.$$

Одержимо

$$\sigma_1 = \sqrt{0,00521 \cdot 55,8} = 0,539; \quad t_{11} = \frac{1,18490}{0,539} = 2,1979;$$

$$\sigma_2 = \sqrt{0,6988 \cdot 55,8} = 6,2445; \quad t_{22} = \frac{19,79132}{6,2445} = 3,1694.$$

За критерієм Стьюдента коефіцієнт a_j вважається значимим, якщо величина t_{jj} перевищує табличне значення $t(\alpha, k)$ даного критерію, що відповідає довірчій імовірності α та кількості ступенів свободи $K = T - 3$. Приймавши $\alpha = 0,95$, одержимо $t(\alpha, k) = 2,13145$. Таким чином коефіцієнти a_1 та a_2 рівняння регресії є значимими.

Отже, одержане рівняння множинної лінійної регресії можна використовувати для прогнозування показника $Y(t)$. Для одержання прогнозного значення обсягу видобутку вугілля в 2024 році підставимо в це рівняння значення $t = 22$, що відповідає даному року. Одержимо значення

$$Y(22) = 45,31833 - 1,18490 \cdot 22 = 19,25.$$

Таким чином в 2024 році прогнозується видобуток вугілля в обсязі 19,25 тис. т., тобто зменшення даного показника на 20,45% порівняно із 2020 роком.

При використанні методу експоненційного вирівнювання значення показника $Y(t)$ вирівнюються за допомогою зваженої ковзної середньої, причому вагові коефіцієнти вибираються такими, щоб дані, одержані за останні роки мали більшу вагу порівняно із попередніми. Величина зростання ваги більш нових значень визначається коефіцієнтом η , який підбирається емпірично. В результаті проведених досліджень нами обрано значення $\eta = 0,105$. Апроксимацію реальних значень обсягів видобування вугілля здійснюємо на основі многочлена $L(t) = \theta_0 + \theta_1 t + \theta_2 \frac{t^2}{2!}$.

Для першого року ретроспективного періоду вирівняні значення Y_1, Y_2, Y_3 обчислюємо за формулами

$$\begin{cases} Y_1(1) = \theta_0 - \frac{1-\eta}{\eta}\theta_1 + \frac{(1-\eta)(2-\eta)}{2\eta^2}\theta_2, \\ Y_2(1) = \theta_0 - \frac{2(1-\eta)}{\eta}\theta_1 + \frac{2(1-\eta)(3-2\eta)}{2\eta^2}\theta_2, \\ Y_3(1) = \theta_0 - \frac{3(1-\eta)}{\eta}\theta_1 + \frac{3(1-\eta)(4-3\eta)}{2\eta^2}\theta_2. \end{cases} .$$

При $t = 1$ коефіцієнти θ_0 , θ_1 , θ_2 визначаємо, розв'язавши оптимізаційну задачу

$$\sum_{t=1}^T (Y(t) - L(t))^2 = \sum_{t=1}^T \left(Y(t) - \theta_0 - \theta_1 t - \theta_2 \frac{t^2}{2!} \right)^2 \rightarrow \min.$$

Для наступних років значення вирівняних рядів визначаються на основі рекурентних рівностей

$$\begin{cases} Y_1(t) = (1 - \eta) Y_1(t - 1) + \eta Y(t), \\ Y_2(t) = (1 - \eta) Y_2(t - 1) + \eta Y_1(t), \\ Y_3(t) = (1 - \eta) Y_3(t - 1) + \eta Y_2(t). \end{cases}$$

При цьому коефіцієнти θ_0 , θ_2 , θ_3 теж динамічно змінюються. Їх значення визначаються за формулами

$$\begin{cases} \theta_0(t) = 3Y_1(t) - 3Y_2(t) + Y_3(t), \\ \theta_1(t) = \frac{\eta}{2(1-\eta)^2} [(6 - 5\eta) Y_1(t) - 2(5 - 4\eta) Y_2(t) + (4 - 3\eta) Y_3(t)], \\ \theta_2(t) = \frac{\eta^2}{(1-\eta)^2} (Y_1(t) - 2Y_2(t) + Y_3(t)). \end{cases}$$

Для одержання прогнозованих значень обсягів видобутку вугілля на 2024 рік використаємо рівність

$$Y(T + \nu) = \theta_0(T) + \theta_1(T) \nu + \theta_2(T) \frac{\nu^2}{2!},$$

де $\nu = 4$ кількість років від завершення ретроспективного періоду до року, на який визначається прогноз. Результати прогнозування відображені в таблиці 3, де наведено реальні та розрахункові дані за ретроспективний період (2003–2020 роки), що відповідають значенням t від 1 до 18, та прогноз на 2024 рік, якому відповідає значення $t = 22$.

Отже, використання моделі експоненційного вирівнювання дає можливість прогнозувати в 2024 році видобуток вугілля в обсязі 22,96 тис. т., тобто передбачається певне зменшення даного показника порівняно із 2020 роком. Прогнозоване зменшення складає 5,1% від рівня 2020 року, що істотно менше аналогічної величини, одержаної методом множинної лінійної регресії.

Адаптивна модель Хольта включає дві функції — $g(t)$, що відображає динаміку рівня ряду, та $q(t)$, що відображає динаміку тренду. В перший рік ретроспективного періоду функція $g(t)$ приймає значення, рівне відповідному рівню ряду, а функція $q(t)$ дорівнює нулю, тобто $g(1) = Y(1)$, $r(1) = 0$. В наступні роки значення цих функцій обчислюють за рекурентними формулами

$$g(t) = \beta Y(t) + (1 - \beta)(g(t - 1) + q(t - 1));$$

$$q(t) = \gamma (g(t) - g(t - 1)) + (1 - \gamma)q(t - 1).$$

Коефіцієнт β згладжування ряду та коефіцієнт γ згладжування тренду вибираються емпірично таким чином, щоб забезпечити найвищу точність прогнозування протягом ретроспективного періоду. Для визначення точності прогнозу

Таблиця 3.

Прогнозування очікуваного обсягу видобування вугілля в Україні методом експоненційного вирівнювання.

t	$Y(t)$	$L(t)$	$(Y(t) - L(t))^2$	$Y_1(t)$	$Y_2(t)$	$Y_3(t)$	θ_0	θ_1	θ_2
1	59,8	57,935	3,479	29,068	-9,682	-59,926	56,323	1,770	-0,158
2	59,4	59,230	0,029	32,252	-5,279	-54,188	58,406	1,655	-0,157
3	60,4	60,209	0,036	35,208	-1,028	-48,606	60,101	1,512	-0,156
4	61,7	60,872	0,686	37,990	3,069	-43,180	61,582	1,361	-0,156
5	58,9	61,218	5,373	40,185	6,966	-37,915	61,742	1,081	-0,161
6	59,5	61,248	3,055	42,213	10,667	-32,814	61,825	0,818	-0,164
7	55	60,961	35,536	43,556	14,121	-27,885	60,421	0,417	-0,173
8	55	60,358	28,710	44,758	17,337	-23,137	59,123	0,064	-0,180
9	62,7	59,439	10,635	46,641	20,414	-18,564	60,117	-0,003	-0,176
10	65,7	58,203	56,205	48,643	23,378	-14,160	61,633	0,000	-0,169
11	64,4	56,651	60,050	50,297	26,205	-9,922	62,355	-0,080	-0,166
12	45,9	54,782	78,893	49,835	28,686	-5,868	57,580	-0,756	-0,184
13	30,2	52,597	501,635	47,774	30,690	-2,029	49,221	-1,772	-0,215
14	31,6	50,096	342,095	46,075	32,306	1,576	42,885	-2,481	-0,233
15	24,2	47,278	532,594	43,779	33,510	4,929	35,734	-3,218	-0,252
16	26,3	44,144	318,401	41,943	34,396	8,023	30,665	-3,661	-0,259
17	25,5	40,693	230,833	40,217	35,007	10,856	26,486	-3,963	-0,261
18	24,2	36,926	161,956	38,535	35,377	13,431	22,904	-4,167	-0,259
Прогнозований період									
22	22,96								

обчислюємо для кожного року ретроспективного періоду, починаючи із другого, величини абсолютної похибки та квадрату відносної похибки за формулами

$$\Delta(t) = Y(t) - g(t) - q(t);$$

$$\delta(t) = \frac{\Delta^2(t)}{Y^2(t)}.$$

Точність прогнозу визначається рівністю

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum_{t=2}^T \delta(t)}{T - 1}.$$

Прогнозоване значення показника $Y(t)$ в j -тий рік після завершення ретроспективного періоду визначається рівністю

$$Y(T + j) = g(T) + jq(T).$$

При прогнозуванні обсягів видобування вугілля параметрами моделі прийняті величини $\beta = 0,6$, $\gamma = 0,7$, при яких точність прогнозу складає 93,54%.

Результати прогнозування методом Хольта відображені в таблиці 4.

Таким чином використання моделі Хольта дає можливість прогнозувати, що обсяг видобування вугілля в Україні в 2024 році досягне 26,89 тис. т., що на 11,13% перевищує рівень 2020 року, але є меншим від рівня 2016 року.

Обсяги видобутку вугілля в Україні в 2003-2020 роках та прогнози на 2024 рік відображені на рисунку 1.

Отже, при використанні рівняння множинної лінійної регресії одержується найменше прогнозоване значення обсягу видобутку вугілля, при використанні експоненційного вирівнювання — дещо більше значення, а використання методу Хольта дає найоптимістичніший прогноз. Одержані значення дають можливість визначити прогноз за допомогою трикутного нечіткого числа. Визначимо

Таблиця 4.

Визначення очікуваних обсягів видобування вугілля в Україні методом Хольта.

Рік	t	$Y(t)$	$g(t)$	$q(t)$	j	$Y(T+j)$	$g(t)+q(t)$	$\Delta(t)$	$\delta(t)$	ϵ
Ретроспективний період										
2003	1	59,8	59,8	0,00000			59,8			93,54%
2004	2	59,4	59,56	-0,16800			59,8	-0,40000	0,00005	
2005	3	60,4	60,00	0,25536			59,39200	1,00800	0,00028	
2006	4	61,7	61,12	0,86345			60,25216	1,44784	0,00055	
2007	5	58,9	60,13	-0,43196			61,98432	-3,08432	0,00274	
2008	6	59,5	59,58	-0,51670			59,70177	-0,20177	0,00001	
2009	7	55	56,63	-2,22358			59,06400	-4,06400	0,00546	
2010	8	55	54,76	-1,97243			54,40202	0,59798	0,00012	
2011	9	62,7	58,74	2,19045			52,78838	9,91162	0,02499	
2012	10	65,7	63,79	4,19561			60,92580	4,77420	0,00528	
2013	11	64,4	65,83	2,68952			67,98593	-3,58593	0,00310	
2014	12	45,9	54,95	-6,81251			68,52390	-22,62390	0,24295	
2015	13	30,2	37,37	-14,34607			48,13704	-17,93704	0,35277	
2016	14	31,6	28,17	-10,74615			23,02874	8,57126	0,07357	
2017	15	24,2	21,49	-7,90079			17,42535	6,77465	0,07837	
2018	16	26,3	21,22	-2,56232			13,58935	12,71065	0,23357	
2019	17	25,5	22,76	0,31324			18,65342	6,84658	0,07209	
2020	18	24,2	23,75	0,78591			23,07461	1,12539	0,00216	
Прогнозний період										
2024					4	26,89				

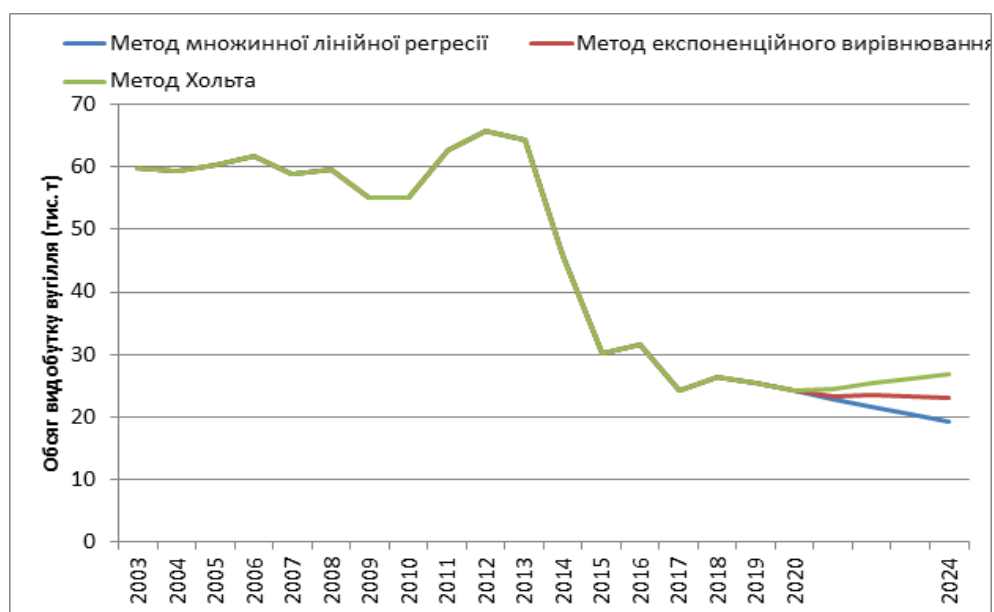


Рис. 1. Обсяги видобутку вугілля в Україні в 2003–2020 роках із прогнозами на 2024 рік.

функцію належності цього числа такою рівністю

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x < F_1; \\ \frac{x-F_1}{F_2-F_1}, & \text{якщо } F_1 \leq x \leq F_2; \\ \frac{F_3-x}{F_3-F_2}, & \text{якщо } F_2 \leq x \leq F_3; \\ 0, & \text{якщо } x > F_3. \end{cases}$$

де F_1 — прогнозоване значення, одержане на основі рівняння множинної лі-

нійної регресії ($F_1 = 19, 25$), F_2 — прогнозоване значення, одержане методом експоненційного вирівнювання ($F_2 = 22, 96$), F_3 — прогнозоване значення, одержане методом Хольта ($F_3 = 26, 89$).

Одержане нечітке трикутне число із функцією належності $f(x)$ визначає прогноз видобутку вугілля в Україні в 2024 році. Графічне відображення даного числа наведено на рисунку 2.

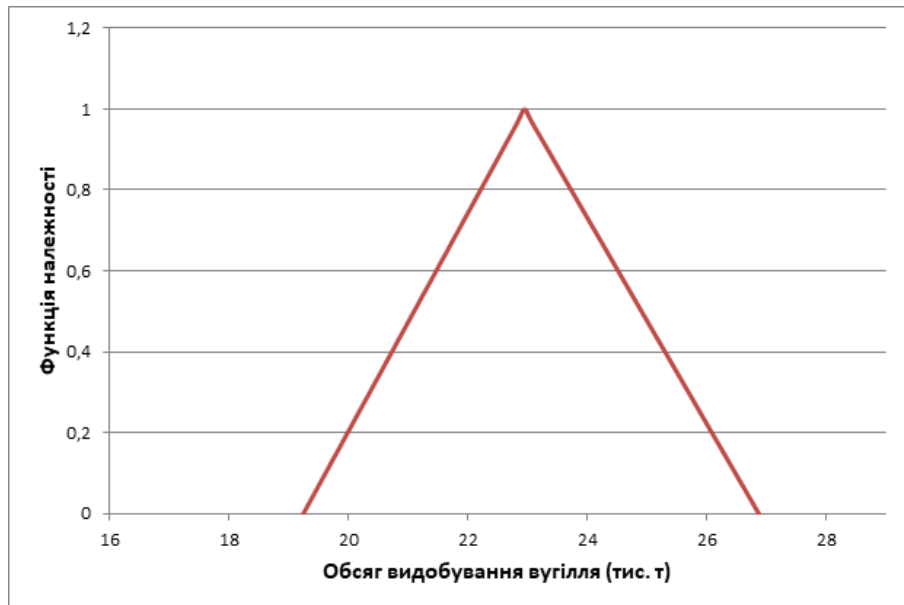


Рис. 2. Прогноз обсягу видобутку вугілля на 2024 рік у вигляді нечіткого трикутного числа.

4. Висновки. Забезпечення позитивної динаміки обсягів видобутку вугілля є критично важливим завданням для урядових органів і підприємств. Реалізація цього завдання передбачає не лише залучення інвестицій у вугільну галузь, а й вдосконалення технологій, відкриття нових родовищ і впровадження нових підходів для підвищення продуктивності видобутку.

Дослідження динаміки та аналіз обсягів видобутку експлуатаційних вуглеводневих покладів, проведений авторами, підтверджує наявність певних особливостей у цьому процесі. У роботі показано, що використання методів нечіткого прогнозування є ефективним і враховує специфіку цього процесу.

Прогнозування видобутку вугілля з використанням адаптивних моделей має значний потенціал, оскільки такий підхід дозволяє моделювати залежність від змінних умов і параметрів вугільного ринку. Це сприяє підвищенню точності прогнозування, оскільки модель адаптується до реальних змін, що відбуваються на ринку. Важливо зазначити, що якість та точність прогнозів значною мірою залежать від якості вхідних даних та ефективності використовуваних методів моделювання.

Реалізація адаптивних моделей для прогнозування обсягів видобутку вугілля може відкрити нові можливості для оптимізації процесів вугледобування, забезпечити більш точні прогнози та сприяти досягненню стабільного розвитку вугільної галузі.

Список використаної літератури

1. Сушко М. Ю. Аналіз сучасного стану розвитку промислової галузі України. *Вісник економічної науки України*. 2017.
2. Юсупова Т. М. Дослідження проблем вітчизняної промисловості в контексті пошуку шляхів відродження її економічного потенціалу. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2013. № 43. С. 107–110.
3. Brown G. Robert. *Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series*. Dover Phoenix Editions : New York, USA.
4. Theil H., Wage S. "Some observations on adaptive forecasting". *Management Science*. 1964. Vol. 10. P. 198–206.
5. Winters, P. R. (1960), "Forecasting sales by exponentially weighted moving averages", *Management Science*, vol. 6, pp. 324-342.
6. Klebanova T. C., Rudachenko, O. O. (2015), "Forecasting of indicators of financial activity of the enterprise of housing and communal services using adaptive models". *Biznes-inform*. Vol. 1. P. 143–148.
7. Стогній О. В., Макаров В. М., Каплін М. І. Потенціал видобутку вугілля в Україні. *Проблеми загальної енергетики*. 2011. № 2, С. 11–16.
8. Корчевой Ю. П., Півняк Г. Г. Новітні технології використання вугілля в енергетиці. 2006.
9. Ніколаєва О. Г. Прогнозування видобутку нафти і газу за допомогою нейромережевого моделювання і трендових моделей. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: Економіка і менеджмент*. 2018. № 31. С. 121–126.
10. Varnaliy Z., Onishchenko S., Masliy A. Preventing threats as a precondition to increase the level of Economic Security of the State. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2016. Vol. 7/1, No. 24, P. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.74409>
11. Ічанська Н. В., Лисенко М. В. Прогнозування видобутку нафти в Україні за допомогою адаптивних моделей. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Математика і інформатика»*, Т. 42, № 1, С. 164–173. DOI: [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2023.42\(1\).164-173](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2023.42(1).164-173)
12. Ichanska N., Shurpik O. Аналіз динаміки видобутку вугілля в Україні за допомогою методів математичного моделювання. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Т. 2, № 72. С. 49-53. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.049>
13. Онищенко В., Ічанська Н., Скриль В., Фурманчук О. Економіко-математичне моделювання інноваційного розвитку підприємств будівельної галузі В: Матеріали 3-ї Міжнародної конференції з будівельних інновацій. ІСВІ 2020. Конспект лекцій з цивільного будівництва, тому 181. / Онищенко В., Мамедова Г., Сивицька С., Гасимов А. Springer : Cham, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_65
14. Hudz S., Ichanska N., Rendyuk S., Molchanov P. Оптимізація розрахункової схеми двопротитних прогонів у каркасній системі з порталними рамами із застосуванням в'язевих підкосів. *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Vol. 1, No. 56. P. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2021.56.2504>
15. Gorik A. V., Piskunov V. G., Serov N. I. et al. The Analytical Solution of the Bending Problem for an Inhomogeneous Noncircular Cylindrical Body. *International Applied Mechanics*. 2002. Vol. 38. P. 1261–1271. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022218731489>
16. Gorik A. V., Piskunov V. G., Serov M. I. et al. Analytic solution of the problem of bending of a composite beam on the basis of an improved model of deformation. *Strength Mater*. 1999. Vol. 31. P. 85–98. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02509745>
17. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. URL: <https://mev.gov.ua/> (дата звернення: 00.00.2023).

Ichanska N. V., Lysenko M. V. Coal mining dynamics research in Ukraine using fuzzy modeling methods.

The article examines the dynamics of coal extraction in Ukraine and discusses various approaches to modeling the life cycle of hydrocarbon deposit exploitation processes. By utilizing elements of mathematical modeling, the authors have solved the approximation problem using the Holt model and exponential smoothing methods, as well as multiple linear regression. The authors have analyzed each of these methods in terms of their effectiveness in addressing the challenges of Ukraine's fuel and energy complex development.

The use of adaptive models in applied research allows for working with complex and

unstable data. In the study, fuzzy modeling methods are applied to forecast coal extraction volumes. This enables modeling the dependence of this process on variable conditions and parameters of the coal market, which contributes to increased forecasting accuracy. The modeling proposed by the authors allows representing the forecast in the form of a triangular fuzzy number, specifically indicating possible expected values.

Keywords: fuzzy forecasting methods, coal mining, Fisher's and Student's criterias, adaptive models, exponential smoothing method, multiple linear regression equation, Holt model, triangular fuzzy number.

References

1. Sushko, M. Y. (2017). Analysis of the current state of the development of the industrial sector in Ukraine. *Bulletin of Economic Science of Ukraine*.
2. Yusupova, T. M. (2013). Research on the problems of the domestic industry in the context of finding ways to revive its economic potential. *Bulletin of Economics, Transport, and Industry*, 43, 107–110.
3. Brown G. Robert (2004). *Smoothing, Forecasting, and Prediction of Discrete Time Series, Dover Phoenix Editions*. New York: USA.
4. Theil, H., & Wage, S. (1964). "Some observations on adaptive forecasting". *Management Science*, 10, 198–206.
5. Winters P. R. (1960). "Forecasting sales by exponentially weighted moving averages". *Management Science*, 6, 324–342.
6. Klebanova, T. C., & Rudachenko, O. O. (2015), "Forecasting indicators of financial activity of housing and communal services enterprises using adaptive models". *Business Inform*, 1, 143–148.
7. Stohmiy, O. V., Makarov, V. M., & Kaplin, M. I. (2011). The Coal Production Potential in Ukraine. *Problems of General Energy*, 2, 11–16.
8. Korchevoy, Yu. P., & Pivnyak, H. H. (2006). *Advanced Coal Utilization Technologies in Energy*.
9. Nikolaeva, O. H. (2018). Forecasting Oil and Gas Production Using Neural Network Modeling and Trend Models. *Scientific Bulletin of the International Humanities University. Series: Economics and Management*, 31, 121–126.
10. Varnaliy, Z., Onishchenko, S., & Masliy, A. (2016). Preventing threats as a precondition to increase the level of Economic Security of the State. *Scientific Journal «ScienceRise»*, 7/1(24), 41–46. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.74409>
11. Ichanska, N. V., & Lysenko, M. V. (2023). Forecasting oil production in Ukraine using adaptive models. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series «Mathematics and Informatics»*, 42(1), 164–173. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2023.42\(1\).164-173](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2023.42(1).164-173)
12. Ichanska, N. V., & Shurpik, O. V. (2023). Analysis of the dynamics of coal mining in Ukraine using mathematical modeling methods.
13. Onyshchenko, V., Ichanska, N., Skryl, V., & Furmanchuk, O. (2022). Economic-mathematical modeling of innovative development of construction industry enterprises. In: Onyshchenko, V., Mamedova, G., Sivitska, S., & Gasimov, A. (Eds.) *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol. 181. Springer: Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_65.
14. Hudz, S., Ichanska, N., Rendyuk, S., & Molchanov, P. (2022). Optimization of the calculation scheme of two-span passages in a frame system with portal frames using diagonal struts. *Academic Journal Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(56), 30–36. <https://doi.org/10.26906/znp.2021.56.2504>
15. Gorik, A. V., Piskunov, V. G., Serov, N. I. et al. (2002). The Analytical Solution of the Bending Problem for an Inhomogeneous Noncircular Cylindrical Body. *International Applied Mechanics*, 38, 1261–1271. <https://doi.org/10.1023/A:1022218731489>
16. Gorik, A. V., Piskunov, V. G., Serov, M. I. et al. (1999). Analytic solution of the problem of bending of a composite beam on the basis of an improved model of deformation. *Strength Mater*, 31, 85–98. <https://doi.org/10.1007/BF02509745>
17. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine. Retrieved from <https://mev.gov.ua/>

Одержано 14.09.2023