

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ

Халмурадов Б.Д., Пронь О.В.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ

oleksandr.pron@npp.kai.edu.ua

У статті розглянуто актуальну проблему та особливості створення математичної моделі для раціонального вибору електрогенераторів з урахуванням екологічної складової, це особливо набуває важливого значення в умовах енергетичної кризи, яка спричинена в Україні. Війна в нашій державі призвела до знищення значної частини енергогенеруючої інфраструктури. Зростає потреба в автономних джерелах живлення та змушує населення та бізнес активно впроваджувати електрогенератори в побут, а це в свою чергу, супроводжується збільшенням обсягів шкідливих викидів в атмосферу. Автори у дослідженні акцентують увагу на необхідності насамперед поєднання економічної доцільності та екологічної безпеки при виборі генераторного обладнання.

Запропонована математична модель базується на багатокритеріальній оптимізації, що дозволяє одночасно мінімізувати вартість, викиди CO₂, NO_x, SO₂, CO, PM та VOC а також забезпечити необхідну потужність і дотримання бюджетних обмежень. Модель включає вхідні дані, цільові функції та обмеження, що відображають екологічні нормативи, бюджетні та технічні вимоги, які забезпечують раціональний вибір електрогенераторів під конкретне завдання.

В статті виділений характерний алгоритм побудови та впровадження математичної моделі, який складається з етапів збір даних, визначення обмежень, розв'язання оптимізаційної задачі та аналізу результатів. Практична реалізація дослідження дасть можливість значно знизити екологічне навантаження при збереженні економічної ефективності та підкреслює важливість інтеграції екологічних критеріїв у процес прийняття рішень щодо раціонального вибору електрогенераторів.

Запропонована в дослідженні математична модель має значне прикладне та методологічне значення її можна застосовувати в приватному секторі, в державному управлінні, в різних приватних підприємствах та ін. для прийняття екологічно відповідальних рішень. Отримані результати дослідження можуть слугувати основою для формування політики у сфері енергоефективності та охорони довкілля в умовах децентралізації енергопостачання. *Ключові слова:* сталий розвиток, екологічна безпека, викиди, технологічні прилади, математична модель, багатокритеріальна оптимізація, критична інфраструктура, стійкість, загроза, об'єкти.

Features of creating a mathematical model for the optimal selection of electric generators taking into account the environmental component. Khalmuradov B., Pron O.

The article considers the current problem and features of creating a mathematical model for the rational selection of electric generators taking into account the environmental component, which is especially important in the context of the energy crisis that has arisen in Ukraine. The war in our country has led to the destruction of a significant part of the energy-generating infrastructure. The need for autonomous power sources is growing and forces the population and business to actively introduce electric generators into everyday life, and this, in turn, is accompanied by an increase in the volume of harmful emissions into the atmosphere. The authors of the study emphasize the need, first of all, to combine economic feasibility and environmental safety when choosing generator equipment. The proposed mathematical model is based on multi-criteria optimization, which allows you to simultaneously minimize the cost, CO₂, NO_x, SO₂, CO, PM and VOC emissions, as well as ensure the necessary capacity and compliance with budget constraints. The model includes input data, objective functions and constraints that reflect environmental standards, budgetary and technical requirements that ensure a rational choice of power generators for a specific task.

The article highlights a characteristic algorithm for building and implementing a mathematical model, which consists of the stages of data collection, definition of constraints, solution of the optimization problem and analysis of results. The practical implementation of the study will make it possible to significantly reduce the environmental load while maintaining economic efficiency and emphasizes the importance of integrating environmental criteria into the decision-making process regarding the rational choice of power generators.

The mathematical model proposed in the study has significant applied and methodological significance; it can be used in the private sector, in public administration, in various private enterprises, etc. for making environmentally responsible decisions. The results of the study can serve as the basis for forming a policy in the field of energy efficiency and environmental protection in the context of decentralization of energy supply. *Key words:* sustainable development, environmental safety, emissions, technological devices, mathematical model, multi-criteria optimization, critical infrastructure, resilience, threat, objects.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день Україна знаходиться в скрутному становищі. Майже 70% усієї української генерації зруйновано, пошкоджено або перебуває під окупацією [1]. За даними джерела [2] найбільших втрат зазнали генеруючі потужності регіонів, наближених до зони бойових дій, а також великі генеруючі об'єкти які знаходяться на Прикарпатті та Поділлі (рис. 1). 25.11.2024 р.

Війна в нашій державі зумовлює населення та бізнес активно впроваджувати електрогенератори в побут. Бойові дії призводять до катастрофічних наслідків в усіх сферах життя нашої держави.

Дані джерела [3] вказують, що на початок 2024 року була випущено понад 400 ракет та безпілотників, які були спрямовані на електростанції та високовольтні мережі передачі. Кілька концен-

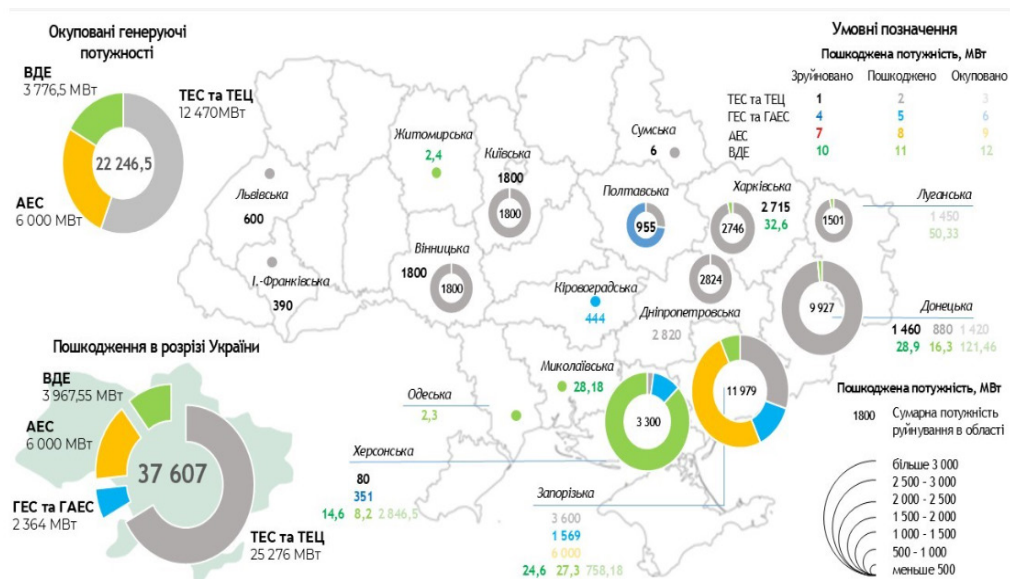


Рис. 1. Мапа витрат енергосистеми України станом на 25.11.2024 р. [2].

трованих хвиль атак вразили цивільну енергетичну інфраструктуру у березні, квітні та знову у серпні. В результаті наша держава зіткнулася з серйозним скороченням генеруючих потужностей: замість 18 ГВт (які необхідні для задоволення споживання в морозні зимові дні -10°C), було доступно в кращому випадку лише 12-13 ГВт. За температури -10°C в державі буде проноз відключення електроенергії до 10-12 годин на день, і цей прогноз навіть не враховує нові атаки, які створюють величезні додаткові ризики [3].

До вторгнення 2022 року українська енергосистема була з'єднана з білоруською та російською мережами [4]. В день вторгнення наша держава відключилася від даних мереж та провела планове випробовування роботи в «ізолюваному режимі». Разом з Молдовою запросили екстрену синхронізацію, яка була проведена в короткі терміни завдяки надзвичайним зусиллям залучених європейських операторів систем передачі (TSO) та Укренерго, координованих Європейською мережею операторів систем передачі електроенергії (ENTSO-E) за сильної підтримки Європейської Комісії. [4].

Відтоді інтеграція з європейською системою є пріоритетом. Торгівля розпочалася в червні 2022 року, при цьому ліміти торгівлі поступово збільшується. У червні 2024 року загальний імпорт України становив близько 2 ГВт протягом кількох годин щодня.

Незважаючи на це, літній дефіцит електроенергії призвів до щоденних відключень електроенергії, порушуючи життя та бізнес, а також посилюючи соціальні та гуманітарні ризики [4]. Протягом червня та липня, навіть з урахуванням імпорту електроенергії, розрив між пропозицією та попитом

коливався від 0,8 ГВт до 2,3 ГВт – останнє еквівалентно піковому попиту в Словенії. Це призвело до поступових відключень електроенергії по всій країні. Більшість громадян солідарно стикалися з цими щоденними відключеннями електроенергії, але обмежена доступність залежних від електроенергії об'єктів, таких як ліфти та водопостачання, ускладнювала повсякденне життя. Закінчення планового технічного обслуговування атомних електростанцій полегшило ситуацію в серпні, але це було до нещодавньої активізації атак [4].

Тобто всі ці причини призвели до того, що електрогенератори стали частиною повсякденного життя українців, допомагаючи пережити складні часи через відсутність електроенергії.

Звичайно використання генераторів може призвести до серйозних екологічних проблем, оскільки генератори викидають в атмосферу велику кількість шкідливих речовин [5]. Тому дуже важливим етапом є вибір раціонального електрогенератора, за допомогою математичного моделювання.

Актуальність дослідження. Не раціональний вибір електрогенератора призводить як до економічних так і екологічних втрат. Шкідливі викиди електрогенераторів можуть мати негативний вплив на навколишнє середовище та здоров'я населення. комплексного дослідження в Забезпечення екологічної безпеки роботи електрогенераторів на селітебній території є складним завданням, яке вимагає комплексного вирішення.

Актуальність даного дослідження спрямоване на розробку науково обґрунтованого підходу, який дозволить оптимізувати вибір електрогенератора з урахуванням економічної ефективності, потрібної

потужності та мінімізації негативного впливу на довкілля.

Результати дослідження сприятимуть впровадженню екологічно орієнтованих рішень у сфері вибору електрогенераторів, що матиме значний вплив на покращення стану повітря на селітебних територіях, зниження рівня шумового забруднення та підвищення загальної енергоефективності впроваджуваного електрогенератора.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками науковці присвячують свої роботи дослідженням з математичного моделювання в різних галузях економіки. Наукові дослідження з розробки математичних моделей та методів моделювання електроенергетики в ринкових умовах виконуються в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України [6] та в Інститут математики НАН України [7]. Дослідження присвячені математичному моделюванню електроенергетичних систем в умовах ринку висвітлені в роботі [8]

Значна увага приділяється також прогнозуванню попиту, оптимізації розвитку генеруючих потужностей та мереж, моделюванню теплових процесів та дослідженню Smart Grid систем [9-11].

Але питанням досліджень та особливостям створення математичної моделі для раціонального вибору генераторів з урахуванням екологічної складової, зокрема і методичних підходів, у публікаціях українських науковців не висвітлюються. Натомість багато українських та міжнародних теоретичних напрацювань свідчать про активне створення необхідної теоретичної основи для розроблення уніфікованих підходів для вирішення даної проблеми

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою статті є дослідження питань особливостей створення математичної моделі для раціонального вибору електрогенераторів з урахуванням екологічної складової,

Новизна. Запропонована математична модель базується на багатокритеріальній оптимізації, що дозволяє одночасно мінімізувати вартість, викиди CO_2 , NO_x , SO_2 , CO , PM та VOC а також забезпечити необхідну потужність і дотримання бюджетних обмежень. Модель включає вхідні дані, цільові функції та обмеження, що відображають екологічні нормативи, бюджетні та технічні вимоги, які забезпечують раціональний вибір електрогенераторів під конкретне завдання.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення полягає у дослідженні особливостей створення математичної моделі для раціонального вибору електрогенераторів на основі поєднання економічних, екологічних та енергетичних параметрів. Запропонована математична модель може бути використана не лише в наукових дослі-

дженнях, а й у практичній діяльності підприємств, державних установ та приватних споживачів, які потребують ефективних рішень для автономного енергозабезпечення.

Викладення основного матеріалу. Наукове дослідження присвячено дослідженню особливостей створення математичної моделі для раціонального вибору електрогенераторів з урахуванням екологічної складової.

Математичні моделі є важливим інструментом для аналізу та вирішення складних проблем у різних галузях науки та техніки. Математичні моделі дозволяють аналізувати існуючі дані та робити прогнози щодо майбутніх подій. Це особливо важливо в економіці, екології, медицині та інших галузях, де точні прогнози можуть допомогти приймати обґрунтовані рішення. За ствердженням Джерела [12] «дотепер не існує універсального алгоритму для побудови будь-яких моделей. Але існує загальна логіка побудови моделей, де кожна конкретна модель для своєї побудови вимагає індивідуального підходу» [12].

Науковці в своїй праці [13] зазначають, що задача математичного моделювання включає в себе три основних елемента: а) незалежні керовані змінні, значення яких визначають певний план дій; б) обмеження, які повинні задовольняти змінні; в) цільова функція, яка підлягає оптимізації [13].

В роботі запропонована математична модель базується на багатокритеріальній оптимізації, що забезпечує врахування економічних, екологічних та технічних аспектів при виборі генераторів. Автори в своїх працях [14-15] також вказують, що багатокритеріальним завданням більшість критеріїв, що характеризують альтернативні варіанти, мають різну розмірність, природу та питомі вагові характеристики. Та методом згортання векторного критерію який враховує відносну важливість окремих критеріїв оптимальності за допомогою побудови скалярної функції яка є узагальненим критерієм щодо векторного критерію та вирішення однокритеріального завдання оптимізації [15].

Для формалізації математичної моделі було визначено ключові параметри, цільові функції, обмеження та змінні. Та виписані основні елементи моделі, які склали в себе параметри системи, бінарні змінні, глобальні параметри системи.

1. До параметрів системи відносяться:

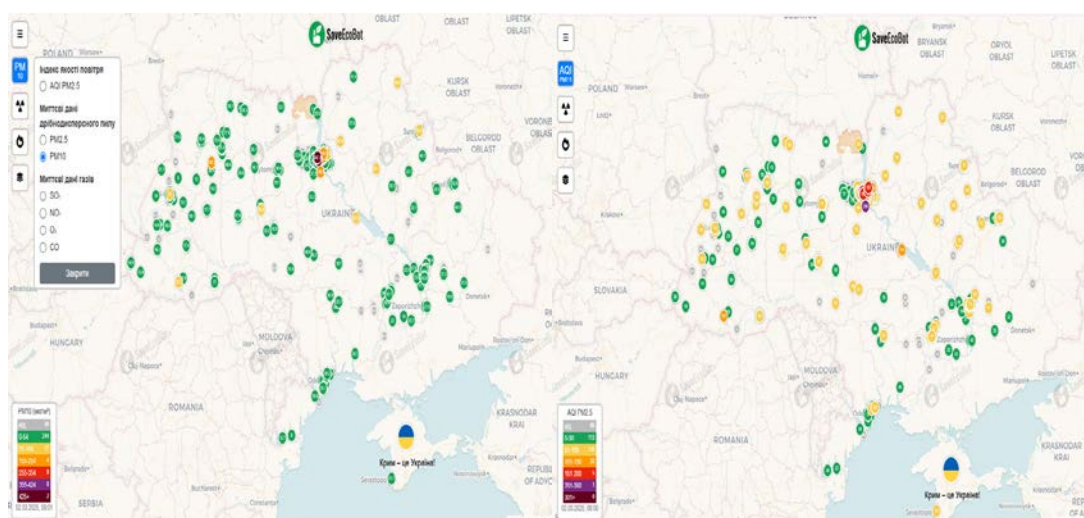
– P_i – потужність i -го генератора, Вт. Це показник, який характеризує, скільки енергії може забезпечити генератор. Важливо враховувати сумісність з потребами системи та загальну потужність, необхідну для задоволення енергетичного попиту.

– C_i – вартість i -го генератора, грн. Це сукупна вартість придбання, монтажу та, за необхідності, обслуговування генератора. Зазвичай цей параметр оцінюється для визначення економічної ефективності вибору.

– L_i – рівень шуму i -го генератора (дБ) – даний показник визначає акустичний вплив.

Індекс якості повітря	PM _{2.5}	PM ₁₀
Добрий	0	0
Задовільний	12	54
Шкідливий для групи ризику	35	154
Шкідливий	55	254
Дуже шкідливий	150	354
Небезпечний	250	424

Рис. 2. Індекс якості повітря [16]



а)

б)

Рис. 3. Мапа України на тверді частинки пилу: а) PM 10; б) PM2.5 [18]

– E_{CO_2i} – кількість викидів CO_2 від i -го генератора, г/кВт·год. Показник відображає вуглецевий слід генератора. Зменшення цього показника позитивно впливає для зниження глобального впливу на зміну клімату.

– E_{NO_xi} – кількість викидів NO_x від i -го генератора, г/кВт·год. Цей показник оцінює рівень викидів оксидів азоту, що впливає на утворення смогу та кислотних дощів.

– E_{SO_2i} – кількість викидів SO_2 від i -го генератора, г/кВт·год. Відображає рівень викидів діоксиду сірки, даний показник впливає на кислотність атмосфери та стан здоров'я населення.

– E_{COi} – кількість викидів CO від i -го генератора (г/кВт·год). CO – це токсичний газ, який утворюється внаслідок неповного згоряння палива. Високий рівень викидів може призвести до серйозного впливу на здоров'я людини, зокрема отруєння та ускладнення дихання.

– E_{PMi} – кількість викидів PM від i -го генератора (г/кВт·год). Джерело [16] вказує що «Particulate matter (PM) це мікроскопічні тверді частинки. Фактично – це все в повітрі, що не є газом, і складається з вели-

чезного різноманіття хімічних сполук та матеріалів, деякі з яких можуть бути токсичними. Через невеликий розмір багатьох частинок, що утворюють PM , деякі з цих токсинів через дихання можуть потрапляти в кров і транспортуватися по всьому тілу, осідаючи в серці, мозку та інших органах» [17].

Іншими словами можна трактувати так PM – це дрібні частинки твердих речовин та рідин (аерозолів), що виділяються внаслідок спалювання палива. Вони можуть бути видимими (дим) або невидимими. До основних забрудників відносяться тверді частинки пилу (PM_{10} і $PM_{2.5}$) [16-17]. Нашою державою встановлений допустимий індекс якості повітря, який представлений на рис 2.

Загалом із $PM_{2.5}$ пов'язано 3% смертей від захворювань серцево-судинної та дихальної системи і 5% смертей від раку легенів. [16].

Попри війну в нашій державі існує SaveEcoBot [18] єдина в Україні екологічна система. Вона поєднує дані про забруднення, забруднювачів та інструменти захисту довкілля. На рис 3. Представлена мапа якості повітря України.

– E_{VOC_i} кількість викидів VOC від i -го генератора (г/кВт·год).

– n – загальна кількість доступних генераторів, шт. Це кількість варіантів генераторів, доступних для аналізу та вибору.

2. Бінарні змінні:

– x_i – бінарна змінна, яка дорівнює 1, якщо i -й генератор обраний, і 0, якщо не обраний.

3. Глобальні параметри системи:

– $P_{required}$ – необхідна загальна потужність, Вт

– C_{budget} – доступний бюджет, грн

– $E_{CO_2,limit}$, $E_{NO_x,limit}$, $E_{SO_2,limit}$, $E_{CO,limit}$, $E_{PM,limit}$, $E_{VOC,limit}$ – допустимі рівні викидів CO_2 , NO_x , SO_2 , CO , PM , VOC .

– L_{limit} – допустимий рівень шуму (дБ) залежить від екологічних стандартів

Для досягнення раціонального вибору генераторів рекомендуємо застосовувати такі цільові функції:

Мінімізація загальної вартості:

$$\min \sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i, \quad (1)$$

Мінімізація загальних викидів CO_2 , NO_x , NO_x , CO , PM , VOC

$$\min \sum_{i=1}^n E_{CO_2,i} \cdot x_i, \quad (2)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{NO_x,i} \cdot x_i, \quad (3)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{SO_2,i} \cdot x_i, \quad (4)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{CO,i} \cdot x_i, \quad (5)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{PM,i} \cdot x_i, \quad (6)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{VOC,i} \cdot x_i, \quad (7)$$

Мінімізація загального рівня шуму:

$$\min \sum_{i=1}^n L_i \cdot x_i, \quad (8)$$

Максимізація загальної потужності – ця функція дозволяє забезпечити максимальну доступну потужність в межах вибраного набору генераторів та висвітлена наступною формулою:

$$\max \sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i, \quad (9)$$

Обмеження:

Для забезпечення необхідної потужності будемо використовувати наступну формулу:

$$\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i \geq P_{required}, \quad (10)$$

Дане обмеження гарантує, що обрані генератори забезпечать потрібний рівень енергії.

Аналізуючи потужності генераторів, слід зазначити, що їхній діапазон становить від 0,2 до 2500 кВт. Натомість бензинові генератори здебільшого є малопотужними (0,2-16 кВт) ніж дизельні та газові. [19]. Для визначення необхідної потужності генератора перш за все визначається об'єкт де буде використовуватися генератор. Потім наявну кількість приладів та обладнання на об'єкті (активні та індуктивні). При розрахунку потужності для активних приладів – достатньо підсумувати їхню потужність та додати 15-20% резерву. Індуктивні прилади – потребують значно більшої стартової потужності через високий пусковий струм. Тому його номінальна потужність повинна перевищувати сумарну робочу потужність підключених пристроїв приблизно втричі [19].

Наступним етапом потрібно врахувати кліматичні фактори, які значно впливають на потужність генераторних установок. А саме: підвищена вологість, температура, висота над рівнем моря це ті показники, які негативно впливають на вихідну потужність генератора і їх обов'язково потрібно враховувати [19].

Бюджетне обмеження:

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i \leq C_{budget}, \quad (11)$$

Обмеження на викиди

Для викидів CO_2 від i -го генератора (г/кВт·год)

$$\sum_{i=1}^n E_{CO_2,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (12)$$

Для викидів NO_x від i -го генератора (г/кВт·год)

$$\sum_{i=1}^n E_{NO_x,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (13)$$

Для викидів SO_2 від i -го генератора (г/кВт·год)

$$\sum_{i=1}^n E_{SO_2,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (14)$$

Для викидів CO від i -го генератора (г/кВт·год)

$$\sum_{i=1}^n E_{CO,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (15)$$

Для викидів VOC від i -го генератора (г/кВт·год):

$$\sum_{i=1}^n E_{VOC,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (16)$$

Для викидів РМ від i -го генератора (г/кВт·год).

$$\sum_{i=1}^n E_{PM,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (17)$$

Для рівня шуму:

$$\sum_{i=1}^n L_i \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (18)$$

Бінарність змінних:

$$x_i \in \{0,1\}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (19)$$

Бінарні змінні широко застосовуються в задачах дискретної оптимізації, дозволяючи математично моделювати вибір «включення» або «виключення» певних елементів системи. Вони дозволяють чітко визначати, які елементи системи активні, що спрощує врахування різних обмежень, таких як бюджет чи екологічні норми. Згідно з матеріалами компанії FICO, бінарні змінні моделюють дискретні рішення, наприклад, «так/ні» або «відкрити/закрити» [20].

У контексті цієї моделі визначає, чи обраний конкретний генератор. Бінарність змінних забезпечує можливість чіткого врахування обмежень, таких як бюджет, необхідна потужність або рівні викидів.

Аналіз наукових публікацій дає змогу зробити висновок, що використання бінарних змінних є основою для багатьох інженерних та екологічних моделей, що потребують ефективного управління ресурсами.

Розроблений алгоритм роботи математичної моделі дає можливість чітко сформулювати етапи роботи та представлений на рис.4.

Перший етап – це збір даних – в якому необхідно зібрати інформацію про доступні електрогенератори, їх потужність, вартість, рівні викидів і т.д.

Другий етап. На цьому етапі проводимо визначення обмежень, тобто на основі технічних, економічних і екологічних вимог задаються параметри $P_{required}$, C_{budget} , $E_{CO2,limit}$, $E_{NOx,limit}$, $E_{SO2,limit}$, $E_{CO,limit}$, $E_{VOC,limit}$, $E_{PM,limit}$.

Третій етап. Безпосередньо саме розв'язання оптимізаційної задачі за допомогою методів лінійного програмування або спеціалізованих програмних пакетів де визначається оптимальний набір генераторів.

Четвертий етап – це етап аналізу результатів. На цьому етапі результати перевіряються на відповідність вимогам та аналізується чутливість моделі до зміни параметрів.

Головні висновки. Таким чином дослідження підтверджують, що запропонована математична модель забезпечує комплексний підхід до оптимізації вибору генераторів, враховуючи комплексно як екологічні так і економічні критерії. Застосування багатокритеріальної оптимізації дозволяє досягти балансу між вартістю та зменшенням негативного впливу електрогенераторів.

Переваги запропонованої математичної моделі полягають у її гнучкості та здатності адаптуватися до різних умов. Завдяки введенню бінарних змінних та обмежень її можна застосовувати до широкого спектра завдань (від вибору обладнання для невеликих автономних систем до оптимізації великих енергетичних проектів).

Перспективи використання результатів дослідження. Екологічна складова в запропонованій математичній моделі дозволяє суттєво знизити рівень шкідливих викидів, що є важливим внеском у збереження екології нашої держави і має практичне значення для енергетичної галузі та екологічної інженерії.

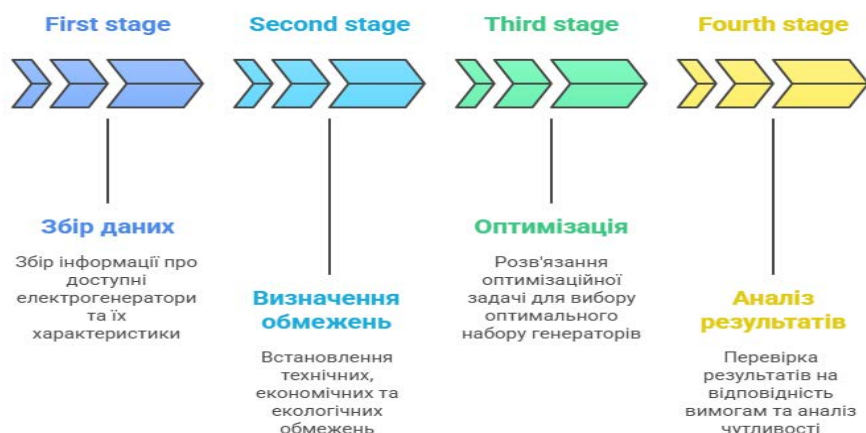


Рис. 4. Алгоритм роботи математичної моделі *

*Розроблено автором за допомогою [21]

Література

1. Війна в 2025: як змінилась енергетика та чому в Україні зростуть тарифи для населення веб-сайт. URL: <https://www.fico.com/fico-xpress-optimization/docs/latest/mipform/dhtml/chap2s1.html><https://brovaryregion.in.ua/%D0%B2%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B0-%D0%B2-2025-%D1%8F%D0%BA-%D0%B7%D0%BC%D1%96%D0%BD%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%8C-%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0-%D1%82%D0%B0-%D1%87%D0%BE/> (дата звернення:04.04.2025).
2. Енергетична система України: стан на кінець 2024 року та сценарії на 2025 веб-сайт. URL: <https://enerhodzherela.com.ua/analitika/%D0%95%D0%9D%D0%95%D0%A0%D0%93%D0%95%D0%A2%D0%98%D0%A7%D0%9D%D0%90-%D0%A1%D0%98%D0%A1%D0%A2%D0%95%D0%9C%D0%90-%D0%A3%D0%9A%D0%A0%D0%90-%D0%87%D0%9D%D0%98-%D0%A1%D0%A2%D0%90%D0%9D-%D0%9D%D0%90-%D0%9A%D0%86%D0%9D%D0%95%D0%A6%D0%AC-2024-%D0%A0%D0%9E%D0%9A%D0%A3-%D0%A2%D0%90-%D0%A1%D0%A6%D0%95%D0%9D%D0%90%D0%A0%D0%86%D0%87-%D0%9D%D0%90-2025> (дата звернення:04.03.2025).
3. Ukraine's Winter Energy Crisis: Facing the Threat of Missiles and Default 2025. веб-сайт. URL: <https://www.wilsoncenter.org/article/ukraines-winter-energy-crisis-facing-threat-missiles-and-default> (дата звернення:22.05.2025).
4. Енергетична система України під ударом. веб-сайт. URL: <https://www.ica.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter/ukraines-energy-system-under-attack> (дата звернення:22.05.2025).
5. Халмурадов Б. Д., Пронь О. В. Між війною та розвитком: дилема енергетики та житлового будівництва в Україні. *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2024*: зб. матеріалів доп. учасн. XXVI Міжнародної наук-практ. конф. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С.100 -102.
6. The main directions of scientific research, proposed by the Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine for joint work. веб-сайт. URL: <https://ipme.kiev.ua/> (дата звернення:22.05.2025).
7. Інститут математики НАН України (ІМ НАН України) веб-сайт. URL: <https://www.imath.kiev.ua> (дата звернення:22.05.2025).
8. Саух С. Є., Борисенко А. В. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія Київ: «Три К», 2020. 340 с.
9. Моделювання енергоефективних режимів роботи smart grid системи електропостачання з сонячними фотоелектричними станціями веб-сайт. URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2019/03/SmartGrid.pdf> (дата звернення:22.05.2025).
10. Баженов В. А. Моделі оптимального розвитку енергосистем: Навчальний посібник.: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 56 с.
11. Саух С.Є. Проблеми математичного моделювання конкурентної рівноваги на ринках електроенергії. *Вісник Національної академії наук України*, 2018, Вип. 40, №4, С. 53 – 67.
12. Пронь С.В. Удосконалення транспортно-технологічного процесу для забезпечення вирощування сільськогосподарських культур: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Київ. нац. трансп. ун-т. – Київ, 2019. 234 с.
13. Бондарчук В. М., Давидчук С. П. Оптимізаційні методи та моделі. Конспект лекцій для студентів денної та заочної форми навчання. Житомир: ЖДТУ, 2016.- 104 с.
14. Янчук М. Б., Пронь С. В., Федина В. П., Чердніченко К. В. Науково-методичні підходи до управління транспортними ризиками в мультимодальних вантажних перевезеннях. *Бізнес Інформ*. 2021. №2. С. 198–209.
15. Pron S., Soloviova O., Herasymenko I., Borets I., Modeling of the transport and production complex in the growing of agricultural crops, taking into account the aviation component / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 2, No. 3 (104). P. 30-39.
16. Що таке PM2.5 та PM10 веб-сайт. URL: <https://meteopost.com/info/PM/>(дата звернення: 12.02.2025).
17. Як пил PM2,5 впливає на здоров'я людей та як захиститися від забруднення повітря – новини екології. веб-сайт. URL: https://ecopolitic.com.ua/ua/news/nevidima-zagroza-yak-pil-pm2-5-vplivaie-na-zdorov-ya-ljudej/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 04.05.2025).
18. SaveEcoBot веб-сайт. URL: <https://www.saveecobot.com/maps#6/48.487/30.959/pm10> (дата звернення: 04.03.2025).
19. Вибір потужності генератора. веб-сайт. URL: <https://matari.ua/vybir-potuzhnosti-heneratora.html> (дата звернення 02.03.2025)
20. Binary variables. веб-сайт. URL: <https://www.fico.com/fico-xpress-optimization/docs/latest/mipform/dhtml/chap2s1.html> (дата звернення:12.02.2025).
21. App.napkin.ai веб-сайт. URL: <https://www.napkin.ai/> (дата звернення: 22.05.2025).