

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ ДЛЯ КРАЇНИ ТА ПРОМИСЛОВОГО СЕКТОРУ ЗА МІСЯЦЯМИ РОКУ

Маляренко О. Є., Тесленко О. І., Майстренко Н. Ю.

ВСТУП

Прогнозуванню енергоспоживання в Інституті загальної енергетики Національної академії наук України присвячені багаторічні наукові дослідження: удосконалено нормативний метод і метод прямого рахунку прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки з урахуванням структурних та технологічних змін, розроблено двоетапний і триетапний методи довгострокового і середньострокового прогнозування енергоспоживання тощо^{1,2}. Розроблені прогнозні моделі враховують два види потенціалів енергозбереження (структурний і технологічний) та обчислюються за кількома сценаріями, які відрізняються темпами впровадження заходів з енергозбереження. Реформування ринку електроенергії в Україні обумовило актуальність вирішення проблеми помісячного прогнозування споживання електроенергії. Перед авторами статті була поставлена задача адаптувати існуючі моделі прогнозування споживання електроенергії по роках для прогнозування попиту на електроенергію по місяцях року. Таке прогнозування дозволить визначити річне електричне навантаження за видами електрогенерувальних джерел, серед яких все більшу частку займають відновлювані джерела енергії (ВДЕ). Вирішення задачі

¹ Кулик М.М., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Куц Г.О. Енергоєфективність та прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки: методологія, прогнозні оцінки до 2040 року. Київ, «Наукова думка», 2021. 234 с. ISBN 978-966-00-1739-9.

² V V Horskyi, O Ye Maliarenko, N Yu Maistrenko, O I Teslenko, N O Kuts Modified three-stage model for forecasting the demand for energy resources at various hierarchy levels of the economy. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 1049, 3rd International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters 24/05/2022 – 27/05/2022 Kryvyi Rih, Ukraine. Citation V V Horskyi et al 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1049 012054 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1049/1/012054>

помісячного прогнозування споживання електроенергії потребує вибору математичної моделі. Точність прогнозування електроспоживання важлива для формування структури генерувальних джерел для покриття графіка електричних навантажень із зростаючою часткою ВДЕ. Ця модель, на нашу думку, має враховувати кілька факторів, що впливають безпосередньо на споживання електроенергії за місяцями року: середньомісячну температуру навколишнього повітря, зимовий (опалювальний) та літній (неопалювальний) періоди, обсяги продукції (робіт та послуг) енергоємних виробництв, рівень енергоефективності таких виробництв. Традиційно для прогнозування електроспоживання на короткострокову перспективу використовують методи статистичного аналізу (метод авторегресії, факторний аналіз)³. Структурні зміни в економіці по-різному впливають на енергоспоживання в її секторах. Ці зміни є довгостроковими, оцінити їх помісячно неможливо. Як правило, такі зміни оцінюються по п'ятирічних періодах за кількома сценаріями: песимістичним, що «заморожує» структурні зміни та враховує лише невисокі темпи впровадження технологічних заходів з енергозбереження, базовим з урахуванням структурних і технологічних змін (обсяги впровадження останніх 65-70% від технічно можливих) та оптимістичним з високими темпами впровадження технологічного енергозбереження (80-90% від технічно можливих) та структурній перебудові як економіки в цілому, так і окремих її секторів. Таким чином, моделювання було вирішено проводити у два етапи. Перший – визначення прогнозу електроенергії на середньо– та довгострокову перспективи на основі удосконаленого нормативного методу⁴, другий – розподіл отриманого річного прогнозу за місяцями року з використанням методів статистичного та регресійного аналізу. Ці методичні положення дозволяють сформулювати напрями подальшого дослідження.

³ Бэнн Д. В., Фармер Е. Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1987. 200 с.

⁴ Кулик М.М., Маляренко О.С., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Куц Г.О. Енергоефективність та прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки: методологія, прогнозні оцінки до 2040 року. Київ, «Наукова думка», 2021. 234 с. ISBN 978-966-00-1739-9.

1. Виникнення передумов та формулювання проблеми

Як зазначалося вище, вибір двоетапного підходу до помісячного прогнозування попиту на електроенергію з використанням удосконаленого нормативного методу⁵, поставив задачу визначення методу статистичного аналізу на основі дослідження статистичних рядів помісячних обсягів споживання електроенергії по країні та середньомісячної температури зовнішнього повітря (далі – повітря) з виявленням залежності у зміні електроспоживання. Огляд літературних джерел з математичного моделювання електроспоживання за місяцями року дозволив виділити дві публікації, що є близькими до поставленої нами задачі. При прогнозуванні щомісячного споживання електроенергії більшість методів безпосередньо моделюють і прогнозують часові ряди ретроспективних даних. Однак в процесі фактичного прогнозування часові ряди щомісячних продажів електроенергії часто містять компоненти з різними характеристиками⁶. В публікації китайських дослідників⁷ пропонується новий метод прогнозування щомісячних продажів електроенергії, заснований на аналізі чинників, що впливають на часові ряди: кількість вихідних днів у місяці та сезонність. Останній фактор ми розглянули як два періоди: опалювальний і неопалювальний. Також прогноз щомісячного споживання електроенергії розглядався у статті українських вчених⁸, в якій досліджувалось уточнення результатів прогнозу споживання електроенергії енергооб'єднання на поточний місяць за алгоритмом врахування значення фактичного добового електроспоживання енергооб'єднанням, фактичних та прогнозних значень

⁵ Кулик М.М., Маляренко О.С., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Куц Г.О. Енергоефективність та прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки: методологія, прогнозні оцінки до 2040 року. Київ, «Наукова думка», 2021. 234 с. ISBN 978-966-00-1739-9.

⁶ Бэнн Д. В., Фармер Е. Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1987. 200 с.

⁷ Tianhe Sun, Tiejian Zhang, Yun Teng, Zhe Chen, and Jiakun Fang Monthly Electricity Consumption Forecasting Method Based on X12 and STL Decomposition Model in an Integrated Energy System. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2019/9012543/>

⁸ Черненко П.О., Мартинюк О.В. Підвищення точності коригування місячного споживання електроенергії енергооб'єднання в задачі середньострокового прогнозування. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2014. № 1. С.77-81. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/983>

середньодобової температури повітря, електроспоживання енергоємними підприємствами, внутрішньомісячного тренду температури повітря та тижневої циклічності добового споживання електроенергії ОЕС України. Таким чином, нами з урахуванням моделей помісячного електроспоживання, згаданих вище, обрано наступні фактори впливу на електроспоживання по країні: середньомісячна температура повітря та сезонність (опалювальний та неопалювальний періоди). Створено узагальнену модель помісячного електроспоживання для країни. Для промислового сектору (зокрема, чорної металургії) додатково враховано вплив обсягів виробництва.

2. Модель прогнозування попиту на електроенергію по країні за місяцями року

2.1 Модель помісячного прогнозування попиту на електроенергію по країні на основі нормативного методу

За даними НЕК «Укренерго»⁹ проаналізована структура споживання електроенергії за групами споживачів за 2016–2020 рр. Результати аналізу дозволили сформулювати групу найбільших споживачів, які споживають більше 80% електроенергії в країні, а саме:

- промисловість: 42,3–42,8%;
- населення: 29,3–30,4%;
- комунально-побутові споживачі: 12,5–12,8%.

Найбільшим споживачем у промисловому секторі є чорна металургія (56% від загального споживання електроенергії в промисловості).

Прогнозування попиту на електроенергію пропонується визначати на перспективу з 5-річним часовим інтервалом із урахуванням факторів зміни структури економіки та обсягів впровадження технологічного потенціалу енергозбереження за комплексним методом, описаним у монографії¹⁰.

⁹ Структура споживання електроенергії по Україні за групами споживачів Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО». Передача і диспетчеризація. Диспетчерська інформація. Електроспоживання. URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya/>

¹⁰ Кулик М.М., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Куц Г.О. Енергоефективність та прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки: методологія, прогнозні оцінки до 2040 року. Київ, «Наукова думка», 2021. 234 с. ISBN 978-966-00-1739-9.

Згідно цього комплексного методу на рівні країни прогноз електроспоживання визначається виразом:

$$E_{TOP_s}^t = e_{ВДВ}^{\delta} V_{ВДВ_s}^t \mp E_{si}^{\delta-t} - E_{mex}^t \mp E_{зам}^t \quad (1)$$

де $e_{ВДВ}^{\delta}$ – електроємність ВДВ (валової доданої вартості) країни у базовому або попередньому році, кВт·год/грн;

$V_{ВДВ_s}^t$ – прогнозне значення обсягу ВДВ країни у прогнозованому t -році або кварталі t -року при s -структурі економіки (s -структура – одна з розрахованих прогнозних структур економіки за сценаріями s), тис. грн./рік;

$E_s^{\delta-t}$ – зниження або перевитрати електроенергії у t -році при зміні структури економіки з базового сценарію на s -сценарій, тис. кВт·год/рік;

E_{mex}^t – зниження електроспоживання шляхом технологічного переозброєння виробництва, тис. кВт·год/рік;

$E_{зам}^t$ – обсяги заміщення палива (газу, дизельного палива) електроенергією або електроенергії газом при заміні типу двигуна (газотурбінного у газотранспортній системі чи дизельного у потягах на електродвигуни, або електроприводу теплових насосів на газопоршневий привід), тис. кВт·год/рік.

Прогнозні обсяги ВДВ визначаються за темпами росту або зниження випуску продукції чи зміни частки секції економіки у загальній ВДВ країни¹¹.

Для помісячного прогнозування споживання електроенергії застосовується формула:

$$E_{TOP_s}^m = \alpha E_{TOP_s}^t \quad (2)$$

де α – коефіцієнт місячного відхилення споживання від середнього значення за рік з урахуванням температурних змін (табл. 1).

Помісячний обсяг виробленої ВДВ не прогнозується, але на рівні підприємства чи виду виробництва (клас, розділ за класифікатором видів економічної діяльності – КВЕД) прогнозується випуск продукції (ВП), який можливо використовувати у формулі (1) замість ВДВ.

¹¹ Кулик М.М., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Куц Г.О. Енергоефективність та прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки: методологія, прогнозні оцінки до 2040 року. Київ, «Наукова думка», 2021. 234 с. ISBN 978-966-00-1739-9.

Таблиця 1

Коефіцієнт місячного відхилення споживання електроенергії від середнього значення за рік з урахуванням температурних змін

Місяці/роки	2017	2025	2030	2035	2040
січень	1,196	1,140	1,116	1,104	1,092
лютий	1,080	1,068	1,056	1,032	1,020
березень	1,025	1,068	1,044	1,020	1,008
квітень	0,929	0,936	0,960	0,960	0,960
травень	0,887	0,912	0,924	0,924	0,924
червень	0,870	0,900	0,912	0,912	0,912
липень	0,911	0,924	0,936	0,948	0,960
серпень	0,948	0,936	0,948	0,948	0,972
вересень	0,887	0,948	0,948	0,972	0,984
жовтень	1,027	1,032	1,032	1,032	1,032
листопад	1,093	1,044	1,044	1,068	1,068
грудень	1,151	1,092	1,0804	1,068	1,068

Відповідно буде визначатись енергоємність випуску продукції базового року. При відсутності таких даних для оцінки прогнозного споживання електроенергії на певний m -ий місяць t -року прогнозний обсяг ВДВ потрібно розділити на квартальні показники за пропорціями попереднього року, а отриманий прогноз електроенергії за квартал розділити на 3 частини за помісячним електроспоживанням базового року, що певною мірою збільшить похибку, але дозволить зробити прогнозну оцінку.

Тоді електроємність ВДВ у m -му місяці t -року для формули (1) буде визначатись так:

$$e_{ВДВ}^{квб} = \frac{E_m^{квб}}{V_{ВДВ}^{квб}/3}, \quad (3)$$

де $e_{ВДВ}^{квб}$ – електроємність ВДВ країни у m -ому місяці базового або попереднього року;

$E_m^{квб}$ – споживання електроенергії у m -ому місяці базового або попереднього року;

$V_{ВДВ}^{квб}$ – квартальна ВДВ базового року.

2.2 Прогнозна оцінка попиту на електроенергію по країні за місяцями року на основі регресійного аналізу

Одним з найпоширених у застосуванні методів прогнозування попиту на електроенергію є авторегресійний аналіз, який застосовується переважно в середньостроковому і довгостроковому

прогнозуванні¹². Авторегресійна модель – модель часових рядів, в якій значення часового ряду в даний момент лінійно залежать від попередніх значень цього ж ряду^{13,14}.

Для здійснення регресійного аналізу необхідно:

- наявність щорічних даних за досліджуваними показниками;
- наявність одноразових прогнозів, тобто таких прогнозів, які не збільшуються у обсягах з надходженням нових даних.

Регресійний аналіз зазвичай проводиться для об'єктів, що мають складну, багатофакторну природу. Прогнози, зроблені методом авторегресії, вважаються одними з найбільш точних статистичних прогнозів, саме тому вони знайшли широке поширення. Це пояснюється тим, що моделлю авторегресії з великою вірогідністю описується велика кількість самих різних економічних показників. Основна ідея методу полягає в побудові прогнозу моделі за допомогою регресійного аналізу. Перевагою авторегресійного аналізу є отримання високоякісної (вірогідної) моделі з адекватним прогнозом при мінімумі витрат часу і вимог до вихідних даних. Недоліками такої моделі планування попиту на електроенергію є прогноз за вихідними даними можливий тільки на один період вперед. Цей метод знайшов широке застосування у контролі та прогнозуванні ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів¹⁵.

Можливо оцінити прогнозне помісячне споживання електроенергії $E_{\text{ТОР}}^m$ за регресійною залежністю, що отримана експериментально за даними 2016-2020 рр. (рис. 1). Ця залежність визначає зміну помісячного електроспоживання за місяцями року¹⁶

¹² Афітов Е.А. Планування на підприємстві. Москва: НДЦ ИНФРА-М. 2015. 344 с.

¹³ Саричев О.П. Моделирование сложных систем в условиях структурной неопределённости: регрессионные и авторегрессионные модели. Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing RU. 2016. 284 с.

¹⁴ Згуровський М.З., Новиков А.Н. Системний аналіз стохастически распределённых процессов: Моделирование, оценка состояний, идентификация. К.: УМКВО. 1988. 204 с.

¹⁵ Одієнко О.В. Світовий досвід контролю ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів при їх споживанні. Енергетика та електрофікація. 2008. № 10. С. 37 – 40.

¹⁶ Структура споживання електроенергії по Україні за групами споживачів Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО». Передача і диспетчеризація. Диспетчерська інформація. Електроспоживання. URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya/>

від середньої температури повітря місяця. Дані по середньомісячній температурі повітря по м. Києву надані у табл. 2. Маючи прогнозні значення середньомісячної температури повітря¹⁷, можливо за рис. 1 оцінити помісячне споживання електроенергії.

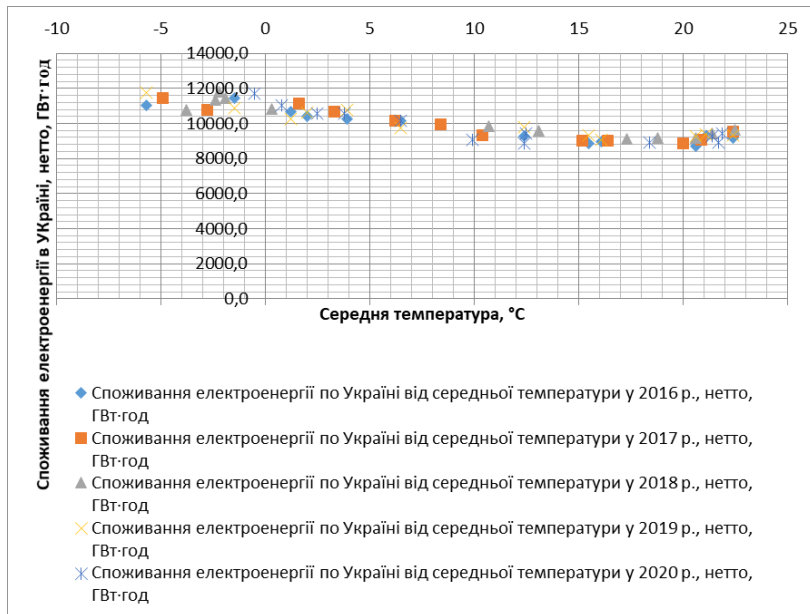


Рис. 1. Експериментальна залежність обсягів електроспоживання від середньої температури повітря місяця року, ГВт·год/місяць

¹⁷ Розроблення сценаріїв зміни кліматичних умов в Україні на середньо- та довгострокову перспективу з використанням даних глобальних та регіональних моделей. Звіт про науково-дослідну роботу. Український гідрометеорологічний інститут НАН України. Київ. 2013. 135 с. URL: <https://uhmi.org.ua/project/rvndr/climate.pdf>

Таблиця 2

Середня температура повітря по м. Києву за місяцями року¹⁸

Рік	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	Середня за рік
ДСТУ ¹⁹	-4,7	-3,6	1,0	9,0	15,2	18,3	19,8	19,0	13,9	8,1	1,9	-2,5	8,0
2016	-5,7	2,0	3,9	12,4	15,5	20,6	22,4	21,1	16,1	6,5	1,2	-1,5	9,5
2017	-4,9	-2,8	6,2	10,4	15,2	20	20,9	22,4	16,4	8,4	3,3	1,6	9,8
2018	-2,4	-3,8	-1,9	13,1	18,8	20,6	21,4	22,5	17,3	10,7	0,3	-2,2	9,5
2019	-4,5	0,6	5,1	10,6	17	23,6	19,8	20,7	15,9	11,1	4,6	2,7	10,6
2020	0,8	2,5	6,5	9,9	12,4	21,7	21,9	21,4	18,4	12,5	3,8	-0,5	10,9

Також було проведено дослідження статистичних даних щодо зміни споживання електроенергії від середньомісячної температури в опалювальний (рис. 2) та неопалювальний (рис. 3) періоди за 2016–2019 рр.

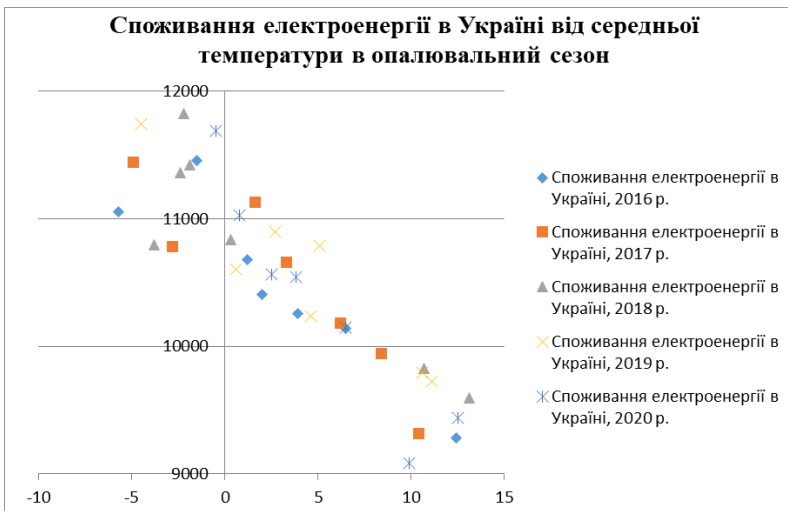


Рис. 2. Експериментальна залежність обсягів електроспоживання від середньої температури місяця опалювального сезону року (жовтень-квітень), ГВт·год/місяць

¹⁸ Середня місячна температура повітря у м. Києві. Центральна геофізична обсерваторія ім. Б. Срезневського. URL: http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/index.php?fn=k_klimat&f=kyiv

¹⁹ ДСТУ – Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія.

Як видно з рис. 2, а особливо з рис. 3, з кожним роком при однаковій низькій або високій температурі збільшується споживання електроенергії, що може свідчити про збільшення використання електричних нагрівачів для обігріву взимку та кондиціонерів для охолодження влітку.

Безумовно, що точно спрогнозувати споживання електроенергії неможливо, але представлені залежності допоможуть визначити діапазон споживання електроенергії при певній прогностичній температурі повітря. Прогноз температури повітря доцільно використовувати за джерелом²⁰.



Рис. 3. Експериментальна залежність обсягів електроспоживання від середньої температури місяця неопалювального сезону року (травень-вересень), ГВт·год/місяць

²⁰ Розроблення сценаріїв зміни кліматичних умов в Україні на середньо- та довгострокову перспективу з використанням даних глобальних та регіональних моделей. Звіт про науково-дослідну роботу. Український гідрометеорологічний інститут НАН України. Київ. 2013. 135 с. URL: <https://uhmi.org.ua/project/rvndr/ climate.pdf>

3. Методичні підходи до прогнозування попиту на електроенергію у промисловості за місяцями року

3.1 Загальні положення

Основними факторами, які обумовлюють рівень споживання електроенергії промисловістю E , є обсяги виробництва продукції N , енергоефективність (енергоємність) застосованих технологій e та температура зовнішнього повітря t_{zn}

$$E = f(N, e, t_{zn}).$$

Таким чином температура є не єдиним фактором впливу на споживання електроенергії промисловістю, а визначення її впливу на рівень електроспоживання для подальшого прогнозування споживання електроенергії потребує комплексного методичного підходу.

Наведені вище фактори мають власні часові особливості, які необхідно враховувати при аналізі енергоспоживання та його прогнозуванні, застосовуючи методи математичної статистики.

Обсяги виробництва. Обсяги виробництва мають, зазвичай, прогнозований та квазістаціонарний характер, зміни якого можуть коливатися у незначному діапазоні протягом року або мати сезонні зміни. Суттєві стрибкоподібні зміни обсягів виробництва продукції протягом року або більш тривалого періоду мають дуже рідкісний характер та можуть бути обумовлені кон'юнктурою ринку продукції або форс-мажорними (непередбачуваними) обставинами. Для помісячного аналізу та прогнозування залежності споживання електроенергії від середньомісячної температури зовнішнього повітря доцільно використовувати середньо добовий виробіток продукції, що дозволяє нівелювати вплив неоднакової кількості днів по місяцях року.

Розрахункова формула середньодобового споживання електроенергії за місяць:

$$E^o = \frac{E^m}{D^m}, \quad (4)$$

де E^m – місячний обсяг споживання електроенергії, млн кВт·год/міс;

D^m – кількість днів в місяці, доба/міс;

E^o – середньодобове споживання електроенергії за місяць, млн кВт·год/доб.

Технологічна енергоефективність. Зміна технологій, окрім розширення асортименту та якості продукції, може призвести до

зміни енергоємності продукції і, як наслідок, до зміни загального споживання електроенергії. За обсягами споживання електроенергії та виробництва продукції визначається ретроспективна та поточна енергоємність (електроенергетична складова) виробництва продукції для кожного місяця періоду, що аналізується.

Розрахункова формула електроємності виробництва продукції за місяць:

$$e = \frac{E^M}{N^M}, \quad (5)$$

E^M – місячне споживання електроенергії, млн кВт·год/міс;

N^M – виробництво продукції за місяць, одиниць продукції/міс;

e – електроємність виробництва продукції за місяць, кВт·год/одиницю продукції.

Прогноз зміни електроємності виробництва продукції визначається технологічними змінами технічного переоснащення виробництва, що передбачаються. Прогнозна електроємність виробництва продукції може зменшуватись (енергоефективне обладнання) або збільшуватись при зміні технології виробництва з перерозподілом споживання окремих видів паливно-енергетичних ресурсів. Наприклад, можна передбачати зменшення споживання електроенергії на 10% кожні п'ять років внаслідок енергозберігаючих технологій або збільшення на 5% кожні п'ять років внаслідок впровадження технологій, які збільшують споживання електроенергії, але зменшують споживання палива (заміна нагрівальних печей на паливі електричними).

Температура зовнішнього повітря. Вплив температури повітря t_{zn} безпосередньо впливає на електроємність виробництва продукції e внаслідок додаткового споживання електроенергії на обігрів помешкань та втрату теплоти від технологічного обладнання у навколишнє середовище в опалювальний період та на охолодження помешкань та технологічне обладнання в неопалювальний період.

3.2. Багатофакторна модель довгострокового прогнозування попиту на електроенергію в промисловості

Для середньострокового та довгострокового прогнозування розрахункову залежність визначення місячного електроспоживання в окремому секторі промисловості в залежності від температури повітря можна представити у вигляді:

а) за умов лінійної залежності від температури зовнішнього повітря

$$E_{np}^M = N_{np}^M(\tau) \times e(t_{zn}) = \chi_{np}^M \times N_{np}^P(\tau) \times (\psi_{np}^M(\tau) \times e_0 + \alpha_t \times t_{zn}); \quad (6)$$

б) за умов нелінійної залежності від температури зовнішнього повітря

$$E_{np}^M = N_{np}^M(\tau) \times e(t_{zn}) = \chi_{np}^M \times N_{np}^P(\tau) \times (\psi_{np}^e(\tau) \times e_0 + \alpha_t \times t_{zn} + \beta \times t_{zn}^2) \quad (7)$$

де $N_{np}^M(\tau)$ - прогноз місячного обсягу виробництва продукції в прогнозний період τ , одиниць продукції/місяць;

$N_{np}^P(\tau)$ – прогноз річного виробітку продукції в прогнозному році, млн т/рік;

χ_{np}^M – коефіцієнт розподілу виробництва продукції по місяцях року;

$\psi^e(\tau)$ – показник, що враховує прогнозовану зміну електроємності внаслідок технологічних змін та технологічної структури виробництва в окремому секторі промисловості за прогнозний період τ ;

e_0 – базовий рівень електроємності виробництва продукції в окремому секторі промисловості, кВт год/одиниця продукції;

t_{zn} – середньомісячна температура зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$;

α, β – коефіцієнти залежності електроємності виробництва продукції в окремому секторі промисловості від середньомісячної температури зовнішнього повітря.

Прогнозне місячне електроспоживання промисловістю $E_{np.пром}^M$ визначається як сума прогнозних значень місячного електроспоживання $E_{np.z}^M$ окремих Z секцій (галузей) промисловості

$$E_{np.пром}^M = \sum_1^Z E_{np.z}^M, \text{ млн кВт}\cdot\text{год}/\text{місяць} \quad (8)$$

3.3. Застосування багатофакторної моделі довгострокового прогнозування попиту на електроенергію на прикладі металургійної промисловості

Споживання електроенергії металургійною промисловістю України

Як вихідні дані для аналізу впливу температури навколишнього повітря на споживання електроенергії металургійною промисловістю України була використана інформація Національної

енергетичної компанії «Укренерго» (далі – НЕК «Укренерго») щодо структури споживання електроенергії по Україні за групами споживачів²¹.

Металургійна промисловість є одним з великих споживачів електроенергії в Україні. В період 2014 – 2020 рр. частка металургійної промисловості у загальному споживанні електроенергії (нетто) в Україні складала від 23,01% до 25,19%, а у споживанні електроенергії промисловим сектором від 55,03% до 57,75% (табл. 3).

В табл. 3 наведено обсяги споживання електроенергії металургійною промисловістю України по місяцях року за місяцями за період 2014 – 2020 рр. В табл. 4–5 наведено обсяги виробництва продукції металургійною промисловістю України по місяцях року за період 2014 – 2020 рр.

Таблиця 3

Споживання електроенергії металургійною промисловістю України (фактичне) за період 2014 – 2020 рр.

Рік	Споживання, млн кВт·год ²²	Частка у споживанні електричної енергії	
		у загальному, %	у промисловості, %
2014*	33933,244	25,19	55,69
2015	28877,398	24,31	57,37
2016	28872,334	24,41	57,75
2017	29054,094	24,43	57,02
2018	29558,750	24,21	56,82
2019	28694,183	23,87	56,09
2020	27134,900	23,01	55,03

* 2014 р. – з урахуванням тимчасово окупованих територій АР Крим, Донецької та Луганської областей. За інші роки – без урахування

Температура зовнішнього повітря

Металургійне виробництво зосереджено переважно в областях, розташованих на східній та південно-східній частині України: Донецька (м. Маріуполь), Запорізька (м. Запоріжжя та м. Нікополь)

²¹ Структура споживання електроенергії по Україні за групами споживачів Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО». Передача і диспетчерізація. Диспетчерська інформація. Електроспоживання. URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya/>

²² Структура споживання електроенергії по Україні за групами споживачів Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО». Передача і диспетчерізація. Диспетчерська інформація. Електроспоживання. URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya/>

та Дніпропетровська (м. Дніпро, м. Кривий Ріг та м. Кам'янське – в минулому Дніпродзержинськ), в яких розташовані підприємства з виробництва чавуну, сталі та феросплавних матеріалів. Як вихідні дані для аналізу впливу температури навколишнього повітря на споживання електроенергії металургійною промисловістю України використана інформація щодо середньомісячної температури по місяцях року за 2014 – 2020 рр. в основних містах України з металургійним виробництвом – містах Маріуполь, Запоріжжя, Дніпро та Кривий Ріг, яка наведена на веб-сайтах Фотовольтичної географічної інформаційної системи Європейської Комісії²³ та RP5.UA «Статистика погоди»²⁴. Середньомісячна температура у основних містах України з металургійним виробництвом по місяцях року за період 2014 – 2019 рр. наведена в табл. 6. З огляду на рівномірний розподіл обсягів металургійного виробництва по зазначеним містам та областям України для подальших розрахунків щодо визначення впливу температури навколишнього повітря на споживання електроенергії металургійною промисловістю були обраховані середні значення середньомісячної температури у основних містах України з металургійним виробництвом по місяцях року за період 2014 – 2020 рр. (табл. 7).

Результати розрахунків

В табл. 7 наведено щомісячні частки споживання електроенергії металургійною промисловістю України від річного обсягу за місяцями за період 2014 – 2020 рр. та щомісячні частки виробництва сталі металургійною промисловістю України від річного обсягу за місяцями за період 2014 – 2020 рр.

У зв'язку з неоднаковістю кількості діб у місяцях року обраховано середньодобове споживання електричної енергії металургійною промисловістю України по місяцям року за період 2014 – 2020 рр. (табл. 7) та показано рівномірний розподіл даного споживання по місяцям року: від 70,79 млн кВт·год до 83,4 млн кВт·год з середнім значенням 78,574 млн кВт·год (без врахування 2014 р.).

²³ European Commission. EU Science Hub. Photovoltaic geographical information system (Фотовольтическая географическая информационная система Европейской Комиссии). URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#pvp

²⁴ Україна. Статистика погоди. Архив. p5.ua URL:<https://rp5.ua/>

Таблиця 4
Споживання (фактичне) електричної енергії металургійною промисловістю України по місяцях року²⁵ та частки споживання електроенергії від річного обсягу за місяцями за 2014 – 2020 рр. (млн кВт-год/місяць)

Рік/місяць	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень	річне
2014*	3000,951	2787,098	3017,525	2928,017	3017,275	2858,098	2848,043	2611,442	2494,768	2775,519	2807,322	2787,186	33933,244
%	0,088	0,082	0,089	0,086	0,089	0,084	0,084	0,077	0,074	0,082	0,083	0,082	1,000
2015	2702,424	2418,133	2537,429	2494,310	2348,917	2355,281	2353,954	2308,495	2451,227	2341,377	2278,956	2286,895	28877,398
%	0,094	0,084	0,088	0,086	0,081	0,082	0,082	0,080	0,085	0,081	0,079	0,079	1,000
2016	2339,440	2246,067	2406,443	2398,470	2466,007	2322,572	2448,104	2369,283	2335,515	2520,577	2454,603	2565,253	28872,334
%	0,081	0,078	0,083	0,083	0,085	0,080	0,085	0,082	0,081	0,087	0,085	0,089	1,000
2017	2536,434	2264,005	2413,454	2280,178	2381,619	2307,310	2364,454	2454,980	2428,057	2512,963	2515,351	2595,389	29054,094
%	0,087	0,078	0,083	0,078	0,082	0,079	0,081	0,084	0,084	0,086	0,087	0,089	1,000
2018	2622,299	2339,226	2589,616	2424,328	2443,082	2397,526	2490,143	2445,000	2365,964	2450,488	2434,888	2556,190	29558,750
%	0,089	0,079	0,088	0,082	0,083	0,081	0,084	0,083	0,080	0,083	0,082	0,086	1,000
2019	2586,600	2381,550	2537,380	2449,750	2459,240	2372,390	2451,870	2478,380	2319,980	2343,700	2136,230	2234,120	28694,183
%	0,090	0,081	0,088	0,085	0,086	0,083	0,085	0,086	0,081	0,082	0,074	0,078	1,000
2020	2311,840	2193,180	2315,950	2195,100	2312,100	2299,500	2343,100	2272,200	2123,700	2221,600	2203,400	2342,900	27134,900
%	0,085	0,081	0,085	0,081	0,085	0,085	0,086	0,084	0,078	0,082	0,081	0,086	1,000

* 2014 р. з урахуванням тимчасово окупованих територій АР Крим, Донецької та Луганської областей. За інші роки – без урахування

²⁵ Структура споживання електроенергії по Україні за групами споживачів Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРО». Передача і диспетчеризація. Делегаторська інформація. Електропостачання. URL: <https://ua.energy.net/ua/en/energy-retail-and-dispatcher/ua/ua/dyspetcherizatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya>

Таблиця 5

Виробництво сталі металургійною промисловістю України та частки виробництва сталі

від річного обсягу по місяцях за період 2014 – 2020 рр. (тис. т /міс)^{26,27,28,29}

Рік/місяць	січень	лютий*	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
2014	2300	2217	2546	2314	2707	2510	2540	2006	1990	2048	1972	1903
%	0,079	0,076	0,102	0,080	0,093	0,086	0,087	0,069	0,068	0,070	0,068	0,065
2015	1879	1632	1729	1935	2137	1979	1924	1723	2004	2094	1951	2012
%	0,075	0,065	0,069	0,077	0,085	0,079	0,077	0,069	0,080	0,084	0,078	0,080
2017	н/д	н/д	1785	1613	1674	1582	1649	1906	1930	1917	1867	1876
%	-	-	0,077	0,091	0,094	0,089	0,093	0,107	0,108	0,108	0,105	0,105
2018	1945	1608	1710	1720	1695	1710	1820	1790	1790	1790	1660	1890
%	0,084	0,069	0,075	0,074	0,073	0,074	0,079	0,077	0,077	0,077	0,072	0,082
2019	1850	1690	1970	1940	1827	1660	1784	1938	1750	1560	1325	1560
%	0,081	0,074	0,087	0,085	0,080	0,073	0,078	0,085	0,077	0,068	0,058	0,068
2020	1843	1696	1789	1339	1638	1799	1751	1813	1651	1661	1730	1910
%	0,081	0,075	0,079	0,059	0,072	0,079	0,077	0,080	0,073	0,073	0,076	0,084

* у 2016 та 2020 рр. лютий має 29 днів

²⁶ Виробництво основних видів промислової продукції по місяцях 2014 року. Державна служба статистики України. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2013/pr/opr/opr_d/opr2014.html

²⁷ Виробництво основних видів промислової продукції по місяцях 2015 року. Державна служба статистики України. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2013/pr/opr/opr_d/opr2015.html

²⁸ Інформація щодо виробництва сталі в Україні по місяцям 2017 – 2018 рр. надана Гулєнком А. А., аналітиком ООО «ГМК Центр», e-mail: a.glushchenko@gmk.center.

²⁹ Прогноз виробництва сталі в Україні в 2021 г. Сайт ООО «ГМК Центр». URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2021/02/Prognoz-steel_2021-02.pdf.

Середньомісячна температура у основних містах України з метеолурґійним виробництвом по місяцях року за період 2014 – 2020 рр.^{30,31}

Рік/місто	Місяць року											
	січень	лютий*	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
2014	-4,0	-0,5	6,1	10,6	18,7	19,7	23,7	23,3	16,6	6,8	1,5	-2,1
Дніпро												
Кривий Ріг	-2,4	0,1	7,1	11,5	18,3	20,4	24,6	23,9	17,6	8,0	2,6	-0,9
Запоріжжя	-2,5	0,3	6,6	11,3	18,7	20,4	24,6	23,9	17,3	7,8	2,2	-1,3
Маріуполь	-0,4	2,7	5,4	10,4	18,7	22,0	25,4	25,5	18,8	10,2	4,1	2,0
Середні	-2,3	0,7	6,3	11,0	18,6	20,6	24,6	24,2	17,6	8,2	2,6	-0,6
2015												
Дніпро	-1,3	-0,8	4,6	9,1	16,5	21,0	22,6	23,1	19,7	7,0	5,6	0,7
Кривий Ріг	-0,4	0,1	5,2	9,5	17,4	21,1	23,6	23,8	20,4	8,3	6,7	1,3
Запоріжжя	-0,8	0,1	5,3	9,5	17,2	21,4	23,3	23,8	20,6	7,8	6,5	1,2
Маріуполь	0,3	0,7	4,8	9,3	16,9	22,9	24,9	25,1	22,0	10,6	8,0	3,3
Середні	-0,6	0,0	5,0	9,4	17,0	21,6	23,6	24,1	20,7	8,4	6,7	1,6
2016												
Дніпро	-4,8	1,9	5,2	12,2	15,6	21,2	23,5	24,1	16,0	6,3	2,2	-2,4
Кривий Ріг	-4,1	3,0	6,0	12,8	16,1	21,7	24,1	24,8	17,2	7,3	3,2	-1,8
Запоріжжя	-3,7	2,6	6,1	12,8	16,1	21,9	24,5	25,3	16,8	7,2	3,2	-2,0
Маріуполь	-0,9	3,8	6,1	11,7	17,0	23,0	25,8	26,6	18,9	10,0	5,0	-0,8
Середні	-3,4	2,8	5,9	12,4	16,2	22,0	24,5	25,2	17,2	7,7	3,4	-1,8
2017												
Дніпро	-5,5	-3,3	5,7	8,9	15,6	20,8	21,5	24,4	18,3	8,8	3,2	3,7
Кривий Ріг	-6	-2,9	5,8	9,2	15,5	21	21,6	24,3	18,3	9,4	3,8	4,2
Запоріжжя	-4,5	-2,7	6,2	9,5	16,4	21,8	22,8	25,8	19,2	9,6	3,9	4,8
Маріуполь	-2,8	-2,2	5,8	9,1	15,6	21	23,3	25,5	19,6	10,4	4,3	3,5
Середні	-4,7	-2,8	5,9	9,2	15,8	21,2	23,3	25,0	18,9	9,6	3,8	4,1
2018												
Дніпро	-2,9	-2,6	-1,4	12,9	19	21,7	22,5	23,4	17,7	11,5	0,6	-1,8
Кривий Ріг	-2,4	-2	-1,3	13,4	18,8	21,7	22,3	24,5	18,1	12,1	0,8	-1,7
Запоріжжя	-2,1	-1,3	-0,2	13,7	20,1	23,8	24,6	25,8	18,9	12,8	1,5	-0,6

³⁰ European Commission. EU Science Hub. Photovoltaic geographical information system (Фотовольтическая географическая информационная система Европейской Комиссии). URL: https://ne.jrc.ec.europa.eu/png_tools/en/tools.html#rpr

³¹ Україна. Статистика погоди. Архів. р5.ца URL: <https://р5.ца/>

Рік/місто	Місяць року											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Маріуполь	-1,5	-1,4	0,7	11,9	19	22,8	25,3	25,1	19	13,2	1,9	-0,4
Середні	-2,2	-1,8	-0,6	13,0	19,2	22,5	23,9	24,7	18,4	12,4	1,2	-1,1
2019												
Дніпро	-3,6	0	4,4	11,2	18	24	21,5	21,3	16,3	10,7	4,5	2,3
Кривий Ріг	-4	0,2	4,7	10,7	17,8	23,2	21,3	21,8	17	10,6	5,5	2,9
Запоріжжя	-2	0,8	5,1	11,7	19	25,2	22,9	22,4	17,6	10,5	5,7	3,1
Маріуполь	-1,2	0,1	4,4	10,9	18,7	25,1	22,8	23,3	17,4	12	5,1	2,4
Середні	-2,7	0,3	4,7	11,1	18,4	24,4	22,1	22,2	17,1	11,0	5,2	2,7
2020												
Дніпро	-0,2	0,7	6,9	9	13,8	21,7	23,5	22,1	19,3	13,2	3,1	-1,5
Кривий Ріг	0,1	1,5	7,1	9,2	13,8	21,8	23,5	22,7	19,6	13,8	3,8	-0,3
Запоріжжя	0,4	1,5	8	11,3	16	23,6	24,5	23,2	20,7	14,2	4,0	-0,8
Маріуполь	1,3	1	6,7	8,7	14,8	22,7	24,8	23,3	20,2	14,9	4,6	-1,1
Середні	0,4	1,2	7,2	9,6	14,6	22,5	24,1	22,8	20,0	14,0	3,9	-0,9

* у 2016 та 2020 рр. лютий має 29 днів

Таблиця 7

**Середньодобове споживання електричної енергії металургійною промисловістю України
за 2014 – 2020 рр. (млн кВт·год/добу)**

Рік/місяць днів	січень	лютий*	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
2014	96,805	99,539	97,340	97,601	97,331	95,270	91,872	84,240	83,159	89,533	93,577	89,909
2015	87,175	86,362	81,853	83,144	75,772	78,509	75,934	74,468	81,708	75,528	75,965	73,771
2016	75,466	77,451	77,627	79,949	79,549	77,419	78,971	76,428	77,851	81,309	81,820	82,750
2017	81,820	80,857	77,853	76,006	76,826	76,910	76,269	79,193	80,935	81,063	83,845	83,722
2018	84,590	83,544	83,536	80,811	78,809	79,918	80,327	78,871	78,865	79,048	81,163	82,458
2019	83,439	83,270	81,851	81,425	79,330	79,080	79,093	79,948	77,333	75,603	71,208	72,068
2020	74,575	75,627	74,708	73,170	74,584	76,650	75,584	73,297	70,790	71,665	73,447	75,577

* у 2016 та 2020 рр. лютий має 29 днів

На рис. 4 представлено залежність помісячного споживання електроенергії E_m від помісячного виробництва сталі N_m металургійною промисловістю України за період 2017 – 2020 рр., яка має лінійний характер та демонструє переважний вплив обсягу виробництва сталі на споживання електроенергії (коефіцієнт кореляції $R^2 = 0,6$ або $R=0,77$).

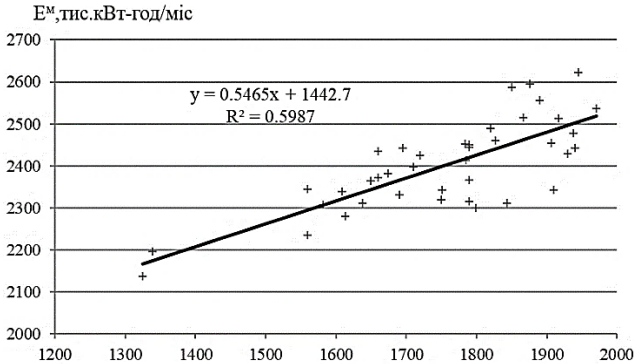


Рис. 4. Залежність помісячного споживання електроенергії від помісячного виробництва сталі (тис. т) металургійною промисловістю України за період 2017 – 2020 рр.

На рис. 5 представлено залежність електроємності металургійного виробництва e від середньомісячної температури повітря по місяцях за період 2017 – 2020 рр., яка має лінійний характер та демонструє несуттєвий вплив температури зовнішнього повітря на споживання електроенергії металургійною промисловістю (коефіцієнт кореляції $R^2 = 0,05$).

Таким чином, залежність для прогнозування оцінки помісячного споживання електроенергії металургійною промисловістю України має вигляд:

$$\begin{aligned}
 E_{np}^M &= N_{np}^M(\tau) \times e(t_{3n}) = \chi_{np}^M \times N_{np}^P(\tau) \times (\psi_{np}^M(\tau) \times e_0 + \alpha_t \times t_{3n}) = \\
 &= \chi_{np}^M \times N_{np}^P(\tau) \times (\psi_{np}^M(\tau) \times 1,3534 - 0,0024 \times t_{3n})
 \end{aligned} \quad (9)$$

де $N_{np}^P(\tau)$ – прогноз річного виробітку сталі в прогнозному році, млн т/рік;

χ_{np}^M – коефіцієнт розподілу виробництва сталі по місяцях року.

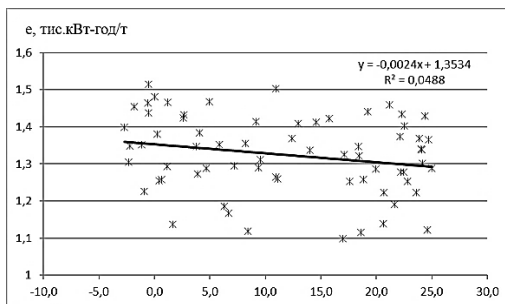


Рис. 5. Залежність електроємності металургійного виробництва від середньомісячної температури зовнішнього повітря по місяцях за період 2017 – 2020 рр.

4. Прогноз споживання електроенергії в Україні по місяцях року на період 2025-2040 рр.

4.1. Передумови та результати прогнозування помісячного споживання електроенергії в Україні у 2025-2040 рр.

Прогноз споживання електроенергії в Україні по місяцях року за період 2025-2040 рр. розроблений за ретроспективними показниками за напрямками споживання електроенергії згідно даних НЕК «Укренерго»^{32,33,34,35} (табл. 8-9). Напрями споживання за даними Укренерго відрізняються від даних, що надаються за КВЕД 2010³⁶. Спочатку був розроблений прогноз споживання електроенергії (нетто) на рівні країни на 2025-2040 роки, далі були зроблені наступні припущення: зростання середньорічної температури до 2030р. в Україні очікується на рівні 1,5°C (зараз – 1,2°C), до 2040 р. цей показник ще збільшиться³⁷. Відповідно, зроблено висновок, що

³² Структура споживання електроенергії по Україні за групами споживачів Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО». Передача і диспетчеризація. Диспетчерська інформація. Електроспоживання. URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya/>

³³ Архів випусків видання ГО «Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України» «Енергоінформ-Інформенерго» за 2018 рік №541-561, за 2019 рік №562-576, за 2020 рік №577-591, за 20 21 рік №592-605. URL: <https://www.ntseu.net.ua/news/review-ntseu>

³⁴ ГО «Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України» «ЕНЕРГОІНФОРМ-ИНФОРМЭНЕРГО» № 577 Інформаційно-аналітичне дослідження стану паливно-енергетичного комплексу України «Про основні показники роботи паливно-енергетичного комплексу України за 2019 рік» URL: <https://www.ntseu.net.ua/docs/review577-202001.pdf>

³⁵ Видання НТСЕУ «Енергоінформ-Інформенерго» № 579 «Про основні показники роботи ПЕК України за січень-лютий 2020 року». URL: <https://www.ntseu.net.ua/docs/review579-202003.pdf>

³⁶ Дані Державної служби статистики України. URL: <https://ukrstat.gov.ua/>

³⁷ Середня місячна температура повітря у м. Києві. Центральна геофізична обсерваторія ім. Б. Срезневського. URL: http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/index.php?fn=k_klimat&f=kyiv

підвищиться загальне споживання електроенергії на охолодження, кондиціонування та вентиляцію як в житлових приміщеннях, так і промислових та інших підприємствах, тобто відбудеться вирівнювання річного графіку помісячного споживання електроенергії. Для дослідження рівнів споживання електроенергії (брутто) в Україні по місяцях року за період 2017 – 2040 рр. були використані попередні розрахунки на рівні країни з деталізацією по місяцях року та припущеннями, що обсяг втрат в електромережах при транспортуванні та інших витратах розподілятиметься пропорційно до обсягів передачі електроенергії.

Для розрахунку прогнозу споживання електроенергії в Україні по місяцях року за період 2025-2040 рр. у промисловості (табл. 10) використані описані підходи та виокремлено із прогнозу споживання по роках на перспективу до 2040 р. по статистичному сектору «Промисловість» секцію «Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря», оскільки в даних Укренерго по напрямках споживання вона включена до інших складових. Все інше споживання за своїми обсягами в промисловості та напрямками споживання віднесено до переробної промисловості (табл. 11).

4.2. Оцінка точності моделі прогнозування

З використанням розробленої у Інституті загальної енергетики НАН України математичної моделі (комбінація нормативного методу на рівні країни з методом регресійного аналізу на рівні секторів економіки) виконано прогноз споживання електроенергії на 2017 р. відносно базового 2015 р, по укрупнених секціях за КВЕД (табл. 15). Фактичні дані електроспоживання за 2015 р. та 2017 р. наведено в джерелі³⁸, ВВП та ВДВ за відповідні роки – в джерелі³⁹. Технологічний потенціал енергозбереження оцінено в 1% за рік. Результати прогнозування було порівняно з фактичним даними 2017 р. Похибка прогнозування на рівні країни склала 0,38%, разом по ВЕД – 1,69%, проте на рівні укрупнених секцій за КВЕД коливається від 0,4% до 19%. Найменшою похибка є для переробної промисловості (0,4%), найбільшою – для сільськогосподарських споживачів (19%), що говорить про необхідність врахування інших чинників при прогнозуванні.

В табл. 12–14 представлена прогнозна структура споживання електроенергії до 2040 р. в помісячному вимірі для країни (брутто та нетто) та промисловості в цілому.

³⁸ Структура споживання електроенергії по Україні за групами споживачів Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО». Передача і диспетчерізація. Диспетчерська інформація. Електроспоживання. URL: <https://ua.energy/peredacha-i-dyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya/>

³⁹ Архів випусків видання ГО «Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України» «Енергоінформ-Інформенерго» за 2018 рік №541-561, за 2019 рік №562-576, за 2020 рік № 577-591, за 2021 рік №592-605. URL: <https://www.ntseu.net.ua/news/review-ntseu>

Таблиця 8
Прогноз споживання електроенергії (брутто) в Україні по місяцях року за період 2025 – 2040 рр.,
 млн кВт·год/місяць

Рік/місяць	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040
	Ретроспектива				Прогноз			
січень	14921	14668	15204	13970	15061,8	15544,02	17209,1	17326,9
лютий	13425	13586	13247	13029	14110,5	14708,32	16086,7	16184,4
березень	12793	14700	13559	12644	14110,5	14541,18	15899,8	15994,0
квітень	11590	10402	11922	11167	12366,5	13371,2	14964,4	15232,4
травень	11061	12208	7754,4	14567	12049,4	12869,8	14403,2	14661,2
червень	10862	11192	15097	7154,5	11890,9	12702,6	14216,2	14470,8
липень	11361	11728	11386	11401	12207,97	13036,9	14777,4	15232,4
серпень	11830	11789	11500	11333	12366,51	13204,1	14964,4	15422,8
вересень	11070	11163	11118	10863	12525,1	13204,1	15151,5	15613,2
жовтень	12814	14998	12363	11790	13634,9	14374,0	16086,7	16374,8
листопад	13642	13920	13073	13386	13793,4	14541,2	16647,9	16946,1
грудень	14358	15384	14014	15043	14427,6	15042,6	16647,9	16946,1
Разом	149725,9	155738	150237,4	146347,5	158545	167140	187055	190405

Таблиця 9

Прогноз споживання електроенергії (нетто) по місяцях року за період 2025 – 2040 рр., млн кВт год./місяць.

Рік/місяць	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040
	Ретроспектива				Прогноз			
січень	11440	11508	11745	11025	12551,5	14260,6	15934,3	16873,8
лютий	10780	10879	10608	10265	11758,5	13493,9	14895,1	15761,2
березень	10180	11193	10791	10675	11758,5	13340,5	14721,9	15575,8
квітень	9318,0	9595,7	9791,3	8804,5	10305,4	12267,1	13855,9	14834,1
травень	9011,0	9155,2	6782,7	11518	10041,2	11807,1	13336,3	14277,8
червень	8840,3	9153,2	11867	6325,8	9909,1	11653,8	13163,1	14092,4
липень	9084,9	9477,9	9313,3	9244,3	10173,3	11960,5	13682,7	14834,1
серпень	9532,5	9581,8	9390	9441,5	10305,4	12113,8	13855,9	15019,5
вересень	9001,1	9155,8	9094,1	8939,4	10437,5	12113,8	14029,1	15204,9
жовтень	9946,5	12298	9724,2	9641,5	11362,4	13187,2	14895,1	15946,6
листопад	10660	10727	10233	9983,9	11494,5	13340,5	15414,7	16502,9
грудень	11133	9799,7	10900	11435	12023,0	13800,5	15414,7	16502,9
Разом	118927	122524	120240	117299	132121	153339	173199	185426

Таблиця 10

Прогноз споживання електроенергії в Україні в промисловості по місяцях року за період 2025 – 2040 рр., млн кВт год./місяць.

Рік/місяць	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040
	Ретроспектива				Прогноз			
січень	4361,1	4619,5	4480,8	4187	4779,45	5562,8	6168,9	6738,8
лютий	4171,1	4239,8	4194	4035,1	4723,875	5498,1	6168,9	6659,5
березень	4269,4	4606,5	4517,5	4207,1	4668,3	5433,5	6096,3	6580,2
квітень	3986,6	4194,1	4252,3	3858,3	4446	5239,4	5878,6	6421,7
травень	4031,8	4162,6	2759,8	5357,4	4390,4	5174,7	5806	6342,4
червень	4001,1	4128,5	5555,9	2600,4	4390,4	5174,7	5806	6421,7
липень	4146,4	4307,7	4239,7	4105,3	4446	5174,7	5878,6	6421,7
серпень	4272,2	4257,4	4311,9	4167,4	4446	5239,4	5878,6	6421,7
вересень	4176,2	4139,2	4169,9	3975,5	4557,2	5304,1	5951,2	6501,0
жовтень	4415,5	5564	4289,4	4120,4	4779,5	5498,1	6168,9	6738,8
листопад	4519,8	4427,2	4143,1	4154,3	4890,6	5627,5	6314,0	6976,6
грудень	4600,8	4616	4240,2	4355,6	5057,3	5756,9	6459,2	7055,9
Разом	50952	53262,5	51154,5	49123,8	55575	64684	72575	79280

Прогноз споживання електроенергії в Україні у переробній промисловості по місяцях року за період 2025 – 2040рр., млн кВт год/місяць

Ріс/місяць	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040
	Ретроспектива				Прогноз			
січень	4024,4	4298,5	4160,2	3893,3	4110,1	4656,0	5006,0	5427,0
лютий	3853,9	3918,5	3906,5	3763,9	3918,9	4439,5	4888,2	5362,4
березень	3949,8	4295,4	4215,8	3922,1	4110,1	4601,9	5006,0	5427,0
квітень	3690,8	3909,8	3976,9	3608,9	3918,9	4385,3	4770,4	5298,0
травень	3737,6	3888,7	2590,7	4997	3918,9	4385,3	4770,4	5233,2
червень	3723,8	3859,1	5183,7	2467,4	3918,9	4385,3	4770,4	5233,2
липень	3861,7	4032,1	3968,3	3849,2	3918,9	4439,5	4829,3	5297,8
серпень	3991,8	3966,5	4043	3895,5	3918,9	4439,5	4829,3	5297,8
вересень	3899,9	3862,9	3904,4	3717,3	3918,9	4493,6	4888,2	5362,4
жовтень	4113,7	5326,9	3997,9	3845,5	3966,7	4547,8	4947,1	5427,0
листопад	4209,8	4126,7	3858,1	3879,9	4014,5	4601,9	5006,0	5536,2
грудень	4278,3	4292,6	3945,6	4065,3	4157,904	4764,3	5182,7	5685,4
Разом	47335,5	49777,7	47751,1	45905,3	47792	54140	58894	64607

Таблиця 12

Прогнозна структура споживання електроенергії, всього (брутто), %									
Рік/місяць	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040	
січень	9,97	9,42	10,12	9,55	9,5	9,3	9,2	9,1	
лютий	9,0	8,72	8,82	8,90	8,9	8,8	8,6	8,5	
березень	8,54	9,44	9,03	8,64	8,9	8,7	8,5	8,4	
квітень	7,74	6,68	7,94	7,63	7,8	8	8	8	
травень	7,39	7,84	5,16	9,95	7,6	7,7	7,7	7,7	
червень	7,25	7,19	10,05	4,89	7,5	7,6	7,6	7,6	
липень	7,59	7,53	7,58	7,79	7,7	7,8	7,9	8	
серпень	7,90	7,57	7,65	7,74	7,8	7,9	8	8,1	
вересень	7,39	7,17	7,40	7,42	7,9	7,9	8,1	8,2	
жовтень	8,56	9,63	8,23	8,06	8,6	8,6	8,6	8,6	
листопад	9,11	8,94	8,70	9,15	8,7	8,7	8,9	8,9	
грудень	9,59	9,88	9,33	10,28	9,1	9	8,9	8,9	
рік	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Таблиця 13

Прогнозна структура споживання електроенергії, всього (нетто), %									
Рік/місяць	2017	2018	2019	2020	2025	2030	2035	2040	
січень	9,62	9,39	9,77	9,40	9,5	9,3	9,2	9,1	
лютий	9,1	8,88	8,82	8,75	8,9	8,8	8,6	8,5	
березень	8,56	9,14	8,97	9,10	8,9	8,7	8,5	8,4	
квітень	7,84	7,83	8,14	7,51	7,8	8	8	8	
травень	7,58	7,47	5,64	9,82	7,6	7,7	7,7	7,7	
червень	7,43	7,47	9,87	5,39	7,5	7,6	7,6	7,6	
липень	7,64	7,74	7,75	7,88	7,7	7,8	7,9	8	
серпень	8,02	7,82	7,81	8,05	7,8	7,9	8	8,1	
вересень	7,57	7,47	7,56	7,62	7,9	7,9	8,1	8,2	
жовтень	8,36	10,04	8,09	8,22	8,6	8,6	8,6	8,6	
листопад	8,96	8,75	8,51	8,51	8,7	8,7	8,9	8,9	
грудень	9,36	8,00	9,07	9,75	9,1	9	8,9	8,9	
рік	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

**Співставлення прогнозів електроенергії та фактичних даних
за 2017 р., млн кВт·год**

Групи споживачів	2015 (факт)	2017 (факт)	2017 (прогноз)	Похибка прогнозування	
				млн кВт·год	%
Споживання електричної енергії споживачами (Нетто)	118726,91	118927,1	119373,2	446,1	0,38
1. Промисловість, у тому числі	50200,29	50952,0	52976,5	2024,5	3,97
Переробна	45915,67	47335,54	47522,9	187,3	0,40
2. Сільгоспспоживачі	3342,27	3642,1	2954,4	-687,7	-18,88
3. Транспорт	6806,96	7044,0	6791,1	-252,9	-3,59
4. Ком.-побутові споживачі	15194,92	15016,3	15636,1	619,8	4,13
5. Інші споживачі	6702,51	7252,79	6967,1	-285,7	-3,94
Разом за видами економічної діяльності	82246,94	83907,19	85325,2	1418,0	1,69

ВИСНОВКИ

За результатами власного дослідження та практичного тестування математичної моделі прогнозування споживання електроенергії по місяцях року було створено комбінації нормативного методу і методу статистичного аналізу для рівня країни та нормативного методу і регресійного аналізу для промислового сектору економіки, які в поетапному моделюванні (по 5-ти річних часових інтервалах на довгострокову перспективу та за місяцями в прогнозному році) дозволяють спрогнозувати різні сценарії попиту на електроенергію в залежності від обсягів ВДВ для країни та випуску продукції для промисловості з урахуванням впливу середньомісячної температури зовнішнього повітря на обсяги споживання електроенергії. Розроблені математичні моделі прогнозування помісячного електроспоживання для країни та сектору промисловості перевірені на ретроспективних даних при прогнозуванні показників електроспоживання на 2017 р. відносно базового 2015 р. Порівняння обчислених прогнозних показників 2017 р. із фактичними даними за 2017 р. показало, що отримані результати прогнозування мають прийнятну похибку (0,38-18,88%) і можуть бути використані для прогнозування структури електрогенерувальних потужностей (зокрема сонячних електростанцій), що надійно покриватиме річний графік електричних навантажень за місяцями року. Прогнозна структура електрогенерувальних потужностей обчислюється за

іншою моделлю, але з використанням розробленого нами прогнозу електроспоживання.

АНОТАЦІЯ

Представлено вирішення задачі адаптації моделі прогнозування споживання електроенергії по роках для прогнозування попиту на електроенергію по місяцях року. Вирішення задачі помісячного прогнозування було досягнуто шляхом комбінації двох методів. На першому етапі – удосконаленого нормативного методу на рівні країни та секторів економіки, що враховує прогноз валової доданої вартості, обсяги структурного і технологічного енергозбереження та обсяги заміщення електроенергії іншими видами енергоресурсів. На другому етапі – методу статистичного аналізу (на рівні країни) та регресійного аналізу (на рівні промислового сектору) для розподілу річного прогнозного електроспоживання за місяцями року. На цей розподіл в більшій ступені впливають обсяги виробництва за місяцями року та в меншій – середньомісячна температура зовнішнього повітря. Отримані прогнозні результати порівняно з фактичними даними на ретроспективному періоді. Результати прогнозування мають достатньо високу достовірність в діапазоні 0,4-19%, що для довгострокового прогнозування є хорошим результатом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кулик М.М., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Куц Г.О. Енергоефективність та прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки: методологія, прогнозні оцінки до 2040 року. Київ, «Наукова думка», 2021. 234 с. ISBN 978-966-00-1739-9.

2. V V Horskyi, O Ye Maliarenko, N Yu Maistrenko, O I Teslenko, H O Kuts Modified three-stage model for forecasting the demand for energy resources at various hierarchy levels of the economy. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 1049, 3rd International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters 24/05/2022 – 27/05/2022 Kryvyi Rih, Ukraine. Citation V V Horskyi et al 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1049 012054 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1049/1/012054>

3. Бэнн Д. В., Фармер Е. Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1987. 200 с.

4. Tianhe Sun, Tiejian Zhang, Yun Teng, Zhe Chen, and Jiakun Fang Monthly Electricity Consumption Forecasting Method Based on X12 and STL Decomposition Model in an Integrated Energy System. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2019/9012543/>

5. Черненко П.О., Мартинюк О.В. Підвищення точності коригування місячного споживання електроенергії энергооб'єднання в задачі середньострокового прогнозування. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2014. №1. С.77–81. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/983>

6. Структура споживання електроенергії по Україні за групами споживачів Національна енергетична компанія «УКРЕНЕРГО». Передача і диспетчеризація. Диспетчерська інформація. Електроспоживання. URL: <https://ua.energy/peredacha-idyspetcheryzatsiya/dyspetcherska-informatsiya/elektrospozhyvannya/>

7. Афітов Е.А. Планування на підприємстві. Москва: НДЦ ИНФРА-М. 2015. 344 с.

8. Саричев О.П. Моделирование сложных систем в условиях структурной неопределённости: регрессионные и авторегрессионные модели. Saarbrücken, Deutschland: LAP Lambert Academic Publishing RU. 2016. 284 с.

9. Згуровський М.З., Новиков А.Н. Системний аналіз стохастически розподілених процесів: Моделювання, оцінка станів, ідентифікація. К.: УМКВО. 1988. 204 с.

10. Овдієнко О.В. Світовий досвід контролю ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів при їх споживанні. Енергетика та електрофікація. 2008. №10. С. 37 – 40.

11. Розроблення сценаріїв зміни кліматичних умов в Україні на середньо– та довгострокову перспективу з використанням даних глобальних та регіональних моделей. Звіт про науково-дослідну роботу. Український гідрометеорологічний інститут НАН України. Київ. 2013. 135 с. URL: <https://uhmi.org.ua/project/rvndr/climate.pdf>

12. Середня місячна температура повітря у м. Києві. Центральна геофізична обсерваторія ім. Б. Срезневського. URL: http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/index.php?fn=k_klimat&f=kyiv

13. European Commission. EU Science Hub. Photovoltaic geographical information system (Фотовольтическая географическая информационная система Европейской Комиссии). URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#pvp

14. Украина. Статистика погоды. Архив. р5.ua URL: <https://rp5.ua/>

15. Виробництво основних видів промислової продукції по місяцях 2014 року. Державна служба статистики України. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2013/pr/ovp/ovp_u/ovp2014.html

16. Виробництво основних видів промислової продукції по місяцях 2015 року. Державна служба статистики України. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2013/pr/ovp/ovp_u/ovp2015.html

17. Інформація щодо виробництва сталі в Україні по місяцям 2017 – 2018 рр. надана Глушченком А. А., аналітиком ООО «ГМК Центр», e-mail: a.glushchenko@gmk.center.

18. Прогноз производства стали в Украине в 2021 г. Сайт ООО «ГМК Центр». URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2021/02/Prognoz-steel_2021-02.pdf

19. Архів випусків видання ГО «Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України» «Енергоінформ-ИнформЭнерго» за 2018 рік № 541-561, за 2019 рік №562-576, за 2020 рік № 577-591, за 2021 рік № 592-605. URL: <https://www.ntseu.net.ua/news/review-ntseu>

20. ГО «Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України» «ЕНЕРГОІНФОРМ-ИНФОРМЭНЕРГО» № 577 Інформаційно-аналітичне дослідження стану паливно-енергетичного комплексу України «Про основні показники роботи паливно-енергетичного комплексу України за 2019 рік» URL: <https://www.ntseu.net.ua/docs/review577-202001.pdf>

21. Видання НТСЕУ «Енергоінформ-ИнформЭнерго» № 579 «Про основні показники роботи ПЕК України за січень-лютий 2020 року». URL: <https://www.ntseu.net.ua/docs/review579-202003.pdf>

22. Дані Державної служби статистики України. URL: <https://ukrstat.gov.ua/>

Information about the authors:

Maliarenko Olena Yevgeniivna,

Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow,
Head of the Department of the Energy Efficiency and Optimization
of Energy Consumption,
Institute of General Energy of the National Academy of Sciences
of Ukraine
172, Antonovycha st., Kyiv, 03150, Ukraine

Teslenko Oleksandr Ivanovich,

Candidate of Technical Sciences,
Leading Researcher at the Department of the Energy Efficiency and
Optimization of Energy Consumption,
Institute of General Energy of the National Academy of Sciences
of Ukraine
172, Antonovycha st., Kyiv, 03150, Ukraine

Maistrenko Natalia Yuriivna,

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher at the Department of the Energy Efficiency and
Optimization of Energy Consumption,
Institute of General Energy of the National Academy of Sciences
of Ukraine
172, Antonovycha st., Kyiv, 03150, Ukraine