



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

здобувача вищої освіти ступеня «бакалавр» заочної форми навчання
за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Тема: «МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОЧІКУВАННЯ ЗБИТКУ
ВІД НЕДОВІДПУСКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ МЕТОДОМ
ПЕРЕБОРУ КОЕФІЦІЄНТІВ»

Виконавець: Дмитро БІРЮК

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота виконана на 89 сторінках, складається з 4 розділів та містить 20 ілюстрацій, 13 таблиць, 1 додатка. При виконанні роботи було використано 35 джерел інформації.

У кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні основи оцінювання недовідпуску електричної енергії та економічних збитків в електроенергетичних системах. Проведено аналіз причин виникнення недовідпуску електричної енергії, розглянуто економічні наслідки перерв електропостачання для різних категорій споживачів та виконано огляд сучасних підходів до визначення очікуваного збитку. Розроблено математичну модель визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії методом перебору коефіцієнтів. Виконано формування ряду розподілу наявної потужності генераторів, ряду навантаження та ряду дефіциту потужності. Проведено розрахунок імовірності виникнення дефіциту потужності, математичного очікування недовідпуску електричної енергії та відповідного економічного збитку. Для автоматизації розрахунків розроблено програмне забезпечення мовою Python, яке забезпечує формування вхідних даних, виконання розрахунків методом перебору коефіцієнтів, побудову проміжних таблиць результатів та експорт отриманих даних для подальшого аналізу. У роботі також розглянуто питання охорони праці та електробезпеки під час експлуатації електроенергетичних об'єктів, проаналізовано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, а також запропоновано організаційно-технічні заходи щодо зниження ризиків аварійних відключень. Практичне значення роботи полягає у створенні математичної моделі та програмного засобу, які можуть бути використані для оцінювання очікуваних економічних втрат.

Ключові слова: НЕДОВІДПУСК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ОЧІКУВАНИЙ ЗБИТОК, МЕТОД ПЕРЕБОРУ КОЕФІЦІЄНТІВ, НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ДЕФІЦИТ ПОТУЖНОСТІ, ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ.

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		8

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	11
ВСТУП.....	12
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ НЕДОВІДПУСКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЕКОНОМІЧНИХ ЗБИТКІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ.....	15
1.1 Сутність недовідпуску електричної енергії як показника надійності електропостачання	15
1.2. Причини виникнення недовідпуску електричної енергії в електричних мережах	19
1.3. Економічні наслідки перерв електропостачання для споживачів електричної енергії	22
1.4 Аналіз новітніх підходів до визначення очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії	26
1.5 Висновки.....	30
2 МЕТОД ПЕРЕБОРУ КОЕФІЦІЄНТІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ОЧІКУВАННЯ ЗБИТКУ ВІД НЕДОВІДПУСКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.....	31
2.1 Визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії	31
2.2. Визначення коефіцієнта готовності генерувального агрегату.....	33
2.3 Формування ряду розподілу наявної потужності генераторів.....	33
2.4 Формування ряду розподілу навантаження	35
2.5 Умова виникнення дефіциту потужності.....	37
2.6. Розрахунок імовірності дефіциту потужності	38
2.7 Визначення математичного очікування недовідпуску електричної енергії	40
2.8 Визначення математичного очікування збитку	40
2.9 Алгоритм розрахунку методом перебору коефіцієнтів	41

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.	1			9

2.10	Приклад інтерпретації результатів розрахунку	42
2.11	Наукове значення методу перебору коефіцієнтів	43
2.12	Висновки.....	43
3	АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ ЗА МЕТОДОМ ПЕРЕБОРУ КОЕФІЦІЄНТІВ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНОЇ ПРОГРАМИ.....	45
3.1.	Призначення програмного засобу	45
3.2.	Структура вхідних даних програми.....	46
3.3	Алгоритм роботи програми	48
3.4	Формування таблиці ряду наявної потужності генераторів.....	52
3.5	Формування таблиці та графіка ряду навантаження.....	53
3.6	Формування ряду дефіциту потужності.....	55
3.7	Розрахунок математичного очікування недовідпуску електроенергії та збитку.....	57
3.8.	Експорт результатів розрахунку	59
3.9.	Переваги автоматизованого розрахунку	60
3.10	Висновки.....	61
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ	62
4.1	Основні небезпечні та шкідливі фактори під час роботи з електрообладнанням	62
4.2.	Заходи електробезпеки під час експлуатації електричних мереж.....	64
4.3.	Організаційно-технічні заходи щодо зниження ризиків аварійних відключень	67
4.4	Висновки.....	70
	ВИСНОВКИ	71
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75
	ДОДАТОК ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО КОДУ	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ASAI — Average Service Availability Index (індекс середньої доступності електропостачання).

CAIDI — Customer Average Interruption Duration Index (індекс середньої тривалості перерв електропостачання для споживачів, що зазнали відключення).

EENS — Expected Energy Not Served (очікуваний недовідпуск електричної енергії).

ENS — Energy Not Served (недовідпуск електричної енергії).

ENTSO-E — European Network of Transmission System Operators for Electricity (Європейська мережа операторів систем передачі електроенергії).

IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers (Інститут інженерів з електротехніки та електроніки).

MathType — програмний пакет для набору та редагування математичних формул.

Microsoft Equation 3.0 — редактор математичних формул Microsoft Office.

НКРЕКП — Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг.

SAIDI — System Average Interruption Duration Index (індекс середньої тривалості довгих перерв електропостачання).

SAIFI — System Average Interruption Frequency Index (індекс середньої частоти довгих перерв електропостачання).

ENS — Energy Not Supplied (обсяг недовідпущеної електричної енергії в розрахунковій моделі).

ВСТУП

Сучасна електроенергетика функціонує в умовах підвищених вимог до надійності, безперервності та економічної обґрунтованості електропостачання. Для промислових, комунальних, транспортних і побутових споживачів електрична енергія є не лише товаром, а й базовим ресурсом технологічної, виробничої та соціальної стабільності. Будь-яке порушення нормального режиму електропостачання спричиняє не тільки технічні наслідки, пов'язані з відмовами обладнання, перевантаженням елементів мережі або зміною режимних параметрів, а й економічні втрати, які виникають унаслідок зупинки виробничих процесів, невиконання технологічних операцій, простою персоналу, пошкодження продукції, зниження якості послуг і необхідності відновлення нормального режиму роботи електроустановок.

Особливе місце серед показників надійності електропостачання посідає недовідпуск електричної енергії, оскільки він дає змогу кількісно оцінити обсяг електроенергії, який не був поставлений споживачам через аварійні, технологічні або режимні порушення. На відміну від показників, що характеризують лише тривалість або частоту перерв, недовідпуск електроенергії безпосередньо пов'язаний з енергетичним дефіцитом і може бути використаний як основа для економічної оцінки збитків. У міжнародній практиці для аналізу надійності систем електропостачання використовуються такі індекси, як SAIDI, SAIFI, CAIDI, а також показники очікуваної недопоставленої енергії. Стандарт IEEE 1366 розглядає їх як поширені індекси оцінювання роботи електророзподільних систем, тоді як у європейській практиці показник Expected Energy Not Supplied трактується як очікуваний обсяг електроенергії, який не буде покритий енергосистемою за певний період.

Актуальність теми дипломної роботи зумовлена тим, що оцінювання очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії потребує не лише фіксації факту перерви електропостачання, а й побудови математичної моделі, здатної враховувати ймовірність аварійного режиму, величину недовідпущеної

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		12

електроенергії, тривалість порушення, категорію споживача та економічний коефіцієнт збитку. У реальних умовах ці параметри не завжди мають однозначне значення, тому виникає потреба у застосуванні розрахункового підходу, який дозволяє аналізувати декілька можливих варіантів коефіцієнтів і визначати найбільш обґрунтоване значення очікуваного збитку. Метод перебору коефіцієнтів у цьому випадку є доцільним інструментом, оскільки дає змогу послідовно змінювати параметри моделі в заданих межах, порівнювати отримані результати та встановлювати вплив кожного коефіцієнта на кінцеву величину збитку.

Нормативну основу дослідження становлять положення, що регламентують функціонування електричних мереж, якість електропостачання та надійність роботи систем розподілу. Кодекс систем розподілу визначає вимоги й правила взаємодії оператора системи розподілу та користувачів системи, а також передбачає оцінювання стану системи розподілу з погляду дотримання вимог до якості електричної енергії та надійності електропостачання. У звітах НКРЕКП щодо якості надання послуг у сфері електроенергетики застосовуються показники SAIDI та SAIFI, які характеризують середню тривалість і частоту довгих перерв в електропостачанні, що підтверджує практичну значущість кількісного аналізу перерв електропостачання для енергетичних підприємств і регуляторного контролю.

Метою дипломної роботи є розроблення та обґрунтування математичної моделі оцінювання очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії з використанням методу перебору коефіцієнтів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

1) дослідити сутність недовідпуску електричної енергії як показника надійності електропостачання, визначити основні причини виникнення недовідпуску в електричних мережах, охарактеризувати економічні наслідки перерв електропостачання для споживачів;

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		13

2) розробити математичну модель та алгоритм розрахунку математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії методом перебору коефіцієнтів, реалізувати алгоритм перебору коефіцієнтів мовою програмування Python, виконати розрахунковий аналіз отриманих результатів;

3) розробити заходи електробезпеки під час експлуатації електричних мереж та організаційно-технічні заходи щодо зниження ризиків аварійних відключень.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання надійності електропостачання та економічних наслідків порушення режимів роботи електроенергетичної системи. Предметом дослідження є математична модель визначення очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії методом перебору коефіцієнтів.

Методологічну основу дипломної роботи становлять методи математичного моделювання, імовірнісного аналізу, техніко-економічного оцінювання, параметричного розрахунку, порівняння результатів і перебору коефіцієнтів у заданих межах.

Практичне значення роботи полягає у розробці алгоритмічних та програмних засобів, які дозволяють здійснити автоматизацію розрахункового процесу визначення збитку від недовідпуску електричної енергії споживачам через відмови електрообладнання.

Структура дипломної роботи відповідає логіці дослідження. У першому розділі розглядаються теоретичні основи оцінювання недовідпуску електричної енергії та економічних збитків в електроенергетичних системах. У другому розділі формується математична модель визначення очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії. У третьому розділі здійснюється автоматизація розрахунків за методом перебору коефіцієнтів на основі розробленої програми виконується аналіз результатів моделювання. У четвертому розділі розглядаються питання охорони праці та безпеки під час експлуатації електроенергетичних об'єктів. Завершується робота висновками, списком використаних джерел і додатком.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ НЕДОВІДПУСКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА ЕКОНОМІЧНИХ ЗБИТКІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Сутність недовідпуску електричної енергії як показника надійності електропостачання

Надійність електропостачання в електроенергетичних системах розглядається як здатність системи виробництва, передачі, розподілу та постачання електричної енергії забезпечувати споживачів електроенергією встановленої якості у необхідному обсязі та у визначений час. Для електротехнічних об'єктів це поняття має не тільки інженерний, а й економічний зміст, оскільки кожне порушення нормального режиму роботи мережі безпосередньо впливає на технологічні процеси споживачів, витрати операторів системи та рівень соціально-економічної безпеки територій. У працях з надійності електроенергетичних систем підкреслюється, що надійність не може бути оцінена лише за фактом наявності або відсутності аварії, оскільки система працює в умовах імовірнісної природи відмов, випадкової тривалості ремонтів, зміни навантаження та дії зовнішніх факторів [1; 2; 3; 31; 32]. Саме тому в сучасних дослідженнях надійності використовують систему взаємопов'язаних індикаторів, які характеризують частоту, тривалість і енергетичний обсяг порушень електропостачання.

У нормативній практиці України якість електропостачання оцінюється через три основні напрями, а саме безперервність електропостачання, комерційну якість надання послуг та якість електричної енергії. Такий підхід закріплений у звітності НКРЕКП, де безперервність електропостачання описується через показники SAIDI, SAIFI та розрахунковий обсяг недовідпущеної електричної енергії. Кодекс систем розподілу встановлює правила функціонування системи розподілу та взаємодії оператора системи розподілу з користувачами, що

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		15

підтверджує системний характер оцінювання надійності, оскільки надійність електропостачання залежить як від технічного стану мережі, так і від організації експлуатації, диспетчерського керування, планування ремонтів, приєднання споживачів та дотримання вимог до якості електроенергії [23; 24; 26].

Недовідпуск електричної енергії є одним із найбільш змістовних показників надійності, тому що він переводить факт перерви електропостачання у кількісний енергетичний вимір. Якщо SAIDI показує середню тривалість довгих перерв для одного споживача або точки комерційного обліку, а SAIFI характеризує середню частоту таких перерв, то недовідпуск електроенергії відображає саме той обсяг енергії, який не був доставлений споживачеві внаслідок порушення нормального режиму роботи системи. У цьому полягає головна перевага показника недовідпуску для економічного аналізу: він безпосередньо пов'язує технічне порушення із втраченим енергетичним ресурсом, а через коефіцієнт питомого збитку дає змогу визначати грошову оцінку наслідків аварійного або обмежувального режиму [11; 12].

У міжнародній практиці аналогом поняття недовідпуску є показники ENS та EENS. За визначенням ENTSO-E, Energy Not Served характеризує енергію, яка не була забезпечена через недостатність ресурсів для покриття попиту, а Expected Energy Not Served відображає очікуване значення такої енергії за визначений період у модельованій зоні [33]. Для дипломної роботи це положення має принципове значення, оскільки тема дослідження пов'язана не тільки з фіксацією фактичного недовідпуску, а й з математичним моделюванням його очікуваного економічного наслідку. Очікуваний збиток є результатом поєднання енергетичної величини недовідпуску з імовірністю виникнення відповідного режиму та економічним коефіцієнтом, який відображає вартість одиниці недопоставленої електроенергії для певного типу споживача [31; 32; 35].

Формально на рівні окремого споживача або вузла навантаження недовідпуск електричної енергії може бути поданий як добуток середньої

потужності відключеного навантаження та тривалості перерви електропостачання:

$$W_i = P_i \cdot t_i \quad (1.1)$$

де W_i – недовідпуск електричної енергії для i -го споживача або вузла навантаження, кВт·год; P_i – середня потужність відключеного навантаження, кВт; t_i – тривалість перерви електропостачання, год. У такому вигляді модель є найпростішою, однак вона вже демонструє ключову ідею: збиток не виникає абстрактно від самого факту аварії, а формується через конкретний обсяг енергії, який споживач не отримав у момент, коли ця енергія була необхідною для виконання технологічних або побутових функцій.

Для системного аналізу безперервності електропостачання застосовуються індекси середньої тривалості та середньої частоти довгих перерв. У стандарті IEEE 1366 SAIFI, SAIDI, CAIDI та ASAI наведені як поширені індекси оцінювання роботи електророзподільних систем [34]. У звітності НКРЕКП індекс SAIDI розраховується як відношення сумарної тривалості довгих перерв у точках комерційного обліку, де було припинене електропостачання, до загальної кількості точок комерційного обліку. Індекс SAIFI, у свою чергу, визначається як відношення сумарної кількості точок комерційного обліку, в яких було припинене електропостачання через усі довгі перерви за звітний період, до загальної кількості таких точок [24; 26]. У формалізованому вигляді ці показники можна представити так:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot t_i}{N_{\Sigma}} \quad (1.2)$$

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{N_{\Sigma}} \quad (1.3)$$

де N_i - кількість точок комерційного обліку або споживачів, охоплених i -ю перервою; t_i - тривалість i -ї перерви, хв або год; N_{Σ} - загальна кількість точок

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		17

комерційного обліку в системі. Ці формули не замінюють розрахунок недовідпуску, але вони створюють інформаційне підґрунтя для його оцінювання, оскільки показують масштаб і повторюваність порушень електропостачання.

За даними НКРЕКП за 2024 рік, індекс SAIDI з вини компанії, тобто внаслідок технологічних порушень у мережах компанії та запланованих без попередження споживачів перерв, становив 502 хв. Індекс SAIDI внаслідок запланованих перерв з попередженням споживачів становив 597 хв, а внаслідок форс-мажорних обставин та вини інших осіб - 29 210 хв [26]. Переведення цих значень у години дає відповідно 8,37 год, 9,95 год та 486,83 год. Така різниця між технологічними, плановими та форс-мажорними перервами демонструє, що надійність електропостачання не можна оцінювати лише за одним усередненим значенням. Для математичного моделювання очікуваного збитку важливо розділяти причини перерв, адже аварія внаслідок внутрішнього дефекту мережі, плановий ремонт і пошкодження об'єкта критичної інфраструктури зовнішнім фактором мають різну ймовірність, різну тривалість відновлення та різний економічний ефект.

Недовідпуск електричної енергії має подвійне значення. З одного боку, він характеризує технічну ненадійність системи, тому що відображає енергетичний результат порушення нормального режиму. З іншого боку, він є базою для фінансової оцінки збитків. Саме ця подвійність обґрунтовує використання математичного моделювання у дипломній роботі. Якщо досліджувати лише кількість аварій, можна зробити висновок про частоту подій, але не про реальний економічний масштаб втрат. Якщо аналізувати лише тривалість перерв, можна оцінити часовий дефіцит електропостачання, але не врахувати потужність відключеного навантаження. Якщо ж обчислювати недовідпуск, то технічна подія набуває вимірюваної енергетичної форми, яку вже можна перетворити на очікуваний збиток.

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		18

1.2. Причини виникнення недовідпуску електричної енергії в електричних мережах

Причини недовідпуску електричної енергії доцільно розглядати як систему взаємопов'язаних технічних, експлуатаційних, організаційних, природних та зовнішніх факторів. Електрична мережа є складним інженерним комплексом, у якому кожний елемент виконує певну функцію у передачі або розподілі електроенергії. Відмова трансформатора, пошкодження кабельної або повітряної лінії, спрацювання захисту, перевантаження комутаційного обладнання, порушення ізоляції або помилка оперативного перемикавання можуть призвести до повного або часткового припинення живлення споживачів. У результаті формується недовідпуск, який залежить від потужності відключеного навантаження, тривалості відновлення, наявності резервного живлення та можливості оперативного перерозподілу навантаження через суміжні ділянки мережі [4; 5; 9; 10; 14; 15; 19; 28; 30].

Першою групою причин є технічний стан обладнання. Значна частина електричних мереж працює в умовах старіння основних фондів, тривалої експлуатації кабельних і повітряних ліній, трансформаторних підстанцій, розподільчих пристроїв і засобів релейного захисту. Із часом зростає ймовірність пробою ізоляції, механічного пошкодження провідників, нагрівання контактних з'єднань, зниження механічної міцності опор, відмови вимикачів і роз'єднувачів. Такі відмови мають не лише технічний, а й економічний наслідок, оскільки кожна година простою елемента мережі створює втрачений обсяг електропостачання. З позиції математичної моделі технічний стан обладнання відображається через імовірність виникнення аварійного режиму, середню тривалість ремонту та потужність навантаження, що потрапляє до зони відключення [1; 2; 3; 9; 27].

Другою групою причин є режимні порушення, що виникають унаслідок невідповідності фактичного навантаження пропускній здатності елементів мережі. Перевантаження ліній і трансформаторів може бути спричинене сезонним зростанням споживання, нерівномірністю добового графіка навантаження,

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		19

збільшенням потужності приєднаних споживачів, недостатньою гнучкістю схеми електропостачання або обмеженістю резервних джерел живлення. У таких випадках недовідпуск може виникати не тільки через повну аварію, а й через вимушене обмеження навантаження, коли оператор змушений відключати частину споживачів для запобігання більш масштабному порушенню режиму. З погляду моделювання це означає, що недовідпуск є наслідком не лише відмови елемента, а й дефіциту пропускної спроможності або резерву системи [16; 17; 18; 29].

Третьою групою причин є планові роботи та регламентні відключення. Планові перерви мають іншу природу, ніж аварійні, оскільки вони пов'язані з ремонтом, реконструкцією, технічним обслуговуванням, приєднанням нових споживачів або модернізацією обладнання. Їх не можна однозначно трактувати як негативний прояв ненадійності, адже своєчасні ремонти зменшують ризик аварій у майбутньому. Однак з позиції споживача навіть планове відключення означає обмеження доступу до електроенергії, а отже може спричиняти економічні втрати. Дані НКРЕКП за 2024 рік показують, що SAIDI внаслідок запланованих перерв з попередженням споживачів становив 597 хв, тобто перевищував показник перерв з вини компанії, який становив 502 хв [26]. Це демонструє необхідність окремого врахування планових перерв у моделі недовідпуску, оскільки вони можуть мати значний внесок у сумарну тривалість припинення електропостачання.

Четвертою групою є зовнішні та форс-мажорні фактори. До них належать стихійні явища, падіння дерев, підтоплення, ожеледиця, грози, пожежі, механічне пошкодження мереж сторонніми особами, воєнні дії та цілеспрямовані пошкодження об'єктів критичної інфраструктури. Для України ця група факторів є особливо важливою, оскільки у 2024 році НКРЕКП прямо зазначала вплив військової агресії, активних бойових дій та ракетно-дронових обстрілів на можливість надання якісних послуг і проведення моніторингу показників якості електропостачання. У звіті Регулятора зазначено, що дані за 2024 рік сформовано на основі наявної інформації, а для Херсонської, Луганської, окремих територій

					Кваліфікаційна робота	
		№ док.ум.		1		20

Донецької, Харківської та Запорізької областей моніторинг за багатьма показниками був ускладнений або неможливий [26]. Це свідчить, що математична модель очікуваного збитку повинна бути здатною працювати в умовах неповної інформації та підвищеної невизначеності.

Для формалізації причин недовідпуску важливо розділяти події за джерелом виникнення, тому що кожна група має різні параметри імовірності та тривалості. Якщо технологічне пошкодження обладнання може бути описане статистикою відмов і ремонтів, то форс-мажорна подія має значно ширший діапазон тривалості та наслідків. Якщо планове відключення може бути частково оптимізоване через попередження споживачів і вибір часу виконання робіт, то аварійне відключення виникає раптово і має більший економічний ефект. У математичній моделі це можна врахувати через коефіцієнт виду перерви, який змінює очікуваний збиток залежно від характеру події:

$$Z_i = W_i \cdot C_i \cdot K_i \quad (1.4)$$

де Z_i - збиток від i -го випадку недовідпуску, грн; W - обсяг недовідпущеної електричної енергії, кВт·год; C_i - питомий коефіцієнт збитку, грн/кВт·год; K_i - коефіцієнт режимної або причинної значущості події. Для планових перерв за наявності завчасного попередження цей коефіцієнт може бути нижчим, оскільки споживач має можливість перенести частину технологічних операцій або підготувати резервне живлення. Для аварійних і форс-мажорних перерв він може бути вищим, оскільки такі події виникають без підготовки та часто супроводжуються додатковими витратами на відновлення.

З інженерної позиції недовідпуск доцільно розглядати не як ізольований результат однієї відмови, а як функцію структури мережі. Радіальні схеми електропостачання, які широко використовуються у розподільних мережах, є простішими та дешевшими, однак у разі пошкодження однієї ділянки можуть призводити до відключення всіх споживачів нижче за місцем пошкодження. Кільцеві або резервовані схеми мають вищу вартість побудови та експлуатації, але дають змогу швидше відновити живлення через альтернативний шлях. Тому

зниження недовідпуску може бути досягнуте не тільки підвищенням якості обладнання, а й зміною схеми мережі, встановленням секціонуючих апаратів, автоматизованих реклоузерів, резервних трансформаторів, джерел безперебійного живлення та засобів дистанційного керування [4; 5; 10; 14; 18; 28; 29].

У практичному розрахунку для дипломної роботи причини виникнення недовідпуску мають бути перетворені на параметри моделі. Технічний стан обладнання відображається через імовірність відмови, планові роботи - через тривалість і періодичність регламентних відключень, зовнішні події - через коефіцієнт форс-мажорного ризику, а конфігурація мережі - через можливість резервування навантаження. Такий підхід дозволяє перейти від описового аналізу до кількісної оцінки, що є необхідною передумовою застосування методу перебору коефіцієнтів у наступних розділах роботи.

1.3. Економічні наслідки перерв електропостачання для споживачів електричної енергії

Економічні наслідки перерв електропостачання є складнішими, ніж проста вартість невикористаної електричної енергії за тарифом. Для споживача відсутність електроенергії означає не економію вартості купленого ресурсу, а втрату можливості виконати певну виробничу, комерційну або соціальну функцію. У промисловості це може проявлятися у зупинці технологічної лінії, псуванні сировини, необхідності повторного запуску обладнання, втраті продукції, порушенні договірних строків постачання та оплаті простою персоналу. У сфері торгівлі та послуг перерва електропостачання призводить до втрати виручки, неможливості обслуговувати клієнтів, порушення роботи касового, холодильного, вентиляційного або охоронного обладнання. Для побутових споживачів економічний збиток має менш прямий, але також суттєвий характер, оскільки пов'язаний із дискомфортом, псуванням продуктів, обмеженням доступу до зв'язку, опалення, водопостачання та інших послуг, залежних від електроенергії.

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		22

У дослідженнях вартості надійності електроенергетичних систем підкреслюється, що економічна ефективність підвищення надійності повинна оцінюватися через зіставлення додаткових витрат на резервування, модернізацію або обслуговування мережі з вигодами від зменшення перерв електропостачання. У роботі, присвяченій цінності надійності в енергосистемах, зазначено, що економічно ефективний рівень надійності досягається тоді, коли вигоди від підвищення надійності зіставляються з витратами на її забезпечення, а витрати споживачів від перерв електропостачання розглядаються як складова прийняття рішень щодо резервів і надійності [35]. Для цієї дипломної роботи важливо, що очікуваний збиток від недовідпуску не є абстрактним теоретичним показником, а виступає економічним критерієм, через який можна порівнювати альтернативні технічні рішення.

У національному регулюванні економічний аспект якості електропостачання частково проявляється через механізм компенсацій споживачам за недотримання гарантованих стандартів. НКРЕКП зазначає, що з метою захисту прав споживачів затверджено гарантовані стандарти якості електропостачання та компенсації за їх недотримання. Вказано, що встановлено 26 гарантованих стандартів для операторів системи розподілу, 22 стандарти для оператора системи передачі та 6 стандартів для електропостачальника [25]. За даними звіту НКРЕКП, у 2024 році було надано компенсації 96 596 споживачам на загальну суму 13 529 735 грн [26]. Середній розмір компенсації на одного споживача за цими даними може бути обчислений так:

$$K_c = \frac{S_c}{N_c} = \frac{13529735}{96596} = 140,07 \quad (1.5)$$

де K_c - середній розмір компенсації на одного споживача, грн/спож.; S_c - загальна сума компенсацій, грн; N_c - кількість споживачів, яким надано компенсації. Отримане значення не можна ототожнювати з повним економічним збитком споживача, оскільки компенсаційний механізм має регуляторний характер і відображає встановлений порядок захисту прав споживачів, а не повну ринкову

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		23

або виробничу вартість втрат. Однак це значення є важливим практичним орієнтиром, який показує, що перерви електропостачання вже мають фінансовий вимір у системі регулювання, а отже потребують більш глибокого техніко-економічного моделювання.

Збиток від недовідпуску електричної енергії доцільно розглядати через питомий коефіцієнт збитку, який показує, скільки гривень втрат припадає на 1 кВт·год недоотриманої електричної енергії. У найпростішому випадку економічний збиток визначається як добуток обсягу недовідпуску на питомий коефіцієнт збитку:

$$Z = W \cdot C \quad (1.6)$$

де Z - економічний збиток, грн; W - недовідпуск електричної енергії, кВт·год; C - питомий коефіцієнт збитку, грн/кВт·год. Для побутового споживача такий коефіцієнт може бути відносно нижчим, оскільки основна частина втрат має соціально-побутовий характер. Для промислового споживача він значно вищий, оскільки одна кВт·год недоотриманої електроенергії може відповідати втраті виробничого випуску, простою обладнання або псуванню продукції. Саме тому в дипломній роботі недоцільно застосовувати один універсальний коефіцієнт для всіх груп споживачів. Більш обґрунтованим є підхід, за якого коефіцієнти задаються в певних межах і аналізуються методом перебору [35].

Очікуваний збиток формується тоді, коли до моделі додається імовірність виникнення відповідного режиму. Якщо одна і та сама перерва має дуже малу ймовірність, її очікуваний вплив на річний збиток може бути меншим, ніж вплив коротших, але частіших перерв. Тому математична модель повинна враховувати не лише величину збитку за одним сценарієм, а і статистичну або експертну ймовірність реалізації цього сценарію. У загальному вигляді очікуваний збиток можна подати так:

$$M(Z) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot W_i \cdot C_i \quad (1.7)$$

де $M(Z)$ - математичне сподівання економічного збитку, грн; p_i - імовірність виникнення i -го аварійного або режимного стану; W_i - недовідпуск електричної енергії за i -м станом, кВт·год; C_i - питокий коефіцієнт збитку для відповідного споживача або режиму, грн/кВт·год. Формула відображає сутність теми дипломної роботи, оскільки очікуваний збиток є результатом імовірнісного зважування вартості недовідпущеної електроенергії за всіма розглянутими станами [31; 32].

Для демонстрації логіки розрахунку у першому розділі доцільно подати укрупнений розрахунковий приклад. Його дані не слід трактувати як фактичну статистику конкретного оператора системи розподілу, оскільки вони використовуються як навчальна розрахункова база для пояснення моделі. У прикладі враховано чотири групи споживачів, різну середню потужність відключеного навантаження, тривалість перерви, умовну імовірність реалізації режиму та питокий коефіцієнт збитку. Такий підхід відповідає меті дипломної роботи, оскільки надалі саме коефіцієнти збитку можуть змінюватися в заданих межах і перевірятися методом перебору.

Розрахунок у таблиці виконано за формулами 1.1 та 1.7. Для промислового навантаження недовідпуск становить $450 \text{ кВт} \cdot 2,5 \text{ год} = 1125 \text{ кВт·год}$, а очікуваний збиток дорівнює $0,08 \cdot 1125 \cdot 45 = 4050 \text{ грн}$. Для комерційного навантаження недовідпуск становить $120 \text{ кВт} \cdot 3,0 \text{ год} = 360 \text{ кВт·год}$, а очікуваний збиток дорівнює $0,12 \cdot 360 \cdot 25 = 1080 \text{ грн}$. Для комунально-побутового навантаження недовідпуск становить 320 кВт·год , а очікуваний збиток дорівнює 576 грн . Для групи побутових споживачів недовідпуск становить 300 кВт·год , а очікуваний збиток дорівнює 384 грн . Сумарний недовідпуск за розглянутим прикладом становить 2105 кВт·год , тоді як очікуваний збиток становить 6090 грн . Найбільший внесок у сумарний збиток формує промислове навантаження, хоча його імовірність у прикладі не є найбільшою. Це пояснюється високим питоим коефіцієнтом збитку та значною потужністю відключеного навантаження.

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		25

Таблиця 1.1 - Розрахункова оцінка недовідпуску електричної енергії та очікуваного збитку

Група споживачів	Середня потужність відключеного навантаження, кВт	Тривалість перерви, год	Імовірність режиму	Недовідпуск електроенергії, кВт·год	Питомий коефіцієнт збитку, грн/кВт·год	Очікуваний збиток, грн
Промислове навантаження	450	2,5	0,08	1125	45	4050
Комерційне навантаження	120	3,0	0,12	360	25	1080
Комунально-побутове навантаження	80	4,0	0,10	320	18	576
Група побутових споживачів	60	5,0	0,16	300	8	384
Разом	710	-	-	2105	-	6090

Аналіз прикладу показує, що очікуваний збиток не завжди пропорційний лише тривалості перерви. Побутова група має найбільшу тривалість перерви в межах прикладу, але її внесок у сумарний збиток є найменшим через нижчу потужність і нижчий питомий коефіцієнт втрат. Промисловий споживач, навпаки, має меншу тривалість перерви, але створює найбільший очікуваний збиток. Такий результат підтверджує необхідність диференційованого підходу до оцінювання недовідпуску та обґрунтовує використання методу перебору коефіцієнтів у подальшому розділі, оскільки зміна коефіцієнта збитку суттєво впливає на кінцеву оцінку економічних наслідків.

1.4 Аналіз новітніх підходів до визначення очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії

Новітні підходи до визначення очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії формувалися на перетині теорії надійності, імовірнісного моделювання, економіки енергетики та технічної експлуатації електричних

мереж. У класичних роботах Р. Аллана та Р. Біллінтона підкреслюється, що детерміновані критерії надійності поступово доповнюються або замінюються імовірнісними підходами, оскільки саме вони здатні враховувати випадковий характер відмов, зміну навантаження та різні умови функціонування системи [31; 32]. Українські дослідження режимної надійності також акцентують увагу на ризику порушення нормального режиму та необхідності оцінювання наслідків відмов електрообладнання [1; 2; 3]. Для теми цієї дипломної роботи це означає, що очікуваний збиток не повинен визначатися лише за одним розрахунковим випадком. Він має враховувати множину можливих станів системи та ймовірність їх реалізації.

Перший підхід можна умовно назвати індексним. Він ґрунтується на використанні стандартних показників надійності, таких як SAIDI, SAIFI, CAIDI, ASAI, ENS та EENS. Перевага такого підходу полягає в тому, що він дозволяє порівнювати роботу різних систем, операторів або періодів за єдиними критеріями. НКРЕКП використовує SAIDI та SAIFI для моніторингу безперервності електропостачання в Україні, а IEEE 1366 закріплює ці індекси як поширені показники оцінювання розподільних систем [24; 26; 34]. Недоліком індексного підходу є те, що самі по собі показники тривалості та частоти не дають повної фінансової оцінки. Вони показують технічну сторону проблеми, але не визначають повну величину збитку для різних груп споживачів.

Другий підхід є енергетичним і базується на визначенні обсягу енергії, яка не була поставлена споживачам. У такому підході центральним є показник ENS або EENS. У дослідженнях надійності енергосистем EENS трактується як очікувана енергія, яка не буде поставлена через випадкові одиничні або множинні відмови в системі [31; 32; 33]. Перевага енергетичного підходу полягає в тому, що він прямо пов'язує тривалість порушення з величиною навантаження. Це особливо важливо для розподільних мереж, де однакова тривалість відключення може мати різні наслідки залежно від того, чи йдеться про малу побутову групу, торговельний об'єкт, лікарню, насосну станцію або промислове підприємство.

					Кваліфікаційна робота	
		№ док.ум.		1		27

Третій підхід є економічним і полягає в оцінюванні вартості недовідпущеної електроенергії. У цьому випадку застосовуються коефіцієнти питомого збитку, функції збитку споживачів, оцінки вартості перерви, аналіз готовності платити за підвищення надійності або готовності прийняти компенсацію за зниження надійності. У дослідженнях цінності надійності підкреслюється, що витрати від перерв електропостачання можуть включати прямі втрати виробництва, простої, пошкодження матеріалів, витрати на повторний запуск процесів, використання резервних джерел живлення та непрямі соціально-економічні наслідки [35]. Для дипломної роботи економічний підхід є ключовим, оскільки метою є не лише розрахунок недовідпуску, а саме оцінювання очікуваного збитку.

Четвертий підхід є імовірно-економічним. Він поєднує ймовірність аварійних станів, величину недовідпущеної електроенергії та питомий коефіцієнт збитку. Саме цей підхід найбільш повно відповідає темі дипломної роботи. Його суть полягає у тому, що кожний можливий стан системи розглядається як окремий сценарій, для якого визначаються тривалість порушення, потужність відключеного навантаження, обсяг недовідпуску, коефіцієнт збитку та ймовірність реалізації. Після цього для всіх сценаріїв обчислюється математичне сподівання збитку. Такий підхід дозволяє уникнути спрощення, за якого складна система описується одним усередненим аварійним випадком.

Метод перебору коефіцієнтів, який використовується в цій дипломній роботі, належить до параметричних розрахункових методів. Його сутність полягає у послідовній зміні одного або декількох коефіцієнтів моделі в заданому діапазоні з подальшим обчисленням результату для кожної комбінації параметрів. Для задачі очікуваного збитку такими коефіцієнтами можуть бути питомий коефіцієнт збитку, коефіцієнт режимної значущості, коефіцієнт резервування, коефіцієнт невизначеності тривалості відновлення або коефіцієнт категорії споживача. На відміну від аналітичного розрахунку з одним фіксованим значенням, перебір дає змогу побачити діапазон можливих фінансових результатів і визначити, який параметр найбільше впливає на очікуваний збиток.

У загальному вигляді модель очікуваного збитку з урахуванням додаткових коефіцієнтів може бути записана так:

$$M(Z) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot W_i \cdot C_i \cdot S_i \quad (1.8)$$

де S_i - коефіцієнт структурної або резервної забезпеченості, який відображає здатність мережі зменшити недовідпуск за рахунок резервного живлення, секціонування або оперативного перемикання. Якщо система не має резервування, цей коефіцієнт може наближатися до 1. Якщо частина навантаження може бути швидко переведена на інше джерело живлення, коефіцієнт зменшується, що відображає зниження очікуваного збитку [4; 5; 10; 14; 18; 28; 29].

Наукова перевага методу перебору коефіцієнтів полягає в тому, що він дозволяє працювати з невизначеними або варіативними параметрами без їх штучного зведення до одного значення. У реальних умовах складно точно визначити питомий збиток для кожного споживача, оскільки він залежить від технології виробництва, часу доби, сезонності, наявності резервного живлення, фінансової структури підприємства та можливості перенесення операцій. Тому в дипломній роботі доцільно задавати діапазон коефіцієнтів і визначати, як змінюється очікуваний збиток у межах цього діапазону. Наприклад, для промислового навантаження коефіцієнт може бути вищим, для комерційного - середнім, а для побутового - нижчим. Подальший перебір дає змогу встановити, за яких значень коефіцієнтів збиток перевищує економічно допустимий рівень.

Практична цінність такого підходу полягає в тому, що він може бути використаний для обґрунтування технічних рішень. Якщо модель показує, що очікуваний збиток для певної ділянки мережі є високим, це може бути аргументом на користь реконструкції лінії, заміни трансформатора, встановлення автоматичного секціонування, резервного джерела живлення або системи моніторингу. Якщо ж очікуваний збиток є низьким, технічно дорогі заходи можуть бути економічно недоцільними. Таким чином, математичне моделювання

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		29

очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії дозволяє перейти від загального твердження про потребу підвищення надійності до конкретного фінансово обґрунтованого висновку.

1.5 Висновки

Підсумовуючи зміст першого розділу, можна зазначити, що недовідпуск електричної енергії є інтегральним показником, який поєднує технічну, енергетичну та економічну складові надійності електропостачання. Його виникнення зумовлюється технічними відмовами, режимними обмеженнями, плановими відключеннями, зовнішніми впливами та структурними особливостями мережі. Економічний збиток від недовідпуску визначається не лише обсягом непоставленої електроенергії, а й категорією споживача, питомим коефіцієнтом втрат, імовірністю режиму та можливістю резервування. Отже, для подальшого дослідження найбільш доцільним є імовірнісно-економічний підхід, у межах якого очікуваний збиток моделюється через суму зважених сценаріїв, а ключові коефіцієнти аналізуються методом перебору.

2 МЕТОД ПЕРЕБОРУ КОЕФІЦІЄНТІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ОЧІКУВАННЯ ЗБИТКУ ВІД НЕДОВІДПУСКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1 Визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії

Надійність функціонування електроенергетичної системи значною мірою визначається здатністю генерувальних потужностей забезпечувати покриття навантаження споживачів у кожний момент часу. У разі аварійного виведення з роботи частини генерувального обладнання або при зростанні навантаження понад наявну потужність у системі виникає дефіцит потужності. Наслідком такого дефіциту є недовідпуск електричної енергії споживачам, що спричиняє економічний збиток.

У цій роботі для визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії використовується метод перебору коефіцієнтів. Його сутність полягає у побудові рядів розподілу наявної потужності генераторів і навантаження, після чого визначається ряд розподілу дефіциту потужності та розраховується математичне очікування недовідпуску електроенергії.

Вихідними даними для розрахунку є: кількість однотипних генерувальних агрегатів; одинична потужність агрегату; коефіцієнт вимушеного простою; добовий графік навантаження; питомий збиток від недовідпуску електричної енергії.

На рис. 2.1 подано структурну схему визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії методом перебору коефіцієнтів. Відповідно до наведеної схеми вихідними даними для розрахунку є кількість генерувальних агрегатів, їхня номінальна потужність, коефіцієнт вимушеного простою, розрахунковий ступінь потужності, питомий збиток від недовідпуску електричної енергії та добовий графік навантаження. На основі цих даних визначається коефіцієнт готовності генерувального обладнання, формується ряд

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		31

розподілу наявної потужності генераторів та ряд розподілу навантаження. Подальший перебір можливих станів генерації та навантаження дає змогу визначити ряд розподілу дефіциту потужності, який використовується для розрахунку математичного очікування недовідпуску електричної енергії. Завершальним етапом є визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електроенергії та формування результатів розрахунку у вигляді таблиць і графіків.

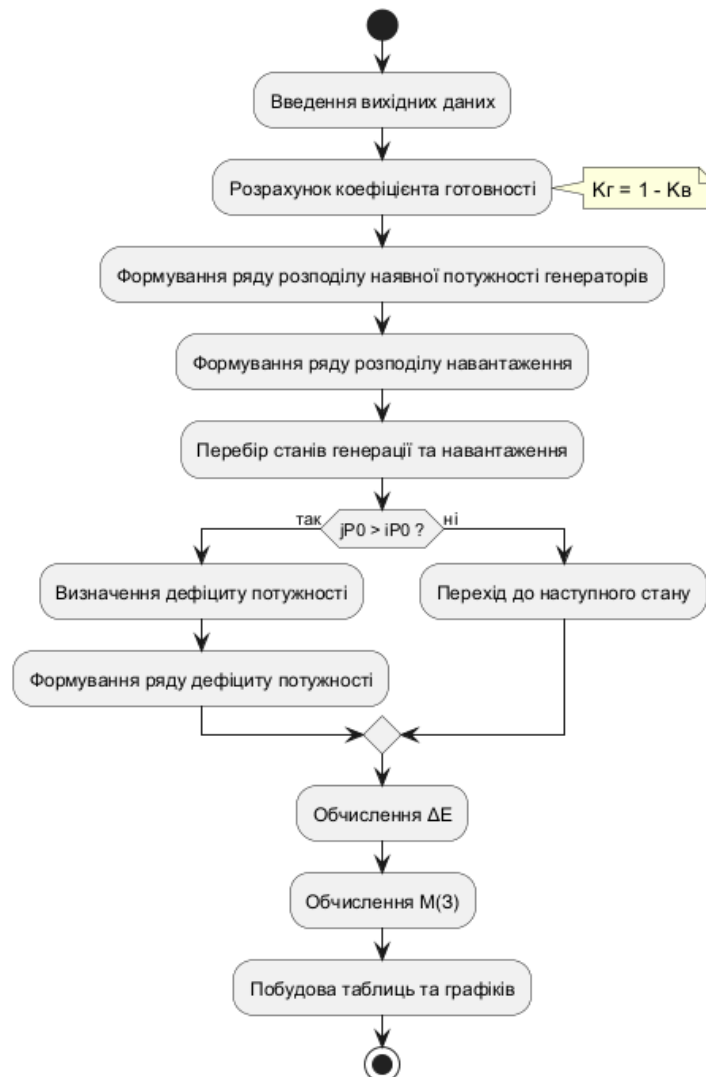


Рисунок 2.1 – Структурна схема визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії методом перебору коефіцієнтів

2.2. Визначення коефіцієнта готовності генерувального агрегату

Кожний генерувальний агрегат може перебувати у двох основних станах: працездатному або аварійному. Імовірність аварійного стану характеризується коефіцієнтом вимушеного простою K_6 . Тоді коефіцієнт готовності агрегату визначається як імовірність перебування агрегату у працездатному стані.

$$K_z = 1 - K_6 \quad (2.1)$$

де K_z – коефіцієнт готовності генерувального агрегату; K_6 – коефіцієнт вимушеного простою агрегату.

Коефіцієнт готовності показує, з якою імовірністю агрегат може брати участь у покритті навантаження. Чим менше значення коефіцієнта вимушеного простою, тим більша готовність генерувального обладнання та тим нижча імовірність виникнення дефіциту потужності.

2.3 Формування ряду розподілу наявної потужності генераторів

Нехай електроенергетична система містить (n) однотипних агрегатів. Якщо в робочому стані перебуває (m) агрегатів, то наявна потужність системи становить:

$$P_{\text{наявн}} = mP_0, \quad (2.2)$$

де $P_{\text{наявн}}$ – наявна генерувальна потужність; m – кількість агрегатів у робочому стані; P_0 – одинична або розрахункова потужність агрегату.

Імовірність того, що з n агрегатів у роботі перебуває саме m агрегатів, визначається за біноміальним законом розподілу.

$$K_{\Gamma}^{mP_0} = C_n^m K_z^m K_6^{n-m}, \quad (2.3)$$

де $K_{\Gamma}^{mP_0}$ – імовірність наявності потужності mP_0 ; C_n^m – кількість можливих комбінацій працездатних агрегатів; K_z – коефіцієнт готовності агрегату; K_6 – коефіцієнт вимушеного простою; n – загальна кількість агрегатів; m – кількість агрегатів у роботі.

					Кваліфікаційна робота	
		№ док.ум.		1		33

Біноміальний коефіцієнт визначається наступним чином:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}. \quad (2.4)$$

Отримані значення утворюють ряд розподілу коефіцієнтів наявної потужності генераторів. Такий ряд показує, з якою імовірністю енергосистема матиме певну кількість працездатних агрегатів і, відповідно, певний рівень доступної генерувальної потужності.

На рис. 2.2 подано схему формування ряду розподілу наявної потужності генераторів за біноміальним законом. Відповідно до наведеної схеми вихідними даними для розрахунку є кількість генерувальних агрегатів, потужність одного агрегату та коефіцієнт вимушеного простою.

На першому етапі визначається коефіцієнт готовності агрегату, який характеризує імовірність його перебування у працездатному стані. Далі для кожної можливої кількості працездатних агрегатів визначається наявна потужність електростанції та обчислюється імовірність відповідного стану на основі біноміального закону розподілу. Сукупність отриманих значень утворює ряд розподілу наявної потужності генераторів, який використовується для подальшого визначення імовірності дефіциту потужності, математичного очікування недовідпуску електричної енергії та очікуваного економічного збитку.

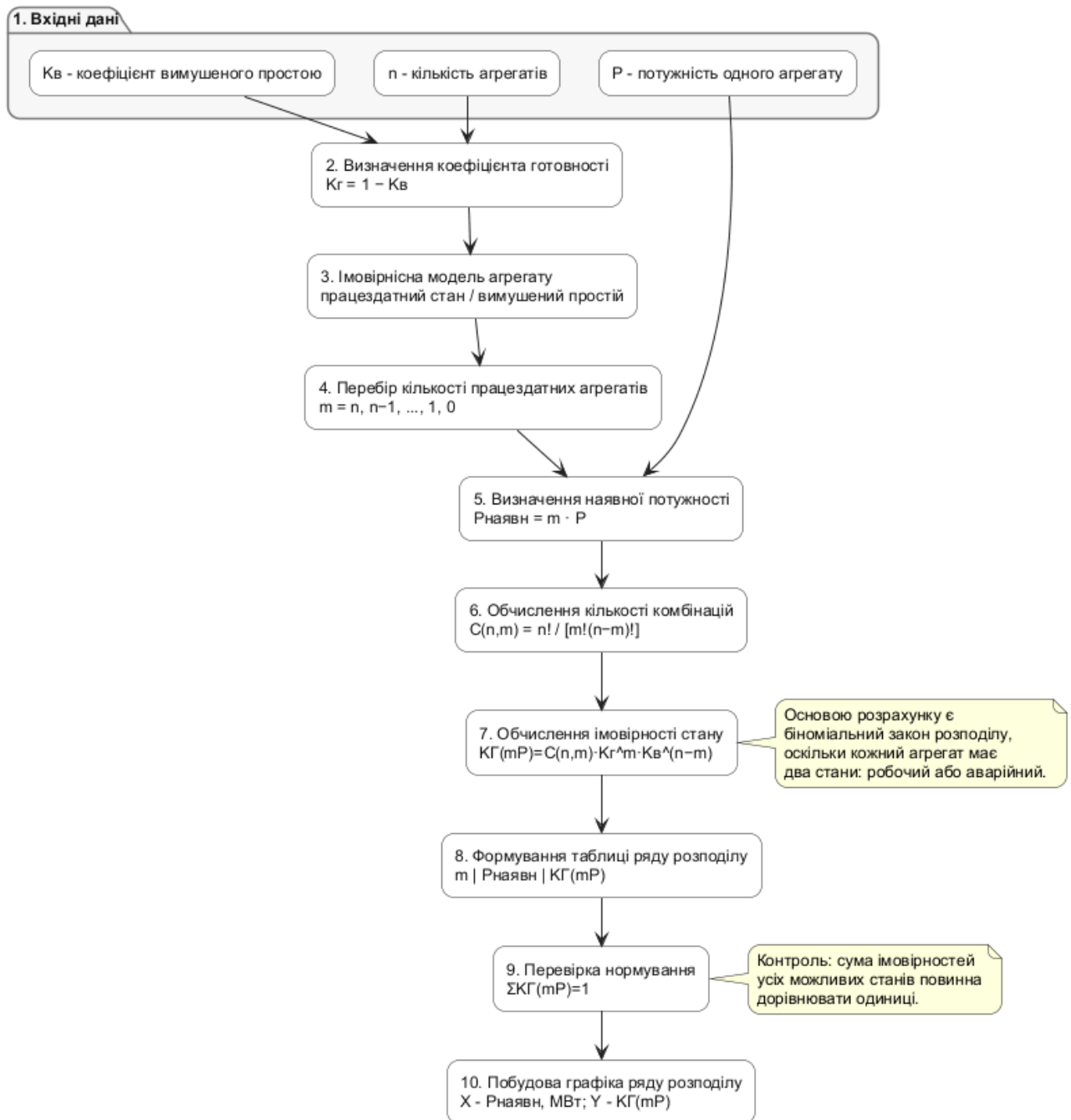


Рисунок 2.2 – Формування ряду розподілу наявної потужності генераторів за біноміальним законом

2.4 Формування ряду розподілу навантаження

Навантаження споживачів задається добовим графіком $P_n(t)$. Для виконання розрахунків добовий графік подається у вигляді ступеневої залежності, де кожному рівню навантаження відповідає певна тривалість протягом доби.

Якщо навантаження має значення P_0 протягом часу $t(jP_0)$, то імовірність існування такого рівня навантаження визначається як частка відповідної тривалості у добі.

$$K_H^{jP_0} = \frac{t(jP_0)}{24}, \quad (2.5)$$

де $K_H^{jP_0}$ – імовірність навантаження jP_0 ; $t(jP_0)$ – тривалість відповідного рівня навантаження, год; j – номер ступеня навантаження; P_0 – розрахунковий щабель потужності.

Сума всіх коефіцієнтів навантаження повинна дорівнювати одиниці.

$$\sum_{j=1}^J K_H^{jP_0} = 1, \quad (2.6)$$

де J – кількість ступенів навантаження у добовому графіку.

На рисунку 2.3 подано типові добові графіки навантаження електроенергетичної системи. Представлені залежності відображають характер зміни споживання електричної енергії протягом доби для різних категорій споживачів. Для побутового навантаження характерними є ранковий та вечірній максимуми, що обумовлено активізацією використання електроприладів населенням.

Промисловий графік навантаження характеризується більш рівномірним споживанням електроенергії з максимальними значеннями у період робочих змін. Змішаний графік поєднує особливості побутового та промислового навантаження і є найбільш наближеним до реальних режимів роботи об'єднаних електроенергетичних систем.

Аналіз добових графіків навантаження є необхідним етапом формування ряду розподілу навантаження та подальшого визначення показників надійності електропостачання методом перебору коефіцієнтів.

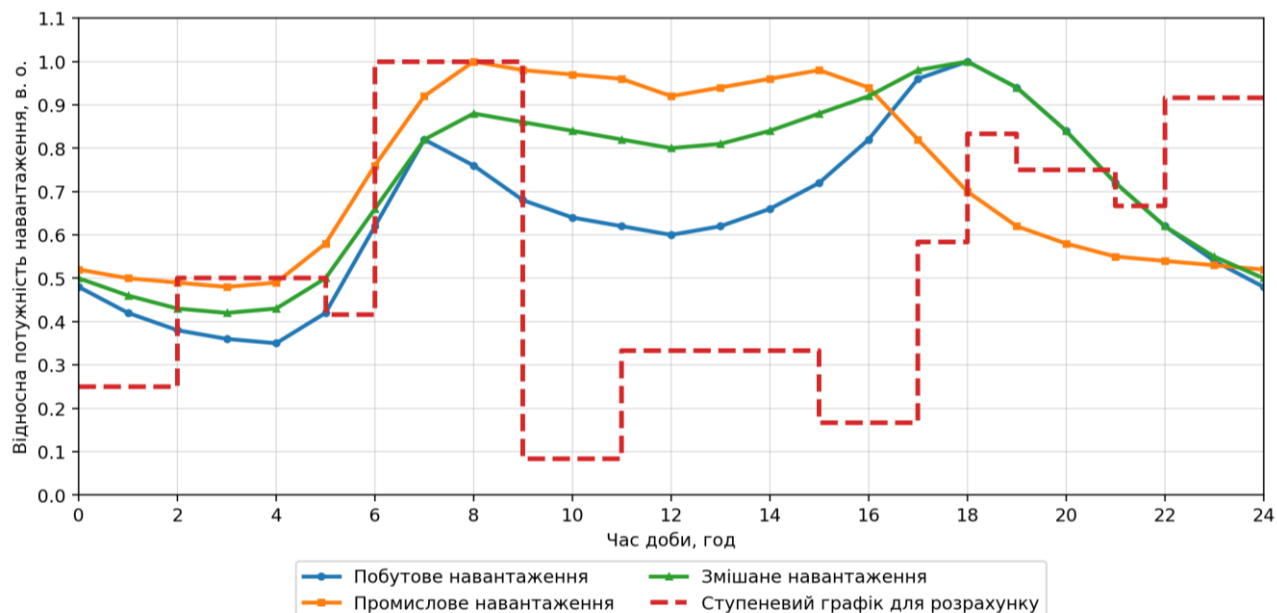


Рисунок 2.3 – Добовий графік навантаження електроенергетичної системи

2.5 Умова виникнення дефіциту потужності

Дефіцит потужності виникає у випадку, коли навантаження перевищує наявну генерувальну потужність.

$$jP_0 > iP_0, \quad (2.7)$$

де jP_0 – потужність навантаження; iP_0 – наявна потужність генераторів.

Величина дефіциту потужності визначається як різниця між навантаженням і наявною потужністю.

$$\Delta P = jP_0 - iP_0 \quad (2.8)$$

або

$$\Delta P = (j - i)P_0 = kP_0, \quad (2.9)$$

де

$$k = j - i \quad (2.10)$$

тут k – кількість розрахункових ступенів дефіциту потужності.

2.6. Розрахунок імовірності дефіциту потужності

Для кожного можливого значення дефіциту kP_0 необхідно визначити імовірність його виникнення. Така імовірність залежить одночасно від імовірності певного рівня навантаження та імовірності певного рівня наявної генерувальної потужності.

Імовірність дефіциту потужності визначається за формулою:

$$K_D^{kP_0} = \sum_j^J K_H^{jP_0} \cdot K_G^{(j-k)P_0}, \quad (2.11)$$

де $K_D^{kP_0}$ – імовірність дефіциту потужності величиною kP_0 ; $K_H^{jP_0}$ – імовірність навантаження jP_0 ; $K_G^{(j-k)P_0}$ – імовірність наявної потужності генераторів $(j-k)P_0$.

Ряд розподілу дефіциту потужності є основою для подальшого визначення математичного очікування недовідпуску електричної енергії.

На рис. 2.4 подано схему формування ряду розподілу дефіциту потужності, який є одним із основних етапів методу перебору коефіцієнтів. Формування зазначеного ряду здійснюється на основі спільного аналізу ряду розподілу наявної потужності генераторів та ряду розподілу навантаження. Для кожного можливого поєднання станів генерації та навантаження перевіряється умова виникнення дефіциту потужності. У випадку, коли навантаження перевищує наявну генерувальну потужність, визначається величина дефіциту та обчислюється імовірність відповідного стану як добуток коефіцієнтів розподілу генерації і навантаження. Отримані значення групуються за однаковими рівнями дефіциту потужності, що дозволяє сформувати ряд розподілу дефіциту КД(kP_0).

Надалі цей ряд використовується для визначення математичного очікування недовідпуску електричної енергії та математичного очікування економічного збитку від порушення балансу потужності в електроенергетичній системі.



Рисунок 2.4 – Формування ряду розподілу дефіциту потужності

2.7 Визначення математичного очікування недовідпуску електричної енергії

Математичне очікування недовідпуску електричної енергії протягом року визначається з урахуванням усіх можливих значень дефіциту потужності та їх імовірностей.

$$\Delta E = 8760 \cdot P_0 \sum_k k \cdot K_{\text{д}}^{kP_0}, \quad (2.12)$$

де ΔE – математичне очікування недовідпуску електричної енергії за рік; 8760 – кількість годин у році; P_0 – розрахунковий ступінь потужності; k – номер ступеня дефіциту потужності; $K_{\text{д}}^{kP_0}$ – імовірність дефіциту потужності величиною kP_0 .

Формула 2.12 показує, що недовідпуск електричної енергії залежить не лише від величини можливого дефіциту, а й від імовірності його виникнення. Саме тому малі за величиною, але часті дефіцити можуть мати істотний вплив на очікуване значення недовідпуску.

2.8 Визначення математичного очікування збитку

Для переходу від енергетичного показника до економічного використовується питомий збиток від недовідпуску електричної енергії Z_0 . Він показує, яку економічну шкоду спричиняє недопостачання одиниці електроенергії.

Математичне очікування збитку визначається за формулою:

$$M(3) = \Delta E \cdot Z_0, \quad (2.13)$$

де $M(3)$ – математичне очікування збитку від недовідпуску електричної енергії; ΔE – математичне очікування недовідпуску електричної енергії; Z_0 – питомий збиток від недовідпуску електричної енергії.

					Кваліфікаційна робота	
		№ док.ум.		1		40

У розгорнутому вигляді формула математичного очікування збитку має такий вигляд.

$$M(З) = 8760 \cdot P_0 \cdot Z_0 \sum_k^K k \cdot K_{\text{д}}^{kP_0} . \quad (2.14)$$

Формула 2.14 є узагальненою розрахунковою залежністю для визначення очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії методом перебору коефіцієнтів.

2.9 Алгоритм розрахунку методом перебору коефіцієнтів

Алгоритм розрахунку математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії включає такі етапи:

- 1) вибір розрахункового ступеня потужності P_0 ;
- 2) приведення добового графіка навантаження до ступенів, кратних P_0 ;
- 3) визначення коефіцієнта готовності агрегату за коефіцієнтом вимушеного простою;
- 4) формування ряду розподілу наявної потужності генераторів за біноміальним законом;
- 5) формування ряду розподілу навантаження за добовим графіком навантаження;
- 6) визначення імовірності виникнення дефіциту потужності для кожного можливого значення;
- 7) розрахунок математичного очікування недовідпуску електричної енергії.
- 8) розрахунок математичного очікування збитку.

У формалізованому вигляді алгоритм можна подати наступною математичною моделлю:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_z = 1 - K_\theta \\ K_\Gamma^{mP_0} = C_n^m \cdot K_z^m \cdot K_\theta^{n-m} \\ K_H^{jP_0} = \frac{t(jP_0)}{24} \\ K_D^{kP_0} = \sum_j^J K_H^{jP_0} \cdot K_\Gamma^{(j-k)P_0} \\ M(3) = 8760 \cdot P_0 \cdot Z_0 \sum_k^K k \cdot K_D^{kP_0} \end{array} \right\} \quad (2.15)$$

2.10 Приклад інтерпретації результатів розрахунку

Якщо в результаті розрахунку отримано ряд коефіцієнтів дефіциту потужності, то кожний його елемент показує імовірність виникнення відповідного рівня дефіциту. Наприклад, якщо $K_D^{kP_0}$ має найбільше значення, то найімовірнішим є дефіцит потужності в один розрахунковий ступінь.

Для практичного аналізу доцільно порівнювати:

- 1) найбільш імовірний дефіцит потужності;
- 2) максимальний можливий дефіцит;
- 3) внесок кожного рівня дефіциту у сумарний недовідпуск;
- 4) вплив питомого збитку на величину математичного очікування збитку.

Сумарна імовірність виникнення будь-якого дефіциту потужності може бути визначена як:

$$P_{\text{оef}} = \sum_{k=1}^K K_D^{kP_0} \quad (2.16)$$

де $P_{\text{оef}}$ – сумарна імовірність виникнення дефіциту потужності.

Частка окремого рівня дефіциту у формуванні математичного очікування недовідпуску може бути визначена за формулою:

$$d_k = \frac{k K_D^{kP_0}}{\sum_k^K k K_D^{kP_0}} 100\% \quad (2.17)$$

де d_k – частка дефіциту kP_0 у сумарному математичному очікуванні недовідпуску електричної енергії.

2.11 Наукове значення методу перебору коефіцієнтів

Метод перебору коефіцієнтів має важливе значення для аналізу надійності електроенергетичних систем, оскільки дозволяє врахувати імовірнісний характер роботи генерувального обладнання та змінність навантаження. Його застосування дає можливість перейти від детермінованого розгляду енергосистеми до імовірнісної оцінки наслідків можливих аварійних станів.

Перевагами методу є: можливість урахування різних станів генерувального обладнання; використання добового графіка навантаження; визначення імовірності дефіциту потужності; розрахунок очікуваного недовідпуску електроенергії; перехід до економічної оцінки збитків; придатність для програмної реалізації.

Обмеження методу пов'язані з тим, що він потребує дискретизації графіка навантаження та припущення про незалежність станів генерувальних агрегатів. Крім того, точність результатів залежить від правильності вибору розрахункового ступеня потужності. Зменшення цього ступеня підвищує точність розрахунку, але збільшує кількість обчислювальних операцій.

2.12 Висновки

У другому розділі розглянуто теоретичні та математичні основи методу перебору коефіцієнтів для визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії. Показано, що метод ґрунтується на побудові рядів розподілу наявної потужності генераторів і навантаження. На основі цих рядів визначається ряд розподілу дефіциту потужності.

Для опису імовірності працездатного стану генерувальних агрегатів використовується коефіцієнт готовності, а для формування ряду наявної

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		43

потужності — біноміальний закон розподілу. Імовірність навантаження визначається за тривалістю відповідних ступенів добового графіка. У разі перевищення навантаження над наявною потужністю виникає дефіцит, імовірність якого визначається як добуток відповідних імовірностей станів генерації та навантаження.

Отриманий ряд дефіциту потужності дає змогу визначити математичне очікування недовідпуску електроенергії за рік, а через питомий збиток — математичне очікування економічного збитку. Таким чином, метод перебору коефіцієнтів є ефективним інструментом для оцінювання надійності електроенергетичних систем та економічного обґрунтування заходів щодо зменшення недовідпуску електричної енергії.

3 АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ ЗА МЕТОДОМ ПЕРЕБОРУ КОЕФІЦІЄНТІВ НА ОСНОВІ РОЗРОБЛЕНОЇ ПРОГРАМИ

3.1. Призначення програмного засобу

Автоматизація розрахунків за методом перебору коефіцієнтів є необхідною умовою підвищення точності, швидкості та зручності визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії. Ручне виконання такого розрахунку потребує багаторазового формування рядів розподілу наявної потужності генераторів, рядів навантаження, рядів дефіциту потужності, а також подальшого обчислення математичного очікування недовідпуску електроенергії та збитку.

Розроблена програма призначена для автоматизації таких етапів:

- введення вихідних даних енергосистеми;
- перевірки коректності добового графіка навантаження;
- обчислення коефіцієнта готовності генерувального агрегату;
- формування ряду розподілу наявної потужності генераторів;
- формування ряду розподілу навантаження;
- перебору можливих станів генерації та навантаження;
- визначення ряду дефіциту потужності;
- розрахунку математичного очікування недовідпуску електричної енергії;
- розрахунку математичного очікування збитку;
- побудови графіків і формування табличних результатів.

Програмний засіб реалізовано мовою Python із використанням графічного інтерфейсу користувача. Для побудови графіків використовується бібліотека Matplotlib, для формування табличних результатів — Pandas, а для створення віконного інтерфейсу — Tkinter.

На рисунку 3.1 проілюстровано головне вікно програми з полями введення кількості агрегатів, потужності одного агрегату, розрахункового ступеня

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		45

потужності, коефіцієнта вимушеного простою, питомого збитку, а також із полями для введення добового графіка навантаження.

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд головного вікна програми

3.2. Структура вхідних даних програми

Для виконання розрахунку користувач задає основні параметри електроенергетичної системи. До них належать кількість однотипних генерувальних агрегатів, одинична потужність агрегату, розрахунковий ступінь потужності, коефіцієнт вимушеного простою, питомий збиток від недовідпуску електроенергії та добовий графік навантаження.

Потужність одного агрегату визначає максимальну генерувальну потужність системи за умови працездатності всіх блоків. Розрахунковий ступінь потужності використовується для дискретизації графіка навантаження та формування рядів розподілу.

Добовий графік навантаження вводиться у вигляді двох послідовностей: тривалостей ступенів навантаження та відповідних значень потужності

споживання. Сума тривалостей усіх ступенів повинна дорівнювати 24 годинам. Це є обов'язковою умовою коректного формування ряду розподілу навантаження.

На рисунку 3.2 проілюстровано заповнені поля програми для контрольного прикладу: кількість агрегатів, потужність одного блоку, тривалості ступенів навантаження та відповідні значення навантажень.

Метод перебору коефіцієнтів – розрахунок $M(3)$

Вхідні дані

Кількість агрегатів n:	6
Потужність одного агрегату, МВт:	100
Розрахунковий ступінь P_0 , МВт:	50
Коефіцієнт вимушеного простою K_v :	0.04
Питомий збиток Z_0 , грн/(кВт·год):	3.27

Добовий графік навантаження

Тривалості t, год:

2	3	1	3	2	4	2	1	1	2	1	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Навантаження P_n , МВт:

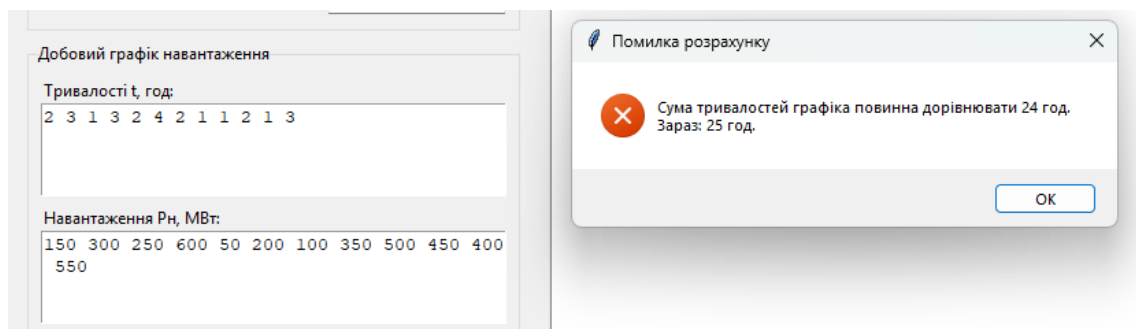
150	300	250	600	50	200	100	350	500	450	400	550
-----	-----	-----	-----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Формат: числа через пробіл, кому або крапку з комою.
Сума тривалостей повинна дорівнювати 24 год.
Усі P_n мають бути кратні P_0 .

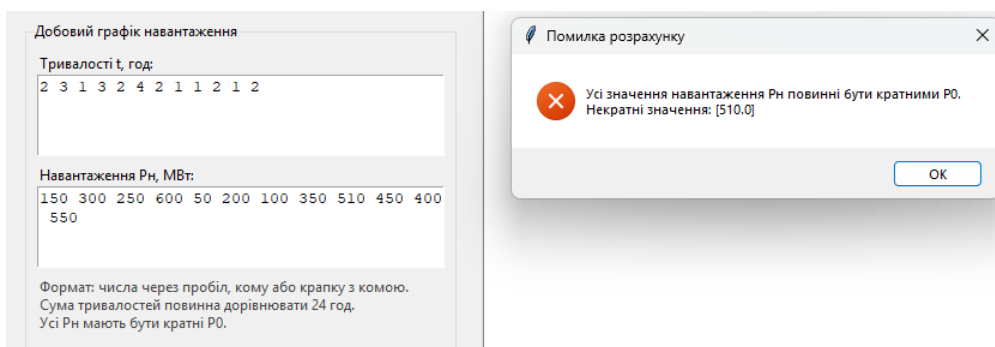
Рисунок 3.2 – Вікно введення вихідних даних для розрахунку

Перед виконанням розрахунку програма здійснює перевірку вхідних даних. Зокрема перевіряється, чи є кількість агрегатів додатним цілим числом, чи не перевищує коефіцієнт вимушеного простою одиницю, чи дорівнює сума тривалостей графіка 24 годинам, а також чи кратні значення навантаження вибраному розрахунковому ступеню потужності.

На рисунку 3.3 а) проілюстровано приклад повідомлення, яке з'являється, якщо сума тривалостей графіка навантаження не дорівнює 24 годинам, на рис. 3.3 б) якщо окремі значення навантаження не кратні розрахунковому ступеню.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Повідомлення програми про помилку у вхідних даних

3.3 Алгоритм роботи програми

Алгоритм роботи програми відповідає методиці розрахунку математичного очікування збитку методом перебору коефіцієнтів. Після введення вихідних даних програма визначає коефіцієнт готовності агрегату за формулою (2.1).

Далі формується ряд розподілу наявної потужності генераторів. Для цього програма послідовно перебирає можливу кількість працездатних агрегатів від (n) до 0 та для кожного стану обчислює імовірність його виникнення за біноміальним законом (2.3).

Після цього програма формує ряд розподілу навантаження. Для кожного рівня навантаження визначається сумарна тривалість його існування протягом

доби, а потім розраховується відповідний коефіцієнт навантаження за формулою (2.5)

Основною частиною алгоритму є перебір усіх можливих пар станів «навантаження — генерація». Для кожної пари перевіряється умова виникнення дефіциту потужності за формулою (2.7).

Якщо ця умова виконується, програма визначає ступінь дефіциту за формулою (2.10) та додає відповідний внесок до імовірності дефіциту потужності за формулою (2.11)

Після завершення перебору програма обчислює математичне очікування недовідпуску електричної енергії за формулою (2.12).

На завершальному етапі визначається математичне очікування збитку за формулою (2.13).

На рисунку 3.4 подано блок-схему з такими основними елементами: введення даних, перевірка суми тривалостей, перевірка кратності навантаження, розрахунок математичного очікування збитку, виведення результатів.

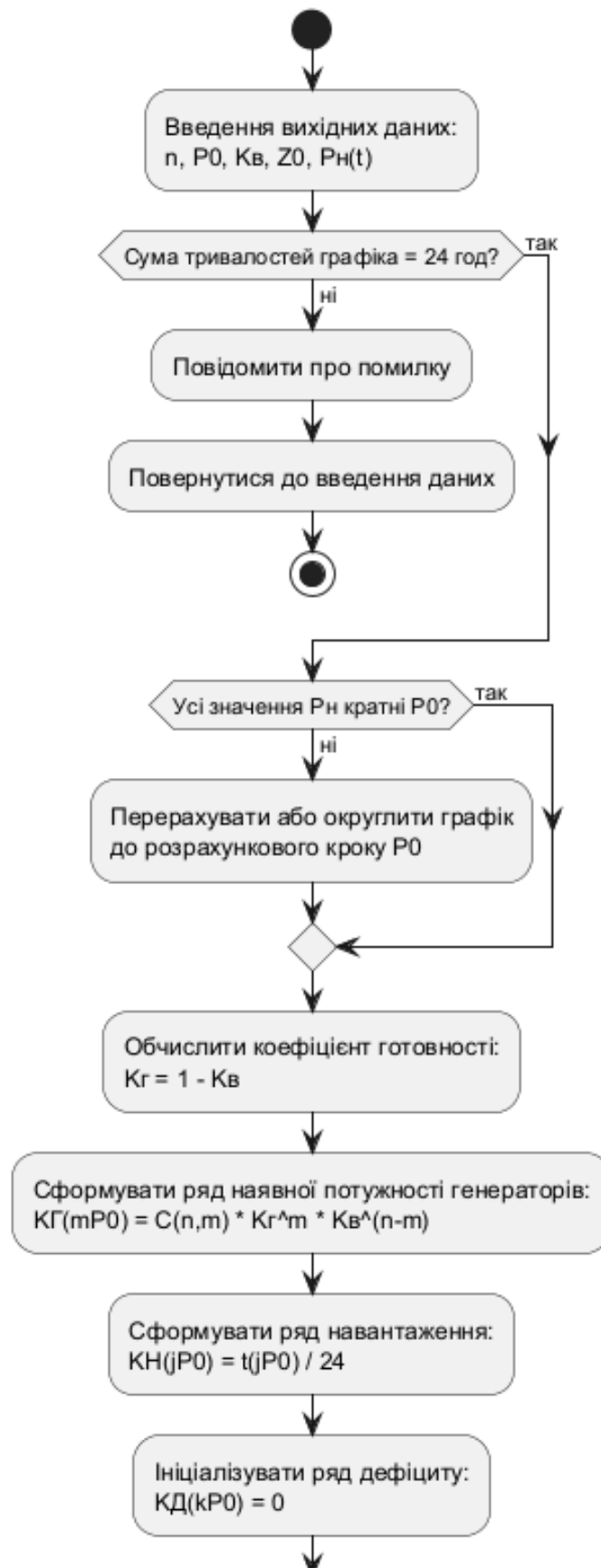




Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму роботи програми з розгалуженням

3.4 Формування таблиці ряду наявної потужності генераторів

Після натискання кнопки розрахунку програма автоматично формує таблицю ряду наявної потужності генераторів. У цій таблиці відображається кількість агрегатів у роботі, відповідна доступна потужність та імовірність такого стану.

Таблиця ряду генерації дозволяє оцінити, які стани генерувального обладнання є найбільш імовірними. Найбільшу імовірність, як правило, має стан, коли всі або майже всі агрегати перебувають у роботі. Стани з великою кількістю аварійно вимкнених агрегатів мають меншу імовірність, однак саме вони можуть формувати значний дефіцит потужності.

На рисунку 3.5 проілюстровано вкладку або таблицю програми, де наведено кількість агрегатів у роботі, наявну потужність у МВт та імовірність відповідного стану K_p .

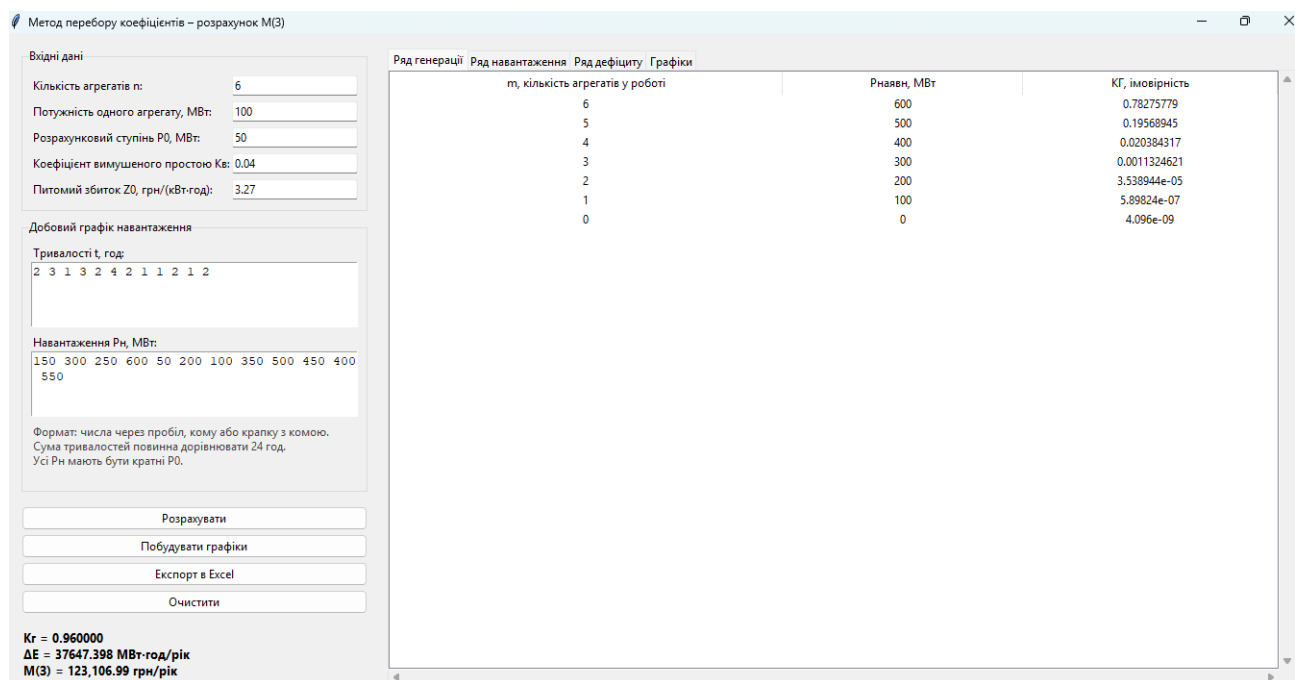


Рисунок 3.5 – Таблиця ряду розподілу наявної потужності генераторів у програмі

Для більшої наочності програма будує графік ряду розподілу наявної потужності генераторів. На осі абсцис відкладається наявна потужність, а на осі ординат — імовірність відповідного стану.

На рисунку 3.6 проілюстровано стовпчикову діаграму, де кожний стовпчик відповідає певному рівню доступної генерувальної потужності, а його висота відображає імовірність цього стану.

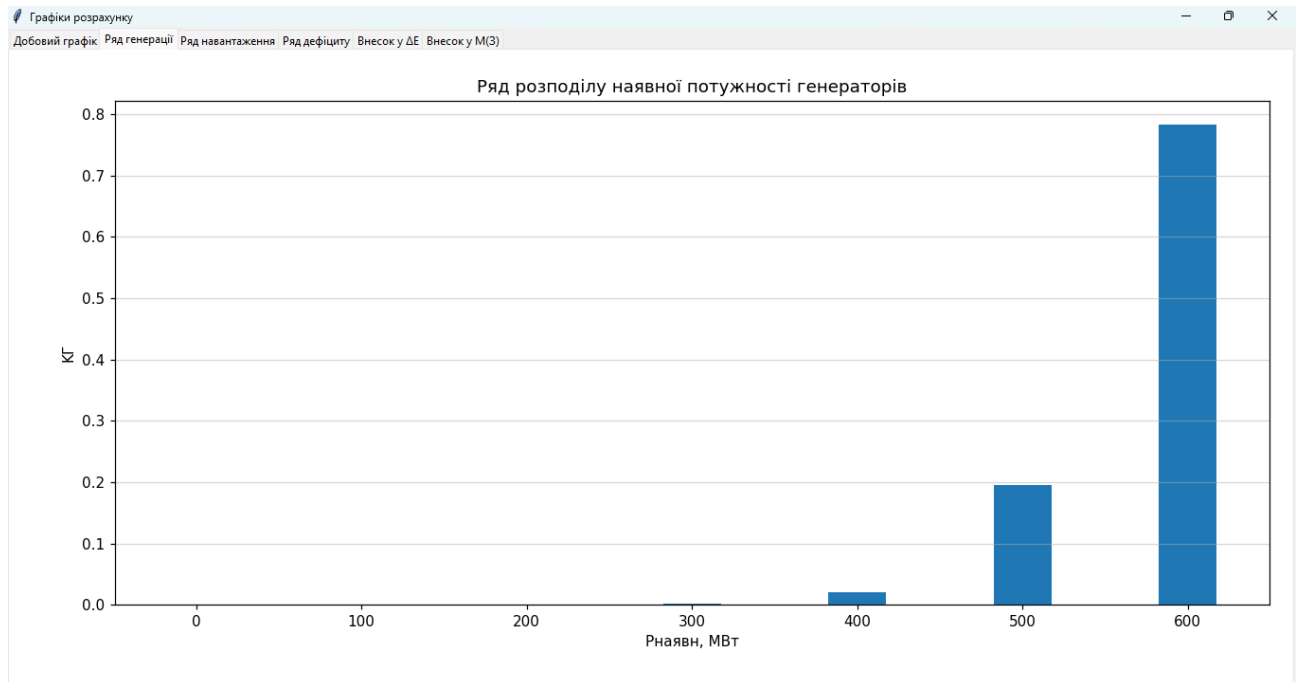


Рисунок 3.6 – Графік ряду розподілу наявної потужності генераторів

3.5 Формування таблиці та графіка ряду навантаження

Другим важливим результатом автоматизованого розрахунку є ряд розподілу навантаження. Програма аналізує введений добовий графік і для кожного рівня навантаження визначає сумарну тривалість його існування протягом доби. На основі цього обчислюється імовірність відповідного рівня навантаження.

Ряд навантаження має важливе значення, оскільки саме він показує, які рівні споживання електроенергії найчастіше трапляються протягом доби. Чим довше існує певний рівень навантаження, тим більший його внесок у розрахунок імовірності дефіциту потужності.

На рисунку 3.7 подано таблицю, у якій наведено значення потужності навантаження jP_0 , тривалість відповідного ступеня $t(jP_0)$ та коефіцієнт навантаження $K_H^{jP_0}$.

					Кваліфікаційна робота	
		№ док.ум.		1		53

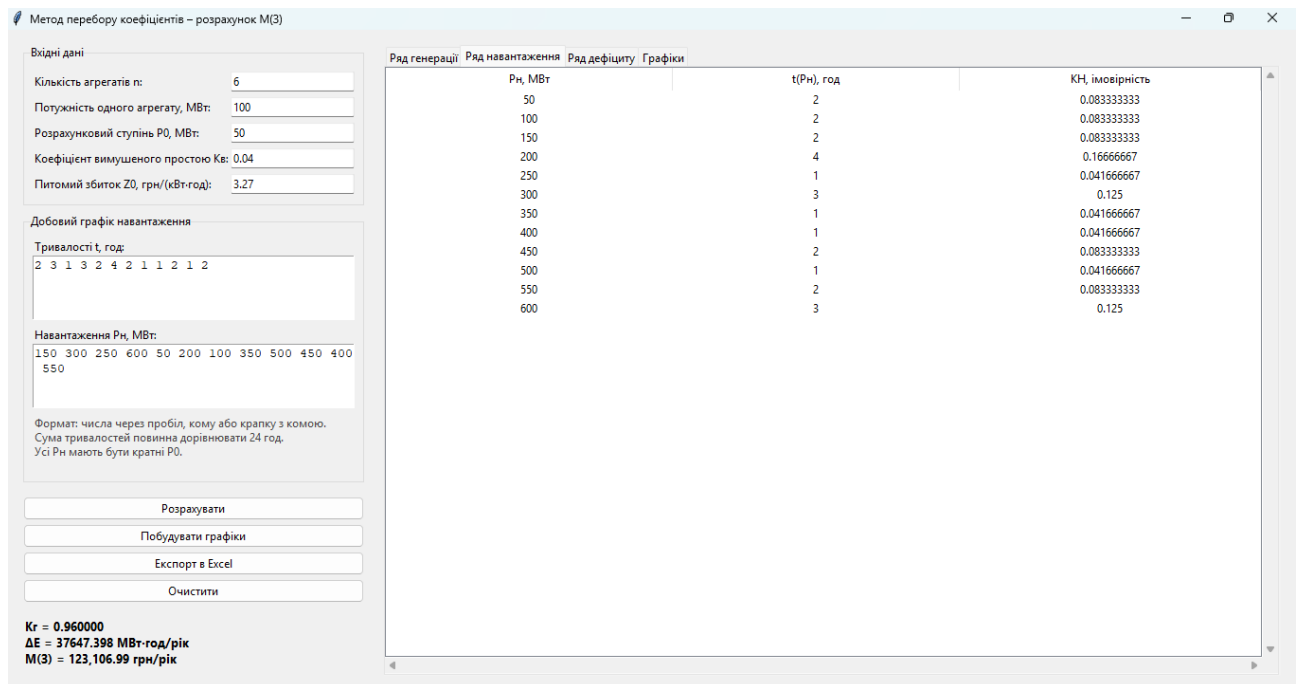


Рисунок 3.7 – Таблиця ряду розподілу навантаження у програмі

На рисунку 3.8 проілюстровано ступеневий графік зміни навантаження протягом 24 годин. На осі абсцис має бути час у годинах, на осі ординат — потужність навантаження у МВт.

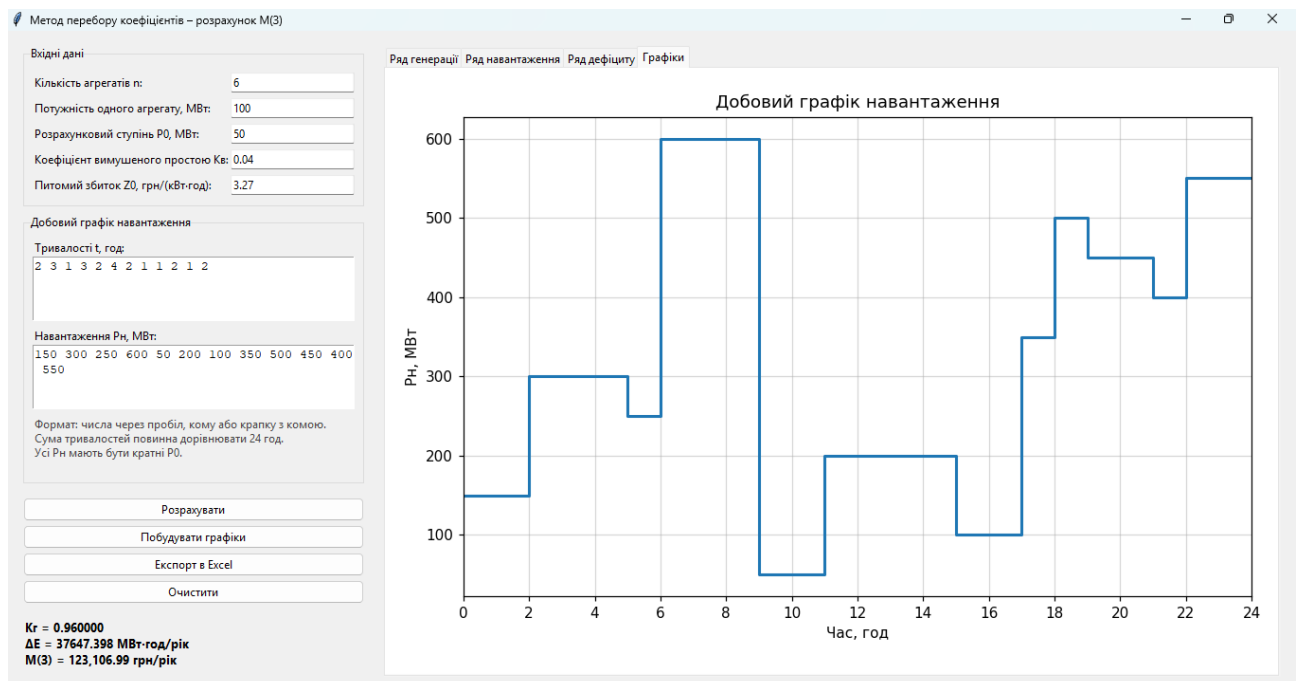


Рисунок 3.8 – Добовий графік навантаження, побудований програмою

На рисунку 3.9 проілюстровано стовпчикову діаграму, де кожний стовпчик відповідає окремому рівню навантаження, а висота стовпчика показує імовірність або частку часу існування цього навантаження протягом доби.

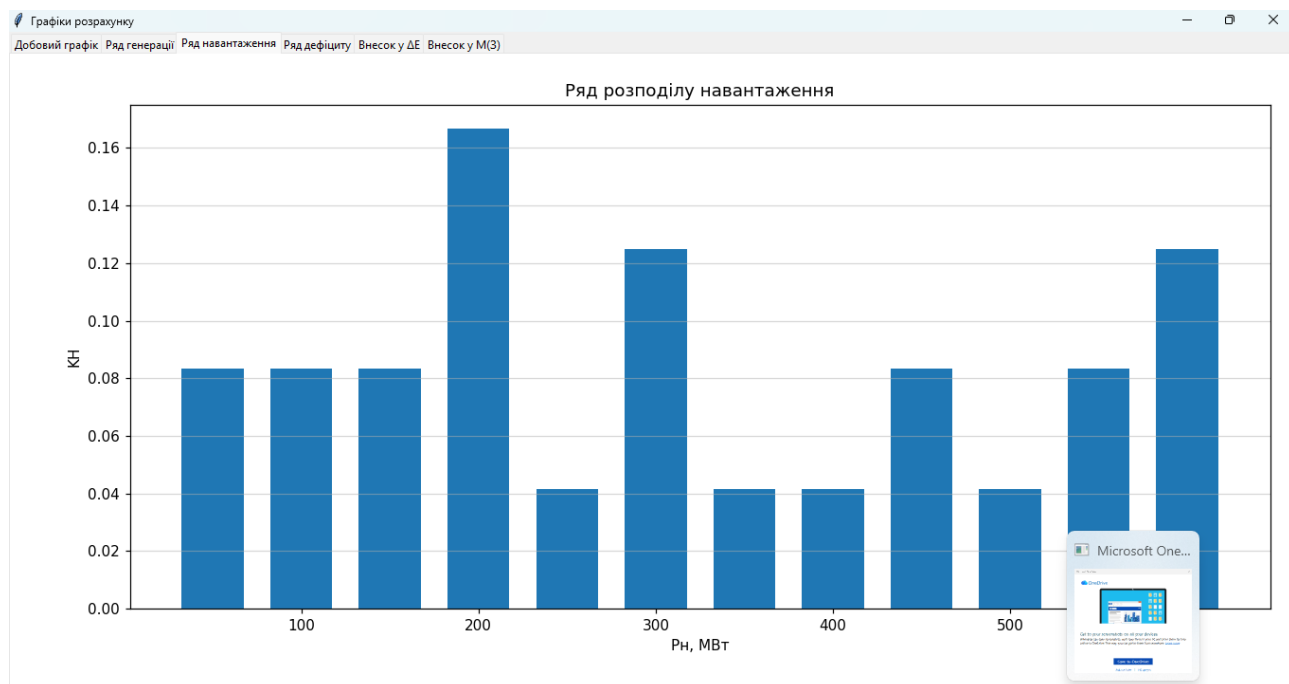


Рисунок 3.9 – Графік ряду розподілу навантаження

3.6 Формування ряду дефіциту потужності

Ряд дефіциту потужності є основним проміжним результатом розрахунку. Він формується шляхом перебору всіх можливих поєднань рівнів навантаження та доступної генерувальної потужності. Якщо навантаження перевищує наявну потужність, програма визначає величину дефіциту і додає до відповідного ступеня імовірність такого поєднання станів.

У таблиці ряду дефіциту потужності відображаються номер ступеня дефіциту k , дефіцит потужності kP_0 , імовірність дефіциту $K_{\text{д}}^{kP_0}$, внесок у математичне очікування недовідпуску електроенергії та внесок у очікуваний збиток.

На рисунку 3.10 проілюстровано таблицю результатів, у якій наведено ці величини та внесок у ΔE та $M(3)$.

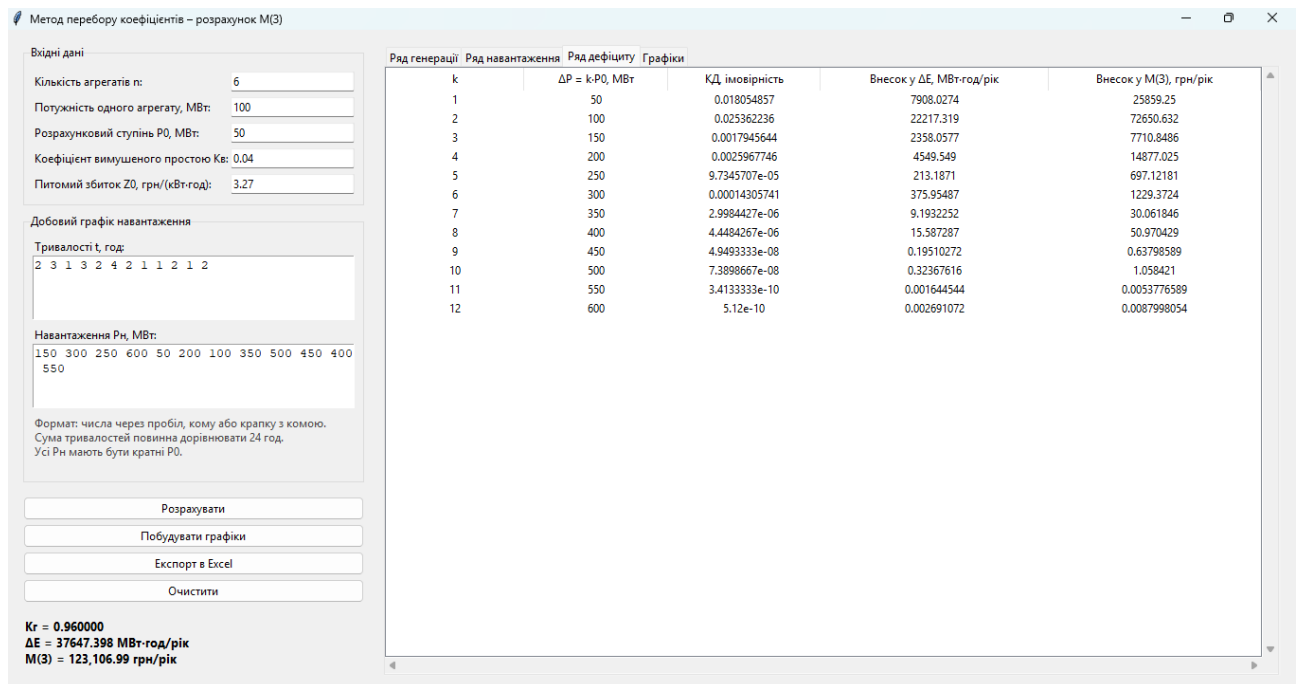


Рисунок 3.10 – Таблиця ряду розподілу дефіциту потужності у програмі

На рисунку 3.11 потрібно показати стовпчикову діаграму, де на осі абсцис відкладається дефіцит потужності у МВт, а на осі ординат — імовірність виникнення відповідного дефіциту.

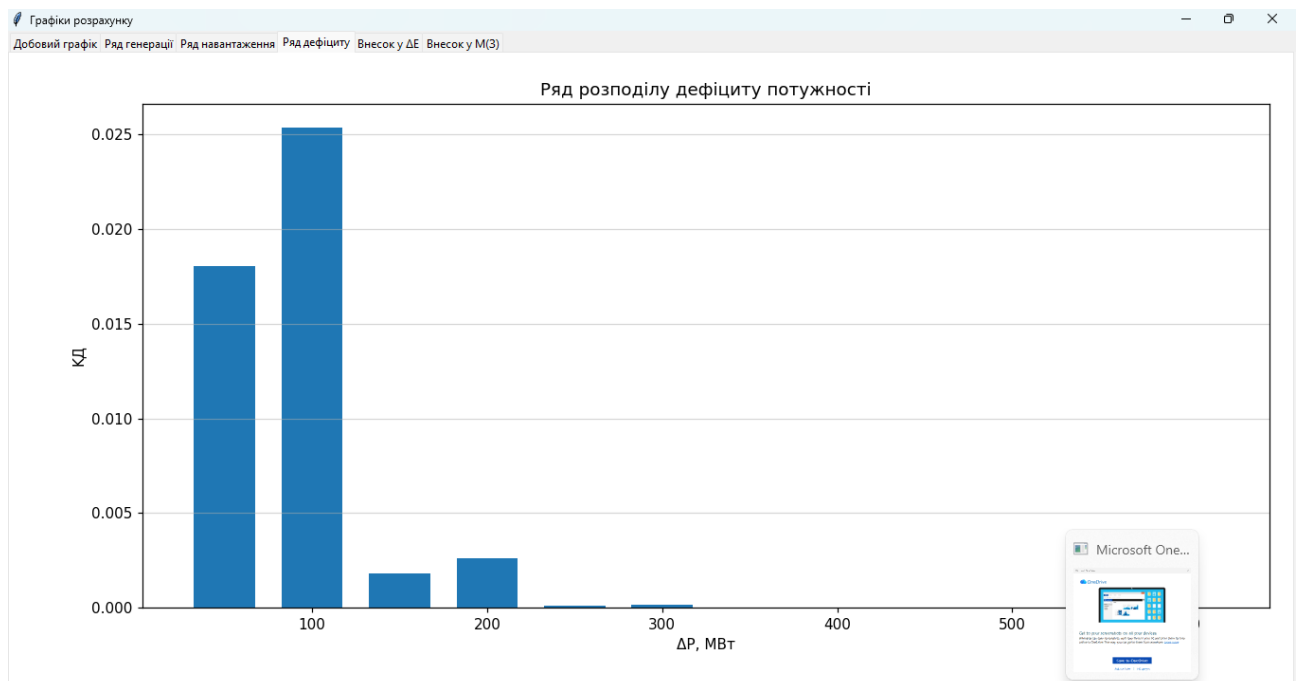


Рисунок 3.11 – Графік ряду розподілу дефіциту потужності

3.7 Розрахунок математичного очікування недовідпуску електроенергії та збитку

Після формування ряду дефіциту потужності програма обчислює математичне очікування недовідпуску електричної енергії за рік. Для кожного ступеня дефіциту визначається його внесок у сумарний недовідпуск. Чим більший добуток величини дефіциту на його імовірність, тим більший внесок відповідного ступеня у загальний результат.

На рисунку 3.12 проілюстровано стовпчикову діаграму, де на осі абсцис відкладається величина дефіциту потужності, а на осі ординат — внесок кожного ступеня дефіциту у ΔE , МВт·год/рік.

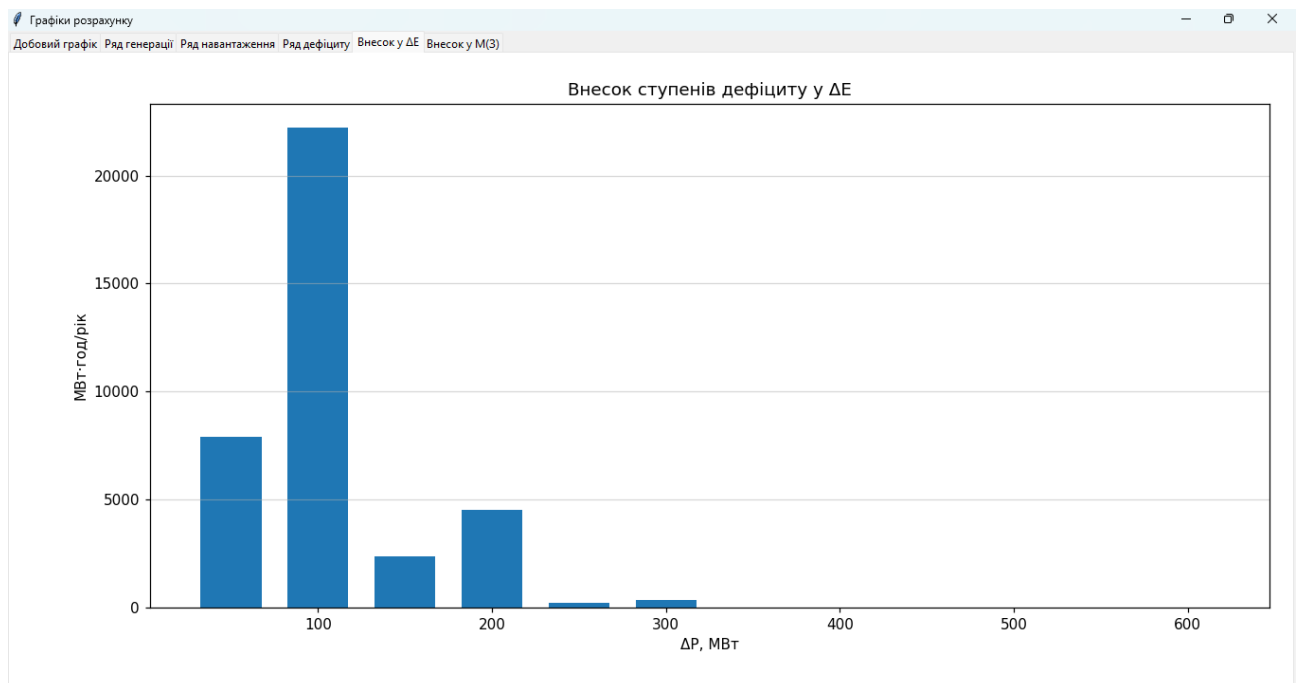


Рисунок 3.12 – Графік внеску ступенів дефіциту у математичне очікування недовідпуску електроенергії

Після визначення ΔE програма множить отриманий результат на питомий збиток Z_0 . У результаті отримується математичне очікування збитку від недовідпуску електричної енергії.

На рисунку 3.13 проілюстровано стовпчикову діаграму, де на осі абсцис відкладається дефіцит потужності, а на осі ординат — внесок відповідного ступеня дефіциту у величину $M(3)$, грн/рік.

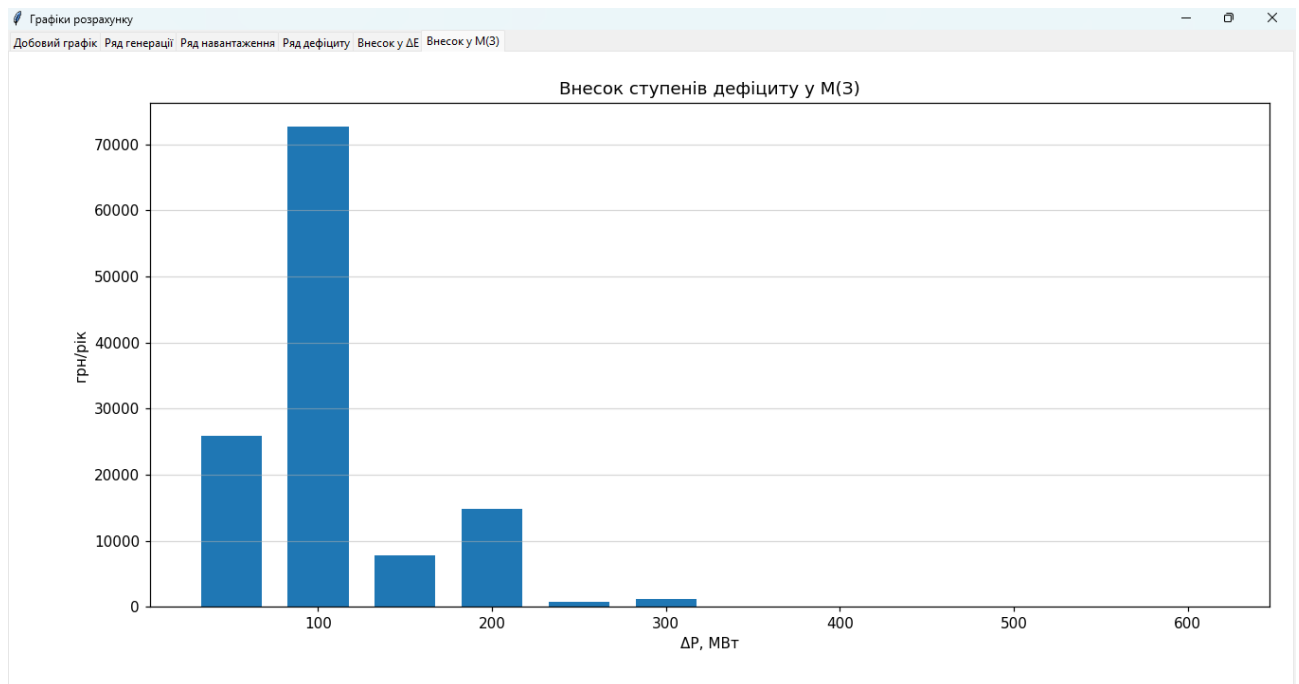


Рисунок 3.13 – Графік внеску ступенів дефіциту в очікуваний збиток

У підсумковій частині інтерфейсу програма виводить значення коефіцієнта готовності, математичного очікування недовідпуску електроенергії та математичного очікування збитку.

На рисунку 3.14 проілюстровано область вікна програми, де виведено значення $K_r^{(j-k)P_0}$, ΔE та $M(3)$.

$K_r = 0.960000$

$\Delta E = 37647.398$ МВт·год/рік

$M(3) = 123,106.99$ грн/рік

Рисунок 3.14 – Підсумкові результати розрахунку у вікні програми

3.8. Експорт результатів розрахунку

Для подальшого аналізу та документування результатів у програмі передбачено можливість експорту розрахункових таблиць до файлу Excel. До експортованого файлу вносяться підсумкові показники, ряд наявної потужності генераторів, ряд навантаження та ряд дефіциту потужності.

Ця функція є важливою для підготовки звітів, лабораторних робіт і дипломних розрахунків, оскільки дозволяє зберегти результати у табличному вигляді та використати їх для подальшого оформлення.

На рисунку 3.15 проілюстровано діалогове вікно збереження Excel-файлу

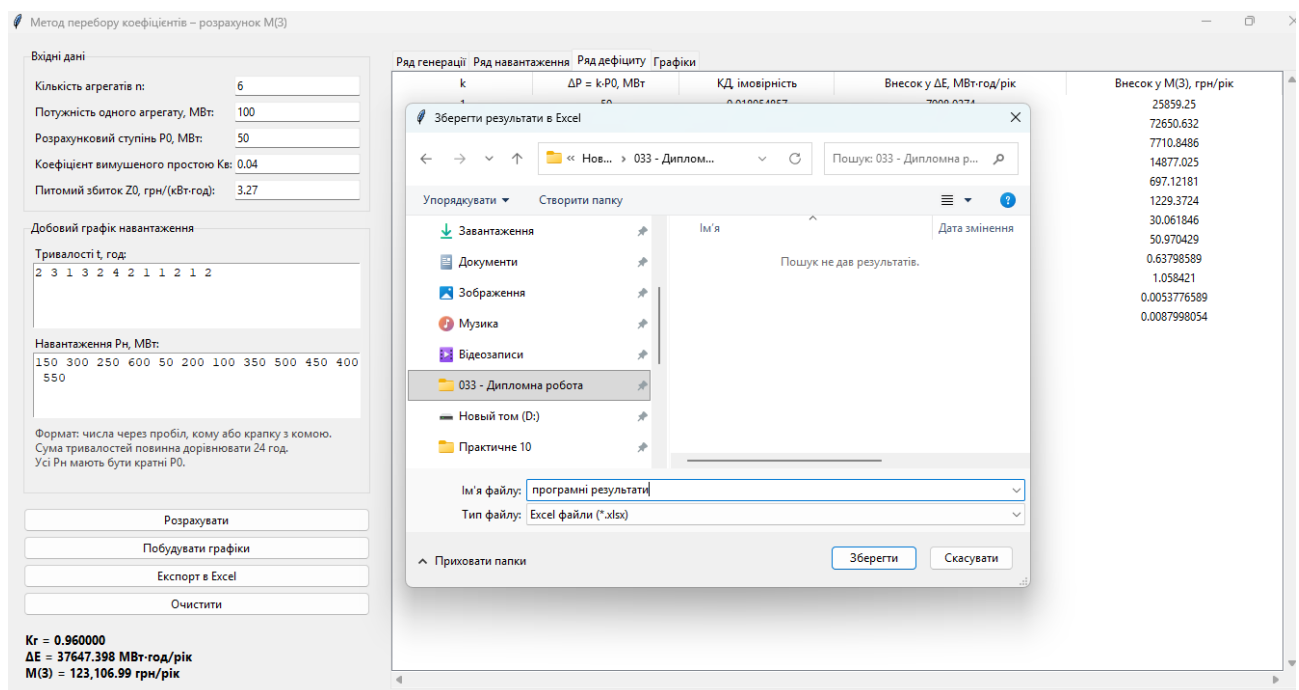


Рисунок 3.15 – Вікно експорту результатів розрахунку в Excel

На рисунку 3.16 проілюстровано відкритий файл Excel із вкладками «Підсумок», «Ряд генерації», «Ряд навантаження» та «Ряд дефіциту».

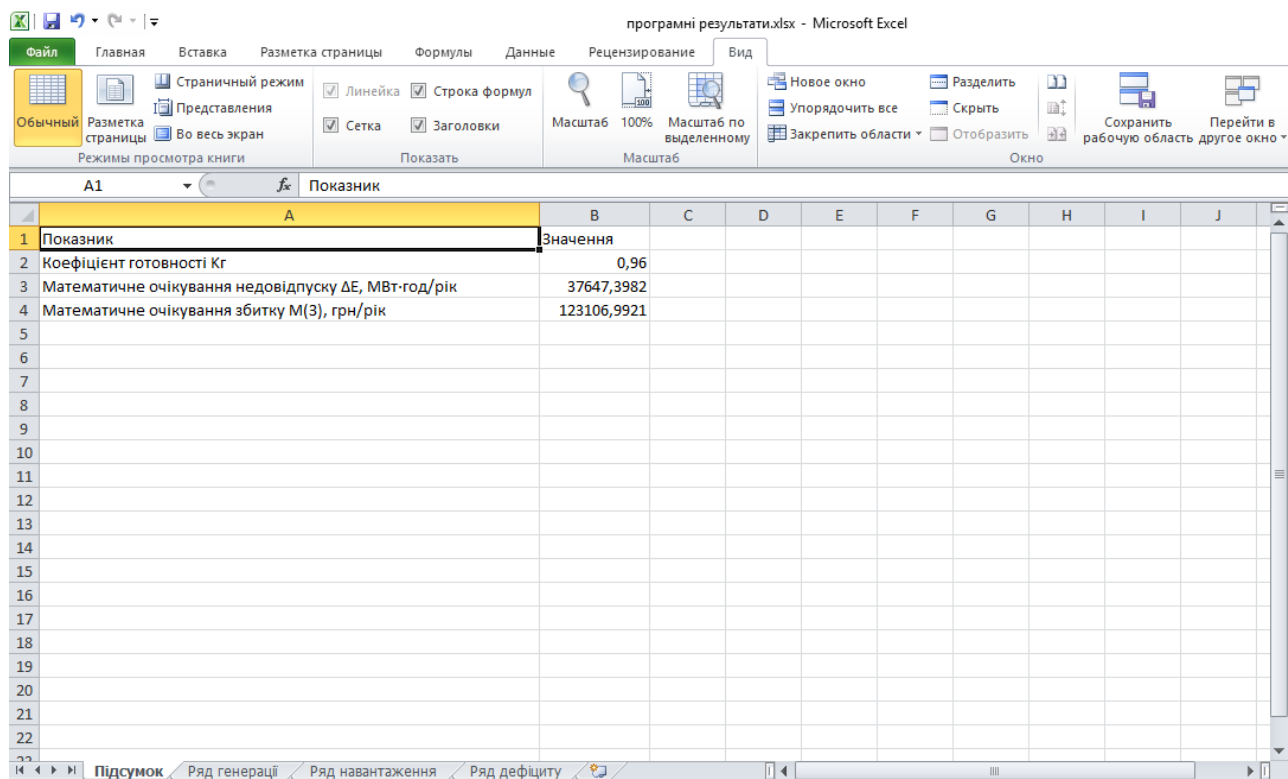


Рисунок 3.16 – Файл результатів розрахунку в Excel

3.9. Переваги автоматизованого розрахунку

Порівняно з ручним розрахунком, використання розробленої програми має такі переваги:

- зменшується кількість арифметичних помилок;
- скорочується час виконання розрахунку;
- автоматично перевіряється коректність вхідних даних;
- забезпечується швидке формування таблиць результатів;
- користувач отримує графічну інтерпретацію результатів;
- є можливість повторного розрахунку для різних вихідних даних;
- результати можна експортувати до Excel.

Особливо важливою є можливість швидкого повторення розрахунку при зміні коефіцієнта вимушеного простою, питомого збитку або розрахункового ступеня потужності. Це дозволяє використовувати програму не лише для одноразового обчислення, а й для аналізу чутливості результату до зміни параметрів моделі.

3.10 Висновки

У третьому розділі розглянуто автоматизацію розрахунків за методом перебору коефіцієнтів на основі розробленої Python-програми з графічним інтерфейсом користувача. Програма забезпечує введення вихідних даних, перевірку коректності добового графіка навантаження, формування рядів розподілу генерації та навантаження, перебір можливих станів системи, визначення ряду дефіциту потужності, розрахунок математичного очікування недовідпуску електричної енергії та очікуваного збитку.

Розроблений програмний засіб дозволяє значно спростити виконання розрахунків, підвищити їх точність і наочність. Побудова графіків рядів розподілу та внесків дефіциту потужності дає змогу краще проаналізувати вплив окремих режимів роботи енергосистеми на підсумковий економічний результат. Отже, автоматизація розрахунків є важливим етапом практичної реалізації методу перебору коефіцієнтів і може бути використана для навчальних, дослідницьких та інженерних задач оцінювання надійності електропостачання.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

4.1 Основні небезпечні та шкідливі фактори під час роботи з електрообладнанням

Охорона праці під час експлуатації електроенергетичних об'єктів має безпосередній зв'язок із темою дипломної роботи, оскільки математичне моделювання очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії розглядає аварійні та режимні стани не тільки як джерело економічних втрат, а й як джерело підвищеної небезпеки для оперативного, ремонтного та електротехнічного персоналу. Відмова елемента електричної мережі, пошкодження ізоляції, коротке замикання, перегрівання контактних з'єднань або помилкове оперативне перемикавання можуть одночасно спричинити недовідпуск електроенергії, пошкодження обладнання, пожежу, травмування персоналу та збільшення часу аварійного відновлення. Саме тому питання електробезпеки у роботі розглядаються як складова управління технічним та економічним ризиком [7; 13; 20; 21; 22].

Нормативною основою аналізу є Закон України «Про охорону праці», Правила улаштування електроустановок, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів та чинні вимоги до експлуатації електрозахисних засобів [7; 13; 20; 21; 22]. Зміст цих документів дає змогу розглядати електробезпеку не як окремий допоміжний елемент, а як комплексну систему управління ризиками, що охоплює організацію робіт, кваліфікацію персоналу, технічний стан обладнання, застосування захисних засобів, контроль ізоляції, заземлення, огороження робочого місця та порядок оперативних перемикань.

Для кількісного оцінювання небезпеки у роботі використано індексний підхід, за якого ризик визначається добутком імовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її наслідків. Така оцінка не замінює спеціальної атестації

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		62

робочих місць або професійного аудиту охорони праці, але дозволяє обґрунтувати пріоритетність захисних заходів у межах дипломного техніко-економічного аналізу. Загальний індекс ризику визначається за формулою:

$$R_j = P_j \cdot S_j \quad (4.1)$$

де R_j - індекс ризику для j -го небезпечного фактора; P_j - умовна оцінка імовірності реалізації небезпечної події за шкалою від 1 до 5; S_j - умовна оцінка тяжкості наслідків за шкалою від 1 до 5. Якщо значення R_j не перевищує 5, ризик можна вважати низьким; у межах від 6 до 12 він характеризується як середній; якщо показник перевищує 12, ризик потребує першочергового управлінського та технічного впливу.

Таблиця 4.1 – Оцінювання основних небезпечних і шкідливих факторів під час роботи з електрообладнанням

Небезпечний або шкідливий фактор	Джерело виникнення під час експлуатації електрообладнання	Можливі наслідки для персоналу та об'єкта	P_i	S_i	$R_i = P_i \cdot S_i$
Ураження електричним струмом	Дотик до струмовідних частин, пошкодження ізоляції, помилкове подання напруги	Електротравма, фібриляція серця, зупинка дихання, смертельний випадок	3	5	15
Електрична дуга та термічний вплив	Коротке замикання, комутація під навантаженням, несправність апаратів захисту	Опіки, пошкодження зору, займання одягу, пожежа в електроустановці	2	5	10
Пожежна небезпека	Перегрів контактів, перевантаження кабелів, старіння ізоляції	Пожежа, пошкодження обладнання, тривале аварійне відключення	3	4	12
Механічні травми	Робота з кабельними лініями, шафами, приводами вимикачів, ручним інструментом	Удари, порізи, защемлення, падіння елементів обладнання	3	3	9
Робота на висоті або в обмеженому просторі	Обслуговування повітряних ліній, щитів, кабельних приміщень	Падіння, травмування, ускладнення евакуації	2	4	8
Психофізіологічне напруження	Аварійні перемикання, робота вночі, необхідність швидкого відновлення живлення	Помилки персоналу, порушення послідовності операцій, збільшення часу відновлення	4	3	12

Результати таблиці 4.1 показують, що найбільш критичним фактором є ризик ураження електричним струмом, для якого умовний індекс становить 15 балів. Це пояснюється тим, що навіть за не максимальної імовірності реалізації події тяжкість її наслідків є гранично високою. Пожежна небезпека та психофізіологічне напруження отримали значення 12 балів, що відповідає верхній межі середнього рівня і фактично потребує системного профілактичного контролю. Такі результати узгоджуються з логікою математичного моделювання недовідпуску електроенергії, оскільки ті самі аварійні події можуть одночасно формувати і економічний збиток, і ризик для персоналу.

Для ілюстрації фізичної небезпеки дотику до струмовідних частин можна використати спрощений розрахунок сили струму через тіло людини. Якщо фазна напруга становить 220 В, а умовний опір тіла людини прийнято 1000 Ом, то струм дотику визначається за законом Ома:

$$I_h = \frac{U_{touch}}{R_h} \quad (4.2)$$

Підставляючи вихідні дані, отримаємо:

$$I_h = \frac{220}{1000} = 0,22 \text{ A} = 220 \text{ mA} \quad (4.3)$$

Отримане значення є небезпечним для людини, тому основним завданням системи охорони праці є не допущення навіть короточасного контакту персоналу зі струмовідними частинами, що перебувають під напругою. З цієї причини організація робіт в електроустановках повинна ґрунтуватися на попередньому знятті напруги, перевірці її відсутності, встановленні заземлень, огороженні робочого місця, застосуванні електрозахисних засобів і суворому контролі послідовності оперативних дій [20; 21; 22].

4.2. Заходи електробезпеки під час експлуатації електричних мереж

Заходи електробезпеки під час експлуатації електричних мереж повинні формувати багаторівневу систему захисту, у якій технічні, організаційні та індивідуальні засоби взаємно доповнюють один одного. У практичних умовах

					Кваліфікаційна робота	
		№ док.ум.		1		64

неможливо забезпечити належний рівень безпеки лише одним видом захисту, оскільки електротравматизм найчастіше виникає внаслідок поєднання технічної несправності, недостатнього контролю робочого місця, помилки персоналу або порушення технологічної послідовності операцій. Тому для електроенергетичного об'єкта, на якому можливі аварійні відключення, доцільно поєднувати технічні засоби захисту, організаційні процедури, навчання персоналу та контроль виконання робіт [13; 20; 21; 22].

Основою технічного захисту є забезпечення такого стану електроустановки, за якого небезпечна напруга дотику не виникає або існує протягом мінімально можливого часу. З цією метою застосовуються заземлювальні пристрої, пристрої захисного вимикання, автоматичні вимикачі, релейний захист, контроль ізоляції, захисні екрани та системи блокування. Для спрощеної перевірки параметрів заземлення можна використати умову обмеження напруги дотику:

$$R_{g,adm} \leq \frac{U_{touch,adm}}{I_g} \quad (4.4)$$

де $R_{g,adm}$ - допустимий опір заземлювального пристрою, Ом; $U_{touch,adm}$ - допустима напруга дотику, В; I_g - розрахунковий струм замикання на землю, А. Якщо для навчального розрахунку прийняти $U_{touch,adm} = 50$ В та $I_g = 25$ А, то допустиме значення опору заземлення становитиме:

$$R_{g,adm} \leq \frac{50}{25} = 2 \text{ Ом} \quad (4.5)$$

Цей результат показує, що якість заземлювального пристрою є одним з ключових чинників електробезпеки. Якщо фактичний опір заземлення перевищує розрахункове допустиме значення, зростає напруга дотику, а отже підвищується імовірність тяжкої електротравми. У контексті теми дипломної роботи це також впливає на ризик аварійного режиму, тому що несправний або неефективний захист може збільшити масштаб пошкодження, тривалість відключення та очікуваний збиток від недовідпуску [13; 20; 21].

Для фінансової оцінки базового комплексу заходів електробезпеки доцільно визначити орієнтовні витрати на забезпечення робочого місця електротехнічного персоналу засобами захисту, контролю та попередження. Такий розрахунок має

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		65

навчальний характер і може бути уточнений залежно від фактичних цін постачальників, класу напруги, кількості працівників і комплектації електроустановки.

Таблиця 4.2 – Орієнтовний розрахунок витрат на базові заходи електробезпеки для електротехнічного персоналу

Захід або засіб електробезпеки	Функціональне призначення	Кількість, од.	Орієнтовна вартість одиниці, грн	Загальна вартість, грн
Показчик напруги до 1000 В	Перевірка відсутності напруги перед початком робіт	2	1200	2400
Діелектричні рукавички	Захист рук від випадкового дотику до небезпечних частин	4	650	2600
Діелектричні килимки	Ізоляція працівника від землі біля щитового обладнання	3	1100	3300
Переносне заземлення	Захист від випадкового подання напруги на робоче місце	2	4200	8400
Комплект плакатів і знаків безпеки	Попередження персоналу та недопущення помилкових дій	1	1500	1500
Блокувальний комплект для оперативних перемикачів	Унеможливлення помилкового вмикання апарата під час роботи	1	5800	5800
Аптечка та засоби першої допомоги	Надання невідкладної допомоги у разі електротравми	2	900	1800
Первинний інструктаж і періодичне навчання персоналу	Зменшення імовірності організаційних помилок	4	1500	6000
Разом	Комплексне забезпечення безпеки робіт	-	-	31800

Загальна орієнтовна вартість базового комплекту електробезпеки становить 31 800 грн. Якщо порівняти цю суму з базовим очікуваним збитком від одного розрахункового набору аварійних режимів, який у попередньому розділі дорівнював 6680,22 грн, то можна визначити кількість умовних аварійних подій, після запобігання яким витрати на електробезпеку будуть економічно компенсовані. Розрахунок виконується за формулою:

$$N_{eq} = \frac{C_{eq}}{Z_b} \quad (4.6)$$

де N_{eq} - кількість умовних аварійних подій, після запобігання яким витрати на захист компенсуються; C_{eq} - витрати на заходи електробезпеки, грн; Z_b - базовий очікуваний збиток від недовідпуску, грн. Підставлення значень дає:

$$N_{eq} = \frac{31\,800}{6\,680,22} = 4,76 \approx 5 \text{ подій} \quad (4.7)$$

Отже, навіть якщо базовий комплект засобів електробезпеки дозволить запобігти приблизно п'яти умовним аварійним подіям або суттєво зменшити їхні наслідки, витрати на його впровадження будуть економічно виправданими. Однак головна цінність цих заходів полягає не лише у прямому фінансовому ефекті, а й у збереженні життя та здоров'я персоналу, скороченні часу аварійного відновлення, підвищенні дисципліни оперативних перемикань і зменшенні імовірності помилкових дій.

4.3. Організаційно-технічні заходи щодо зниження ризиків аварійних відключень

Організаційно-технічні заходи щодо зниження ризиків аварійних відключень мають бути спрямовані не тільки на захист персоналу, а й на зменшення частоти, тривалості та економічних наслідків перерв електропостачання. У межах теми дипломної роботи це означає, що кожний захід доцільно оцінювати через його вплив на параметри математичної моделі очікуваного збитку. Якщо захід зменшує імовірність аварійного режиму, він впливає на параметр p_i . Якщо він скорочує час відновлення електропостачання, він впливає на параметр t_i . Якщо він зменшує обсяг відключеного навантаження або підвищує резервування, він впливає на параметри P_i та $K_{s,i}$ [4; 5; 13; 17; 20; 21].

До найбільш ефективних заходів належать періодична діагностика ізоляції, тепловізійний контроль контактних з'єднань, планово-попереджувальні ремонти, ревизія пристроїв релейного захисту та автоматики, автоматизація секціонування мережі, впровадження дистанційного моніторингу, чітке оформлення нарядів-

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		67

допусків, навчання оперативного персоналу та аналіз причин аварій після кожного порушення. Такі заходи не усувають усі ризики повністю, але переводять експлуатацію електрооб'єкта з реактивного режиму, коли персонал реагує лише після аварії, у превентивний режим, коли небезпечні фактори виявляються й усуваються до настання перерви електропостачання [13; 20; 21; 22].

Для розрахункової оцінки ефективності прийнято, що базовий очікуваний збиток за одним розрахунковим набором аварійних режимів становить 6680,22 грн. Якщо протягом року умовно очікується 12 подібних аварійних або режимних подій, річний очікуваний збиток до впровадження заходів визначається за формулою:

$$Z_0 = Z_b \cdot n_{av} \quad (4.8)$$

де Z_0 - річний очікуваний збиток до впровадження заходів, грн; Z_b - базовий очікуваний збиток за одним розрахунковим набором аварійних режимів, грн; n_{av} - очікувана кількість аварійних або режимних подій за рік. Підставлення вихідних даних дає:

$$Z_0 = 6\,680,22 \cdot 12 = 80\,162,64 \text{ грн} \quad (4.9)$$

Якщо комплекс організаційно-технічних заходів забезпечує середнє зменшення очікуваного збитку на 35 %, то річний збиток після впровадження заходів становитиме:

$$Z_1 = Z_0 \cdot (1 - K_z) \quad (4.10)$$

де Z_1 - річний очікуваний збиток після впровадження заходів, грн; K_z - коефіцієнт зменшення очікуваного збитку. За умови $K_z = 0,35$ отримаємо:

$$Z_1 = 80\,162,64 \cdot (1 - 0,35) = 52\,105,72 \text{ грн} \quad (4.11)$$

Річний економічний ефект від зниження аварійності визначається як різниця між початковим і скоригованим збитком:

$$E_r = Z_0 - Z_1 \quad (4.12)$$

Після підстановки значень маємо:

$$E_r = 80\,162,64 - 52\,105,72 = 28\,056,92 \text{ грн} \quad (4.13)$$

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		68

Таблиця 4.3 – Розрахунок ефективності організаційно-технічних заходів щодо зниження аварійних відключень

Захід	Основний параметр моделі, на який впливає захід	Орієнтовна вартість впровадження, грн	Очікуване зниження збитку, %	Річний економічний ефект, грн	Очікуваний строк окупності, років
Тепловізійний контроль контактних з'єднань	Зменшення імовірності пошкодження p_i	18000	8	6412,05	2,81
Планово-попереджувальний ремонт кабельних і комутаційних елементів	Зменшення тривалості відновлення t_i	42000	12	9618,08	4,37
Перевірка релейного захисту та автоматики	Зменшення масштабу аварійного режиму P_i	25000	6	4809,04	5,20
Встановлення оперативного секціонування та блокувань	Підвищення резервної забезпеченості $k_{рез}$	55000	9	7213,56	7,62
Додаткове навчання персоналу та аналіз помилкових дій	Зменшення організаційного ризику p_i	12000	5	4007,53	2,99
Разом	Комплексне зниження аварійності та тривалості перерв	152000	35	28060,26	5,42

Розрахунок у таблиці 4.3 показує, що найбільший прямий економічний ефект забезпечують планово-попереджувальний ремонт і оперативне секціонування, оскільки вони впливають на тривалість відновлення та обсяг відключеного навантаження. Водночас найкоротший строк окупності має тепловізійний контроль, оскільки його вартість порівняно невелика, а профілактичний ефект проявляється через раннє виявлення перегріву контактів, ослаблених з'єднань і прихованих дефектів. Навчання персоналу також має суттєве значення, оскільки організаційні помилки часто не потребують дорогого

технічного переоснащення, але можуть суттєво впливати на імовірність аварійної події.

Строк окупності комплексного впровадження заходів визначається за формулою:

$$T_{ок} = \frac{C_{\Sigma}}{E_r} \quad (4.14)$$

де $T_{ок}$ - строк окупності заходів, років; C_{Σ} - сумарна вартість організаційно-технічних заходів, грн; E_r - річний економічний ефект, грн. За даними таблиці:

$$T_{ок} = \frac{152\,000}{28\,056,92} = 5,42 \text{ року} \quad (4.15)$$

4.4 Висновки

Запропонований комплекс заходів має не миттєву, але прийнятну для інженерної експлуатації економічну віддачу. Крім прямого скорочення очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії, він забезпечує додатковий ефект у вигляді підвищення безпеки персоналу, зменшення пожежних ризиків, скорочення простою обладнання, підвищення дисципліни оперативних перемикачів і створення більш керованої системи експлуатації електроенергетичного об'єкта. Таким чином, охорона праці в роботі розглядається не як формальний завершальний розділ, а як практична складова зменшення аварійності, недовідпуску електроенергії та економічних втрат.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було досліджено теоретичні, математичні, розрахункові та безпекові аспекти оцінювання очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії методом перебору коефіцієнтів. У процесі виконання роботи встановлено, що недовідпуск електричної енергії є не лише технічним показником ненадійності електропостачання, а й важливою економічною категорією, яка дає змогу пов'язати факт перерви електропостачання з конкретним обсягом енергії, не отриманої споживачем, і подальшою грошовою оцінкою втрат. У роботі обґрунтовано, що для повноцінного аналізу недостатньо враховувати тільки тривалість відключення або кількість аварійних подій, оскільки реальний розмір збитку залежить від потужності відключеного навантаження, категорії споживача, імовірності виникнення аварійного режиму, питомого коефіцієнта збитку, можливості резервування та характеру самої перерви електропостачання. Саме тому в роботі було використано імовірнісно-економічний підхід, який найбільш повно відповідає темі дослідження та дозволяє перейти від загального опису проблеми до кількісного моделювання очікуваних втрат. Структура роботи охоплює теоретичний аналіз недовідпуску електричної енергії, побудову математичної моделі, реалізацію методу перебору коефіцієнтів та розгляд питань охорони праці під час експлуатації електроенергетичних об'єктів.

У першому розділі було визначено сутність недовідпуску електричної енергії як показника надійності електропостачання та розглянуто основні причини його виникнення в електричних мережах. З'ясовано, що недовідпуск може бути наслідком технічних відмов обладнання, пошкодження кабельних і повітряних ліній, відмов трансформаторних підстанцій, режимних перевантажень, планових ремонтів, зовнішніх впливів, форс-мажорних обставин та недостатнього рівня резервування мережі.

Окрему увагу приділено економічним наслідкам перерв електропостачання, оскільки для різних груп споживачів однаковий обсяг недоотриманої

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		71

електроенергії може мати різний фінансовий ефект. Для промислового навантаження збитки є значно вищими через зупинку виробничих процесів, простої обладнання, втрату продукції та необхідність повторного запуску технологічних ліній, тоді як для побутових споживачів вони мають переважно соціально-побутовий і частково матеріальний характер. У результаті було доведено доцільність використання диференційованих коефіцієнтів збитку для різних груп навантаження, а також необхідність подальшого математичного моделювання очікуваного збитку.

У другому розділі було сформовано математичну модель визначення очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії. У моделі враховано середню потужність відключеного навантаження, тривалість перерви електропостачання, імовірність аварійного або режимного стану, питомий коефіцієнт економічного збитку, коефіцієнт резервування та коефіцієнт аварійної значущості.

Такий підхід дозволив перейти від простого розрахунку фізичного обсягу недовідпущеної електроенергії до комплексної оцінки її фінансових наслідків. У роботі показано, що первинний недовідпуск визначається як добуток потужності відключеного навантаження на тривалість перерви, однак для отримання більш реалістичної оцінки цей показник необхідно коригувати з урахуванням резервного живлення, можливості оперативного перемикавання та характеру аварійного режиму. Побудована модель дає змогу оцінювати не лише окремий сценарій аварійної події, а й математичне сподівання збитку за сукупністю можливих режимів електропостачання. У розрахунковій частині було використано сценарії, пов'язані з відмовою секції трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ, пошкодженням кабельної лінії 0,4 кВ, відключенням фідера комунального вузла та локальною аварією у розподільній мережі, що дозволило змодельовати різні за масштабом і наслідками режими роботи електричної мережі.

У третьому розділі було реалізовано метод перебору коефіцієнтів для оцінювання очікуваного збитку.

Застосування цього методу дозволило не обмежуватися одним фіксованим значенням питомого збитку або тривалості відновлення, а дослідити, як змінюється результат при варіюванні ключових параметрів моделі. Для цього було введено коефіцієнт корекції питомого збитку та коефіцієнт корекції тривалості перерви. Базове значення очікуваного збитку за прийнятими вихідними даними становить 6679,22 грн, а розмах його можливої зміни в межах прийнятого діапазону коефіцієнтів становить 2003,76 грн. Мінімальне значення очікуваного збитку отримано за нижніх значень коефіцієнтів, а максимальне — за одночасного збільшення вартості недовідпуску та тривалості перерви. Це підтвердило, що модель є чутливою до зміни коефіцієнтів, а найвагомішим фактором формування підсумкового збитку є поєднання високої потужності відключеного навантаження з високим питомим коефіцієнтом економічних втрат. Найбільший внесок у сумарний збиток формує промислове навантаження, що пояснюється значною величиною відключеної потужності та високою економічною вартістю простою виробничих процесів. Отримані результати підтверджують практичну придатність методу перебору коефіцієнтів для техніко-економічного обґрунтування рішень щодо підвищення надійності електропостачання.

У четвертому розділі було розглянуто питання охорони праці та безпеки під час експлуатації електроенергетичних об'єктів. Встановлено, що аварійні та режимні стани електричних мереж створюють не лише економічні збитки через недовідпуск електроенергії, а й підвищені ризики для оперативного, ремонтного та електротехнічного персоналу. До основних небезпечних факторів належать ураження електричним струмом, електрична дуга, коротке замикання, перегрівання контактних з'єднань, пошкодження ізоляції, помилки оперативних перемикачів, робота поблизу струмовідних частин та виконання аварійно-відновлювальних робіт в умовах обмеженого часу. У роботі обґрунтовано, що заходи електробезпеки, застосування засобів індивідуального та колективного захисту, дотримання організаційних процедур допуску до робіт, своєчасна діагностика обладнання, секціонування мережі, резервування живлення та

					Кваліфікаційна робота	
		№ док.ум.		1		73

автоматизація перемикачів одночасно знижують ризик травматизму і зменшують імовірність аварійних відключень. Таким чином, охорона праці в межах теми роботи має не формальний, а безпосередній техніко-економічний зміст, оскільки безпечна експлуатація електрообладнання сприяє зменшенню аварійності, недовідпуску електроенергії та очікуваного збитку.

Отже, у дипломній роботі досягнуто поставленої мети, оскільки було розроблено й обґрунтовано математичну модель оцінювання очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії та реалізовано метод перебору коефіцієнтів для аналізу впливу ключових параметрів на кінцевий результат. Запропонований підхід дозволяє поєднати технічні характеристики електричної мережі з економічними наслідками перерв електропостачання, оцінити діапазон можливих збитків і визначити, які саме фактори найбільше впливають на фінансові втрати. Практичне значення роботи полягає в тому, що така модель може використовуватися для попереднього аналізу аварійних режимів, порівняння варіантів резервування, обґрунтування модернізації електричних мереж, оцінювання доцільності автоматизації перемикачів і вибору заходів, спрямованих на підвищення надійності електропостачання. Виконане дослідження підтверджує, що математичне моделювання очікуваного збитку від недовідпуску електричної енергії є ефективним інструментом для прийняття технічно та економічно обґрунтованих рішень у сфері електроенергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бардик Є. І. Моделі оцінки надійності схем електропостачання власних потреб АЕС з дизель-генераторами. Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2014. Вип. 37. С. 53–60. URL: https://jnas.nbu.gov.ua/j-pdf/PIED_2014_37_8.pdf
2. Бардик Є. І., Болотний М. П., Бондаренко О. Л. Визначення ризику порушення нормального режиму енергосистеми при плановому і аварійному виведенні з експлуатації електрообладнання. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 2. С. 54–62. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-155-2-54-62>
3. Бондаренко О. Л. Моделювання і аналіз режимної надійності в підсистемах електроенергетичних систем в умовах каскадного розвитку відмов : дис. доктора філософії. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/items/369a6432-be21-4c68-964f-e76e11526a58>
4. Бурбело М. Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків : навч. посіб. Вінниця : Універсум-Вінниця, 2005. 148 с. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/11751>
5. Буслова Н. В. Проектування електричних мереж. Курсовий проєкт : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/bb7734e9-6fa7-48d2-9d9d-1bcd0a812f72/download>
6. Василега П. О. Електропостачання : підручник. Суми : Сумський державний університет, 2019. 521 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi69/0050457.pdf>
7. Верховна Рада України. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12>
8. Верховна Рада України. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
9. Гаряжа В. М., Карюк А. О. Електрична частина станцій та підстанцій : конспект лекцій. Ч. 1. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 149 с. URL:

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		75

https://nvkarta.com/project/library/uploads/engineering/electricity/%28uk%29_elektrychna_chastyna_stantsiy_ta_pidstantsiy_khnu.pdf

10. Гребченко М. В. Системи електропостачання з локальними джерелами енергії та керування ними : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 90 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6affa121-647d-4371-b5e6-17c48cd0f6bd/content>

11. Денисюк С. П., Дерев'янюк Д. Г. Оцінювання якості електропостачання у локальних системах з джерелами розосередженої генерації : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 166 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41213>

12. Дерев'янюк Д. Г. Оцінювання якості електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією : дис. канд. техн. наук. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/9013732d-db29-4e90-8a4c-c0851953057f/download>

13. Державна інспекція енергетичного нагляду України. Правила улаштування електроустановок : затв. наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476. URL: <https://sies.gov.ua/storage/app/sites/4/uploaded-files/Законодавство.%20Накази%20Міненерго/Nakaz%20476%20vid%2021.07.2017/stranitsy-iz-pue-skan1.pdf>

14. Кирик В. В. Електричні мережі та системи : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 40 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/bb86ebe0-480b-41e8-a22f-981bad48ed06/content>

15. Коваленко О. І., Коваленко Л. Р., Мунтян В. О., Радько І. П. Основи електропостачання сільського господарства : навч. посіб. Мелітополь : ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2011. 462 с. URL: <https://www.tsatu.edu.ua/ea/wp-content/uploads/sites/27/kovalenko-osnovy-elektropostachannja.pdf>

16. Кучанський В. В. Експрес-оцінка резонансних перенапруг в аномальних режимах магістральних електричних мереж. Вісник Національного

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		76

університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. 2016. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/oct/19268/13.pdf>

17. Лежнюк П. Д., Гунько І. О., Рубаненко О. Є. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2017. 164 с. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/34596/92698.pdf>

18. Лежнюк П. Д., Комар В. О., Собчук Н. В. Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2023. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/36430/120343.pdf>

19. Малогулко Ю. В., Бурикін О. Б., Кацадзе Т. Л., Нетребський В. В. Електричні системи і мережі. Частина 1 : навч. посіб. / за ред. П. Д. Лежнюка. Вінниця : ВНТУ, 2020. 200 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/44736/1/Elektrychni-systemy-i-merezhi_2020_Ch1.pdf

20. Міністерство палива та енергетики України. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів : наказ від 25.07.2006 № 258. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1143-06>

21. Міністерство праці та соціальної політики України. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ від 09.01.1998 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98>

22. Міністерство праці та соціальної політики України. Правила експлуатації електрозахисних засобів : наказ від 05.06.2001 № 253. URL: <https://uis.zp.ua/wp-content/uploads/2018/12/NPAOP-40.1-1.07-01-Pravila-ekspluatatsiyi-elektrozahisnih-zasobiv.pdf>

23. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Про затвердження Кодексу систем розподілу : постанова від 14.03.2018 № 310. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0310874-18>

24. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Про затвердження форм звітності щодо показників якості електропостачання та інструкцій щодо їх заповнення : постанова від 12.06.2018 № 374. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0374874-18>

25. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання : постанова від 12.06.2018 № 375. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0375874-18>

26. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Звіт щодо показників якості надання послуг у сферах електропостачання і централізованого водопостачання та водовідведення у 2024 році. Київ : НКРЕКП, 2025. URL: https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Monitoring/Zvit_yakist_posluh/Zvit_yakist_posluh_2024.pdf

27. Остапчук О. В., Бардик Є. І., Матеєнко Ю. П. Вступ до спеціальності: електричні станції : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 104 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/dc054a4d-7949-4571-ae1d-de334a950dec/content>

28. Сегеда М. С., Бахор З. М., Яцейко А. Я. Проектування ліній електричних мереж : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. URL: <https://librarygo.lpnu.ua/?elbook=proektuvannya-linij-elektrychnyh-merezh>

29. Сегеда М. С., Олійник М. Й., Лисяк В. Г. Режимы систем пересылки та споживання електричної енергії : навч. посіб. / за заг. ред. М. С. Сегеди. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. 304 с. URL: <https://vlp.com.ua/node/20451>

30. Харченко В. Ф. Електропостачання міст і промислових підприємств : конспект лекцій. Харків : ХНАМГ, 2011. 168 с. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/52143/1/2017%D0%BF%D0%B5%D1%87.%20152%D0%9B%20%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA>

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		78

%D1%82%20%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9%28%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BD%D1%821%29%20%D0%BD%D0%B0%2024.12.18.pdf

31. Allan R. N., Billinton R. Reliability Evaluation of Power Systems. 2nd ed. New York : Plenum Press, 1996. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4899-1860-4>

32. Billinton R., Allan R. N. Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques. 2nd ed. New York : Plenum Press, 1992. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4899-0685-4>

33. ENTSO-E. European Resource Adequacy Assessment 2023. Annex 5: Definitions and Glossary. Brussels : ENTSO-E, 2023. URL: https://www.entsoe.eu/eraa/2023/report/ERAA_2023_Annex_5_Definitions_and_Glossary.pdf

34. IEEE Power & Energy Society. IEEE Std 1366-2012: IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. New York : IEEE, 2012. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6209381>

35. Sullivan M. J., Mercurio M. G., Schellenberg J. A. Estimated Value of Service Reliability for Electric Utility Customers in the United States. Berkeley : Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009. URL: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-2132e.pdf>

ДОДАТОК ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО КОДУ

```
# -*- coding: utf-8 -*-  
"""
```

Програма для визначення математичного очікування збитку від недовідпуску електричної енергії $M(3)$ методом перебору коефіцієнтів.

Авторська структура:

- введення вихідних даних у візуальному середовищі;
- перевірка добового графіка навантаження;
- розрахунок ряду наявної потужності генераторів;
- розрахунок ряду навантаження;
- перебір пар "навантаження - генерація";
- формування ряду дефіциту потужності;
- розрахунок ΔE та $M(3)$;
- побудова графіків.

Потрібні бібліотеки:

```
pip install matplotlib pandas openpyxl
```

Запуск:

```
python pkgui.py  
"""
```

```
import math  
import tkinter as tk  
from tkinter import ttk, messagebox, filedialog  
from dataclasses import dataclass  
from typing import Dict, List, Tuple  
  
import pandas as pd  
import matplotlib.pyplot as plt  
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
```

```
@dataclass  
class InputData:  
    n: int  
    p_block: float  
    p0: float  
    kv: float  
    z0: float  
    durations: List[float]  
    loads: List[float]
```

```
@dataclass  
class CalculationResult:  
    kg: float  
    generation_df: pd.DataFrame  
    load_df: pd.DataFrame  
    deficit_df: pd.DataFrame  
    delta_e: float  
    expected_damage: float  
    time_edges: List[float]  
    loads: List[float]
```

```
def parse_float_list(text: str) -> List[float]:  
    """  
    Перетворює рядок чисел у список float.  
    Дозволені роздільники: пробіл, кома, крапка з комою, перенесення рядка.  
    Десяткова кома автоматично замінюється на крапку.
```

					Кваліфікаційна робота	
		№ докum.		1		80

```

"""
prepared = (
    text.replace(";", " ")
        .replace("\n", " ")
        .replace("\t", " ")
)
parts = [p.strip() for p in prepared.split(" ") if p.strip()]
values = []
for p in parts:
    values.append(float(p.replace(",", ".")))
return values

def validate_input(data: InputData) -> None:
    if data.n <= 0:
        raise ValueError("Кількість агрегатів n повинна бути більшою за нуль.")
    if data.p_block <= 0:
        raise ValueError("Потужність одного агрегату повинна бути більшою за нуль.")
    if data.p0 <= 0:
        raise ValueError("Розрахунковий ступінь P0 повинен бути більшим за нуль.")
    if not (0 <= data.kv <= 1):
        raise ValueError("Коефіцієнт вимушеного простою Кв повинен бути в межах [0; 1].")
    if data.z0 < 0:
        raise ValueError("Питомий збиток Z0 не може бути від'ємним.")
    if len(data.durations) != len(data.loads):
        raise ValueError("Кількість значень тривалості t і навантаження Pn повинна збігатися.")
    if len(data.durations) == 0:
        raise ValueError("Потрібно ввести хоча б один ступінь добового графіка.")
    if any(t <= 0 for t in data.durations):
        raise ValueError("Усі тривалості ступенів навантаження повинні бути додатними.")
    if any(p < 0 for p in data.loads):
        raise ValueError("Потужність навантаження не може бути від'ємною.")

    total_hours = sum(data.durations)
    if abs(total_hours - 24.0) > 1e-6:
        raise ValueError(f"Сума тривалостей графіка повинна дорівнювати 24 год. Зараз: {total_hours:g} год.")

    # М'яка перевірка кратності P0.
    not_multiple = []
    for p in data.loads:
        ratio = p / data.p0
        if abs(ratio - round(ratio)) > 1e-6:
            not_multiple.append(p)
    if not_multiple:
        raise ValueError(
            "Усі значення навантаження Pn повинні бути кратними P0. "
            f"Некратні значення: {not_multiple}"
        )

    if abs((data.p_block / data.p0) - round(data.p_block / data.p0)) > 1e-6:
        raise ValueError("Потужність одного агрегату повинна бути кратною P0.")

def calculate(data: InputData) -> CalculationResult:
    validate_input(data)

```

```

kg = 1.0 - data.kv

# 1. Ряд наявної потужності генераторів.
generation_rows = []
for m in range(data.n, -1, -1):
    available_power = m * data.p_block
    probability = math.comb(data.n, m) * (kg ** m) * (data.kv ** (data.n
- m))
    generation_rows.append({
        "m, кількість агрегатів у роботі": m,
        "Рнаявн, МВт": available_power,
        "КГ, імовірність": probability
    })
generation_df = pd.DataFrame(generation_rows)

# 2. Ряд навантаження.
load_levels: Dict[float, float] = {}
for t, p in zip(data.durations, data.loads):
    load_levels[p] = load_levels.get(p, 0.0) + t

load_rows = []
for p in sorted(load_levels.keys()):
    t_sum = load_levels[p]
    load_rows.append({
        "Рн, МВт": p,
        "t(Рн), год": t_sum,
        "КН, імовірність": t_sum / 24.0
    })
load_df = pd.DataFrame(load_rows)

# 3. Перебір пар станів "навантаження - генерація".
# Якщо Рн > Рнаявн, є дефіцит ΔР = Рн - Рнаявн = k * Р0.
deficit_probs: Dict[int, float] = {}

for _, load_row in load_df.iterrows():
    p_load = float(load_row["Рн, МВт"])
    k_load = float(load_row["КН, імовірність"])

    for _, gen_row in generation_df.iterrows():
        p_gen = float(gen_row["Рнаявн, МВт"])
        k_gen = float(gen_row["КГ, імовірність"])

        if p_load > p_gen:
            deficit_power = p_load - p_gen
            k = int(round(deficit_power / data.p0))
            deficit_probs[k] = deficit_probs.get(k, 0.0) + k_load *
k_gen

deficit_rows = []
for k in sorted(deficit_probs.keys()):
    kd = deficit_probs[k]
    delta_e_part = 8760.0 * data.p0 * k * kd
    damage_part = delta_e_part * data.z0
    deficit_rows.append({
        "k": k,
        "ΔР = k·Р0, МВт": k * data.p0,
        "КД, імовірність": kd,
        "Внесок у ΔЕ, МВт·год/рік": delta_e_part,
        "Внесок у М(3), грн/рік": damage_part
    })

deficit_df = pd.DataFrame(deficit_rows)

```

```

if len(deficit_df) == 0:
    delta_e = 0.0
    expected_damage = 0.0
else:
    delta_e = float(deficit_df["Внесок у ΔЕ, МВт·год/рік"].sum())
    expected_damage = float(deficit_df["Внесок у М(3), грн/рік"].sum())

time_edges = [0.0]
for t in data.durations:
    time_edges.append(time_edges[-1] + t)

return CalculationResult(
    kg=kg,
    generation_df=generation_df,
    load_df=load_df,
    deficit_df=deficit_df,
    delta_e=delta_e,
    expected_damage=expected_damage,
    time_edges=time_edges,
    loads=data.loads
)

class App(tk.Tk):
    def __init__(self):
        super().__init__()

        self.title("Метод перебору коефіцієнтів - розрахунок М(3)")
        self.geometry("1250x780")
        self.minsize(1100, 720)

        self.result: CalculationResult | None = None

        self.create_widgets()
        self.insert_default_values()

    def create_widgets(self):
        main = ttk.PanedWindow(self, orient=tk.HORIZONTAL)
        main.pack(fill=tk.BOTH, expand=True, padx=8, pady=8)

        left = ttk.Frame(main, padding=8)
        right = ttk.Frame(main, padding=8)
        main.add(left, weight=0)
        main.add(right, weight=1)

        # ---- Вхідні дані ----
        input_box = ttk.LabelFrame(left, text="Вхідні дані", padding=8)
        input_box.pack(fill=tk.X)

        self.n_var = tk.StringVar()
        self.p_block_var = tk.StringVar()
        self.p0_var = tk.StringVar()
        self.kv_var = tk.StringVar()
        self.z0_var = tk.StringVar()

        rows = [
            ("Кількість агрегатів n:", self.n_var),
            ("Потужність одного агрегату, МВт:", self.p_block_var),
            ("Розрахунковий ступінь P0, МВт:", self.p0_var),
            ("Коефіцієнт вимушеного простою Кв:", self.kv_var),
            ("Питомий збиток Z0, грн/(кВт·год):", self.z0_var),
        ]

        for i, (label, var) in enumerate(rows):

```

```

        ttk.Label(input_box, text=label).grid(row=i, column=0,
sticky="w", pady=3)
        ttk.Entry(input_box, textvariable=var, width=18).grid(row=i,
column=1, sticky="ew", pady=3)

        input_box.columnconfigure(1, weight=1)

        graph_box = ttk.LabelFrame(left, text="Добовий графік навантаження",
padding=8)
        graph_box.pack(fill=tk.BOTH, expand=True, pady=8)

        ttk.Label(graph_box, text="Тривалості t, год:").pack(anchor="w")
        self.duration_text = tk.Text(graph_box, height=4, width=42)
        self.duration_text.pack(fill=tk.X, pady=(0, 6))

        ttk.Label(graph_box, text="Навантаження Pн, МВт:").pack(anchor="w")
        self.load_text = tk.Text(graph_box, height=4, width=42)
        self.load_text.pack(fill=tk.X)

        help_text = (
            "Формат: числа через пробіл, кому або крапку з комою.\n"
            "Сума тривалостей повинна дорівнювати 24 год.\n"
            "Усі Pн мають бути кратні P0."
        )
        ttk.Label(graph_box, text=help_text,
foreground="#444").pack(anchor="w", pady=6)

        button_box = ttk.Frame(left)
        button_box.pack(fill=tk.X, pady=4)

        ttk.Button(button_box, text="Позрахувати",
command=self.run_calculation).pack(fill=tk.X, pady=2)
        ttk.Button(button_box, text="Побудувати графіки",
command=self.show_all_plots).pack(fill=tk.X, pady=2)
        ttk.Button(button_box, text="Експорт в Excel",
command=self.export_excel).pack(fill=tk.X, pady=2)
        ttk.Button(button_box, text="Очистити",
command=self.clear_results).pack(fill=tk.X, pady=2)

        self.summary_label = ttk.Label(left, text="", justify=tk.LEFT,
font=("Segoe UI", 10, "bold"))
        self.summary_label.pack(fill=tk.X, pady=8)

        # ---- Результати ----
        self.notebook = ttk.Notebook(right)
        self.notebook.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

        self.tab_generation = ttk.Frame(self.notebook)
        self.tab_load = ttk.Frame(self.notebook)
        self.tab_deficit = ttk.Frame(self.notebook)
        self.tab_graph = ttk.Frame(self.notebook)

        self.notebook.add(self.tab_generation, text="Ряд генерації")
        self.notebook.add(self.tab_load, text="Ряд навантаження")
        self.notebook.add(self.tab_deficit, text="Ряд дефіциту")
        self.notebook.add(self.tab_graph, text="Графіки")

        self.tree_generation = self.create_tree(self.tab_generation)
        self.tree_load = self.create_tree(self.tab_load)
        self.tree_deficit = self.create_tree(self.tab_deficit)

        self.graph_container = ttk.Frame(self.tab_graph)
        self.graph_container.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

```

```

def create_tree(self, parent):
    frame = ttk.Frame(parent)
    frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

    tree = ttk.Treeview(frame, show="headings")
    vsb = ttk.Scrollbar(frame, orient="vertical", command=tree.yview)
    hsb = ttk.Scrollbar(frame, orient="horizontal", command=tree.xview)
    tree.configure(yscrollcommand=vsb.set, xscrollcommand=hsb.set)

    tree.grid(row=0, column=0, sticky="nsew")
    vsb.grid(row=0, column=1, sticky="ns")
    hsb.grid(row=1, column=0, sticky="ew")

    frame.rowconfigure(0, weight=1)
    frame.columnconfigure(0, weight=1)

    return tree

def insert_default_values(self):
    # Контрольний приклад: 6 блоків, P=100 МВт, Кв=0.04, Z0=3.27, P0=50
    МВт.
    self.n_var.set("6")
    self.p_block_var.set("100")
    self.p0_var.set("50")
    self.kv_var.set("0.04")
    self.z0_var.set("3.27")

    self.duration_text.delete("1.0", tk.END)
    self.duration_text.insert("1.0", "2 3 1 3 2 4 2 1 1 2 1 2")

    self.load_text.delete("1.0", tk.END)
    self.load_text.insert("1.0", "150 300 250 600 50 200 100 350 500 450
400 550")

def get_input_data(self) -> InputData:
    return InputData(
        n=int(self.n_var.get().strip()),
        p_block=float(self.p_block_var.get().strip().replace(",", ".")),
        p0=float(self.p0_var.get().strip().replace(",", ".")),
        kv=float(self.kv_var.get().strip().replace(",", ".")),
        z0=float(self.z0_var.get().strip().replace(",", ".")),
        durations=parse_float_list(self.duration_text.get("1.0",
tk.END)),
        loads=parse_float_list(self.load_text.get("1.0", tk.END)),
    )

def run_calculation(self):
    try:
        data = self.get_input_data()
        self.result = calculate(data)
        self.fill_tables()
        self.update_summary()
        self.plot_daily_load()
        self.notebook.select(self.tab_deficit)
    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Помилка розрахунку", str(e))

def fill_tables(self):
    if self.result is None:
        return
    self.fill_tree(self.tree_generation, self.result.generation_df)
    self.fill_tree(self.tree_load, self.result.load_df)
    self.fill_tree(self.tree_deficit, self.result.deficit_df)

```

```

def fill_tree(self, tree: ttk.Treeview, df: pd.DataFrame):
    tree.delete(*tree.get_children())
    tree["columns"] = list(df.columns)

    for col in df.columns:
        tree.heading(col, text=col)
        tree.column(col, width=max(120, min(280, len(col) * 9)),
anchor="center")

    for _, row in df.iterrows():
        values = []
        for val in row:
            if isinstance(val, float):
                values.append(f"{val:.8g}")
            else:
                values.append(str(val))
        tree.insert("", tk.END, values=values)

def update_summary(self):
    if self.result is None:
        self.summary_label.config(text="")
        return

    txt = (
        f"Kr = {self.result.kg:.6f}\n"
        f"ΔE = {self.result.delta_e:.3f} МВт·год/пik\n"
        f"M(3) = {self.result.expected_damage:,.2f} грн/пik"
    )
    self.summary_label.config(text=txt)

def clear_graph_tab(self):
    for widget in self.graph_container.winfo_children():
        widget.destroy()

def show_figure(self, fig):
    self.clear_graph_tab()
    canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=self.graph_container)
    canvas.draw()
    canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
    plt.close(fig)
    self.notebook.select(self.tab_graph)

def plot_daily_load(self):
    if self.result is None:
        return

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 4.5), dpi=110)
    y = self.result.loads + [self.result.loads[-1]]
    ax.step(self.result.time_edges, y, where="post", linewidth=2)
    ax.set_title("Добовий графік навантаження")
    ax.set_xlabel("Час, год")
    ax.set_ylabel("Pн, МВт")
    ax.set_xlim(0, 24)
    ax.set_xticks(range(0, 25, 2))
    ax.grid(True, alpha=0.5)
    fig.tight_layout()
    self.show_figure(fig)

def show_all_plots(self):
    if self.result is None:
        messagebox.showwarning("Немає розрахунку", "Спочатку натисніть кнопку «Розрахувати».")
        return

```

```

win = tk.Toplevel(self)
win.title("Графіки розрахунку")
win.geometry("1100x780")

nb = ttk.Notebook(win)
nb.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

figures = [
    ("Добовий графік", self.make_daily_load_figure()),
    ("Ряд генерації", self.make_generation_figure()),
    ("Ряд навантаження", self.make_load_figure()),
    ("Ряд дефіциту", self.make_deficit_figure()),
    ("Внесок у  $\Delta E$ ", self.make_energy_contribution_figure()),
    ("Внесок у  $M(3)$ ", self.make_damage_contribution_figure()),
]

for title, fig in figures:
    frame = ttk.Frame(nb)
    nb.add(frame, text=title)
    canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master=frame)
    canvas.draw()
    canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)
    plt.close(fig)

def make_daily_load_figure(self):
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 4.5), dpi=110)
    y = self.result.loads + [self.result.loads[-1]]
    ax.step(self.result.time_edges, y, where="post", linewidth=2)
    ax.set_title("Добовий графік навантаження")
    ax.set_xlabel("Час, год")
    ax.set_ylabel("Pн, МВт")
    ax.set_xlim(0, 24)
    ax.set_xticks(range(0, 25, 2))
    ax.grid(True, alpha=0.5)
    fig.tight_layout()
    return fig

def make_generation_figure(self):
    df = self.result.generation_df
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 4.5), dpi=110)
    ax.bar(df["Рнаявн, МВт"], df["КГ, імовірність"], width=35)
    ax.set_title("Ряд розподілу наявної потужності генераторів")
    ax.set_xlabel("Рнаявн, МВт")
    ax.set_ylabel("КГ")
    ax.grid(axis="y", alpha=0.5)
    fig.tight_layout()
    return fig

def make_load_figure(self):
    df = self.result.load_df
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 4.5), dpi=110)
    ax.bar(df["Рн, МВт"], df["КН, імовірність"], width=35)
    ax.set_title("Ряд розподілу навантаження")
    ax.set_xlabel("Рн, МВт")
    ax.set_ylabel("КН")
    ax.grid(axis="y", alpha=0.5)
    fig.tight_layout()
    return fig

def make_deficit_figure(self):
    df = self.result.deficit_df
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 4.5), dpi=110)
    if len(df):
        ax.bar(df[" $\Delta P = k \cdot P_0$ , МВт"], df["КД, імовірність"], width=35)

```

```

ax.set_title("Ряд розподілу дефіциту потужності")
ax.set_xlabel("ΔP, МВт")
ax.set_ylabel("КД")
ax.grid(axis="y", alpha=0.5)
fig.tight_layout()
return fig

def make_energy_contribution_figure(self):
df = self.result.deficit_df
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 4.5), dpi=110)
if len(df):
    ax.bar(df["ΔP = k·P0, МВт"], df["Внесок у ΔE, МВт·год/рік"],
width=35)
    ax.set_title("Внесок ступенів дефіциту у ΔE")
    ax.set_xlabel("ΔP, МВт")
    ax.set_ylabel("МВт·год/рік")
    ax.grid(axis="y", alpha=0.5)
    fig.tight_layout()
    return fig

def make_damage_contribution_figure(self):
df = self.result.deficit_df
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 4.5), dpi=110)
if len(df):
    ax.bar(df["ΔP = k·P0, МВт"], df["Внесок у M(3), грн/рік"],
width=35)
    ax.set_title("Внесок ступенів дефіциту у M(3)")
    ax.set_xlabel("ΔP, МВт")
    ax.set_ylabel("грн/рік")
    ax.grid(axis="y", alpha=0.5)
    fig.tight_layout()
    return fig

def export_excel(self):
if self.result is None:
    messagebox.showwarning("Немає розрахунку", "Спочатку натисніть
кнопку «Розрахувати».")
    return

path = filedialog.asksaveasfilename(
    title="Зберегти результати в Excel",
    defaultextension=".xlsx",
    filetypes=[("Excel файли", "*.xlsx")]
)
if not path:
    return

summary_df = pd.DataFrame({
    "Показник": [
        "Коефіцієнт готовності Кг",
        "Математичне очікування недовідпуску ΔE, МВт·год/рік",
        "Математичне очікування збитку M(3), грн/рік"
    ],
    "Значення": [
        self.result.kg,
        self.result.delta_e,
        self.result.expected_damage
    ]
})

with pd.ExcelWriter(path, engine="openpyxl") as writer:
    summary_df.to_excel(writer, sheet_name="Підсумок", index=False)
    self.result.generation_df.to_excel(writer, sheet_name="Ряд
генерації", index=False)

```

```

        self.result.load_df.to_excel(writer, sheet_name="Ряд
навантаження", index=False)
        self.result.deficit_df.to_excel(writer, sheet_name="Ряд
дефіциту", index=False)

        messagebox.showinfo("Експорт завершено", f"Файл збережено:\n{path}")

    def clear_results(self):
        self.result = None
        for tree in [self.tree_generation, self.tree_load,
self.tree_deficit]:
            tree.delete(*tree.get_children())
            tree["columns"] = []
        self.clear_graph_tab()
        self.summary_label.config(text="")

if __name__ == "__main__":
    app = App()
    app.mainloop()

```