

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАБЕНКО МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.314

ДИСЕРТАЦІЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СИСТЕМА КАТОДНОГО
ЗАХИСТУ ПІДЗЕМНОГО СТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДА

141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
14 Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М.В. Бабенко

Науковий керівник:

Азюковський Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, професор.

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Бабенко М.В. Енергоефективна електротехнічна система катодного захисту підземного сталевих трубопровода.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2026.

Робота присвячена розробці методів вибору раціональних структур комплексних джерел живлення з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) для систем захисту від електрохімічної корозії підземних сталевих металоконструкцій. Орієнтація на джерела розподіленої генерації для живлення розгалуженої системи активних станцій катодного захисту (СКЗ) надає нові можливості електропостачання важкодоступних, віддалених та малонаселених регіонів країни. У поєднанні з сучасними схемними рішеннями та архітектурами вентильних перетворювачів, існує досить велика кількість схемних та режимних комбінацій для формування захисного потенціалу вздовж траси прокладання підземних сталевих трубопроводів.

Парадигма модульної інтеграції джерел живлення СКЗ обумовлює інваріантність гібридних джерел живлення відносно географічних та кліматичних умов використання. Вибір певних енергетичних модулів та їх потужність визначається ефективністю використання різних видів альтернативних джерел електроенергії у даному географічному регіоні і даних кліматичних умовах з урахуванням геології ґрунтів. Створення micro Smart Grid системи на основі гібридних альтернативних джерел дозволить вирішувати питання автономності, стабілізації рівня захисного потенціалу у динамічних режимах джерел блукаючих струмів та наявності полімерних поздовжніх вставок на трубопроводах, що відрізняється від існуючих методик розподілу СКЗ та їх живлення від централізованих систем електропостачання.

Перший розділ присвячений аналізу стану проблематики даного напрямку дослідження, показано різноманіття технічних параметрів сталевих підземних

трубопроводів для транспортування нафти та газу. Дослідження та публікації в області електрохімічної корозії показують, що єдиного підходу до визначення оптимальних значень захисного потенціалу та закономірностей його розподілу по довжині траси трубопроводу не існує. Але налаштування режимів роботи активних та пасивних СКЗ з урахуванням усього діапазону варіативних змінних, пов'язаних з електротехнічними, гідрогеологічними та електрохімічними процесами, дозволяє забезпечити надійну та безаварійну експлуатацію підземних сталевих металоконструкцій.

У другому розділі досліджено аналітичні моделі для визначення рівнів захисного потенціалу системи захисту від електрохімічної корозії, як функції двох змінних (часу та координати відстані трубопроводу). При цьому був прийнятий обґрунтований рівень припущень та початкових умов, який дозволив створити адекватні схеми заміщення трубопроводів з урахуванням геометричних розмірів конструкції, параметрів ґрунтів, наявності полімерних вставок для з'єднання секцій трубопроводів, якісних показників ізоляції та параметрів вентильних перетворювачів СКЗ.

Отримані вперше залежності дозволи стверджувати, що неоднорідність ґрунту впливає на градієнт захисного потенціалу СКЗ, точкові неоднорідності у вигляді перетинів залізничних колій, автомобільних доріг, кабельних підземних ліній електропередачі та стохастичний характер взаємного впливу заданих факторів на результуючий тип електромагнітного поля від групи катодних станцій.

Використання запропонованих аналітичних та графічних залежностей для різних умов роботи катодних станцій від поздовжньої координати дозволяє значно покращити якість формування функції захисного потенціалу. Це характеризує отримані наукові результати стосовно оцінки енергоефективних режимів захисту підземних трубопроводів від електрохімічної корозії.

Змінний характер функції захисного потенціалу на відстані 0–3000 м визначає необхідність та важливість врахування складних неоднорідностей для

розробки універсального методу вибору технічних параметрів комплексу електротехнічного захисту та оптимального режиму роботи.

У третьому розділі проведено аналіз електричних режимів та енергетичної ефективності при роботі СКЗ з вентильними перетворювачами. Особлива увага приділялась частотному складу первинного струму перетворювачів AC/DC при централізованому живленні системи захисту та можливостям реалізації стабільного рівня потенціалу при автономному живленні від сонячних та вітрових електростанцій (DC/DC перетворювачі).

Рівні вищих гармонік та інтергармонік при роботі випрямлячів та інверторів моделювались за допомогою стандартного математичного апарату на основі рядів Фур'є, що є ефективним інструментом дослідження періодичних функцій.

За умови живлення СКЗ у несиметричному режимі від централізованих систем ослабленої потужності у віддалених районах електричних мереж або при острівних режимах живлення, виконано аналіз складових повної потужності та отримані залежності, які дозволяють визначити електричні режими з найбільшою енергетичною ефективністю з точки зору перетікань реактивної потужності та емісії вищих гармонік до електричної мережі.

У четвертому розділі в середовищі Simulink / MATLAB були створені моделі мережі з розподіленою генерацією, що включає в себе споживача у вигляді СКЗ ($S_{СКЗ} = 3$ кВА), а також сонячні та вітрові електростанції малої потужності (3 кВт та 5 кВт). Для моделювання використовувалися реальні набори даних з навантаженням та генерацією електроенергії, а також метеопараметри (швидкість вітру та рівень сонячної інсоляції), прив'язані до часу.

У професійному програмному продукті HelioScore виконано моделювання складу та електричних режимів генерації та енергетичної ефективності гібридної сонячної електростанції потужністю 3 кВт для умов розташування у трьох географічних регіонів України (Дніпропетровська, Одеська та Закарпатська область). Визначено діапазон розбіжності показників генерації для урахування у

методиці вибору структури та потужності джерел генерації та акумулювання електроенергії.

Сформульовано та представлено вирішення оптимізаційної задачі вибору структури автономного електрогенеруючого комплексу з відновлюваними джерелами енергії для СКЗ. Обґрунтовані важливі енергетичні критерії прийняття рішення за показниками надійності, якості електроенергії та мінімуму загальних витрат. Даний алгоритм дозволяє обрати оптимальний варіант при компромісних взаємовиключних рішеннях за різних умов інсоляції, сили вітру та вартості логістичних перевезень для регіонів України.

Отримані результати похибок генерації знаходяться у допустимих для подібних систем значень та можуть бути зменшені при раціональному виборі параметрів перетворювачів, системи зовнішнього електропостачання та Storage-системи, яка дозволить об'єкту критичної інфраструктури працювати надійно під час блекаутів та обмежень електропостачання.

Ключові слова: Електротехнічний комплекс, електрохімічна корозія, станція катодного захисту, захисний потенціал, джерело живлення, перетворювач, електричні поля, адаптивне керування потенціалом, сонячна електростанція, вітрова електростанція, система накопичення енергії, вищі гармоніки, інтелектуальні електричні мережі, мікромережі.

Список публікацій здобувача

Статті у наукових фахових виданнях України

Азюковський О., Бабенко М. (2025). ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СТАНЦІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ТРУБОПРОВІДІВ НА ОСНОВІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ. *Електротехнічні та інформаційні системи*. 108, 3-7. (Фахове видання).

Расцветаев В.О., Азюковський О.О., Пащенко О.А., Яворська В.В., Бабенко М.В. (2025). Неруйнівні методи оцінки впливу газогідратів на міцність

магістральних трубопроводів. Технічна інженерія, 2(96), 322-330. (Фахове видання).

Расцветаев В.О., Азюковський О.О., Пащенко О.А., Бабенко М.В., Васильченко Д.О. (2025). Термодинамічні та кінетичні аспекти формування газогідратів у магістральних трубопроводах. Вісті Донецького гірничого інституту, 2(57), 7-14. (Фахове видання).

Наукові праці у виданнях іноземних держав або виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз

Aziukovskyi O.O., Papaika Y.A., Gorev V.N., Babenko N.V. (2024). REGULATIONS OF THE FORMATION OF PROTECTIVE POTENTIAL OF UNDERGROUND STEEL PIPELINES UNDER CONDITIONS OF HETEROGENEOUS ENVIRONMENT. Technical Electrodynamics. 2024(2), pp. 23–29. (Scopus).

Aziukovskyi O.O., Papaika Yu.A., Babenko M.V. (2024). CONSIDERATION OF THE VARIABLE STORAGE POTENTIAL OF UNDERGROUND STEEL PIPELINES IN THE DEVELOPMENT OF ELECTRICAL COMPLEXES FOR THEIR PROTECTION AGAINST ELECTROCHEMICAL CORROSION. Technical Electrodynamics. 2024(5), pp. 85–93. (Scopus).

Aziukovskyi O., Papaika Yu., Podoltsev O., Babenko M., Shykhov S. (2024). SIMULATION OF THE OPERATION MODES OF THE CATODIC PROTECTION COMPLEX OF PIPELINES IN THE APPROACH OF OVERHEAD POWER LINES. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2024, (6). pp. 73–78. (Scopus).

Aziukovskyi O.O., Pivniak H.H., Babenko M.V., Shykhov S.K. (2025). Influence of the protective potential distribution of a steel underground pipeline on electrochemical corrosion processes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2025, (2). pp. 155–163. (Scopus).

Праці апробаційного характеру

Азюковський О.О., Папаїка Ю.А., Бабенко М.В. Змінна складова захисного потенціалу від електрохімічної корозії підземних сталевих трубопроводів. XVIII міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки – 2024» (м. Київ, 25-27 червня 2024 року).

Aziukovskyi, O., Shykhov, S., & Babenko, M. (2025). Optimization of Hot Blast Stove Emissions Through Automated Control System Configuration. *Physical and Chemical Geotechnologies*, 9(1), 091002.

Патент на корисну модель

Расцветаев В. О., Азюковський, О.О., Коровяка, Є.А., Ігнатов А.О., Пашенко О. А., Хоменко В.Л., Бабенко М.В., Шихов С.К. (2025). Пристрій для регулювання температурного режиму в трубопроводах. Патент на корисну модель № 161729, Україна.

ABSTRACT

Babenko M.V. Energy-efficient electrical cathodic protection system for underground steel pipelines.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 – Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. –Dnipro University of Technology, Dnipro, 2026.

The work is devoted to the development of methods for selecting rational structures of complex power sources with renewable energy sources (RES) for protection systems against electrochemical corrosion of underground steel metal structures. Orientation to distributed generation sources for powering an extensive system of active cathodic protection stations (SPS) provides new opportunities for power supply of hard-to-reach, remote and sparsely populated regions of the country. In combination with modern circuit solutions and architectures of valve converters, there is a fairly large number of circuit and mode combinations for forming a protective potential along the route of laying underground steel pipelines.

The paradigm of modular integration of power sources of SPC determines the invariance of hybrid power sources with respect to geographical and climatic conditions of use. The choice of certain energy modules and their power is determined by the efficiency of using different types of alternative sources of electricity in a given geographical region and given climatic conditions, taking into account soil geology. The creation of a micro Smart Grid system based on hybrid alternative sources will allow solving the issues of autonomy, stabilization of the level of protective potential in dynamic modes of stray current sources and the presence of polymer longitudinal inserts on pipelines, which differs from existing methods of distributing SPCs and their power supply from centralized power supply systems.

The first section is devoted to the analysis of the state of the issues of this area of research, showing the variety of technical parameters of steel underground pipelines for transporting oil and gas. Research and publications in the field of electrochemical corrosion show that there is no single approach to determining the optimal values of the protective potential and the patterns of its distribution along the length of the pipeline route. But setting the operating modes of active and passive SCCs taking into account the entire range of variable variables associated with electrical, hydrogeological and electrochemical processes allows ensuring reliable and trouble-free operation of underground steel metal structures.

In the second section, analytical models are investigated to determine the levels of the protective potential of the electrochemical corrosion protection system as a function of two variables (time and pipeline distance coordinates). At the same time, a reasonable level of assumptions and initial conditions was adopted, which allowed creating adequate pipeline replacement schemes taking into account the geometric dimensions of the structure, soil parameters, the presence of polymer inserts for connecting pipeline sections, qualitative insulation indicators and parameters of SCC valve converters.

The dependences obtained for the first time allowed us to state that the soil heterogeneity affects the gradient of the protective potential of the SPC, point heterogeneities in the form of intersections of railway tracks, highways, underground

cable power lines and the stochastic nature of the mutual influence of the specified factors on the resulting type of electromagnetic field from a group of cathode stations.

The use of the proposed analytical and graphical dependences for different operating conditions of cathode stations on the longitudinal coordinate allows us to significantly improve the quality of the formation of the protective potential function. This characterizes the obtained scientific results regarding the assessment of energy-efficient modes of protection of underground pipelines from electrochemical corrosion.

The variable nature of the protective potential function at a distance of 0–3000 m determines the need and importance of taking into account complex heterogeneities for the development of a universal method for selecting the technical parameters of the electrical protection complex and the optimal operating mode.

In the third section, an analysis of electrical modes and energy efficiency during the operation of the SPC with valve converters is carried out. Special attention was paid to the frequency composition of the primary current of AC/DC converters with centralized power supply of the protection system and the possibilities of implementing a stable potential level with autonomous power supply from solar and wind power plants (DC/DC converters).

The levels of higher harmonics and interharmonics during the operation of rectifiers and inverters were modeled using standard mathematical apparatus based on Fourier series, which is an effective tool for studying periodic functions.

Under the condition of power supply of the RMS in an asymmetric mode from centralized systems of weakened power in remote areas of the electric grid or in island power modes, an analysis of the components of the full power was performed and dependencies were obtained that allow determining the electrical modes with the highest energy efficiency in terms of reactive power flows and emission of higher harmonics to the electric grid.

In the fourth section, models of a network with distributed generation were created in the Simulink / MATLAB environment, which includes a consumer in the form of a RMS ($S_{RMS} = 3 \text{ kVA}$), as well as small-power solar and wind power plants (3 kW and 5 kW). Real data sets with load and electricity generation, as well as

meteorological parameters (wind speed and solar insolation level) tied to time, were used for modeling.

In the professional software product HelioScope, the composition and electrical modes of generation and energy efficiency of a hybrid solar power plant with a capacity of 3 kW were simulated for the conditions of location in three geographical regions of Ukraine (Dnipropetrovsk, Odesa and Transcarpathian regions). The range of divergence of generation indicators was determined to be taken into account in the methodology for selecting the structure and power of sources of generation and accumulation of electricity.

The solution to the optimization problem of selecting the structure of an autonomous power generating complex with renewable energy sources for the VPS was formulated and presented. Important energy criteria for decision-making based on indicators of reliability, quality of electricity and minimum total costs were substantiated. This algorithm allows you to choose the optimal option for compromise mutually exclusive solutions under different conditions of insolation, wind force and cost of logistics transportation for the regions of Ukraine.

The obtained results of generation errors are within the permissible values for such systems and can be reduced by rational selection of parameters of converters, external power supply system and storage system, which will allow the critical infrastructure facility to operate reliably during blackouts and power supply restrictions.

Keywords: Electrical complex, electrochemical corrosion, cathodic protection station, protective potential, power source, converter, electric fields, adaptive potential control, solar power plant, wind power plant, energy storage system, higher harmonics, intelligent electrical networks, microgrids.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
 РОЗДІЛ 1	
СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАВДАННЯ	
ДОСЛІДЖЕННЯ.....	24
1.1. Аналіз проблеми електрохімічного захисту від корозії підземних сталевих трубопроводів.....	24
1.2. Доцільність подовження терміну експлуатації підземних сталевих трубопроводів	29
1.3. Перелік факторів, що зменшують термін експлуатації трубопроводів	36
1.4. Електрохімічна корозія та її вплив на експлуатаційні характеристики підземних сталевих трубопроводів.....	46
1.4.1 Загальні основи електрохімічної корозії	46
1.4.2. Корозія в ґрунтах як середовищі електрохімічної взаємодії...	50
1.4.3. Гальванічна та локалізована корозія як фактор порушення працездатності.....	55
1.5 Види та способи захисту від електрохімічної корозії.....	58
1.5.1 Катодний захист.....	58
1.5.2 Анодний захист.....	61
1.6 Система електрохімічного захисту, як об'єкт електроспоживання	64
1.6.1 Конфігурація системи електрохімічного захисту та вплив елементів кола на розподіл струмів і потенціалів.....	64
1.6.2 Джерело живлення системи електрохімічного захисту як активний елемент електричного кола.....	66

1.6.3 Характерні особливості електроспоживання установок електрохімічного захисту.....	68
1.6.4 Фактори, що визначають електроспоживання.....	70
1.6.5 Надійність електропостачання та взаємодія з енергосистемою	72
1.7. Постановка задачі наукових досліджень.....	74
1.8. Висновки по розділу 1.....	76

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ РІВНІВ ЗАХИСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ У ПАСИВНИХ ТА АКТИВНИХ СИСТЕМАХ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ.....	77
2.1 Аналітичні моделі розподілу захисного потенціалу СКЗ у двовимірному просторі.....	77
2.2. Особливості врахування неоднорідностей у залежностях розподілу потенціалу	86
2.3. Вплив повітряних ліній електропередач на характер розподілу захисного потенціалу.....	91
2.4. Висновки по розділу 2.....	104

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ СКЗ З ВЕНТИЛЬНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ.....	107
3.1 Аналіз типових схемних рішень перетворювачів для СКЗ.....	107
3.2 Аналіз спектрального складу вихідного струму СЗК для різних схемних реалізацій перетворювачів.....	112
3.3 Методи і моделі визначення рівнів несинусоїдальності вихідного сигналу.....	115
3.4. Вплив вищих гармонік на енергетичну ефективність СКЗ	119
3.5. Моделювання режимів роботи керованих та некерованих перетворювачів СКЗ.....	121

3.6. Висновки по розділу 3.....	126
---------------------------------	-----

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ

СКЗ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ.....	127
4.1. Визначення початкових умов та рівнів припущення.....	127
4.2. Дослідження стохастичного характеру електричних навантажень станцій катодного захисту.....	130
4.3. Розробка цифрової моделі гібридної сонячної електростанції....	137
4.4. Розробка цифрової моделі вітрової електростанції	139
4.5. Моделювання рівнів генерації електроенергії для трьох географічних регіонів України у програмі HelioScore.....	141
4.6. Розробка методики вибору параметрів комплексного джерела живлення СКЗ.....	143
4.7. Висновки по розділу 4.....	149

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ	150
--------------------------------------	-----

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
----------------------------------	-----

ДОДАТКИ.....	164
--------------	-----

Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів	164
---	-----

Додаток Б. Довідки про впровадження та використання результатів дисертаційної роботи	166
---	-----

Додаток В. Результати моніторингу рівнів захисного потенціалу.....	169
---	-----

Додаток Г. Моделювання річної генерації електроенергії в умовах трьох регіонів України.....	172
--	-----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГТС - газотранспортна система
ГРС - газорозподільна станція
МІК - мікробіологічно індукована корозія
КЗ – катодний захист
СКЗ - станції катодного захисту
ВВ – високовольтний випрямляч
СПЧ – силовий перетворювач частоти
ВН – низьковольтний випрямляч
СК – система керування
ЛЕП – лінія електропередачі
ВГ – вищі гармоніки
ІГ – інтергармоніки
ШПФ – швидке перетворення Фур'є
СЕС – сонячна електростанція
ВЕС – вітрова електростанція
СЕП – система електропостачання
КРП – компенсація реактивної потужності
БК – батареї конденсаторів
АД – асинхронні двигуни
СІФУ – система фазо-імпульсного управління
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність досліджень

У сучасних умовах існування воєнних, політичних, економічних, соціальних та екологічних ризиків надзвичайно важливим питанням є пошук концептуально нових підходів до формування стратегії забезпечення енергонезалежності, енергобезпеки та енергоефективності країни в цілому, окремих територіальних громад, а також суб'єктів малого та середнього бізнесу, які є основою для інтенсифікації темпів економічного розвитку. Попередні дослідження довели, що одним з дієвих підходів до вирішення даного питання є науково обґрунтований вибір технічних, технологічних, економічних, екологічних параметрів стратегічно важливої газотранспортної системи України (ГТС) та модульний принцип створення гнучкої гібридної системи власних потреб для забезпечення надійного та безаварійного живлення системи електрохімічного захисту, навіть під час тривалих обмежень у електропостачанні та блекаутах.

Проблема електрохімічної корозії підземних сталевих трубопроводів - одна з найсерйозніших у сфері експлуатації інженерних мереж, адже вона може призводити до втрат герметичності, аварій, витоків, забруднення ґрунтів і підземних вод, а також до значних економічних збитків [1, 2].

В основі проблематики знаходиться процес руйнування металу внаслідок електрохімічних реакцій, що відбуваються у вологому ґрунті, який визначається електролітичними властивостями. Механізм виникнення електрохімічної корозії розділяється на анодні та катодні ділянки на поверхні труби. Це призводить до окислення металу в анодній зоні та утворення вільних електронів. Рух електронів до катодної зони призводить до реакції відновлення кисню [3-5].

Провідним середовищем для руху електронів є глинистий і вологий ґрунт, який проводить електричний струм. Це дозволяє утворювати електрохімічну пару між різними ділянками металу або між металом і сторонніми об'єктами.

Особливу небезпеку у теорії електрохімічної корозії складають блукаючі струми (від електричного транспорту чи заземлення), які також можуть значно посилювати корозію, викликаючи втрати металу в місцях витоку струму з металу в ґрунт.

Основні чинники, що сприяють електрохімічній корозії [5]:

- Висока вологість ґрунту.
- Хімічно агресивне середовище (сульфати, хлориди, кислоти).
- Погана або відсутня ізоляція труб.
- Недостатній електрохімічний захист.
- Наявність джерел блукаючих струмів (наприклад, рейковий транспорт, ЛЕП).
- Контакт з різними металами (утворення гальванічної пари).

Методи захисту сталевих трубопроводів [6, 7]:

- Ізоляційні покриття (бітумні, полімерні, епоксидні тощо). Маючи діелектричні властивості ці матеріали зменшують контакт металу з ґрунтом.
- Катодний захист з використання джерела постійного струму (примусовий катодний захист) або жертвенного анода (магній, цинк, алюміній), який кородує замість сталі.
- Моніторинг і контроль потенціалів за умови регулярного вимірювання потенціалів труби відносно еталонного електрода для контролю ефективності захисту.
- Заземлення і нейтралізація блукаючих струмів. Правильне заземлення джерел струму, використання дренажних пристроїв.
- Застосування корозійно-стійких матеріалів (нержавіюча сталь, полімерні труби або ізоляція труб).

Актуальність вирішення проблеми.

Якщо ігнорувати проблему електрохімічної корозії, то виникають витoki газу або нафти, зростає ризик вибухів або екологічного забруднення, ремонтні витрати зростають у рази, зменшується строк служби мережі. Тому, зважаючи на

те, що електрохімічна корозія - це складне, але передбачуване явище, вчасна профілактика, постійний моніторинг та застосування захисних технологій дають змогу значно продовжити термін служби сталевих трубопроводів та знизити аварійність. При цьому розробка сучасних активних систем катодного захисту - це один із найефективніших методів боротьби з електрохімічною корозією сталевих підземних трубопроводів. Для реалізації цього захисту використовують станції катодного захисту (СКЗ) - спеціальні технічні комплекси, які забезпечують подачу захисного струму до трубопроводу. Невирішеним залишається питання розробки архітектури комплексних джерел живлення катодних станцій від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у віддалених та важкодоступних районах країни. Реалії воєнного стану та постійні загрози тривалих порушень електропостачання тільки посилюють необхідність створення розгалуженої децентралізованої системи автономних джерел живлення СКЗ [9].

Критичний аналіз існуючих у промисловості типів СКЗ дозволив виявити режимні особливості різних типів та визначитись з оптимальною структурою електротехнічного комплексу живлення [10, 11].

Станції катодного захисту поділяються за принципом дії на два основних типи:

1. Станції примусового струму (зовнішнього джерела живлення) за принципом подачі до сталевих трубопроводів захисного струму від джерела постійного струму (перетворювача або випрямляча). Анод при цьому розміщується в ґрунті на певній віддаленості. Подібна реалізація захисту дозволяє забезпечити стабільний рівень захисного потенціалу у координаті відстані трубопроводу. При цьому можливо забезпечити регулювання сили струму в залежності від умов прокладання трубопроводу, топології місцевості та розгалуженості мережі. Основним недоліком цього принципу захисту є необхідність надійного електропостачання СКЗ, що інколи складно або неможливо забезпечити через відсутність систем електропостачання або низьку якість напруги.

2. Станції з анодним захистом (гальванічні системи). Захисний струм у таких системах виникає внаслідок гальванічної пари між більш активним металом (анод з магнію, цинку, алюмінію) і сталлю. За даного принципу захисту відбувається руйнування аноду замість труби, відсутня потреба у електроживленні, простота конструкції та низька вартість спорудження. Проте суттєві недоліки обмежують масове використання станцій подібного типу через обмежену ефективність при високій корозійній активності ґрунту, неможливість використання у розгалужених мережах з трубами у пошкодженій ізоляції. Крім того, необхідна організація постійного контролю за станом анодного заземлювача, що складно реалізувати.

Метою роботи є розробка науково обґрунтованої концепції гібридних електрогенеруючих комплексів живлення СКЗ на базі відновлюваних джерел енергії з вибором їх технічних, технологічних, економічних параметрів та модульних елементів, спрямованої на максимальну енергетичну ефективність та надійність реалізації заданих рівнів захисного потенціалу.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі сформульовано і виконано наступні **задачі досліджень**:

1. Дослідити сучасні підходи до принципи вибору технічних, технологічних, економічних параметрів систем електрохімічного захисту залежно від вхідних умов (географічні, кліматичні, інфраструктурні, ресурсні, тощо), внутрішніх й зовнішніх обмежень енергосистеми.

2. Аналіз впливу схемних реалізацій вентильних перетворювачів СКЗ на спектральний склад вихідного струму та рівні захисного потенціалу.

3. Аналіз типових графіків електричних навантажень СКЗ з урахуванням стохастичного характеру зміни технологічних умов прокладання підземних трубопроводів.

4. Обґрунтувати багатоваріантну гнучку математичну модель вибору параметрів та модульних елементів гібридних електрогенеруючих комплексів СКЗ за критерієм максимальної енергетичної ефективності та надійності.

5. Моделювання параметрів електричної частини автономних електрогенеруючих комплексів, графіків генерації електроенергії для різних регіонів України та режимів DC/DC перетворювачів при гібридному та децентралізованому приєднанні до існуючої енергосистеми.

Об’єкт дослідження – електромагнітні процеси генерації, перетворення та споживання електроенергії станціями катодного захисту при гібридному та автономному способі реалізації джерела живлення.

Предмет дослідження – показники енергетичної ефективності та якості формування захисного потенціалу об’єкту електрохімічного захисту підземного трубопроводу при застосуванні активних керованих перетворювачів.

Ідея роботи – забезпечення достатнього та ефективного електропостачання станцій катодного захисту від автономних відновлюваних джерел енергії шляхом врахування індивідуальних особливостей графіків електричних навантажень при збереженні оптимальних рівнів захисного потенціалу та наявності точкових неоднорідностей.

Наукова задача полягає у встановленні закономірності реалізації енергоефективних значень потенціалів захисту трубопроводу шляхом встановлення залежностей реалізації енергоефективних режимів роботи автономних електрогенеруючих комплексів з відновлюваними джерелами енергії та системами керування вентилями перетворювачами, які відрізняються від існуючих можливостями реалізації раціональних значень потужності станцій катодного захисту у спектрі частот до 50 кГц, що забезпечить необхідний рівень електромагнітної сумісності, оптимізує витрати електроенергії, дозволить створити децентралізовану розгалужену систему живлення станцій.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі при визначенні раціональних структур системи захисту від електрохімічної корозії використано комплексний підхід, що включає в себе методи розрахунку електричних кіл, теорію ймовірності, математичну статистику, теорію спектрального аналізу, диференційні числення, теорія несинусоїдальних струмів та математичного моделювання. Для імітаційного моделювання використано програмний продукт

MATLAB (Simulink) та HelioScope. Експериментальні дослідження проведені з використанням методів обробки даних.

Наукові положення, що виносяться на захист:

1. Мінімальна потужність комплексного джерела електропостачання станцій катодного захисту визначається електротехнічними параметрами що характеризують стан ізоляційного покриття підземних трубопроводів та провідність ґрунту.

2. Мінімальний рівень вихідної напруги акумулятора за якою зберігається дієздатність електротехнічної системи захисту від корозії визначається співвідношенням внутрішнього опору акумулятора до повного опору ізоляційного покриття підземного сталевих трубопроводу і частотним спектром вихідного сигналу СКЗ.

3. Мінімальний рівень вихідної напруги акумулятора за якою зберігається дієздатність електротехнічної системи захисту від корозії з транзисторним інвертором визначається співвідношенням внутрішнього опору акумулятора до повного опору ізоляційного покриття підземного сталевих трубопроводу.

Наукові результати дослідження:

1. Розвинуто механізми вибору параметрів комплексного джерела автономного електропостачання станцій катодного захисту підземних сталевих трубопроводів з урахуванням стохастичних особливостей формування електричних навантажень, умов прокладання трубопроводів та наявності неоднорідностей, що дозволяє реалізувати максимальну енергетичну ефективність роботи комплексу в умовах технологічних обмежень енергосистеми або блекаутах.

2. Аналіз особливостей формування умов ефективного захисту від електрохімічної корозії електротехнічного комплексу «Підземний трубопровід – група станцій катодного катодного захисту» дозволив отримати їх унікальні особливості - неоднорідність ґрунту впливає на градієнт захисного потенціалу. Це враховано при моделюванні точковими неоднорідностями у вигляді перетинів

залізниць, автомобільних доріг, кабельних підземних ліній електропередачі та стохастичному характеру графіку електричних навантажень станцій, що дозволяє реалізувати оптимальний результуючий енергоефективний режим даного електротехнічного комплексу.

3. Враховуючи обов'язкове дотримання жорстких вимог до розподілу захисного потенціалу по всій довжині трубопроводу, обґрунтована концепція модульного електрогенеруючого комплексу з відновлюваними джерелами енергії та вентилями перетворювачами при формуванні вихідного сигналу у спектральному діапазоні до 50 кГц DC/DC або DC/AC перетворювачів.

4. Результати моделювання графіків генерації електроенергії від вітроенергетичних та сонячних електростанцій за територіальним принципом визначають необхідність і важливість врахування стохастичності електричних режимів навантаження для розробки універсальної методики вибору технічних параметрів комплексу електротехнічного захисту та встановлення оптимального режиму роботи.

5. При аналітичному описанні електромагнітних процесів формування захисного потенціалу катодними станціями були прийняті припущення щодо найбільш розповсюджених геометричних розмірів трубопроводів (діаметр труби, товщина стінки, матеріал, ізоляція). У дослідженні було прийнято ряд стандартних довжин трубопроводів у діапазоні 1000-10000 м.

6. Точки приєднання активних та пасивних катодних станцій приймаються з умов прокладання траси трубопроводу, наявності перетинів з залізничними коліями, коліями міського електротранспорту, автомагістралей тощо. Для кожної ділянки трубопроводів середнього та високого тиску приймається індивідуальна схема розподілу захисних станцій з урахуванням геології ґрунтів. В даній роботі прийнято кілька різних варіантів приєднання катодних станцій.

7. Сформульовано та представлено вирішення оптимізаційної задачі вибору структури автономного електрогенеруючого комплексу з відновлюваними джерелами енергії для СКЗ. Обґрунтовані важливі енергетичні критерії прийняття рішення за показниками надійності, якості електроенергії та

мінімуму загальних витрат. Даний алгоритм дозволяє обрати оптимальний варіант при компромісних взаємовиключних рішеннях за різних умов інсоляції, сили вітру та вартості логістичних перевезень для регіонів України.

Практична цінність роботи полягає в:

- обґрунтуванні уточненого розрахункового співвідношення для визначення параметрів схеми заміщення металевої конструкції при дослідженні режимів електротехнічної системи катодного захисту;
- створенні методики, алгоритму та програмного забезпечення для моделювання розподілу захисного потенціалу вздовж підземного металевого трубопроводу;
- розробці рекомендацій щодо вибору комплексного джерела електропостачання з відновлюваним джерелами енергії при врахуванні ймовірнісних характеристик зміни навантаження;
- обґрунтуванні впливу спектрального складу вихідного струму СКЗ на ефективність захисту;
- розробці технічного рішення з вибору типу та потужності фотоелектричних модулів та/або вітроенергетичної установки за географічним розташуванням об'єкту захисту.

Особистий внесок здобувача включає в себе проведення фундаментальних теоретичних і експериментальних досліджень, які були представлені у дисертаційній роботі. Це включало розробку теоретичних моделей, методик експериментальних досліджень, участь у виконанні експериментів, аналіз, інтерпретацію та узагальнення отриманих результатів. Основні наукові висновки та результати дисертаційної роботи були отримані автором самостійно.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати досліджень пройшли апробацію і отримали позитивну оцінку на таких вітчизняних і міжнародних науково-технічних конференціях:

Азюковський О.О., Папаїка Ю.А., Бабенко М.В. Змінна складова захисного потенціалу від електрохімічної корозії підземних сталевих трубопроводів. XVIII

міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки – 2024» (м. Київ, 25-27 червня 2024 року).

Aziukovskyi, O., Shykhov, S., & Babenko, M. (2025). Optimization of Hot Blast Stove Emissions Through Automated Control System Configuration. *Physical and Chemical Geotechnologies*, 9(1), 091002.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 10 наукових працях, у тому числі три статті у наукових фахових виданнях України, а також 4 публікації — у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 180 сторінок, з яких основний зміст викладений на 178 сторінках друкованого тексту і містить 69 рисунки, 10 таблиць, список використаних джерел зі 115 найменувань та чотирьох додатків.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз проблеми електрохімічного захисту від корозії підземних сталевих трубопроводів

Потужна енергетика та надійне і стабільне транспортування енергоносіїв таких як нафта і газ є основою енергетичної безпеки та сталого розвитку кожної країни. Газотранспортна система України (ГТС України) представляє собою комплекс інженерних систем транспортування природного газу і є одним із найбільших в Європі. ГТС має значне економічне і геополітичне значення [1-3], оскільки не тільки забезпечує природним газом внутрішніх споживачів, а й являє собою ключову ланку між газовидобувними регіонами Східної Європи та Центральної Азії і основними центрами споживання природного газу в Україні та країнах Європейського Союзу. Оскільки, надійна і безперебійна робота усіх елементів газотранспортного комплексу є однією із основ української економіки і промисловості, а також важливою складовою розвитку і зростання національного добробуту, українська ГТС признана важливим об'єктом критичної інфраструктури загально державного значення [4, 6].

Газотранспортна система відлічує своє існування від початку експлуатації Дашавського газового родовища в 1924 році та спорудження від нього перших українських газопроводів [7, 8]. Через свою значну, більш ніж столітню, історію Українська ГТС представляє собою розгалужену мережу інженерних об'єктів і споруд (Рис. 1.1) до яких входять як безпосередньо газопроводу так і споруди, що забезпечують функціонування та якість продукту, що транспортується системою.

Магістральні газопроводи представляють собою системи труб великого діаметру: від 1000 мм, типово – 1200 – 1400 мм (Рис. 1.2). Вони забезпечують транспортування газу під високим тиском (зазвичай 7,5 МПа) на великі відстані,

від місць видобутку, зберігання та імпорту природного газу до газотранспортної системи, до районів споживання або передачі в інші газопроводи [3].



Рис. 1.1. Карта газотранспортної системи України [3]



Рис. 1.2. Ремонт магістрального трубопроводу [6]

Стратегічне розташування України між газовидобувними регіонами та споживачами газу в країнах Європейського Союзу, а також тісний зв'язок української ГТС із системами країн сусідів значно підвищує значущість існуючих магістральних трубопроводів. Основними транзитними магістральними трубопроводами газотранспортної системи України є газопроводи «Союз» (діаметр – 1420 мм; протяжність територією України – 1568 км), «Уренгой – Помари – Ужгород» (діаметр – 1420 мм; протяжність територією України – 1160 км), «Прогрес» (діаметр – 1400 мм; протяжність територією України – 1160 км) [1].

Для підтримання високого тиску вздовж усієї довжини магістральних трубопроводів будуються **компресорні станції** (Рис. 1.3) із газоперекачувальними агрегатами [7]. Їх завданням є підтримка необхідних гідравлічних параметрів потоку та компенсація втрати тиску в процесі транспортування газу. Газоперекачувальні агрегати в складі компресорних станцій можуть бути представлені в наступному виконанні: газомоторними поршневыми компресорами або відцентровими нагнітачами з приводом від газотурбінних установок або електродвигунів.



Рис. 1.3. Компресорна станція [8]

Крім того, на всіх компресорних станціях передбачається обладнання для очищення газу від механічних домішок у пиловловлювачах і фільтрах, охолодження газу після перекачування газу. Також наявне допоміжне обладнання, що забезпечує функціонування основних вузлів компресорної станції, такі як: системи електропостачання, теплопостачання, водопостачання та склади обладнання та запчастин.

Для підготовки природного газу до передачі до споживачів, газ, що протікає по магістральному трубопроводу по газопроводам відводам поступає на **газорозподільні станції (ГРС)** [9]. Основним завданням ГРС є зниження тиску газу до рівня, необхідного споживачу. Крім того на газорозподільних станціях відбувається додаткова очистка газу від механічних часток, облік та контролю якості газу, до газу додається одорант (речовини з неприємним запахом, призначена для швидкого визначення витоків газу).

Після пониження тиску на газорозподільних станціях, газ потрапляє у трубопроводи **газорозподільної системи** [10]. Газорозподільна система є комплексом інженерних споруд головною задачею якої є безпосереднє живлення промислових і побутових споживачів. Основою системи є мережа газопроводів, яка представлена декількома групами в залежності від тиску: газопроводи високого тиску I категорії (тиск від 0,6 до 1,2 МПа) та II категорії (тиск від 0,3 до 0,6 МПа); газопроводи середнього тиску (тиск від 0,005 до 0,3 МПа); газопроводи низького тиску (тиск до 0,005 МПа) [11].

Крім того до газорозподільних систем входять обладнання та споруди, що забезпечують функціонування газопровідних мереж, такі як: обладнання для зниження тиску і підтримання його на заданому рівні, лінії технологічного зв'язку, споруди та обладнання автоматизованих систем контролю, колодязі, запірні арматури, компенсатори, конденсатозбірники, контрольні трубки, контрольно-вимірювальні пункти, футляри, розпізнавальні і сигнальні знаки тощо.

Важливим елементом ГТС України є система **підземних сховищ газу**, яка є найбільшим в Європі комплексом газосховищ (Рис. 1.4). Вони

використовуються для сезонного вирівнювання споживання, шляхом зберігання надлишків газу в періоди зниженого попиту (зазвичай весна - літо), і віддачею в період підвищеного споживання. Зазвичай, для підземних сховища газу переобладнують відпрацьовані нафтові і газові родовища. Наявність таких запасів газу позитивно впливає на підвищення надійності газопостачання та забезпечення попиту у періоди пікових навантажень. Значна частина цих сховищ розташована поблизу західних кордонів України, що створює додаткові можливості для інтеграції з європейським газовим ринком.



Рис. 1.4. Комплекс підземного зберігання газу [12]

Фактично, через значний вік, газотранспортна система України характеризується великим різноманіттям обладнання, що використовується на усіх етапах шляху природного газу від місць видобутку до споживачів. Різноманіття матеріалів трубопроводів, їх діаметрів, робочих тисків, і типів компресорного та іншого обладнання, зумовлено поетапним розвитком системи протягом кількох десятиліть. Значна частина об'єктів була введена в

експлуатацію у другій половині XX століття, що визначає актуальність питань модернізації, підвищення енергоефективності та надійності експлуатації [13].

Таким чином, газотранспортна система України є складним багаторівневим техніко-технологічним комплексом, що має стратегічне значення для енергетичної безпеки держави та регіону в цілому. Її подальший розвиток пов'язаний із необхідністю технічного оновлення, впровадження сучасних систем управління та забезпечення безпечної й надійної експлуатації в умовах змінного характеру електропостачання і зростаючих вимог до енергоефективності.

1.2 Доцільність подовження терміну експлуатації підземних сталевих трубопроводів

Як вже згадувалось вище, основним методом транспортування енергоносіїв на великі відстані від місць видобутку і зберігання є газонафтопроводи [14]. Трубопровід, як метод транспортування рідин, газу та суспензій відомий вже давно [15], і зустрічається в різних іпостасях ще за довго до нашої ери.

Яскравими представниками стародавніх трубопроводів є акведуки Римської імперії (Рис. 1.5), які забезпечували водопостачання великих міст, і представляють собою справжні шедеври, частини яких дійшли і до наших днів [16]. Навіть в Стародавньому Єгипті використовувались для водопостачання труби із різних матеріалів, таких як кераміка, дерево та метали. Вперше використовувати газопроводи почали в Китаї [17], де метан із глибоких свердловин використовувався для опалення й освітлення, а доставлявся він за допомогою трубопроводів виготовлених із бамбуку.



Рис. 1.5. Римські акведуки [16]

Із зростанням виробництва і промисловості, початку масового застосування в двигунів внутрішнього згоряння та зростання потреб побутових споживачів, зросла і потреба у вуглеводнях, і відповідно значного розвитку набула паливно-енергетична галузь. І якщо нафту можливо транспортувати в цистернах або тарі, за допомогою залізничного (Рис. 1.6), водного або автомобільного транспорту [14], то природний газ можливо доставляти до споживачів виключно газопроводами.



Рис. 1.6. Транспортування газонафтопродуктів залізницею

Окрім того важливою перевагою є той факт, що собівартість трубопровідного транспорту у порівнянні із іншими видами транспортування газонафтопродуктів залишається в декілька разів нижчою. Це обумовлюється рядом факторів, як от:

- значно більша пропускна здатність;
- безперервність роботи;
- рівномірність постачання продукту;
- мінімальні втрати продукту під час транспортування;
- з'єднання джерела і споживача найкоротшим шляхом;
- відсутність необхідності в пунктах завантаження та розвантаження;

З іншого боку, високі капітальні витрати на спорудження трубопроводів, обумовлює доцільність їх використання виключно для великих і стабільних споживачів, а також ускладнює підключення нових.

Один із перших газопроводів в США, що був побудований в 1821 році, поставляв газ з джерела на Канадавей-Крік у Фредонії, штат Нью-Йорк, до найближчих споживачів, і був виконаний із дерев'яних труб. З того часу технології виробництва і прокладання трубопроводів значно розвинулися, а газопроводи стали невід'ємною частиною паливно-енергетичного сектору, і на теперішній час їх неможливо замінити іншими видами транспорту.

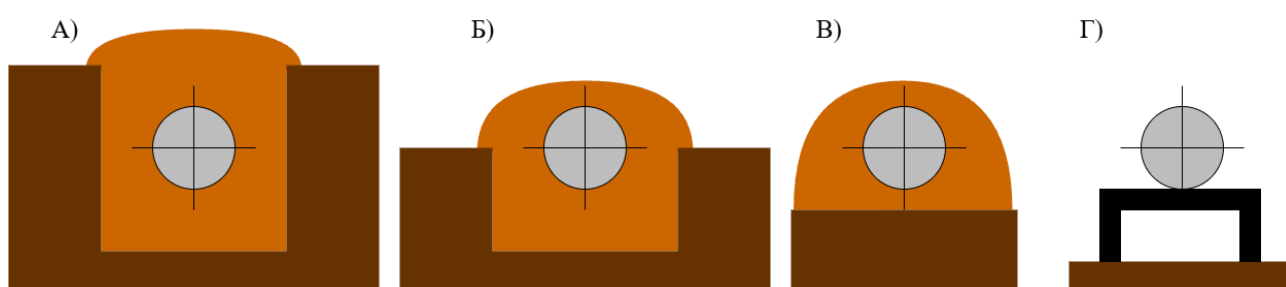


Рис. 1.7. Схеми прокладання трубопроводів

За способом прокладання трубопроводи бувають підземні, півпідземні, наземні та надземні (Рис. 1.7). Вибір схеми прокладання має значний вплив на майбутню експлуатацію трубопроводу [18], оскільки в значній мірі визначає перелік факторів, що будуть на нього впливати.

Відповідно до вимог нормативних документів [11], найбільш розповсюдженим видом прокладання газопроводів є саме підземні трубопроводи. Підземне прокладання означає, що верхня частина труби знаходиться нижче поверхні ґрунту. Зазвичай магістральні трубопроводи заглиблюють на 0,8 - 1 м. Перевагою такої схеми є майже повне збереження можливості використання землі вздовж траси трубопроводу під сільськогосподарські потреби, захист від атмосферних і ультрафіолетових впливів.

У випадку сильно обводнених та заболочених ґрунтів використовуються напівпідземні або наземна схеми прокладання. Для таких схем, труба прокладається в насипній греблі [14]. Наземне прокладання має досить обмежене застосування і недоцільне в населених і сільськогосподарських районах.

Надземне прокладання трубопроводів на відповідних опорах застосовується на переходах через природні або штучні перешкоди (ріки, водойми, залізничні та авто магістралі тощо). Основним недоліком такої схеми є значне ускладнення будівництва і збільшення капіталовкладень.

Іншим аспектом, що безпосередньо впливає на безпеку, довговічність, експлуатаційну надійність та економічну ефективність є вибір матеріалу труб. Українська нормативна документація [11], разом із європейськими та міжнародними стандартами [19, 20], дозволяє використовувати як сталеві, так і поліетиленові (ПЕ) труби (Рис. 1.8) для підземних газопроводів, залежно від тиску, діаметра, умов монтажу та вимог безпеки.



Рис. 1.8. Труби сталеві та поліетиленові

Сталеві труби, що використовуються для підземних газопроводів, зазвичай виготовляються з вуглецевих або низьколегованих сталей [21] з контрольованими механічними властивостями. Вони виготовляються як безшовні або зварні труби та захищені зовнішніми антикорозійними покриттями.

Перевагами вибору сталі для газопроводів є:

1. Висока механічна міцність: сталь витримує високий внутрішній тиск, що робить її незамінною для магістральних трубопроводів та трубопроводів високого тиску;

2. Термостійкість: зберігає механічні властивості в широкому діапазоні температур;
3. Жорсткість конструкції: стійка до деформацій викликаних тиском та рухом ґрунту, тощо;
4. Можливість виготовлення труб великих діаметрів: сталеві трубопроводи можна виготовляти та встановлювати діаметром понад 1400 мм;
5. Відомі методи контролю та ремонту: сталеві трубопроводу використовують вже давно, в результаті чого розроблено чимало методів стану підземних сталевих трубопроводів, що значно полегшує роботи із ремонту та відновлення.

Недоліками сталевих трубопроводів є:

1. Схильність до корозії вимагає використання захисних покриттів та систем захисту від корозії [22];
2. Вищі витрати: роботи із зварювання труб, значна вага, що впливає на транспортування труб до місць закладання та потреба в засобах протикорозійного захисту збільшують витрати закладання та експлуатацію;

Альтернативою є поліетиленові труби (PE 80, PE 100) – це термопластичні труби, що з'єднуються методом стикового зварювання [23].

Переваги поліетиленових труб:

1. Відмінна стійкість до корозії: поліетилен хімічно інертний, що виключає електрохімічну корозію;
2. Мала вага та простота монтажу скорочують час будівництва та витрати;
3. Гнучкість: компенсують незначні рухи ґрунту та осідання.
4. Менші потреби в обслуговуванні: немає потреби в системах катодного захисту.

Недоліками поліетиленових труб можливо назвати:

1. Обмежений діапазон тиску та температур: зазвичай обмежений робочим тиском до 1,0 МПа [24];
2. Чутливість ультрафіолетового випромінювання;
3. Нижча механічна стійкість до зовнішніх навантажень та пошкоджень;
4. Обмежений максимальний діаметр.

Узагальнені висновки можливо представити у вигляді таблиці:

Таблиця 1.1. Характеристики сталі і поліетилену

Критерій	Сталеві трубопроводи	Поліетиленові трубопроводи
Допустимий тиск	високий	середній
Корозійна стійкість	низька	висока
Складність монтажу	висока	низька
Термін служби	40–50+ років (із захистом)	30–50 років
Допустимі діаметри	широкі	обмежені
Галузі використання	магістральні і розподільчі	розподільчі

Незважаючи на наявність переваги в невразливості поліетилену до корозії, його використання в газорозподільних мережах обмежене, а сталеві трубопроводи залишаються домінуючими в підземному транспортуванні газу з ряду причин. Неможливість використання поліетиленових труб для магістральних газопроводів, що вимагають високих рівнів тиску та діаметрів. Забезпечення сталевими трубами конструкційної надійності та передбачуваної поведінки в складних умовах, що обумовлено тривалою історією експлуатації та добре встановленими методологіями. Крім того сучасні засоби захисту значно знижують ризики корозії, продовжуючи термін служби понад 50 років.

Із вище описаного можливо зробити висновки, що газонафтопроводи на сьогоднішній день представляють собою стратегічний ресурс, від надійності і безперебійності роботи якого залежить ефективність промисловості України, а отже її економічна і національна безпека. Через значну протяжність

газотранспортної системи трубопроводи прокладаються в різних топографічних, геологічних і кліматичних умовах. При цьому, для транспортування газу найбільш широко використовуються саме підземні сталеві трубопроводи.

Через значний період їх експлуатації, стан таких є далеким від задовільного. Так серед усього об'єму газопроводів [25]:

- 40% - експлуатуються більше 20 років;
- 29% - понад 30 років;
- 30% - між 35 і 50 роками;
- 0,1% - понад 50 років.

Однак, оновлення і заміна небезпечних і застарілих ділянок, яка і так відбувалася досить повільно, майже призупинилась. В поточних реаліях постійних викликів, перебоїв з енергопостачанням, нестачею кваліфікованого персоналу і коштів на модернізацію, на перше місце виходять методи подовження експлуатаційного періоду існуючих підземних сталевих трубопроводів.

1.3 Перелік факторів, що зменшують термін експлуатації трубопроводів

На основі попередніх пунктів можливо впевнено заявити, що основним технологічним елементом систем газопровідного транспорту є підземні сталеві трубопроводи, якими продукт транспортується від джерел до споживачів. Через значний запланований експлуатаційний період, такі трубопроводи опиняються під впливом різноманітних факторів, які негативно впливають на цілісність трубопроводу, а також скорочують його можливий термін експлуатації та збільшують поточні витрати на його обслуговування і відновлення.

Безаварійність та безвідмовність роботи підземних сталевих трубопроводів є основою надійної роботи всієї газотранспортної системи України. Поява тріщин, пітінгів та отворів на будь-якому сегменті трубопроводу призводить до втрати герметичності, що в свою чергу дискредитує роботу всієї нитки газогону. Поява пошкоджень призводить до аварій, пошкодження майна

та людських жертв [26], забруднення навколишніх територій, втрати продукту, додаткових витрат на відновлення цілісності.



Рис. 1.9. EGIG та PHMSA

Для дослідження і вивчення небезпек та ризиків, пов'язаних з транспортуванням газу трубопроводами газотранспортні компанії формують різноманітні об'єднання [27]. Метою таких організацій є обмін знаннями та даними, пов'язаними з інцидентами на трубопроводах, що сприяє розробці та перевірці відповідних методів оцінки ризиків, проведення експериментів для перевірки гіпотез та прогнозів [28]. До подібних об'єднань відносяться EGIG (Європейська група з обробки даних про інциденти на газопроводах) та PHMSA (Управління з безпеки трубопроводів та небезпечних матеріалів) (Рис. 1.9).

Пошкодження, зниження експлуатаційних характеристик та аварії на газопроводах відбуваються внаслідок різноманітних причин технологічного, технічного та суб'єктивного характеру. До факторів, що впливають на експлуатаційні терміни трубопроводів відносяться корозія, старіння металу, механічні навантаження. Дванадцятий звіт Європейської групи з обробки даних про інциденти на газопроводах [29] представляє унікальну інформацію по

розподілу причин інцидентів та аварій на газопроводах дев'ятнадцяти великих газопостачальних компаній Європи.

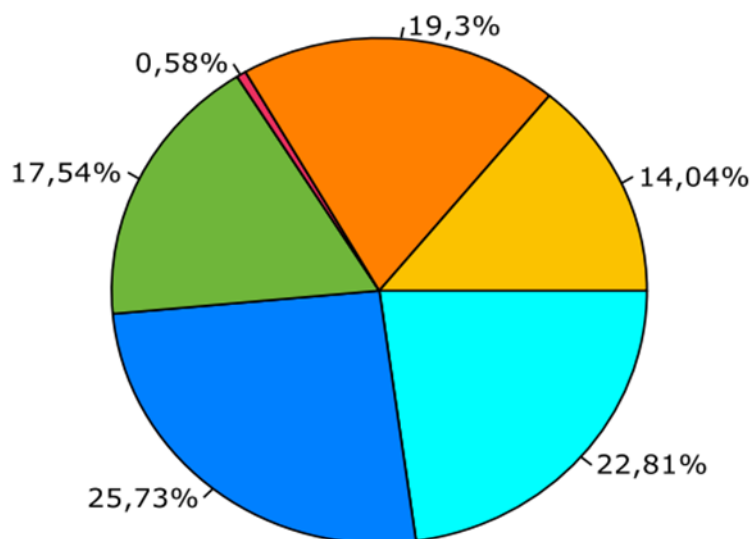
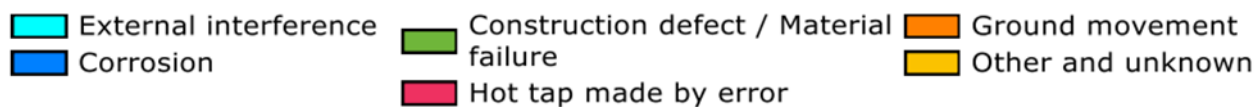


Рис. 1.10. Розподіл інцидентів за 2013-2022 роки

Hot Tap Made by Error – позначає появу інциденту під час гарячого врізання –процедури, яка використовується для створення нового з'єднання до трубопроводу під тиском, не виводячи його з експлуатації. Процедура гарячого врізання включає приєднання відгалуження та клапана на зовнішній стороні діючого трубопроводу, а потім вирізання стінки трубопроводу всередині відгалуження, видалення ділянки стінки через клапан та закриття клапана для майбутнього підключення (Рис. 1.11). Гаряче врізання дозволяє оператору зробити нове з'єднання, не вимикаючи трубопровід або не випускаючи газ в атмосферу. Ця практика забезпечує безперебійне обслуговування клієнтів, і є альтернативою повного відключення частини системи та продувку газопроводу перед початком будь-яких робіт.

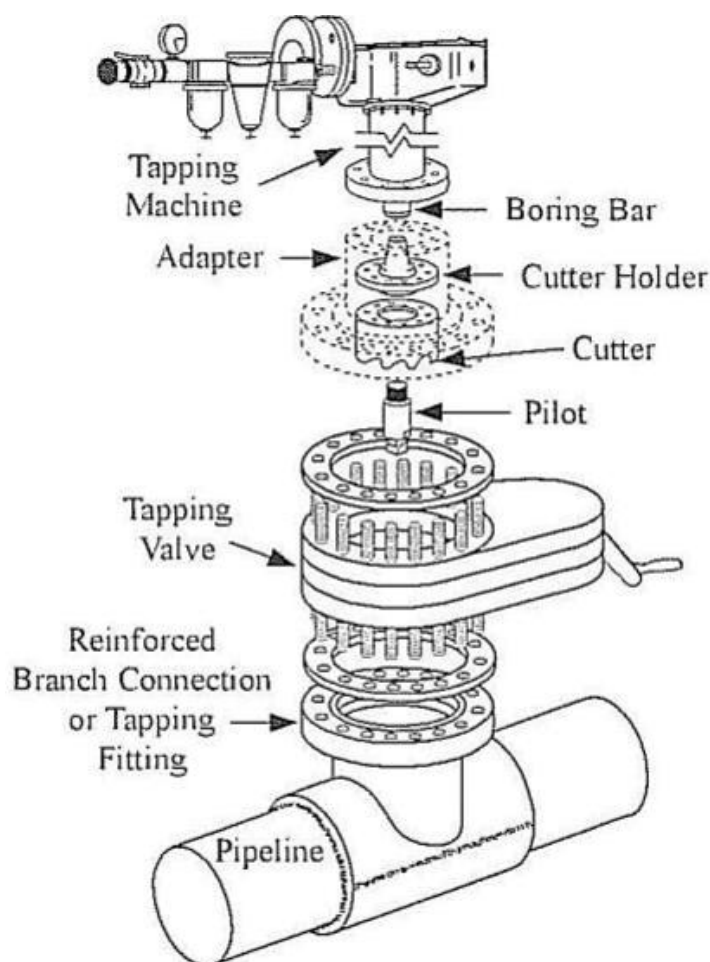


Рис. 1.11. Процедура гарячого врізання [30]

Відповідно до звіту EGIG інциденти пов'язані із помилками під час гарячого врізання займають останнє місце в усьому переліку і складають менше одного відсотка усіх нещасних випадків. Хоча процедура гарячого врізання має потенційно високі ризики, інциденти трапляються дуже рідко, що обумовлюється обмеженою кількістю подібних робіт, суворим контролем під час їх виконання та процедурами навчання та підтвердження кваліфікації персоналу. Можливими причинами нещасних випадків можна назвати несправність обладнання та людська похибка під проведення робіт.

Інші та невизначені причини інцидентів охоплюють широкий спектр причин пошкоджень газопроводів, які складно або неможливо класифікувати в інші категорії. Вони становлять досить помітні 14% усіх випадків, що обумовлюється різноманітністю причин їх появи. До можливих типів

відносяться випадки із відсутністю очевидного джерела пошкодження або малої кількості інформації про нього. Також в цю категорію відносяться пошкодження викликані природними явищами, які безпосередньо не відносяться до руху ґрунтів, як наприклад, ураження трубопроводу блискавкою [27].

Дефекти конструкції та матеріалів. Рівень виконання будівельних та ремонтних робіт [30, 31], якість та властивості металу трубопроводу та з'єднань його сегментів істотно впливають на терміни його експлуатації. Інциденти, що виникли внаслідок недоліків проектування, виробництва труб або етапу будівництва трубопроводу становлять 17,5 % загалу, і нажаль є майже неминучими через значний кілометраж і комплексність процесу прокладання нових трубопроводів. До причин появи дефектів відносяться:

- Задирки і подряпини на поверхні металу, що утворюються в процесі транспортування, закладання та роботи. Ці пошкодження, не зважаючи на їх фактичні розміри, виконують роль концентраторів механічних напружень, що під час експлуатації трубопроводу призводить до появи тріщин та отворів;
- Розшарування, включення та виробничі дефекти сталі труб, що утворюються під час їх виготовлення на виробництві [32];
- Якість виконання з'єднань. Будь-яке з'єднання є зоною концентрації напружень, які при умові не дотримання вимог, можуть призводити до пошкодження цілісності газогону. Найбільш поширеним методом з'єднання сегментів трубопроводу є зварювання [33, дефекти якого, як наприклад, відсутність сплавлення, пористість та тріщини (Рис. 1.12), є потенційним інцидентом. Іншим методом виконання поєднання сегментів трубопроводу є фланці [34]. Вони також не захищені від появи дефектів і тріщин (Рис. 1.13).
- Такі помилки проектування та монтажу, як неправильний вибір товщини стінки, погана засипка, тощо.

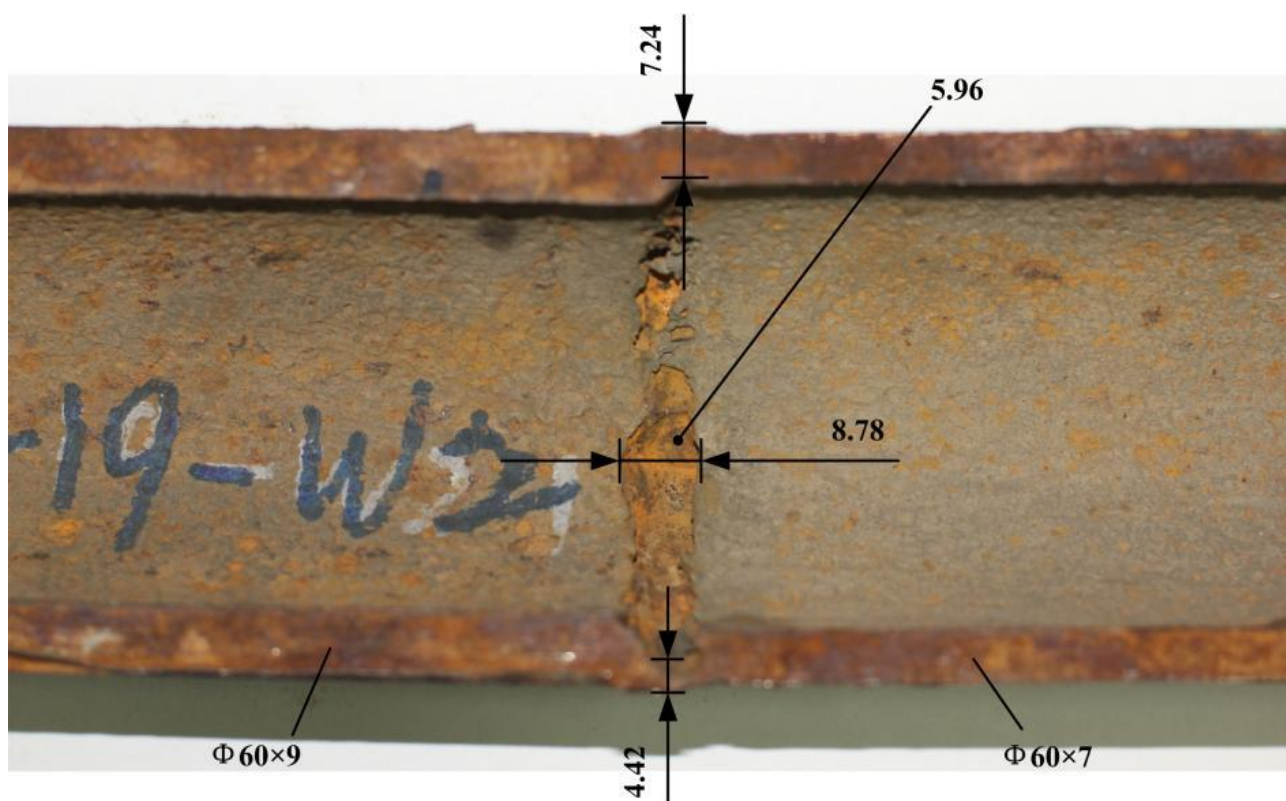


Рис. 1.12. Пошкоджене зварне з'єднання [33]

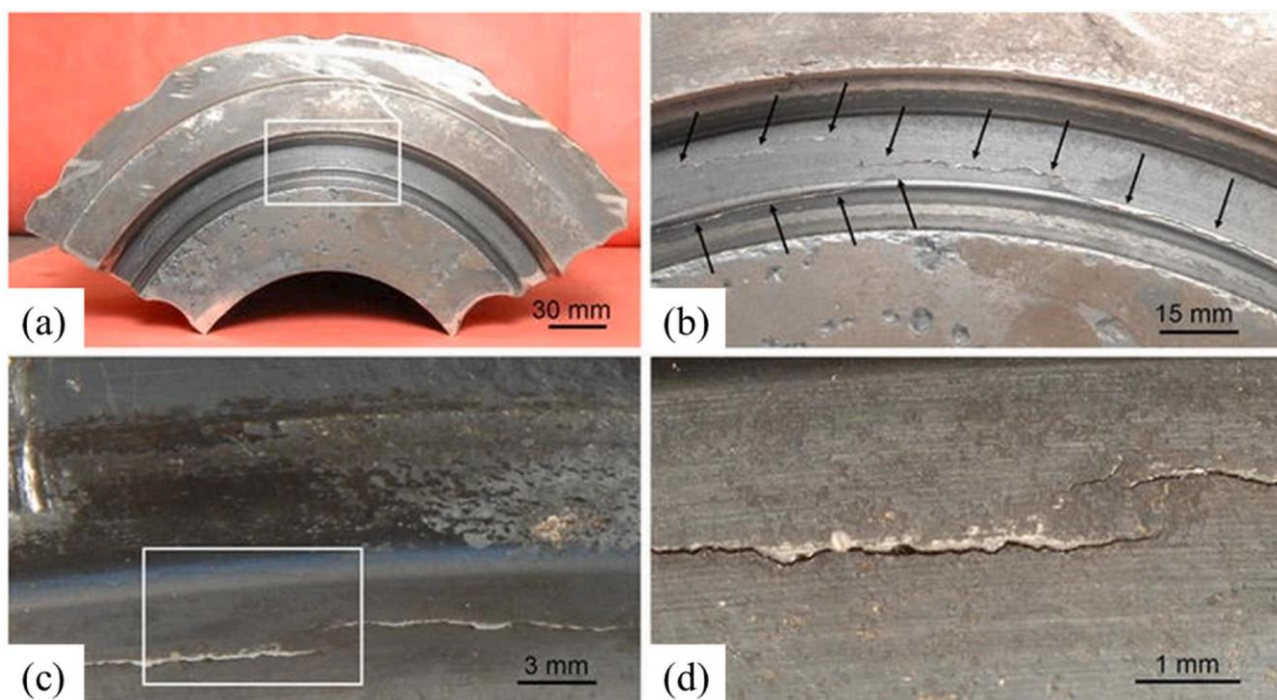


Рис. 1.13. Пошкодження фланців [34]

Такі пошкодження можуть залишатися прихованими роками та проявлятися під впливом коливань тиску, втомних навантажень та комплексної дії інших чинників.

Рух ґрунтів безпосередньо відповідає за механічні навантаження, що впливають на нитку газогону і провокує його деформацію, що в свою чергу представляється джерелом напружень і пошкоджень. Як причина інцидентів – займає третє місце (19,3%) за розповсюдженістю і є серйозною загрозою. Можливими причинами руху слоїв ґрунту можуть бути: сейсмічна активність, такі як землетруси та зсуви пластів на нестабільних схилах, повені та ерозія ґрунту поблизу водойм та русл річок, а також техногенні причини, які викликані діяльністю людини, тощо [35].

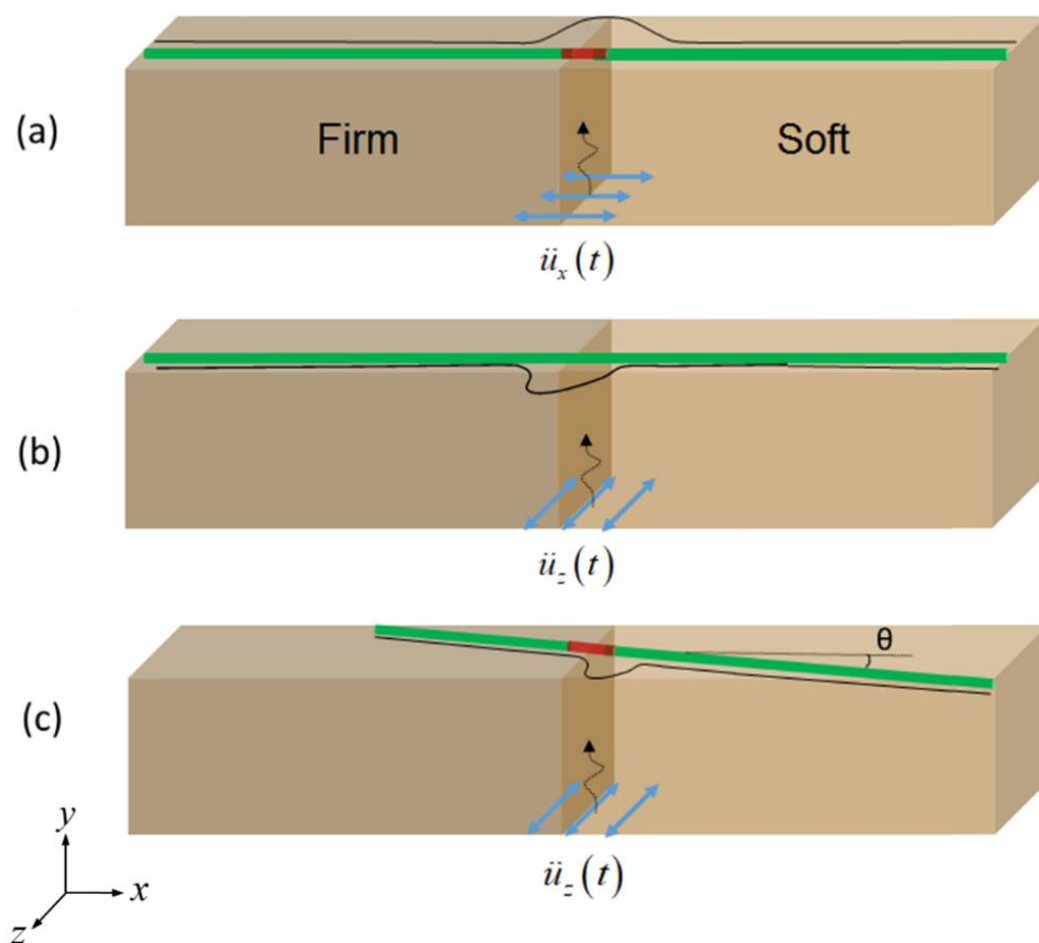


Рис. 1.14. Деформація трубопроводу через рух ґрунтів [36]

Як відомо трубопроводи – це лінійні споруди, які перетинають різноманітну місцевість, яка може мати різні топографічні, геологічні і кліматичних умови. Рух ґрунту може спричиняти вигини (Рис. 1.14) та осьові напруження [36], які в свою чергу призводять до розривів та пошкодження

ізоляційних покривів трубопроводу. Най більше розповсюджені інциденти, пов'язані із рухом ґрунтів в гірських або геологічно нестабільних регіонах.

Зовнішнє втручання охоплює механічні пошкодження трубопроводів, спричинені діяльністю третіх осіб, не пов'язаною безпосередньо з експлуатацією трубопроводу. За даними EGIG, зовнішнє втручання є однією з домінуючих причин інцидентів (22,8% інцидентів), особливо в густонаселених та інфраструктурно-розвинених регіонах. Пошкодження часто виникають раптово та можуть призвести до негайної втрати герметичності. Втручання може бути представлене наступною діяльністю [36]:

- Земляними роботами поблизу трубопроводів з використанням екскаваторів, траншеєкопачів або бурових установок;
- Сільськогосподарською діяльністю;
- Будівництвом споруд та прокладанням залізничних і авто доріг;



Рис. 1.15. Земельні роботи, що призвели до пошкодження трубопроводу [37]



Рис. 1.16. Пошкоджений технікою трубопровід [36]

Причини перешкоджання роботи газогонів, зазвичай, мають організаційний характер, як то: недостатня точність маркування трубопроводів або картографування, недотримання процедур отримання дозволів на роботи та неадекватний нагляд за роботами в захисних зонах трубопроводів.

Корозія. І хоча у звітах EGIG наголошується увага на зменшенні частоти інцидентів протягом останніх десятиліть, в тому числі через корозійні пошкодження, їх частка залишається найбільшою (25,73%). Інциденти, пов'язані з корозією, включають внутрішні та зовнішні механізми корозії, які призводять до стоншення стінки, утворення каверн, піттингів та отворів (Рис. 1.17).

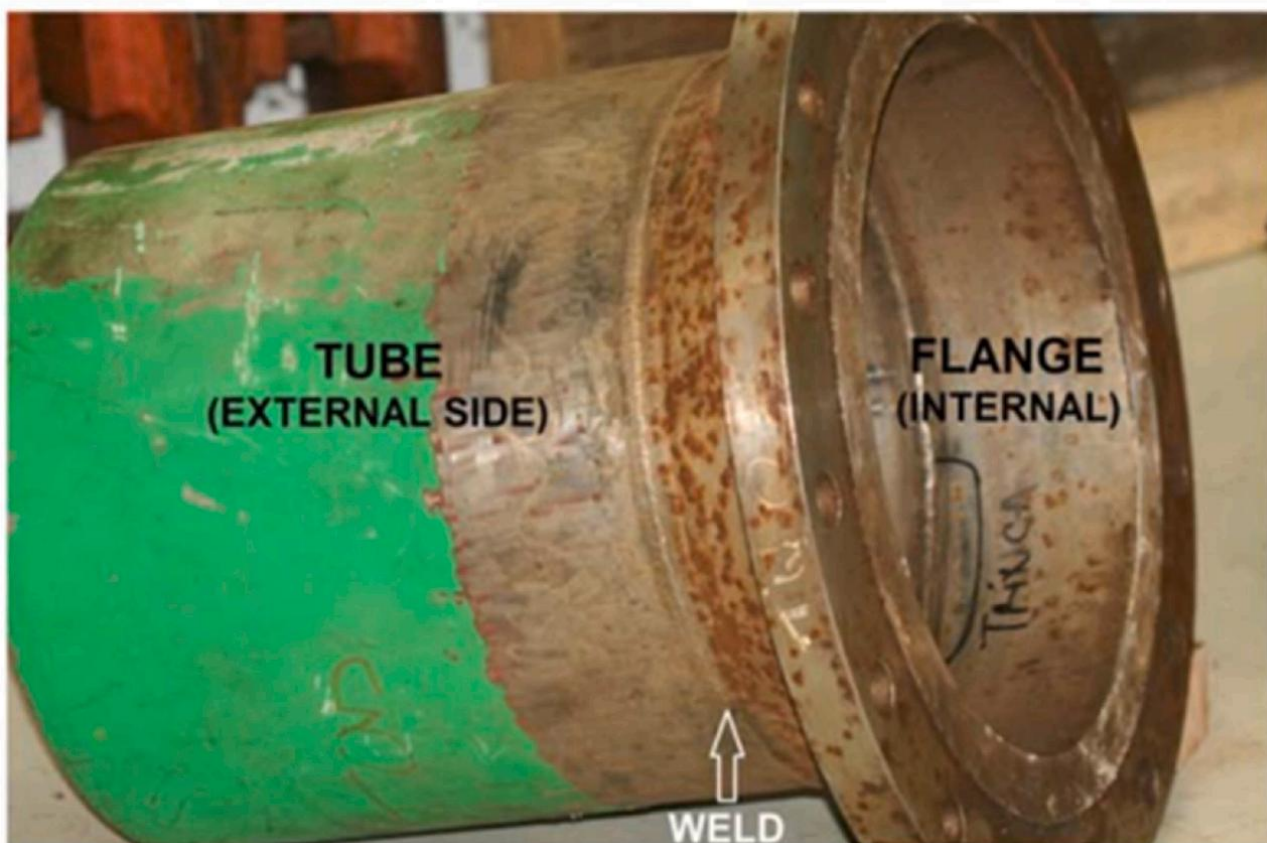


Рис. 1.17. Приклад корозійного пошкодження трубопроводу [34]

Корозійне руйнування підземних сталевих трубопроводів протікає за електрохімічним механізмом і викликане рядом чинників:

- Агресивністю навколишнього середовища (низький опір та висока вологість ґрунту, наявність блукаючих струмів);
- Наявністю води або інших агресивних компонентів у продукті, що транспортується;
- Пошкодженням або зношеністю захисних покриттів;
- Недостатнім електрохімічним захистом.

Незважаючи на сучасні системи захисту від корозії, електрохімічна корозія залишається найбільшою небезпекою для цілісності підземних сталевих трубопроводів. Це, в свою чергу, обумовлює необхідність постійного моніторингу засобів електрохімічного захисту і актуальності теми підвищення їх надійності і ефективності.

1.4 Електрохімічна корозія та її вплив на експлуатаційні характеристики підземних сталевих трубопроводів

1.4.1 Загальні основи електрохімічної корозії

Значна частина ключових хімічних процесів має електрохімічну природу. Адекватне розуміння механізмів електрохімічних реакцій потребує опанування базових понять електротехніки та їх коректного застосування до аналізу електрохімічних взаємодій. У загальному випадку електрохімічні реакції визначаються як хімічні перетворення, що супроводжуються спрямованим перенесенням електронів між реагуючими частинками або фазами.

Фундаментальною фізичною величиною, яка використовується для кількісного опису електричних явищ і, відповідно, електрохімічних процесів, є електричний струм (I). Електричний струм характеризує впорядкований рух електричних зарядів і вимірюється в амперах (А), що належать до базових одиниць Міжнародної системи одиниць вимірювання (SI). Залежно від характеру зміни напрямку руху зарядів у часі розрізняють постійний струм, за якого перенесення заряду відбувається в одному фіксованому напрямку, та змінний струм, для якого характерна періодична зміна напрямку протікання струму. Саме ці поняття є базовими для подальшого аналізу електрохімічних процесів, зокрема явищ електрохімічної корозії металів [37].

Електричний заряд (Q) кількісно визначається як добуток сили електричного струму (I) та часу його протікання (t), тобто:

$$E = I * t. \quad (1.1)$$

Одиницею вимірювання електричного заряду в Міжнародній системі одиниць є кулон (Кл). Один кулон відповідає кількості заряду, що переноситься електричним струмом силою 1 А протягом 1 с, у зв'язку з чим кулон за розмірністю еквівалентний ампер-секунді.

Протікання електричного струму через речовину можливе лише за умови витрати енергії, величина якої визначається електричними властивостями

середовища, зокрема його електричним опором (R). Електричний опір характеризує здатність матеріалу перешкоджати руху електричних зарядів і вимірюється в омах (Ом). Опір дорівнює 1 Ом у випадку, коли при проходженні струму силою 1 А через провідник витрачається енергія 1 Дж.

Взаємозв'язок між електричним струмом, опором та різницею електричних потенціалів описується фундаментальним законом електрики — законом Ома:

$$E = \frac{I}{R}. \quad (1.2)$$

Згідно з цим законом, різниця потенціалів (E) є рушійною силою, що забезпечує протікання струму через опір. Одиницею вимірювання різниці електричних потенціалів у системі SI є вольт (V). Різниця потенціалів 1 В забезпечує протікання струму силою 1 А через опір 1 Ом, при цьому виконується робота 1 Дж та переноситься електричний заряд 1 Кл. Таким чином, джоуль є еквівалентним вольт-кулону, що має принципове значення для енергетичного аналізу електрохімічних процесів.

Окисно-відновні процеси є фундаментальною основою електрохімічних явищ. У будь-якій електрохімічній реакції відбувається перенесення електронів від одного атома, іона або молекули до іншого, навіть у тих випадках, коли електрони не фігурують явно в загальному збалансованому рівнянні реакції. Саме перерозподіл електронної густини між реагуючими частинками визначає напрямок і термодинамічну можливість перебігу електрохімічних процесів.

Залежно від характеру змін ступенів окиснення розрізняють три типи електрохімічних реакцій: реакції окислення, реакції відновлення та окисно-відновні реакції. Термін «окисно-відновні» (редокс-реакції) використовується для позначення процесів, у яких одночасно відбуваються як окислення, так і відновлення різних компонентів системи. У випадку окремо розглянутих реакцій окислення або відновлення електрони з'являються у рівняннях реакцій у явному

вигляді, тоді як в окисно-відновних реакціях їх участь, як правило, є неявною і відображається через зміну ступенів окиснення [37].

Окисненням називають процес, у ході якого атоми або іони елементів, що беруть участь у реакції, втрачають електрони. Наслідком цього є зростання їх позитивного заряду або, в більш загальному формулюванні, підвищення ступеня окиснення. Дане визначення має принципове значення для аналізу електрохімічних процесів, зокрема механізмів електрохімічної корозії металів, де окиснення є домінуючим анодним процесом.

У межах електрохімічних систем ключову роль відіграють електроліти та електроди, через які реалізується перенесення заряду та перебіг окисно-відновних процесів. Іоном називають атом або молекулу, що внаслідок втрати або приєднання електронів набули електричного заряду. Іони з позитивним зарядом визначаються як катіони, тоді як іони з негативним зарядом — як аніони. Частинки, які не мають сумарного електричного заряду, відносять до нейтральних речовин [38].

Розчини, що містять вільні іони, класифікуються як електролітичні розчини або електроліти. Здатність таких розчинів проводити електричний струм зумовлена рухливістю іонів у рідкому середовищі. На відміну від металевих провідників, у яких перенесення заряду здійснюється електронами, електролітичні розчини є іонними провідниками. Саме ця властивість електролітів використовується в електрохімічних системах для забезпечення замкненості електричного кола. Типовим прикладом є сольовий міст, призначений для перенесення іонного заряду між двома електролітними розчинами без їх безпосереднього змішування.

Сукупність двох або більше електродів, занурених в електроліт та з'єднаних із зовнішнім електричним колом, утворює електрохімічну комірку. На поверхні кожного електрода відбувається окрема електрохімічна реакція — окиснення або відновлення. Реакції, у рівняннях яких електрони фігурують у явному вигляді, прийнято називати електродними реакціями або напівреакціями.

Напівреакція може відповідати процесу окислення, якщо електрони виступають продуктами реакції, або процесу відновлення, якщо електрони є реагентами.

Поєднання двох електродних напівреакцій формує загальну реакцію електрохімічного елемента, яка за своєю природою є окисно-відновною, оскільки один електрод обов'язково виконує функцію джерела електронів, а інший — їх споживача. Збалансована електрохімічна напівреакція характеризується рівністю кількості та типу атомів по обидва боки рівняння, а також рівністю сумарного електричного заряду, при цьому на одній зі сторін обов'язково присутні електрони, не врівноважені електронами на іншій стороні.

Електрони вільно не існують у водних розчинах, оскільки швидко взаємодіють із молекулами води, тому їх перенесення між електродами відбувається через електронні провідники, зазвичай металеві дроти. Іони, навпаки, є термодинамічно стабільними у водному середовищі та забезпечують перенесення заряду в межах електроліту шляхом власного руху. Електрод, на якому реалізується реакція окислення, визначається як анод, тоді як електрод, на якому відбувається реакція відновлення, називається катодом. Таке розмежування має принципове значення для аналізу електрохімічних процесів, зокрема при дослідженні механізмів електрохімічної корозії металів [38].

Електрохімічні елементи є функціональними системами, здатними як віддавати електричну енергію у зовнішнє коло, так і споживати її, що визначається співвідношенням електрорушійних сил, прикладених до елемента та зовнішнього електричного пристрою (навантаження або джерела живлення). Протікання електричного струму через електрохімічний елемент супроводжується перебігом електрохімічної реакції, кількісні закономірності якої описуються законами електрохімічної стехіометрії, зокрема законом Фарадея. Електрорушійну силу елемента за умов термодинамічної рівноваги прийнято характеризувати оборотним потенціалом.

Залежно від режиму роботи та термодинамічного характеру реакцій електрохімічні елементи поділяють на гальванічні, електролітичні та оборотні. Гальванічний елемент є системою, у якій відбувається самодовільна

електрохімічна реакція, що супроводжується протіканням струму та перетворенням хімічної енергії на електричну. Електролітична комірка, навпаки, функціонує за умов підведення зовнішньої енергії: у ній електричний струм змушує перебіг реакції, яка є зворотною до спонтанної реакції відповідного гальванічного елемента. Оборотною комірка характеризується відсутністю струму, а отже й відсутністю споживання або вироблення потужності, оскільки . У таких умовах реакція перебуває у стані термодинамічної рівноваги та вважається оборотною, оскільки нескінченно мала зміна потенціалу комірки здатна зумовити перебіг процесу в будь-якому напрямку. За оборотних умов різницю потенціалів, або електрорушійну силу, можна виміряти без втрат, пов'язаних з омичним або ІЧ-падінням напруги, і в цьому випадку відповідає потенціалу розімкнутого кола.

При розгляді електродних структур слід зазначити, що на межі електрод–електроліт відбувається перехід провідності з іонної в електронну. Хоча рівняння напівреакцій можуть не містити явного електронного провідника, реальний фізичний напівелемент обов'язково включає електронний провідник, який забезпечує зовнішній електричний контакт електрода з колом. Під час запису напівелементів зазвичай вказують агрегатний стан усіх компонентів, а межі між фазами позначаються косою рисою «/».

Електролітичні провідники, що застосовуються для розділення двох електролітичних розчинів із забезпеченням перенесення іонного заряду між ними, зокрема сольові мости, сепаратори або мембрани, у схемних записах позначаються подвійною косою рисою «//», яка відображає наявність фазових меж на обох кінцях такого провідника. Формалізовані приклади електродних напівреакцій і відповідних напівелементів зазвичай наводяться в табличній формі для узагальнення та порівняльного аналізу електрохімічних систем.

1.4.2. Корозія в ґрунтах як середовищі електрохімічної взаємодії

Ґрунт являє собою складну природну систему, що включає мінеральні частки, органічні компоненти, водну та газову фазу, переважно повітря.

Формування ґрунту відбувається під впливом комплексної взаємодії фізичних факторів, зокрема вітру та водної ерозії, а також біологічних процесів, пов'язаних із розкладом органічної речовини. Співвідношення основних складових значно варіює в різних типах ґрунтів: наприклад, гумус характеризується високим вмістом органічних речовин, тоді як у піщаних відкладеннях, як правило, органіка практично відсутня [39].

Властивості та характеристики ґрунту змінюються залежно від глибини, що обумовлює необхідність виділення вертикальних перерізів — ґрунтових профілів. Вертикальний переріз складається з окремих горизонтів, які відрізняються фізико-хімічними властивостями та складом. До основних ґрунтових горизонтів належать:

1. органічний горизонт, де відбувається розклад рослинних решток;
2. поверхневий горизонт, зазвичай темного кольору через високий вміст органічних речовин;
3. елювіальний горизонт, світлий, характеризується вилуженням;
4. акумуляційний горизонт, багатий на певні оксиди металів;
5. материнська порода, що складається переважно з невивітреної корінної породи.

Корозійні процеси в ґрунтах становлять серйозну інженерну проблему, особливо з урахуванням старіння значної частини підземної інфраструктури. Зростаючі екологічні вимоги та потреба у безпечній експлуатації об'єктів інженерної інфраструктури підсилюють актуальність проблеми. Типові приклади корозійного пошкодження включають нафто- та газопроводи, водопровідні трубопроводи, підземні резервуари, електричні кабелі, обсадні труби свердловин та елементи кріплення шахт. Надійне функціонування таких систем протягом десятиліть вимагає глибокого розуміння механізмів корозії в ґрунтовому середовищі [40].

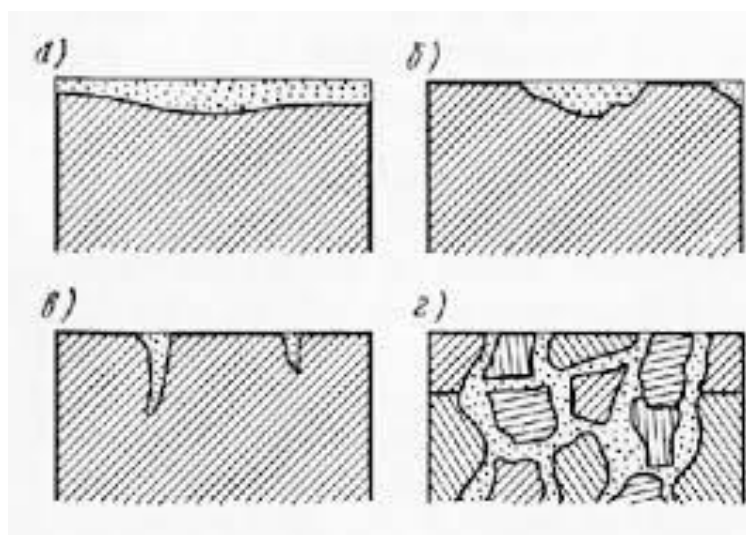


Рис. 1.18. Ступінь корозії металу

Корозійні явища в ґрунтах мають складний характер і залежать від багатьох змінних факторів, включаючи хімічний склад ґрунту, його фазові співвідношення, вологість, рН та електропровідність. У ґрунтах відбуваються численні хімічні реакції, у яких можуть брати участь майже всі елементи періодичної системи. Відносна значущість окремих факторів варіюється для різних матеріалів, що унеможливорює створення універсального керівництва з корозії. Зміни фізико-хімічних властивостей ґрунту у трьох вимірах можуть суттєво впливати на інтенсивність та характер корозійного пошкодження підземних споруд.

Для цілей проектування підземних споруд та оцінки ризику корозійного пошкодження доцільно оцінювати корозійну активність ґрунтів без проведення тривалих і ресурсномістких випробувань на корозію. Проведення таких випробувань ускладнюються насамперед необхідністю моделювання довготривалого впливу ґрунтового середовища — зазвичай передбачається, що закопані конструкції повинні експлуатуватися протягом декількох десятиліть — а також із значною змінністю умов ґрунту в різних місцях.

Враховуючи багатофакторний характер процесів, що визначають корозійну активність ґрунту, застосування відносно простих емпіричних моделей для оцінки корозійності неминуче супроводжується певною похибкою.

Ці обмеження необхідно брати до уваги при використанні будь-яких загальноприйнятих методів або допоміжних засобів прогнозування корозії. Усе це підкреслює потребу у комплексному підході до оцінки ризиків корозійного ушкодження підземних конструкцій.

Сталь є одним із найпоширеніших конструкційних матеріалів для підземних споруд, однак її використання без додаткового захисту від корозії практично неможливе. Незахищена сталь демонструє високу схильність до локалізованого корозійного пошкодження, зокрема піттингу, при безпосередньому контакті з ґрунтом. Таке пошкодження зазвичай виникає внаслідок диференціальних аераційних комірок, контакту з різними типами ґрунту, мікробіологічно індукованої корозії (МІК) або гальванічних комірок, які формуються, наприклад, при контакті сталевих поверхні з частками вугілля чи золи. Блукаючий електричний струм у ґрунті також може спричиняти серйозну корозію. При цьому низький рівень аерації ґрунту не гарантує низьких швидкостей корозії, оскільки деякі мікроорганізми, що здатні викликати інтенсивну МІК, розмножуються у анаеробних умовах [39, 40].

Основною мірою захисту сталі, закопаної в ґрунт, є нанесення покриттів, що виконують роль фізичного бар'єра між металом і агресивним середовищем. Для підвищення надійності зазвичай застосовують комбінований захист, який включає катодний захист із жертвними анодами або системи з зовнішнім струмом. Це обумовлено неминучою наявністю дефектів та розривів у покриттях, через які може розпочатися локальна корозія.

Чавунні сплави також широко застосовуються в підземних спорудах; багато газових і водопровідних труб з чавуну експлуатуються протягом десятиліть. Незважаючи на поступову заміну чавунних труб сталевими конструкціями з покриттям і катодним захистом, а також полімерними трубами, чавун демонструє високу корозійну стійкість. Разом із тим він не є повністю стійким і може зазнавати корозійного пошкодження, аналогічного описаному для сталі, що вимагає застосування покриттів та катодного захисту.

Нержавіюча сталь рідко використовується для підземних споруд через обмежену корозійну стійкість у ґрунті, зокрема щодо локалізованої корозії. Присутність галогенідних іонів і формування концентраційних комірок на поверхні сплавів підвищують ризик піттингу. Вищі окисно-відновні потенціали сприяють розвитку локалізованої корозії. Навіть високолеговані марки нержавіючої сталі не є повністю стійкими до МІК, зокрема до корозії, індукованої сульфатредуючими бактеріями.

Кольорові метали і їх сплави, мідь загалом вважається корозійно стійким матеріалом у ґрунті. Основні чинники ризику корозії включають кислі ґрунти, наявність вуглецевих забруднень (золи), а також підвищені концентрації хлоридів і сульфідів. Помилковою є думка, що мідь та її сплави абсолютно стійкі до МІС; механізми мікробіологічно індукованої корозії для цих матеріалів включають катодну деполяризацію, селективне вилугування, корозію під відкладеннями та диференціальні аераційні комірки. Корозійні продукти, що утворюються внаслідок дії мікроорганізмів, включають вуглекислий газ, сірководень, інші сполуки сірки, аміак, а також органічні та неорганічні кислоти. У випадку латуні особливо важливо враховувати ризик децинкування, що посилюється при високому вмісті цинку.

Ґрунти, забруднені промисловими відходами, нафтою, солями або іншими хімічними сполуками, значно підвищують ризик корозійного пошкодження металевих конструкцій. Наявність таких забруднень сприяє формуванню локалізованих корозійних комірок і підвищує електропровідність ґрунту, що, у свою чергу, стимулює як рівномірну, так і мікролокалізовану корозію. Особливо небезпечними є ґрунти з підвищеною концентрацією іонів хлоридів або сульфатів, які спричиняють активізацію піттингу та міжкристалічної корозії.

Підвищена вологість ґрунту та його неоднорідний склад у вертикальному та горизонтальному перерізах створюють умови для виникнення диференціальних аераційних комірок, що підсилюють локалізовану корозію сталі та чавуну. Додатково слід враховувати вплив мікроорганізмів, які здатні індукувати корозію через продукування корозійно активних сполук, таких як

сірководень, органічні та неорганічні кислоти, а також аміак. Ці процеси можуть проявлятися навіть у відносно низько аерованих або анаеробних умовах, що робить біологічно індуковану корозію особливо важливою для оцінки довговічності підземних конструкцій.

Виходячи з цього, захисні заходи для металевих споруд у ґрунті повинні бути комплексними. Основними методами є застосування покриттів, катодного захисту з жертвними анодами та контроль якості ґрунту навколо конструкцій. Покриття виконують функцію фізичного бар'єра, який обмежує контакт металу з агресивним середовищем, тоді як катодний захист компенсує місцеві дефекти покриття та запобігає ініціації піттингу. Для кольорових металів, таких як мідь і її сплави, також застосовують контроль навколишнього середовища та періодичний моніторинг корозії, оскільки навіть ці матеріали не є повністю стійкими до МІК та локалізованої корозії [40].

Таким чином, експлуатація підземних металевих конструкцій у ґрунтовому середовищі потребує системного підходу, що поєднує знання фізико-хімічних властивостей ґрунту, механізмів корозії та застосування комбінованих захисних технологій для забезпечення довготривалої надійності інфраструктури.

1.4.3. Гальванічна та локалізована корозія як фактор порушення працездатності

Системні відмови технічних об'єктів та подальший аналіз їх причин набувають дедалі більшої актуальності в умовах сучасного індустріального та соціально-економічного розвитку. Окрім аспектів юридичної відповідальності, ключовою метою проведення розслідувань відмов є ідентифікація механізмів і першопричин виникнення несправностей з метою запобігання їх повторенню. У цьому контексті формування обґрунтованих рекомендацій щодо коригувальних і запобіжних заходів є одним із найважливіших етапів аналізу відмов, зокрема корозійної природи [41].

Ігнорування встановлення причин корозійних пошкоджень та невжиття адекватних превентивних заходів може призвести не лише до повторних відмов, але й до серйозних правових наслідків, фінансових втрат та зниження довіри з боку споживачів і громадськості. У глобалізованому конкурентному бізнес-середовищі подібні ризики є неприйнятними та можуть мати довгострокові негативні наслідки для репутації організації. Водночас слід зазначити, що проведення аналізу відмов є складним міждисциплінарним завданням, яке потребує високої кваліфікації та системного підходу.

Особливої ваги набуває раннє виявлення корозії як чинника відмови, оскільки значна частина критично важливої інформації щодо характеру та механізмів корозійного пошкодження може бути втрачена у разі модифікації, ремонту або демонтажу об'єкта до проведення повноцінних спостережень і випробувань. З метою мінімізації таких ризиків у науковій та інженерній практиці були розроблені систематизовані процедури, що дозволяють досліднику послідовно та обґрунтовано здійснювати аналіз відмов. Разом із тим аналіз відмов найефективніше опановується в процесі практичної діяльності, а фахівець з аналізу відмов формує необхідні компетентності шляхом участі в реальних розслідуваннях та успішного вирішення різноманітних інженерних задач.

Надзвичайно важливим аспектом аналізу відмов є використання чіткої, коректної та уніфікованої термінології. Непослідовне або надто вільне застосування спеціалізованих термінів суттєво знижує аналітичну цінність звітів, особливо у випадках, коли результати мають зберігатися, систематизуватися та оброблятися із застосуванням комп'ютерних інформаційних систем. Незважаючи на це, на практиці часто спостерігається нехтування термінологічною точністю, що ускладнює інтерпретацію та повторне використання отриманих даних [42].

У подальшому викладі даного розділу розглядаються базові поняття, необхідні для ідентифікації корозійних пошкоджень, наводиться огляд методичних рекомендацій щодо проведення розслідувань корозійних відмов, а

також обговорюється роль і практична цінність аналізу типових випадків (case studies). Завершальною частиною є узагальнення основних коригувальних заходів, спрямованих на усунення виявлених недоліків і підвищення надійності технічних систем.

Для ефективного контролю гальванічної корозії доцільно підбирати конструкційні матеріали з близькими значеннями корозійних потенціалів у конкретному експлуатаційному середовищі. Такий підхід дозволяє зменшити електрохімічний потенціал пари та, відповідно, інтенсивність гальванічних процесів. Важливим конструктивним чинником є також співвідношення площ анодної та катодної поверхонь, оскільки несприятливі геометричні пропорції можуть суттєво прискорювати локалізовану корозію анодного матеріалу; тому таких співвідношень необхідно уникати на етапі проєктування [42].

Одним із методів зниження гальванічної взаємодії є електрична ізоляція, яка забезпечує фізичне розділення гальванічно несумісних матеріалів. Проте на практиці реалізація ізоляції не завжди є технічно або економічно доцільною. Альтернативним підходом є застосування захисних бар'єрних покриттів, однак їх використання потребує особливої обережності. Зокрема, не рекомендується наносити покриття виключно на анодний матеріал гальванічної пари, оскільки в реальних умовах у покриттях неминуче присутні дефекти. У зонах таких дефектів за надзвичайно несприятливого співвідношення площ може відбуватися різке прискорення корозійного проникнення, що здатне призвести до швидкого руйнування конструкції.

Більш раціональною та безпечною практикою вважається нанесення покриттів на катодну поверхню гальванічної пари, що знижує катодну активність і, відповідно, інтенсивність анодного розчинення. Класичним прикладом негативних наслідків невдалого конструктивного рішення є випадки швидкого виходу з ладу резервуарів, де сталеві бокові стінки з покриттям виконували роль анода, тоді як дно резервуара з нержавіючої сталі функціонувало як катод. Таке поєднання матеріалів і покриттів створювало умови для інтенсивної гальванічної корозії та прискореного пошкодження сталевих елементів [43].

1.5 Види та способи захисту від електрохімічної корозії

1.5.1 Катодний захист

Основний принцип катодного захисту (КЗ) є досить простим.

Завдяки подачі катодного струму на захищену конструкцію, анодне розчинення зводиться до мінімуму. Катодний захист часто застосовується до конструкцій з покриттям, яке є основним засобом захисту від корозії. Вимоги до струму КЗ, як правило, є надмірними для систем без покриття. Перше застосування КЗ датується задовго до встановлення його теоретичних основ. Цей розділ присвячений переважно катодному захисту, пов'язаному з підземними трубопроводами, що є важливою сферою застосування. Інші поширені установки СР включають підземні резервуари, морські конструкції, такі як морські платформи, та арматурну сталь у бетоні [44].

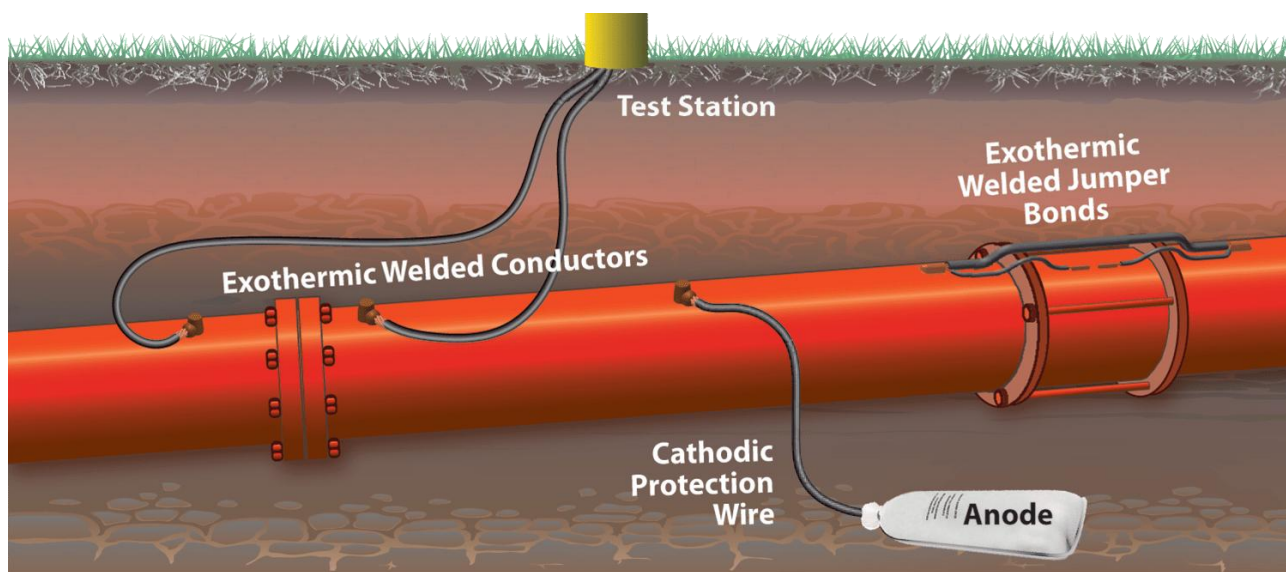


Рис. 19 Катодний захист [37]

Вибір критеріїв катодного захисту підземних сталевих конструкцій. З практичної точки зору ключовим етапом проєктування системи катодного захисту є визначення оптимального рівня захисного струму. Недостатній струм катодного захисту призводить до збереження або інтенсифікації корозійних процесів, тоді як надмірний струм, відомий як перезахист, може викликати

негативні побічні ефекти, зокрема відшарування захисних покриттів та розвиток водневої крихкості металу [45].

Слід враховувати, що корозійні конструкції характеризуються просторовою неоднорідністю корозійних потенціалів і, відповідно, різними вимогами до рівня захисту на окремих ділянках поверхні. Тому практичні критерії катодного захисту повинні враховувати ці відмінності. Для підземних сталевих конструкцій запропоновано такі основні критерії захисту:

- потенціал конструкції не менш ніж -850 мВ відносно насиченого електрода порівняння Cu/CuSO_4 в аеробних умовах;
- потенціал конструкції не менш ніж -950 мВ відносно насиченого електрода Cu/CuSO_4 в анаеробних середовищах, де можлива мікробіологічно індукована корозія;
- зміщення потенціалу в негативний бік не менше ніж 300 мВ при подачі захисного струму;
- зміщення потенціалу в позитивний бік не менше ніж 100 мВ після переривання захисного струму.

Перший із наведених критеріїв є найбільш відомим і широко застосовується в промисловій практиці завдяки простоті його використання. Застосування рівняння Нернста за концентрації іонів заліза порядку 10^{-6} М, що відповідає умовам незначної корозії з термодинамічної точки зору, дає потенціал сталі приблизно -830 мВ відносно Cu/CuSO_4 , що дещо менш негативний за зазначений критерій. Задовільний захист за менш суворих потенціальних вимог часто пов'язують з утворенням захисної плівки гідроксиду заліза на поверхні металу [44, 45].

Строго кажучи, критерії потенціального захисту повинні базуватися на значенні потенціалу безпосередньо на межі поділу «метал – ґрунт». Однак у практичних умовах вимірювання здійснюються шляхом розміщення електрода порівняння на певній відстані від конструкції, що зумовлює необхідність урахування поправок на омичне падіння напруги. Критерії зсуву потенціалу вимагають проведення вимірювань у режимах ON та OFF системи катодного

захисту, при цьому вплив омічного падіння може суттєво знижувати достовірність критерію зсуву на 300 мВ. Натомість критерій зсуву на 100 мВ є корисним інструментом для запобігання надмірному захисту.

Слід зазначити, що для різних комбінацій матеріалів і середовищ експлуатації застосовуються різні критерії катодного захисту. Матеріали, які широко використовуються в підземних спорудах, зокрема мідь, алюміній і свинець, мають інші допустимі діапазони потенціалів порівняно зі сталлю. Надмірно негативні потенціали можуть бути шкідливими для таких матеріалів через утворення лужних сполук на катодній поверхні, що призводить до деградації металу або його сплавів [44].

Строго кажучи, потенціальні критерії катодного захисту, наведені вище, визначаються потенціалом на межі розділу між металевою конструкцією та ґрунтовим електролітом. Проте в реальних умовах експлуатації безпосереднє вимірювання цього потенціалу, зокрема для заглиблених трубопроводів, є технічно складним або практично неможливим.

З теоретичної точки зору, еталонний електрод порівняння повинен бути розміщений у ґрунті безпосередньо поблизу поверхні трубопроводу, на нескінченно малій відстані від металу, щоб зафіксувати істинне значення потенціалу «метал–ґрунт». Однак на практиці таке розміщення є недосяжним через конструктивні, експлуатаційні та геотехнічні обмеження. У результаті виміряний потенціал включає додаткові складові, зумовлені омічним падінням напруги в ґрунті, що потребує відповідної інтерпретації результатів та застосування коригувальних методик [45].

Таблиця 1.2. Взаємозв'язок між потенціалом і ризиком корозії для заглиблених сталевих конструкцій

Потенціал	Стан сталі
Від 0,5 до 0,6	Інтенсивна корозія
Від 0,6 до 0,7	Корозія
0,7 до 0,8	Деякий захист
0,8 до 0,9	Катодний захист
0,9 до 1,0	Деякий надмірний захист
1,0 до 1,1	Підвищений надмірний захист
1,1 до 1,4	Все більш серйозний надмірний захист, відшарування покриття та утворення пухирців, підвищення ризику водневого крихкості

1.5.2 Анодний захист

На відміну від катодного захисту, анодний захист є відносно новим. Еделману вперше продемонстрував можливість застосування анодного захисту в 1954 році і випробував його на невеликих котлах з нержавіючої сталі, що використовувалися для розчинів сірчаної кислоти. Це було, ймовірно, перше промислове застосування, хоча в інших місцях проводилися й інші експериментальні роботи. Ця техніка була розроблена з використанням принципів електрохімічної кінетики і її досить складно описати без введення складних понять електрохімічної теорії. Простіше кажучи, анодний захист базується на утворенні захисної плівки на металах за допомогою зовнішніх анодних струмів. Анодна захист має унікальні переваги. Наприклад, прикладений струм зазвичай дорівнює швидкості корозії захищеної системи. Таким чином, анодна захист не тільки захищає, але й пропонує прямий засіб для контролю швидкості корозії системи. Як стверджував ентузіаст і відомий інженер-корозієзнавець, «анодний захист можна класифікувати як одне з найважливіших досягнень в історії науки про корозію».

Електрохімічною основою анодного захисту є характерна залежність анодного струму від потенціалу, яка має ділянки активного розчинення, пасивації та транспасивації. При досягненні критичного потенціалу пасивації густина анодного струму різко зменшується, що свідчить про утворення захисної плівки. Подальше підвищення потенціалу в межах пасивної області супроводжується низькими швидкостями корозії. Однак при перевищенні верхньої межі пасивної зони можливий перехід у транспасивний стан, який характеризується руйнуванням пасивної плівки, виділенням газів і різким зростанням корозійного струму. Саме тому точне регулювання потенціалу є критично важливою умовою ефективного анодного захисту [45].

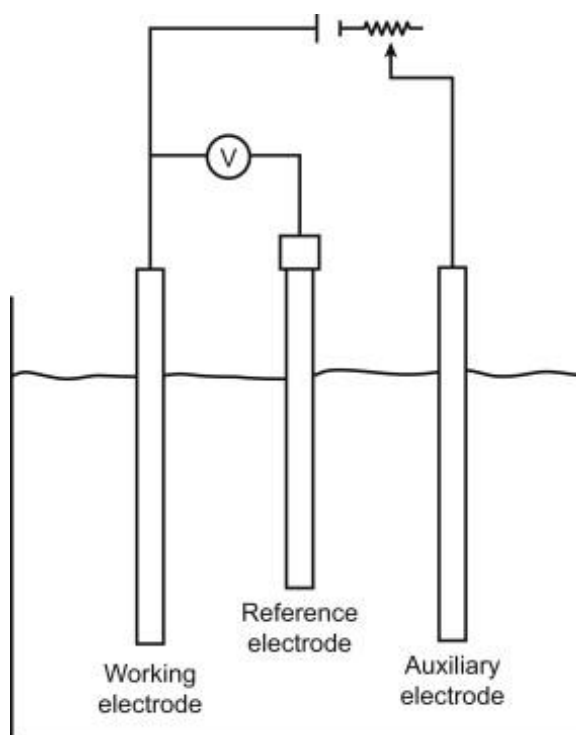


Рис. 1.20. Анодний захист

З практичної точки зору, реалізація анодного захисту вимагає використання джерел постійного струму з автоматизованою системою керування потенціалом. Контроль здійснюється за допомогою еталонних електродів порівняння, розміщених у безпосередній близькості до поверхні конструкції, яка захищається. Система працює в режимі зворотного зв'язку, коригуючи величину струму таким чином, щоб потенціал конструкції підтримувався в заданому

діапазоні пасивації. Відмова або некоректна робота вимірювальних елементів може призвести до виходу системи з оптимального режиму та спричинити інтенсивну корозію.

Однією з ключових переваг анодного захисту є надзвичайно низький рівень споживання струму після досягнення пасивного стану. У пасивній області анодний струм зменшується на кілька порядків порівняно з активною корозією, що забезпечує високу енергоефективність системи. Крім того, анодний захист дозволяє значно знизити втрати металу навіть у надзвичайно агресивних середовищах, де інші методи захисту є малоефективними або економічно недоцільними [46].

Водночас анодний захист має низку суттєвих обмежень. По-перше, він є чутливим до змін складу середовища, температури, концентрації агресивних іонів та гідродинамічних умов. Навіть незначні коливання параметрів можуть порушити пасивний стан і спричинити локалізовану корозію. По-друге, метод потребує безперервного моніторингу та високої надійності апаратури, що ускладнює його застосування в умовах обмеженого доступу або відсутності стабільного електроживлення. По-третє, анодний захист практично непридатний для неоднорідних електролітів, таких як ґрунти, де потенціал і електропровідність значно змінюються в просторі.

У зв'язку з цим анодний захист застосовується переважно в хімічній та нафтохімічній промисловості для захисту резервуарів, теплообмінників, реакторів і трубопроводів, що працюють у концентрованих кислотах або інших агресивних, але добре контрольованих середовищах. Для підземних металевих конструкцій, зокрема сталевих трубопроводів у ґрунтах, анодний захист майже не використовується, оскільки неоднорідність ґрунтового електроліту унеможлиблює стабільне підтримання потенціалу в зоні пасивації та створює високий ризик локалізованих пошкоджень.

Таким чином, анодний захист є високоефективним, але вузькоспеціалізованим методом протикорозійного захисту. Його доцільність визначається поєднанням електрохімічних властивостей матеріалу,

характеристик середовища та можливостей технічного контролю. У порівнянні з катодним захистом, анодний захист має значно суворіші вимоги до стабільності умов експлуатації, проте за їх дотримання забезпечує надзвичайно низькі швидкості корозії та тривалий термін служби обладнання [45, 47].

1.6 Система електрохімічного захисту, як об'єкт електроспоживання

1.6.1 Конфігурація системи електрохімічного захисту та вплив елементів кола на розподіл струмів і потенціалів

З електротехнічної точки зору система електрохімічного захисту з примусовим струмом є замкненим електричним колом постійного струму. До складу цього кола входять джерело живлення (випрямляч), анодне заземлення, ґрунт як електроліт та металева споруда, що захищається.

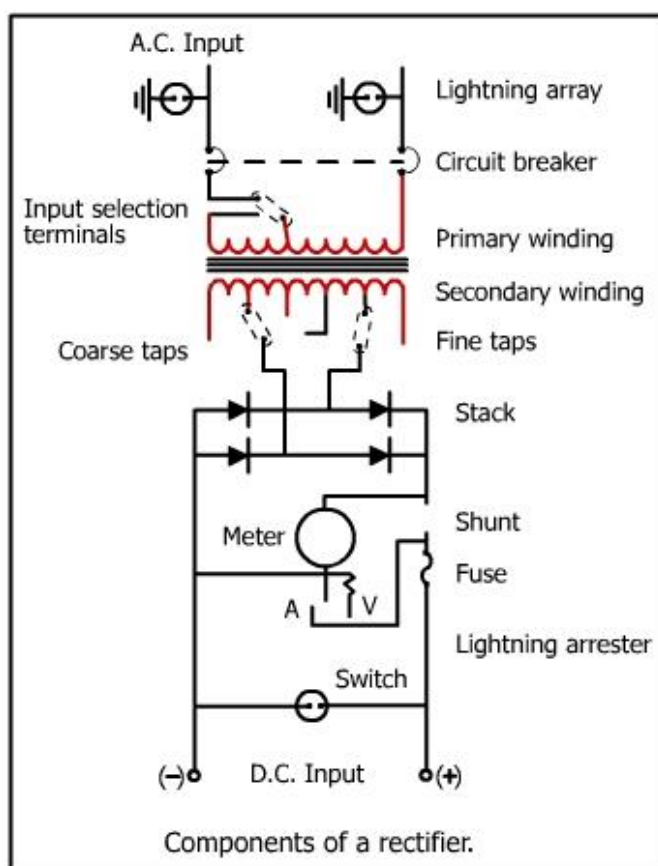


Рис. 1.21. Електрична схема катодного захисту [48]

Метал трубопроводу виконує функцію протяжного електрода з ненульовим питомим опором, величина якого визначається матеріалом,

геометричними параметрами та наявністю електричних розривів або з'єднань з іншими металевими конструкціями. Унаслідок цього потенціал трубопроводу не є сталим уздовж його довжини, а характеризується просторовими варіаціями, що зумовлюють утворення локальних анодних і катодних ділянок. Такі неоднорідності потенціалу сприяють виникненню диференціальних корозійних комірок навіть за наявності катодного захисту [47].

Ґрунт, у якому розміщено трубопровід і анодну систему, виконує роль електроліту та одночасно є середовищем розтікання захисного струму. Його електричні властивості — питомий опір, вологість, аерація, хімічний склад і стратифікація — істотно впливають на розподіл струмів у системі. Нерівномірність ґрунтових характеристик призводить до просторово змінного падіння напруги в електроліті та формування градієнтів потенціалу, що безпосередньо впливає на величину та характер вимірюваних трубопровід–ґрунт потенціалів.

Анодна система, незалежно від типу (гальванічна чи з примусовим струмом), є активним елементом електричного кола з власним опором і визначеною геометрією. Матеріал анодів, їх розміщення, глибина залягання та опір контакту «анод–ґрунт» формують конфігурацію електричного поля в навколишньому середовищі. Саме анодна система задає напрямок і густину струмових ліній, що досягають поверхні трубопроводу, і, відповідно, визначає ефективність катодного захисту на різних ділянках споруди.

Значний вплив на електричну схему системи має ізоляційне покриття трубопроводу. Покриття не є ідеальним діелектриком, а характеризується скінченним електричним опором, наявністю дефектів та можливістю катодного відшарування. Захисний струм у системі концентрується переважно в зонах дефектів покриття, де відбувається локальне зростання густини струму та істотна зміна електродного потенціалу. Таким чином, стан і якість покриття визначають не лише величину необхідного захисного струму, але й просторовий розподіл електрохімічних процесів на поверхні трубопроводу.

Джерело живлення системи катодного захисту та електричні з'єднання між її елементами також не можуть розглядатися як ідеальні. Внутрішній опір джерела, стабільність вихідних параметрів, контактні опори кабельних з'єднань і заземлень впливають на фактичний струмовий режим та призводять до додаткових втрат напруги в колі. Ці фактори необхідно враховувати як при проектуванні системи, так і при інтерпретації результатів електрохімічних вимірювань [47].

1.6.2 Джерело живлення системи електрохімічного захисту як активний елемент електричного кола

У більшості промислових систем катодного захисту як джерело живлення застосовуються напівпровідникові випрямлячі, що перетворюють змінний струм електричної мережі у низьковольтний постійний струм. Випрямлячі характеризуються номінальними значеннями вихідної напруги та струму, які вибираються з урахуванням довжини трубопроводу, стану ізоляційного покриття, питомого опору ґрунту та геометрії анодного поля. Таким чином, джерело живлення визначає граничні енергетичні можливості системи катодного захисту та її здатність компенсувати корозійні струми в різних експлуатаційних умовах.

З електротехнічної точки зору джерело живлення не є ідеальним джерелом напруги або струму, а характеризується наявністю внутрішнього опору та обмежень регулювання. Внутрішній опір випрямляча зумовлює залежність вихідної напруги від навантаження і безпосередньо впливає на стабільність захисного струму при зміні електричних параметрів зовнішнього кола. До таких змін належать сезонні коливання питомого опору ґрунту, деградація ізоляційного покриття трубопроводу, зміна опору анодного заземлення та поява додаткових струмових шляхів унаслідок електричного контакту з іншими металевими спорудами.

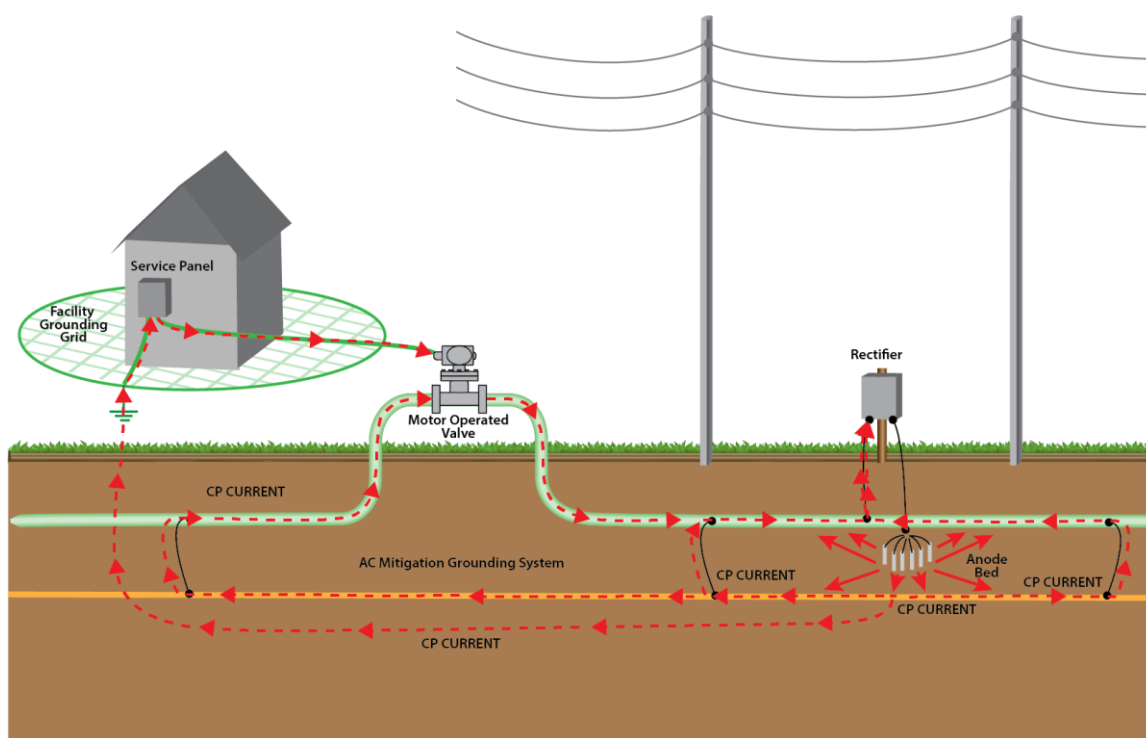


Рис. 1.22. Катодний захист як частина електричної мережі [49]

Важливою особливістю джерела живлення системи катодного захисту є його участь у формуванні потенціального режиму трубопроводу. Збільшення вихідної напруги випрямляча призводить до зростання струму, що надходить на металеву поверхню, та до зміщення потенціалу трубопроводу в більш негативну область. Проте цей процес має нелінійний характер, оскільки розподіл струму обмежується опором ґрунту, станом покриття та поляризаційними характеристиками метал–електроліт. Унаслідок цього подальше підвищення напруги джерела може призводити не до рівномірного зростання захисного ефекту, а до локального перезахисту окремих ділянок трубопроводу.

З позицій електрохімії джерело живлення забезпечує зовнішню енергію, необхідну для перебігу катодних реакцій на поверхні металу. Захисний струм, який подається від джерела, компенсує анодні струми корозійних мікрокомірок і змінює швидкість електродних процесів. Таким чином, джерело живлення безпосередньо впливає на ступінь поляризації металевої поверхні та визначає досягнення критеріїв катодного захисту за потенціалом або за зміною електрохімічної кінетики.

Окремої уваги заслуговує вплив джерела живлення на електромагнітну та електрохімічну взаємодію системи катодного захисту з навколишнім середовищем. Нерівномірний розподіл струмів у ґрунті, зумовлений режимом роботи випрямляча, може призводити до виникнення блукаючих струмів і до інтерференції з іншими підземними металевими спорудами. У цьому контексті параметри джерела живлення, зокрема рівень напруги та спосіб регулювання струму, відіграють важливу роль у забезпеченні електрохімічної сумісності системи катодного захисту з іншими інженерними мережами.

З погляду енергоспоживання система катодного захисту з примусовим струмом є специфічним споживачем електричної енергії. Джерело живлення працює, як правило, у безперервному режимі, а споживана потужність визначається добутком вихідної напруги на струм захисту. Зміни електричних параметрів системи в часі зумовлюють зміну режиму навантаження джерела, що необхідно враховувати при оцінці енергоефективності та надійності роботи системи в цілому.

Отже, джерело живлення системи електрохімічного захисту слід розглядати не як допоміжний елемент, а як активний компонент розподіленого електричного кола. Його електричні та енергетичні характеристики визначають струмовий режим, потенціальний стан трубопроводу, ефективність захисної дії та взаємодію системи з навколишнім електрохімічним середовищем. Коректне проєктування та експлуатація джерела живлення є необхідною умовою забезпечення надійного та довготривалого захисту підземних металевих споруд від електрохімічної корозії.

1.6.3 Характерні особливості електроспоживання установок електрохімічного захисту

Установки електрохімічного (катодного) захисту з примусовим струмом належать до специфічної категорії електроспоживачів, електричне навантаження яких визначається не технологічним циклом у традиційному розумінні, а електрохімічними процесами на межі розділу «метал–електроліт». Особливості

електроспоживання таких установок зумовлені безперервним режимом роботи, просторовою розподіленістю електричного кола та суттєвою залежністю струмового режиму від параметрів навколишнього середовища.

Першою характерною особливістю є тривалий безперервний характер електроспоживання. Установки катодного захисту експлуатуються цілодобово та, як правило, без зупинок, оскільки припинення подачі захисного струму призводить до відновлення корозійних процесів на поверхні трубопроводу. Унаслідок цього споживана електрична енергія акумулюється протягом тривалого часу, а інтегральне енергоспоживання визначається не піковими навантаженнями, а сумарною тривалістю роботи установки.

Другою особливістю є низький рівень напруги при відносно значних значеннях струму. Вихідна напруга джерел живлення установок катодного захисту зазвичай становить одиниці або десятки вольт, тоді як струм може досягати десятків і сотень ампер. Така комбінація параметрів зумовлює підвищену чутливість електроспоживання до змін опору зовнішнього кола, зокрема опору ґрунту, анодного заземлення та ізоляційного покриття трубопроводу [46].

Третьою характерною рисою є змінність електричного навантаження в часі. Струм споживання установок електрохімічного захисту не є сталим і змінюється під впливом сезонних коливань вологості та температури ґрунту, старіння та пошкодження ізоляційного покриття, а також змін у конфігурації підземних комунікацій. У результаті навіть за сталих налаштувань джерела живлення спостерігаються флуктуації струму та потужності, що ускладнює прогнозування електроспоживання.

Четвертою особливістю є нелінійний характер навантаження. Електричний струм у системі катодного захисту визначається не лише законом Ома, а й поляризаційними характеристиками електродних процесів. Залежність між напругою джерела та струмом захисту має нелінійний характер, оскільки зі зростанням струму змінюється потенціал металу та кінетика електрохімічних

реакцій. Це призводить до того, що ефективність використання електричної енергії не є пропорційною прикладеній напрузі.

П'ятою важливою особливістю є просторова нерівномірність споживання електричної енергії. Захисний струм розподіляється вздовж трубопроводу нерівномірно, концентруючись у зонах дефектів ізоляційного покриття та ділянках з пониженим опором ґрунту. Унаслідок цього різні ділянки трубопроводу фактично «споживають» різну частку загальної електричної енергії, що має принципове значення для оцінки ефективності системи та ризиків локального перезакхисту.

Шостою особливістю є вплив зовнішніх електричних факторів на режим електроспоживання. Наявність блукаючих струмів, суміжних систем катодного захисту або електрифікованого транспорту призводить до додаткових струмових потоків у ґрунті. Це може викликати зміну навантаження джерела живлення та збільшення споживаної потужності без відповідного підвищення захисного ефекту [46].

Нарешті, установкам електрохімічного захисту притаманна висока залежність електроспоживання від якості технічного обслуговування та регулювання. Некоректне налаштування напруги або струму, деградація анодів, зростання контактних опорів у з'єднаннях призводять до нераціонального використання електричної енергії. У цьому контексті оптимізація режимів роботи джерел живлення є важливим чинником підвищення енергоефективності систем електрохімічного захисту.

1.6.4 Фактори, що визначають електроспоживання

Величина електроспоживання установок електрохімічного (катодного) захисту з примусовим струмом формується під впливом комплексу взаємопов'язаних технічних, електрохімічних та експлуатаційних факторів. На відміну від традиційних електротехнічних споживачів, у таких системах споживана потужність і електрична енергія визначаються не лише параметрами

джерела живлення, а насамперед властивостями захищеної споруди та середовища, у якому вона експлуатується [48, 49].

Одним із визначальних факторів є геометричні параметри та протяжність трубопроводу. Зі збільшенням довжини та площі поверхні металу зростає сумарна кількість електрохімічно активних ділянок, що потребують катодної поляризації. Відповідно зростає необхідний захисний струм, а разом з ним і споживана електрична потужність. Цей фактор є базовим при первинному проектуванні системи катодного захисту та визначає орієнтовний рівень електроспоживання.

Суттєвий вплив на величину електроспоживання має стан і тип ізоляційного покриття трубопроводу. Якісне покриття з високим електричним опором обмежує площу контакту металу з електролітом, унаслідок чого зменшується кількість струму, необхідного для досягнення захисного потенціалу. Навпаки, наявність дефектів, старіння або катодне відшарування покриття призводять до різкого зростання локальної густини струму та збільшення загального струмового навантаження джерела живлення, що безпосередньо відображається на електроспоживанні установки [46].

Визначальним фактором є електричні властивості ґрунту, зокрема його питомий опір. У ґрунтах з низьким питомим опором захисний струм розтікається легше, що дає змогу досягати необхідного потенціалу при відносно невеликій напрузі джерела. У ґрунтах з високим питомим опором для забезпечення того самого струмового рівня потрібне підвищення вихідної напруги, що призводить до зростання споживаної потужності. Крім того, сезонні зміни вологості та температури ґрунту зумовлюють змінність електроспоживання в часі.

Важливу роль відіграють параметри анодної системи. Матеріал анодів, їх геометрія, кількість, глибина встановлення та опір контакту з ґрунтом визначають величину анодного опору, який входить до складу зовнішнього електричного кола. Зростання анодного опору потребує підвищення напруги джерела живлення для забезпечення заданого струму, що безпосередньо

збільшує електроспоживання. Деградація анодів у процесі експлуатації також є фактором поступового зростання енергетичних витрат.

На величину електроспоживання істотно впливають електрохімічні характеристики процесів на поверхні металу. Поляризаційні властивості сталі трубопроводу, склад електроліту та умови масоперенесення визначають залежність між прикладеною напругою та досягнутим потенціалом захисту. У разі підвищеної корозійної активності середовища для досягнення критеріїв катодного захисту необхідні більші струми, що призводить до зростання споживаної електричної енергії.

Окремим фактором є вплив сторонніх електричних струмів та суміжних систем катодного захисту. Блукаючі струми та електрична інтерференція можуть змінювати струмовий баланс у системі, спричиняючи додаткові втрати або потребу в підвищенні струму захисту. У таких умовах зростає електроспоживання без пропорційного підвищення ефективності захисту.

Не менш важливим фактором є режим роботи та налаштування джерела живлення. Робота установки в режимі стабілізації напруги або струму, рівень встановлених уставок, а також точність регулювання безпосередньо впливають на середнє значення споживаної потужності. Надмірні уставки напруги призводять до перезахисту та необґрунтованого зростання електроспоживання, тоді як оптимізовані режими дають змогу мінімізувати енергетичні витрати при збереженні необхідного рівня захисту [46].

1.6.5 Надійність електропостачання та взаємодія з енергосистемою

Надійність електропостачання є одним із визначальних чинників ефективності роботи установок електрохімічного (катодного) захисту з зовнішнім струмом. На відміну від більшості промислових електроспоживачів, переривання електроживлення таких установок безпосередньо призводить до втрати захисної дії та відновлення електрохімічних процесів корозії на поверхні трубопроводу. У зв'язку з цим системи електрохімічного захисту належать до категорії відповідальних електроспоживачів, для яких надійність

електропостачання має не лише техніко-економічне, але й експлуатаційно-безпекове значення [46].

Електропостачання установок катодного захисту, як правило, здійснюється від розподільчих мереж загального призначення змінного струму з подальшим перетворенням енергії у постійний струм за допомогою випрямлячів. Така схема зумовлює залежність режимів роботи системи захисту від параметрів енергосистеми, зокрема рівня напруги, частоти та якості електроенергії. Коливання напруги в мережі призводять до зміни вихідних параметрів джерела живлення, що може спричиняти флуктуації захисного струму та потенціалу трубопроводу.

Особливістю взаємодії установок електрохімічного захисту з енергосистемою є низька одинична потужність, але велика кількість розосереджених споживачів. Окремі випрямлячі катодного захисту, як правило, споживають відносно невелику активну потужність, однак їх значна кількість уздовж протяжних трубопроводів формує помітне сумарне навантаження на розподільчі мережі. Така просторова розосередженість ускладнює централізований контроль режимів електроспоживання та підвищує вимоги до надійності локальних ділянок електропостачання [50-52].

З точки зору надійності електропостачання, найбільш критичними є аварійні та планові відключення електроенергії в розподільчих мережах. Навіть короточасні перерви живлення призводять до деполяризації металеві поверхні та зменшення захисного ефекту. За повторюваних або тривалих відключень відбувається циклічна зміна електрохімічних умов, що може інтенсифікувати корозійні процеси. Тому для відповідальних ділянок трубопроводів передбачаються резервні джерела живлення або схеми підвищеної надійності електропостачання.

Взаємодія установок катодного захисту з енергосистемою проявляється також у характері електричного навантаження. Випрямлячі катодного захисту є нелінійними споживачами, які можуть створювати гармонічні спотворення струму та впливати на показники якості електроенергії в точці приєднання. Хоча

одинична потужність таких установок зазвичай невелика, їх сукупний вплив у місцях концентрації може бути відчутним, що потребує врахування при проєктуванні систем електропостачання.

Окремим аспектом взаємодії з енергосистемою є можливість використання альтернативних та автономних джерел електропостачання. У віддалених районах або в умовах обмеженої надійності мережевого електроживлення системи електрохімічного захисту можуть житися від автономних джерел, зокрема фотоелектричних установок, вітрогенераторів або комбінованих гібридних систем з акумуляторним накопиченням енергії. Такі рішення підвищують енергетичну автономність і надійність захисту, проте потребують додаткового аналізу стабільності режимів та відповідності електрохімічним вимогам [52].

З позицій системної надійності енергосистеми установки електрохімічного захисту можуть розглядатися як навантаження, що допускає обмежену гнучкість. У нормальних умовах вони потребують безперервного електропостачання, однак у короткочасних аварійних режимах енергосистеми можливе тимчасове зниження рівня захисного струму без негайної втрати цілісності трубопроводу. Це створює передумови для застосування адаптивних схем керування та оптимізації взаємодії систем катодного захисту з енергосистемою [53].

1.7. Постановка задачі наукових досліджень

Проведений аналіз проблеми електрохімічної корозії підземних сталевих конструкцій та енергетичної ефективності роботи систем катодного захисту дозволяє сформулювати наступні положення, що обумовлюють задачі цього дослідження. Перспективним шляхом підвищення надійності та енергетичної ефективності роботи станцій катодного захисту (СКЗ) є впровадження уточнених методик визначення закономірностей розподілу захисного потенціалу, а також визначення раціональних структур комплексів надійного електропостачання з розподіленою генерацією. Одним з електромагнітних ефектів, який проявляється при роботі вентильних перетворювачів СКЗ, є значні

рівні інтергармонік та вищих гармонік, що генеруються в електричну мережу та сприяють зростанню втрат електроенергії та скороченню регламентного строку служби електрообладнання. Проте закономірності, що зв'язують параметри СКЗ при ослабленій енергосистемі, не вивчалися, і обґрунтування параметрів раціонального енергетично ефективного режиму системи електропостачання до не проводилося. Існуючі методики розрахунку не дозволяють визначити раціональну потужність генерації та накопичення енергії при роботі СКЗ в умовах блекаутів та обмежень електропостачання. Недостатня вивченість процесів електромагнітної сумісності вентильних перетворювачів з особливим тривалим режимом роботи є одним із факторів, який обмежує впровадження інноваційних принципів інтелектуальної енергетики.

Таким чином, метою роботи є розвиток теорії електрохімічної корозії підземних сталевих конструкцій при децентралізованому принципі електропостачання активних та пасивних СКЗ та обґрунтування показників надійності й якості їх електропостачання. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі сформульовано і виконано наступні задачі досліджень:

1. Дослідити сучасні підходи до принципи вибору технічних, технологічних, економічних параметрів систем електрохімічного захисту залежно від вхідних умов (географічні, кліматичні, інфраструктурні, ресурсні, тощо), внутрішніх й зовнішніх обмежень енергосистеми.
2. Аналіз впливу схемних реалізацій вентильних перетворювачів СКЗ на спектральний склад вихідного струму та рівні захисного потенціалу.
3. Аналіз типових графіків електричних навантажень СКЗ з урахуванням стохастичного характеру зміни технологічних умов прокладання підземних трубопроводів.
4. Обґрунтувати багатоваріантну гнучку математичну модель вибору параметрів та модульних елементів гібридних електрогенеруючих комплексів СКЗ за критерієм максимальної енергетичної ефективності та надійності.

5. Моделювання параметрів електричної частини автономних електрогенеруючих комплексів, графіків генерації електроенергії для різних регіонів України та режимів DC/DC перетворювачів при гібридному та децентралізованому приєднанні до існуючої енергосистеми.

1.8. Висновки по розділу 1

1. Виконавши детальний аналіз вітчизняних та закордонних наукових досліджень з проблематики електрохімічного захисту (Інститут Електродинаміки НАН України, Масачусетський технічний університет, Есслінгенський університет прикладних наук), зроблено висновок, що незважаючи на надзвичайну важливість розробки надійної системи захисту підземних сталевих трубопроводів від електрохімічної корозії, універсальних моделей моделювання активних систем катодного захисту не існує.

2. Необхідна розробка уточненої математичної та комп'ютерної моделі електротехнічної системи «Джерело живлення – станція катодного захисту – трубопровід», яка відрізняється від існуючих можливістю врахування фізичних параметрів трубопроводу та ізоляції, гідрогеологічних особливостей ґрунтів у області прокладання трубопроводу, точкових неоднорідностей, викликаних полімерними вставками та можливість одночасної реалізації безпечних рівнів потенціалу групою активних станцій.

3. Впровадження елементів концепції Smart Grid з позиції децентралізації електропостачання об'єктів критичної інфраструктури України дозволяє застосувати нові підходи до організації електропостачання СКЗ у важкодоступних, віддалених та постраждалих від воєнних дій регіонів. При цьому вибір структури та параметрів електрогенеруючих комплексів має врахувати, на відміну від існуючих методів, комплексні показники особливих режимів СКЗ, надійності та якості електропостачання в автономних електричних мережах.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ РІВНІВ ЗАХИСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ У ПАСИВНИХ ТА АКТИВНИХ СИСТЕМАХ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

2.1 Аналітичні моделі розподілу захисного потенціалу СКЗ у двовимірному просторі

Газотранспортна система України – це комплекс підземних та наземних комунікацій, які об'єднані в єдину стратегічну систему енергопостачання промислових об'єктів та житлового фонду. Проблема, пов'язана із захистом підземних трубопроводів від електрохімічної корозії, є складною, багатогранною та остаточно не вирішеною сьогодні, враховуючи реалії воєнного часу та виклики повоєнного відновлення.

Різноманітність умов прокладання, фізичних розмірів трубопроводу, наявність поблизу інженерних комунікацій та маршрутів електрифікованого транспорту не дозволяють розробити універсальну адекватну методику вибору параметрів захисних електротехнічних комплексів для успішного довгострокового захисту металевих конструкцій [54, 55]. У процесі розробки комплексної стратегії захисту газопроводів високого та середнього тиску були запропоновані спеціальні моделі для визначення кількості та потужності катодних станцій та спеціальної топології в їх розташуванні. Труднощі реалізації стабільного значення захисного потенціалу по всій довжині трубопроводу призвели до необхідності аналітичного та фізичного моделювання функціональної залежності $U(z, t)$ (де U – захисний потенціал; z – відстань у метрах; t – час) з урахуванням усіх можливих комбінацій початкових умов та наявного сучасного електротехнічного обладнання [9].

Для визначення підходів до створення комплексних гібридних систем електропостачання СКЗ необхідно розробити інженерні аналітичні моделі варіації рівня захисного потенціалу, враховуючи різноманіття технічних конфігурації самої металевої конструкції та режими керованих інверторів для

реалізації успішного захисту з максимальною енергоефективністю та мінімальною номінальною потужністю джерел живлення [9].

Для представлення аналітичної функціональної залежності захисного потенціалу введемо рівень припущень та початкових умов:

- розглядаємо порожню нескінченну підземну сталеву циліндричну трубу із зовнішнім радіусом $r=30$ мм та товщиною стінки $h_p=4$ мм, центр якої розташований на глибині $H=1,5$ см;

- труба розміщена в однорідному ґрунті з провідністю $\sigma_s=2 \cdot 10^{-2} \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$;

- параметри системи змінюються з частотою $f=25$ кГц;

- ізоляція задається питомим опором $R_i=10^6$ Ом·м.

Адекватність прийнятих припущень доводиться тривалими експериментальними дослідженнями електрофізичних параметрів електротехнічних комплексів захисту підземних газопроводів у різних регіонах України, що дозволяє охопити різні стадії старіння та пошкоджень трубопроводів,

Коефіцієнт демпфування сталі та ґрунту розраховується наступним чином [1, 14, 21]:

$$\gamma_{st} = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_{st} \sigma_{st}}{2}}, \quad \gamma_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma_s}{2}}, \quad (2.1)$$

де $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м – магнітна константа; $\omega=2\pi f$ – кутова частота; $\mu_{st}=200$ – магнітна константа сталі; σ_{st} – провідність сталі, $\sigma_{st}=1/\rho_{st}$; $\rho_{st}=1.3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м – питомий опір сталі.

Індуктивний опір труби Z , резистивний опір трансформатора R_t та стала поширення α обчислюються [60]:

$$Z = \frac{\omega\mu_0}{8} + i \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1,3}{\gamma_s r}\right) + \frac{(1-i)\gamma_{st}}{2\pi r \sigma_{st}} \cot((1-i)\gamma_{st} h_p), \quad R_t = R_i + \frac{1}{\pi\sigma_s} \ln\left(\frac{1.12}{\gamma_s \sqrt{rH}}\right),$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{Z}{R_t}}, \quad (2.2)$$

де $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця; слід зазначити, що $[Z] = \text{Ом/м}$, $[R_t] = \text{Ом} \cdot \text{м}$ та $[\alpha] = \text{м}^{-1}$.

Комплексні амплітуди потенціалу вздовж труби $V(z)$ та струму вздовж труби $I(z)$ описуються рівняннями:

$$\frac{dV(z)}{dz} = -ZI(z), \quad V(z) = -R_t \frac{dI(z)}{dz} + \varphi(z), \quad (2.3)$$

де $\varphi(z)$ – потенціал зовнішнього електричного поля, z – координата вздовж труби.

Функція $V(z)$ задовольняє наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{d^2 V(z)}{dz^2} - \alpha^2 V(z) = -\alpha^2 \varphi(z). \quad (2.4)$$

Початкове моделювання розподілу захисного потенціалу виконано без зовнішнього електричного поля, коли станції захисту від корозії підключені до труби. Нехай станція створює різницю потенціалів між точкою на поверхні сталеві труби та точкою, розташованою на тій самій глибині, що й центр труби, на відстані y від центру труби. Різницю потенціалів між цими точками можна виразити як [47]:

$$\Delta V(z) = -R_{st-s} \cdot \frac{dI(z)}{dz}, \quad R_{st-s} = R_i + \frac{1}{2\pi\sigma_s} \ln\left(\frac{y\sqrt{y^2 + 4H^2}}{2rH}\right). \quad (2.5)$$

Рішення диференційного рівняння подамо у вигляді:

$$V(z) = \begin{cases} \frac{R_t}{R_{st-s}} V_a e^{\alpha z}, & z < 0 \\ \frac{R_t}{R_{st-s}} V_a e^{-\alpha z}, & z \geq 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

Це дає можливість отримати наступний вираз для потенціалу як функції координати та часу:

$$U(z, t) = \operatorname{Re}(V(z) e^{i\omega t}) = \begin{cases} \frac{R_t}{R_{st-s}} V_a e^{\alpha_1 z} \cos(\omega t + \alpha_2 z), & z < 0 \\ \frac{R_t}{R_{st-s}} V_a e^{-\alpha_1 z} \cos(\omega t - \alpha_2 z), & z \geq 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

де $\alpha_1 = \operatorname{Re}(\alpha)$, $\alpha_2 = \operatorname{Im}(\alpha)$; слід зазначити, що $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$.

Отже, у випадку однієї станції, амплітуда потенціалу експоненціально зменшується, і відбувається координатно-залежний фазовий зсув.

Далі розглянемо дві станції, одна з яких розташована в координаті $z=0$, інша - в $z=L$. Тоді відповідні різниці потенціалів будуть:

$$\Delta U(z=0, t) = V_{a1} \cos(\omega t + \varphi_1), \quad \Delta U(z=L, t) = V_{a2} \cos(\omega t + \varphi_2), \quad (2.8)$$

Також слід зазначити, що в загальному випадку відстані y_1, y_2 та відповідні параметри R_{st-s1} та R_{st-s2} можуть не збігатися. Таким чином:

$$\Delta V(0) = V_a e^{i\varphi_1}, \quad V(0) = \frac{R_t}{R_{st-s1}} V_a e^{i\varphi_1}, \quad \Delta V(L) = V_a e^{i\varphi_2}, \quad V(L) = \frac{R_t}{R_{st-s2}} V_a e^{i\varphi_2}. \quad (2.9)$$

Для ефективного захисту від електрохімічної корозії необхідно, щоб потенціал був неперервним, і потенціал, очевидно, не може зростати експоненціально, якщо $z \rightarrow \pm\infty$, тому отримаємо комплексну амплітуду потенціалу у вигляді:

$$V(z) = \begin{cases} Ae^{\alpha z}, & z < 0 \\ Be^{\alpha z} + Ce^{-\alpha z}, & z \in [0, L] \\ De^{-\alpha z}, & z > L \end{cases} \quad (2.10)$$

де

$$A = B + C, \quad Be^{\alpha L} + Ce^{-\alpha L} = De^{-\alpha L}, \quad A = \frac{R_t}{R_{s-st1}} V_a e^{i\varphi_1}, \quad De^{-\alpha L} = \frac{R_t}{R_{s-st2}} V_a e^{i\varphi_2}. \quad (2.11)$$

Після лінеаризації системи рівнянь отримаємо наступний вираз:

$$V(z) = \begin{cases} \frac{R_t}{R_{s-st1}} V_{a1} e^{\alpha z} e^{i\varphi_1}, & z < 0 \\ V_{a1} \frac{R_t}{R_{s-st1}} \frac{\sinh(\alpha L - \alpha z)}{\sinh(\alpha L)} e^{i\varphi_1} + V_{a2} \frac{R_t}{R_{s-st2}} \frac{\sinh(\alpha z)}{\sinh(\alpha L)} e^{i\varphi_2}, & z \in [0, L] \\ \frac{R_t}{R_{s-st2}} V_{a2} e^{\alpha L} e^{-\alpha z} e^{i\varphi_2}, & z > L \end{cases} \quad (2.12)$$

де

$$U(z, t) = \operatorname{Re}(V(z) e^{i\omega t}) = \begin{cases} U_1(z, t), & z < 0 \\ U_2(z, t), & z \in [0, L] \\ U_3(z, t), & z > L \end{cases} \quad (2.13)$$

та

$$U_1(z, t) = \frac{R_t}{R_{s-st1}} V_{a1} e^{\alpha_1 z} \cos(\omega t + \alpha_2 z + \varphi_1),$$

$$U_3(z, t) = \frac{R_t}{R_{s-st2}} V_{a2} e^{\alpha_1(L-z)} \cos(\omega t + \alpha_2(L-z) + \varphi_2). \quad (2.14)$$

Вираз для $U_2(z, t)$ потребує певних перетворень.

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} = \frac{e^{x_1 + ix_2} - e^{-x_1 - ix_2}}{2} = \sinh x_1 \cos x_2 + i \cosh x_1 \sin x_2,$$

$$x_1 = \operatorname{Re} x, \quad x_2 = \operatorname{Im} x, \quad (2.15)$$

де

$$|\sinh x| = \sqrt{\sinh^2 x_1 \cos^2 x_2 + \cosh^2 x_1 \sin^2 x_2} = \sqrt{\frac{\cosh(2x_1) - \cos(2x_2)}{2}}, \quad (2.16)$$

та

$$\arg(\sinh x) = \operatorname{atan}(\cosh x_1 \sin x_2, \sinh x_1 \cos x_2) \quad (2.17)$$

де *atan* - це так званий арктангенс двох аргументів:

$$\operatorname{atan}(x_2, x_1) = \begin{cases} \arctan(x_2/x_1), x_1 > 0 \\ \pi + \arctan(x_2/x_1), x_1 < 0, x_2 \geq 0 \\ -\pi + \arctan(x_2/x_1), x_1 < 0, x_2 < 0 \\ \pi/2, x_1 = 0, x_2 > 0 \\ -\pi/2, x_1 = 0, x_2 < 0 \\ \text{undefined}, x_1 = x_2 = 0 \end{cases}. \quad (2.18)$$

Шляхом перетворень отримаємо вираз для $U_2(z, t)$:

$$\begin{aligned} U_2(z, t) = & V_{a1} \frac{R_t}{R_{st-s1}} \frac{h(L-z)}{h(L)} \cos(\omega t + g(L-z) - g(L) + \varphi_1) + \\ & + V_{a2} \frac{R_t}{R_{st-s2}} \frac{h(z)}{h(L)} \cos(\omega t + g(z) - g(L) + \varphi_2), \end{aligned} \quad (2.19)$$

де

$$\begin{aligned} h(z) &= \sqrt{\cosh(2\alpha_1 z) - \cos(2\alpha_2 z)}, \\ g(z) &= \operatorname{atan}[\cosh(\alpha_1 z) \sin(\alpha_2 z), \sinh(\alpha_1 z) \cos(\alpha_2 z)]. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Слід підкреслити, що функція $U(z, t)$ суттєво відрізняється, коли станції мають однакові або протилежні фази (рис. 2.1 та 2.2). Графіки, показані на рис. 2.1 та 2.2 для $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ та $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \pi$, побудовані для значень: $V_{a1} = V_{a2} = 3$ В, $y_1 = y_2 = 0.1$ м, $L = 3$ км.

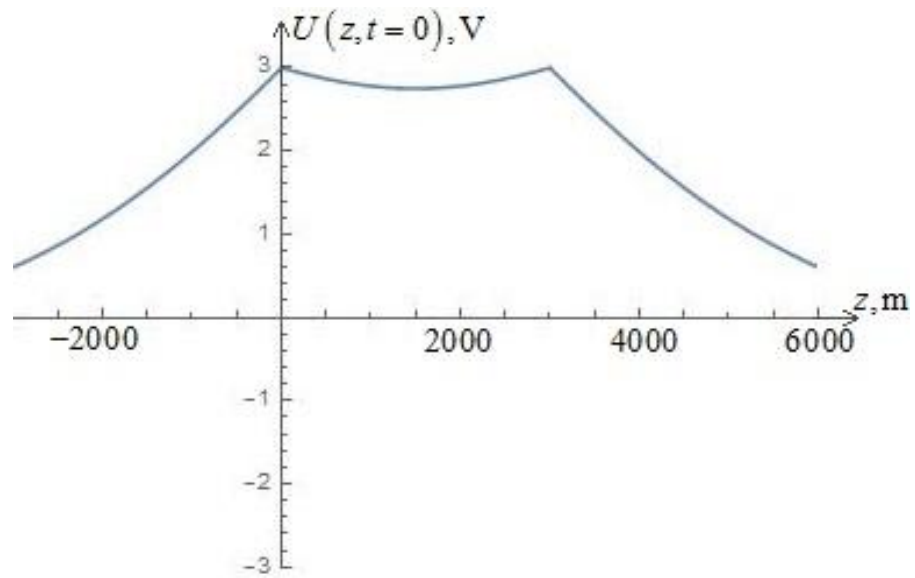


Рис. 2.1. Функціональна залежність захисного потенціалу СКЗ при початкових фазах $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$

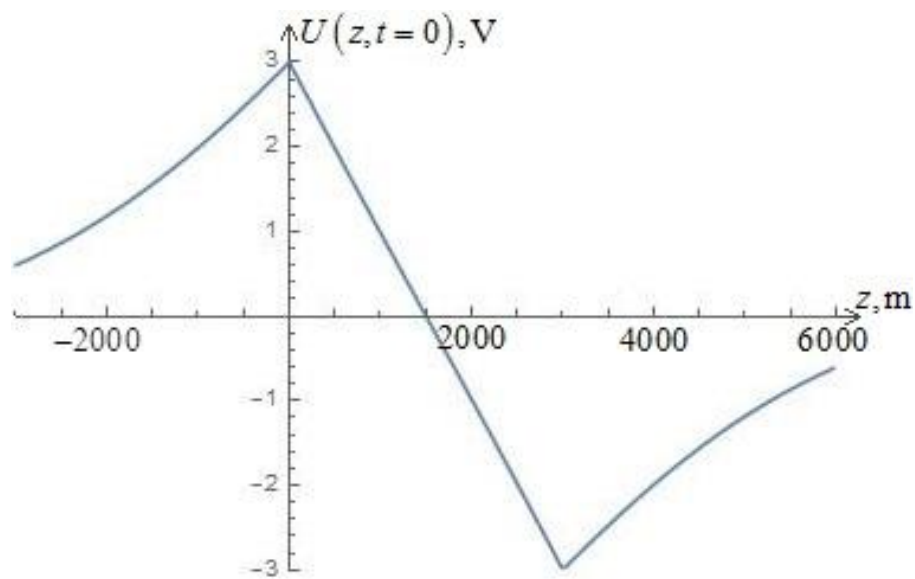


Рис. 2.2. Функціональна залежність захисного потенціалу СКЗ при початкових фазах $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \pi$

Функція двох змінних $U_2(z, t)$ має вигляд:

$$U_2(z,t) = \frac{V_a}{h(L)} \frac{R_t}{R_{st-s}} \left(h(L-z) \cos(\omega t + g(L-z) - g(L)) + h(z) \cos(\omega t + g(z) - g(L)) \right). \quad (2.21)$$

Визначимо екстремум функції $U_2(z,t)$:

$$U_2(z=0,t) = U_2(z=L,t) = V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \cos(\omega t). \quad (2.22)$$

Після перетворень маємо вираз:

$$U_2(z,t) = \frac{V_a}{h(L)} \frac{R_t}{R_{st-s}} \left[a(z) \cdot \cos(\omega t - g(L)) - b(z) \cdot \sin(\omega t - g(L)) \right] = \quad (2.23)$$

$$= \frac{V_a}{h(L)} \frac{R_t}{R_{st-s}} \sqrt{a^2(z) + b^2(z)} \left[\frac{a(z)}{\sqrt{a^2(z) + b^2(z)}} \cdot \cos(\omega t - g(L)) - \frac{b(z)}{\sqrt{a^2(z) + b^2(z)}} \cdot \sin(\omega t - g(L)) \right].$$

Функція $\psi(z)$ існує якщо:

$$\cos(\psi(z)) = \frac{a(z)}{\sqrt{a^2(z) + b^2(z)}}, \quad \sin(\psi(z)) = \frac{b(z)}{\sqrt{a^2(z) + b^2(z)}},$$

$$\psi(z) = \text{atan}(b(z), a(z)), \quad (2.24)$$

Тому

$$U_2(z,t) = \frac{V_a}{h(L)} \frac{R_t}{R_{st-s}} \sqrt{a^2(z) + b^2(z)} \cos(\omega t - g(L) + \psi(z)) = V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} A(z) \cos(\omega t + B(z)), \quad (2.25)$$

де

$$A(z) = \frac{\sqrt{a^2(z) + b^2(z)}}{h(L)}, \quad B(z) = \psi(z) - g(L). \quad (2.26)$$

Отримаємо наступний вираз:

$$\left| U_2(z,t) - V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \cos(\omega t) \right| = V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \left| A(z) \cos(\omega t + B(z)) - \cos(\omega t) \right| =$$

$$\begin{aligned}
&= V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \left| \left[A(z) \cos(B(z)) - 1 \right] \cos(\omega t) - A(z) \sin(B(z)) \sin(\omega t) \right| = \\
&= V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \kappa(z) \left| \cos(\omega t + \theta(z)) \right|,
\end{aligned} \tag{2.27}$$

де

$$\begin{aligned}
\kappa(z) &= \sqrt{\left[A(z) \cos(B(z)) - 1 \right]^2 + \left[A(z) \sin(B(z)) \right]^2} = \sqrt{A^2(z) - 2A(z) \cos(B(z)) + 1}, \\
\theta(z) &= \operatorname{atan} \left(\frac{A(z) \sin(B(z))}{\kappa(z)}, \frac{A(z) \cos(B(z)) - 1}{\kappa(z)} \right).
\end{aligned} \tag{2.28}$$

Отже, маємо вираз:

$$\max_{t,z} \left| U_2(z,t) - V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \cos(\omega t) \right| = V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \cdot \max_z \kappa(z), \quad z \in [0, L]. \tag{2.29}$$

Комп'ютерне моделювання показує, що функція $\kappa(z)$ має один максимум у точці $z=L/2$ в інтервалі $z \in [0, L]$, якщо, наприклад, $L \leq 10$ км.

Таким чином:

$$\max_{t,z} \left| U_2(z,t) - V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \cos(\omega t) \right| = V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \cdot \kappa\left(\frac{L}{2}\right). \tag{2.30}$$

Спрощений вираз для $\kappa(L/2)$ можна отримати, перетворивши (2.30):

$$a\left(\frac{L}{2}\right) = 2h\left(\frac{L}{2}\right) \cos\left(g\left(\frac{L}{2}\right)\right), \quad b\left(\frac{L}{2}\right) = 2h\left(\frac{L}{2}\right) \sin\left(g\left(\frac{L}{2}\right)\right), \tag{2.31}$$

В результаті отримаємо кінцевий вираз:

$$\begin{aligned} \max_{t,z} |U_2(z,t) - U_2(z=0,t)| &= \max_{t,z} |U_2(z,t) - U_2(z=L,t)| = \\ &= V_a \frac{R_t}{R_{st-s}} \cdot \sqrt{\frac{4h^2(L/2)}{h^2(L)} - 4 \frac{h(L/2)}{h(L)} \cos\left(g\left(\frac{L}{2}\right) - g(L)\right) + 1} = F(L), \end{aligned} \quad (2.32)$$

де функції $h(z)$ та $g(z)$ визначаються за формулою (2.20). Для розглянутих параметрів рівняння (2.32) застосовується, наприклад, коли $L \leq 10$ км. Функція $F(L)$ для $V_{a1}=V_{a2}=V_a=3$ В, $y_1=y_2=y=0,1$ м та $\varphi_1=\varphi_2=0$ зображена на рис. 2.3.

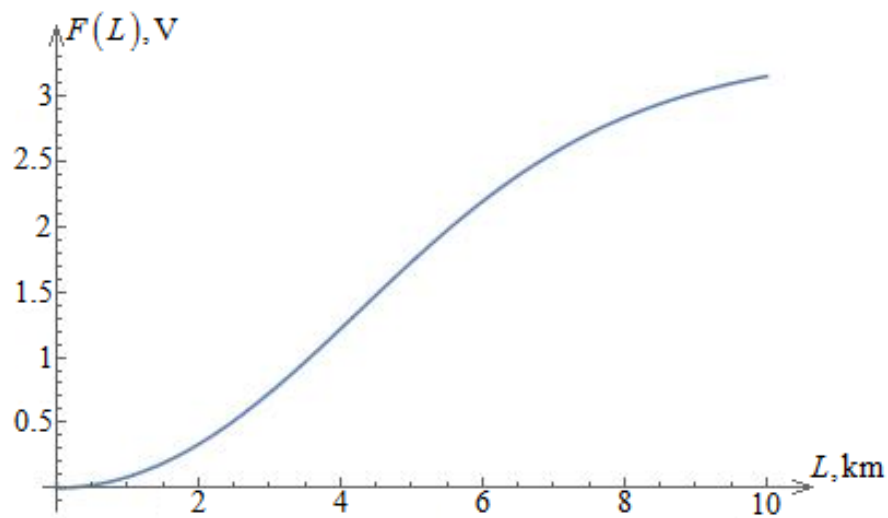


Рис. 2.3. Функціональна залежність захисного потенціалу від координати відстані трубопроводу

2.2. Особливості врахування неоднорідностей у залежностях розподілу потенціалу

Основним критерієм системи катодного захисту вважається наявність поляризаційного потенціалу, який для сталі повинен знаходитись у межах від (-0,85) В до (-1,15) В відносно створеного анодного електроду [10, 14, 64]. Для підтримання потенціалу металоконструкцій в слабо електропровідному середовищі використовують спеціалізоване електротехнічне обладнання. Це дозволяє контролювати та підтримувати електричний потенціал металевих

поверхонь в необхідному діапазоні значень для забезпечення захисту металу від корозії.

Сучасні СКЗ створено за високочастотним принципом перетворення сигналу (рис. 2.4). Головною перевагою їх є масо-габаритні характеристики, ККД та регульовальні характеристики, що дозволяють інтегрувати елементи комплексу до систем автоматичного керування процесами захисту від електрохімічної корозії. Високовольтний випрямляч (ВВ) здійснює перетворення напруги силовим частотним перетворювачем (СПЧ) до змінної. Високочастотний трансформатор (ТВ) перетворює рівень напруги до потрібного значення. Низьковольтний випрямляч (ВН) приєднується до підземного сталевого трубопроводу та анодного заземлювача, створюючи захисний потенціал (полігармонічний) [6]. Змінна складова захисного потенціалу проявляється при комплексному захисті дистанції трубопроводу групою СКЗ з вентильними перетворювачами та наявності неоднорідностей на трасі прокладки. У деяких режимних точках вплив змінної складової виражається у неприпустимому рівні перевищення рівня захисного потенціалу, що призводить до стрімкої деградації металоконструкцій.

Система керування (СК) відпрацьовує сигнал блока завдання (З) шляхом зміни параметрів комутації силових ключів у СЧП [62, 63].

Потенціал захисту вздовж трубопроводу характеризується експоненціальною залежністю. Вона змінюється в межах мінімального значення у точці підключення станції катодного захисту сталевому підземному трубопроводу та максимального (природнього) значення. Прийнято вважати: у зонах, де потенціал підземного сталевому трубопроводу дорівнює природньому значенню, закінчується межа впливу станції катодного захисту й сповільнення корозійних процесів не відбувається [10]. За цих умов інша частина трубопроводу лишається без захисту від електрохімічної корозії.

Відповідно до визнаних підходів, у випадку, коли станції катодного захисту містять трансформаторну схему з діодним випрямлячем, на виході якого

існують пульсації 100 Гц, вважають: у кожній точці за координатою “Х” значення потенціалу за часом є незмінним [15].

Значне поширення отримали станції, що мають високочастотні перетворювачі. Це обумовлює дещо іншу залежність зміни потенціалу за часом на виході станції (рис. 2.5). У фіксованій за координатою “Х” точці значення потенціалу має складну залежність, яка містить достатньо широкий спектр сигналу (рис.2.6). Враховують, що струми під час протікання корозійних процесів досягають рівня мілі – мікро ампер, для виносу 1 г металу потрібен струм 0,1 мА протягом одного року. Тому амплітудне значення високочастотної складової сигналу СКЗ достатньо для значного погіршення корозійної ситуації. Виявляючи та оцінюючи вплив змінної (високочастотної) складової сигналу на виході станції, помітно покращується корозійна ситуація та подовжується термін експлуатації підземних сталевих трубопроводів. Без урахування змінної складової неможливо налаштувати сумісну роботу декількох СКЗ при наявності неоднорідностей у зоні прокладки.

Протягом кількох років науковці НТУ «Дніпровська політехніка» проводили експериментальні дослідження та реєстрували часові та координатні еволюції захисного потенціалу в різних умовах прокладки підземних газопроводів у кількох областях України. Захисний потенціал підземного трубопроводу (рис. 2.4) має складну форму і є результатом одночасної сумісної діяльності декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем (без впливу блукаючих струмів). Досягають значення потенціалу: мінімальне (-3,46) В, максимальне (+0,001) В, середнє (-2,54) В. За умов забезпечення раціонального режиму захисту приймається середнє значення потенціалу. Такий рівень потенціалу прийнятний для здійснення ефективного захисту від корозії, що підтверджують результати моделювання та багатофакторного моніторингу.

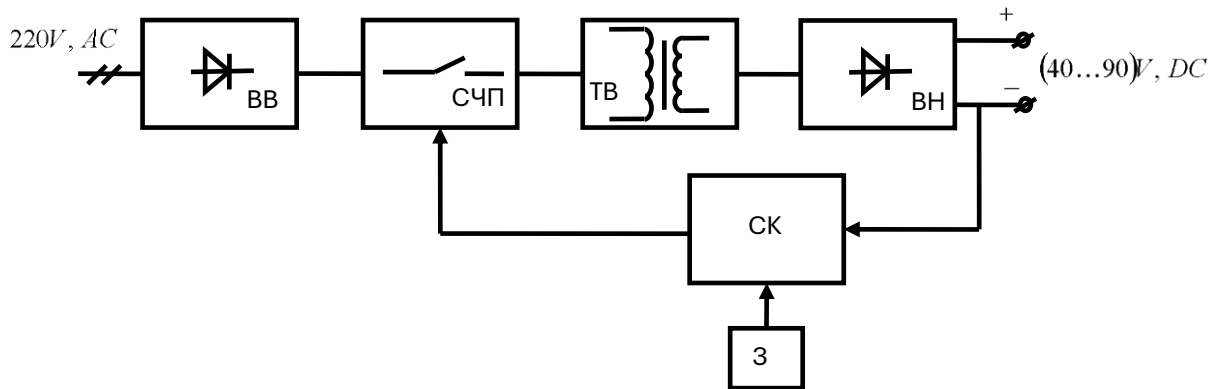


Рис. 2.4. Структурна схема перетворення енергії у системі СКЗ

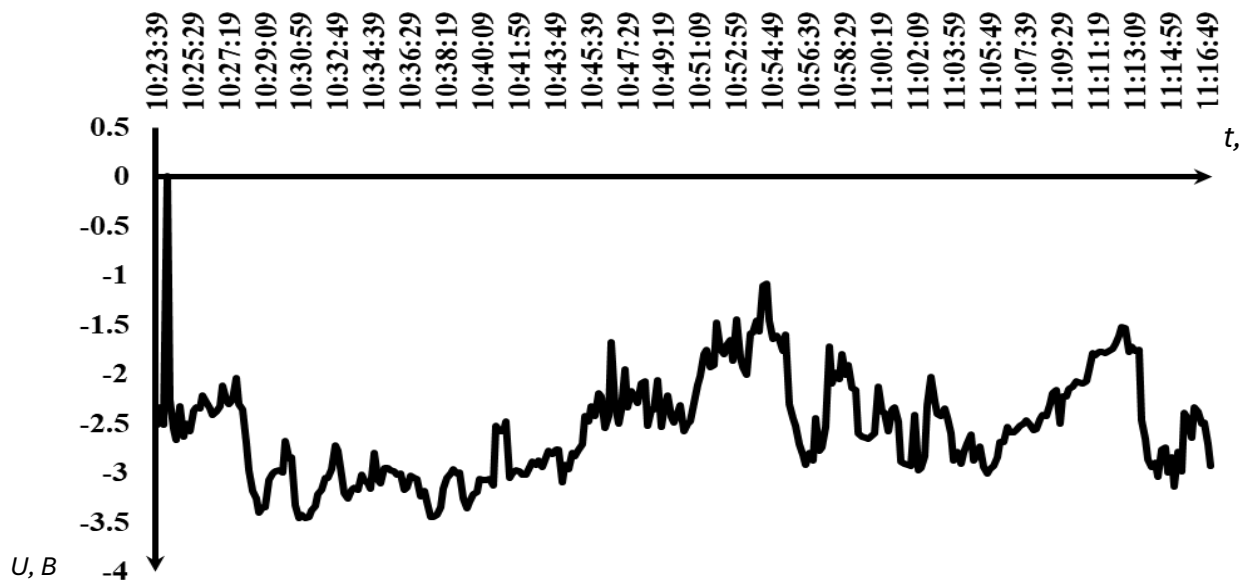


Рис. 2.5. Потенціал підземного трубопроводу як результат сумісної роботи декількох станцій катодного захисту

За умов врахування мінімального значення потенціалу досягаються надлишкова перекомпенсація та нераціональна витрата електричної енергії і матеріалу анодного заземлювача. Нерівномірність розподілення потенціалу за часом досить значна, містить знакозмінні перевищення рівня $(-0,55)$ В, так і позитивні значення (рис. 2.6).

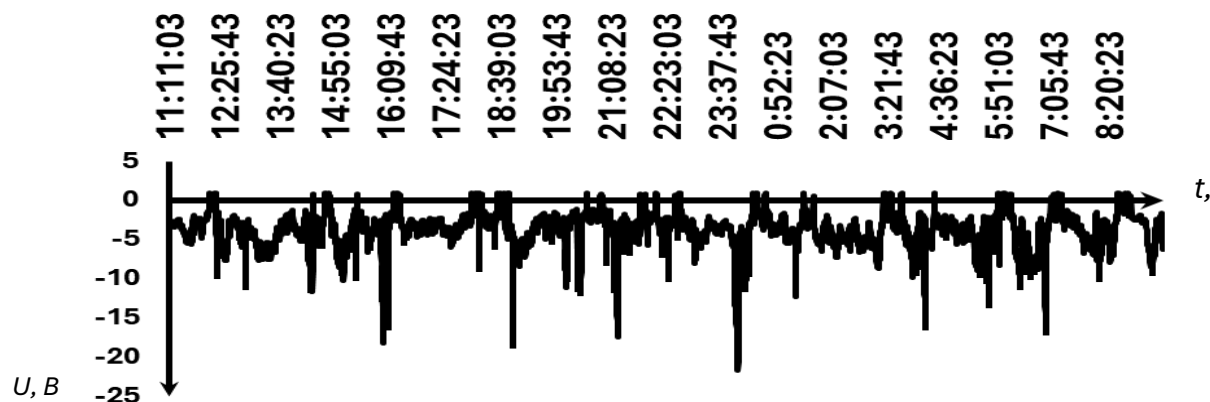


Рис. 2.6. Критичні межі зміни захисного потенціалу підземного трубопроводу

Частота зміни потенціалу за часом знаходиться у діапазоні від низькочастотно-модульованого сигналу (10 Гц) до високочастотної складової (18 кГц) [4]. За результатами моніторингу отримано: амплітуда коливань потенціалу незначна (рис. 2.7), а частота зміни значень висока. Напруга на виході випрямляча пульсуюча. При активному навантаженні форма зміни струму повторює форму напруги. Сучасні підземні трубопроводи з ізоляційною оболонкою мають іншу схему заміщення, що містить реактивні елементи [9, 10]. Електромагнітні перехідні процеси обумовлюють відхилення сигналу, що сягає позитивного значення (рис. 2.7, час 14:05:08).

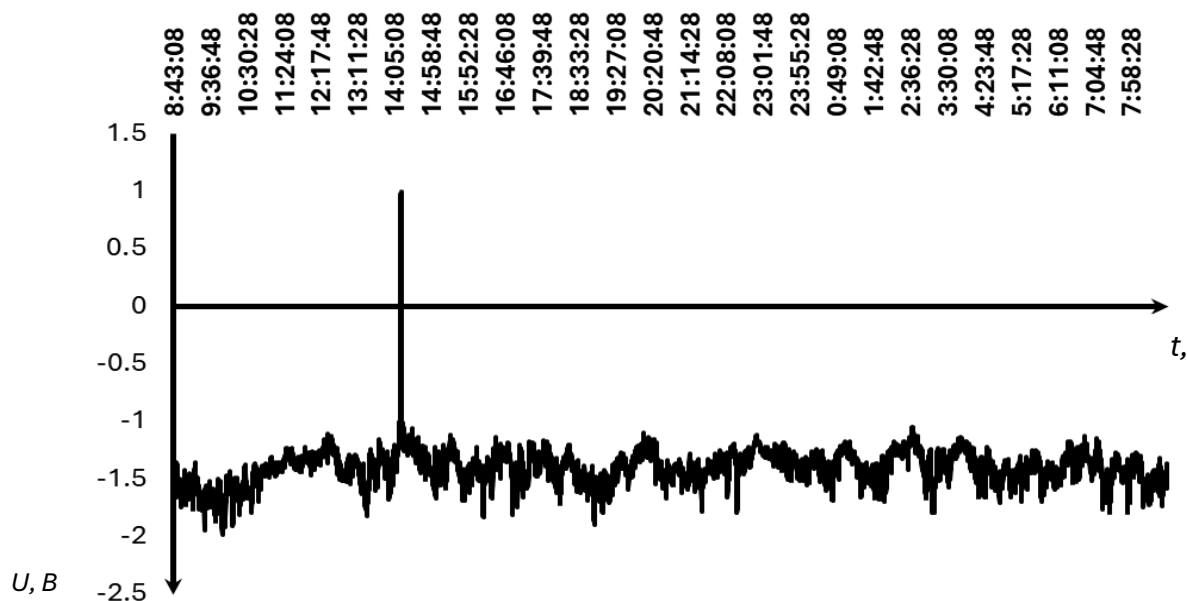


Рис. 2.7. Потенціал підземного трубопроводу, сформований сумісною роботою декількох станцій катодного захисту із високочастотним перетворювачем

У проміжки часу, коли захисний потенціал перевищує мінімально припустиме значення, підземний трубопровід лишається захисту, а металева споруда є джерелом блукаючих струмів та активно руйнується. Тому, навіть за відсутністю широкоамплітудних коливань потенціалу фактичний корозійний стан відрізняється від очікуваного і запланованого.

2.3. Вплив повітряних ліній електропередач на характер розподілу захисного потенціалу

У разі прокладання підземного трубопроводу поблизу повітряної лінії електропередачі (ЛЕП), або підземної кабельної лінії, виникає електромагнітний зв'язок між металевою конструкцією трубопроводу та цими лініями, як джерелами електромагнітного поля. При цьому в трубопроводі індукується змінне електричне поле промислової частоти, яке впливає на інтенсивність корозійних процесів, як трубопроводу, так і обладнання, що забезпечує катодний захист трубопроводу шляхом створення постійного електричного потенціалу на його поверхні.

Необхідно підкреслити, що розрахунку магнітного та електричного полів біля ЛЕП присвячено багато робіт, зокрема [18-20]. Проте в цих роботах розраховується потенційне електричне поле в повітряному просторі між лінією та ґрунтом. В той же час питання щодо розрахунку електричного поля в ґрунті, а також розгляд одночасно діючих в трубопроводі змінного електричного поля та поля постійних струмів, що утворюються при використанні катодного захисту, в літературі розглянуті не достатньо повно.

В роботі розглядається підземний трубопровід зі сталеві труби великої протяжності – 7 км та розташований в слабо електропровідному середовищі – ґрунті.

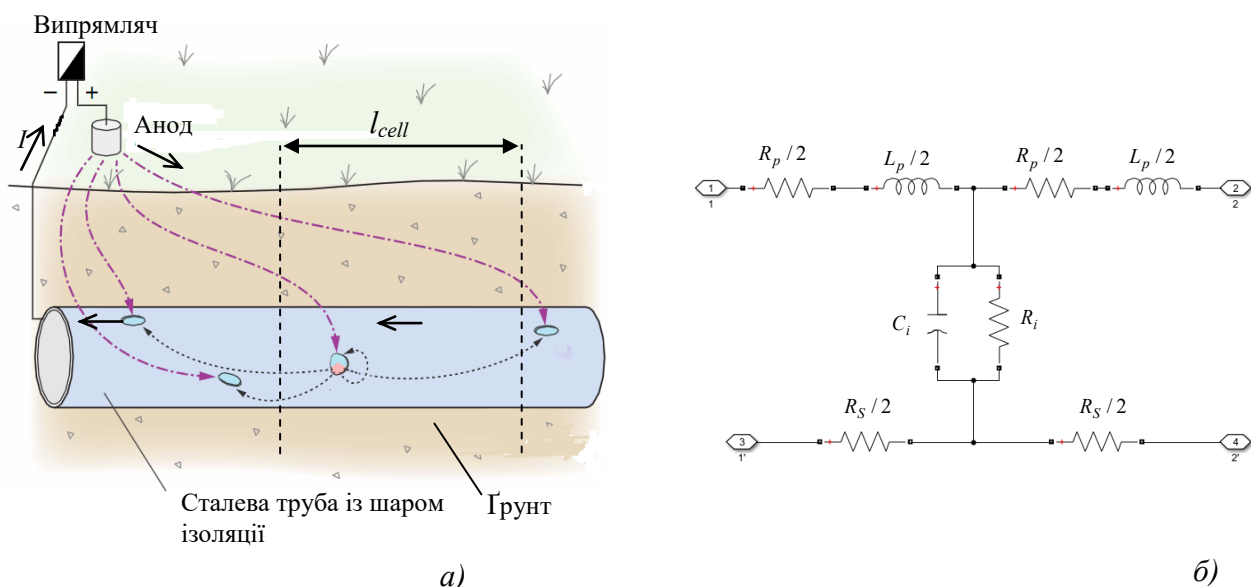


Рис. 2.8. Структурна схема системи електрохімічного захисту (а) та еквівалентна схема заміщення (б)

При моделюванні враховано, що труба покрита шаром бітумної ізоляції для зменшення струмів в системі "труба – ґрунт" при використанні катодного захисту. Внаслідок наявності дефектів в ізоляції, що показано на рис. 2.8, електричний струм, що протікає між ґрунтом та трубою, має складну структуру. Катодний захист здійснюється за допомогою джерела постійного струму, мінус якого приєднується до поверхні труби, а плюс – до спеціально створеного аноду.

Внаслідок цього на трубі утворюється електричний потенціал, що змінюється від $-0,85$ до $-1,15$ В та значно гальмує протікання корозійних процесів.

Для побудови схеми заміщення протяжного трубопроводу доцільно виділити елементарну комірку довжиною l_{cell} , для якої еквівалентне електричне коло буде мати вигляд, що показаний на рис. 2.8, б. Еквівалентна модель всього трубопроводу буде складатися із послідовно з'єднаних таких комірок, так що загальна довжина трубопроводу буде дорівнювати $l_p = N l_{cell}$, де N – загальне число комірок. В схемі на рис. 2.8, б містяться наступні елементи, що відповідають довжині елементарної комірки l_{cell} : R_p, L_p – активний опір та індуктивність труби, R_i, C_i – еквівалентний активний опір та ємність ізоляції труби, R_s – активний опір ґрунту. Для розрахунку значень цих параметрів використовувалися відомі вирази [65, 66, 69].

Розроблена Simulink-модель підземного трубопроводу із використанням пристрою для катодного захисту показана на рис. 2.9, а. Модель складається із послідовно з'єднаних елементарних комірок, кожна з яких моделює електричні процеси на ділянці довжиною $l_{cell} = 500$ м. Число таких комірок дорівнює $N = 14$, що відповідає загальній довжині трубопроводу – 7 км. Електричне коло кожної комірки із засобами вимірювання електричних струмів у повздовжніх колах та напруги на ізоляції трубопроводу, струм i в цій ізоляції показано на рис. 2.9, б. Для моделювання процесу катодного захисту в центрі трубопроводу підключено джерело постійного струму. В моделі застосовані припущення, що всі процеси періодично повторюються із просторовим періодом 7 км, що враховується з'єднанням в схемі на рис. 2.9, а виходу останньої комірки із входом першої комірки.

Розрахунки проводимо при наступних припущеннях та початкових умовах:

- сталева труба трубопроводу має зовнішній діаметр 45 мм та товщину стінки 4 мм, прокладена в ґрунті на глибині 1,2 м і має загальну протяжність – 7 км;

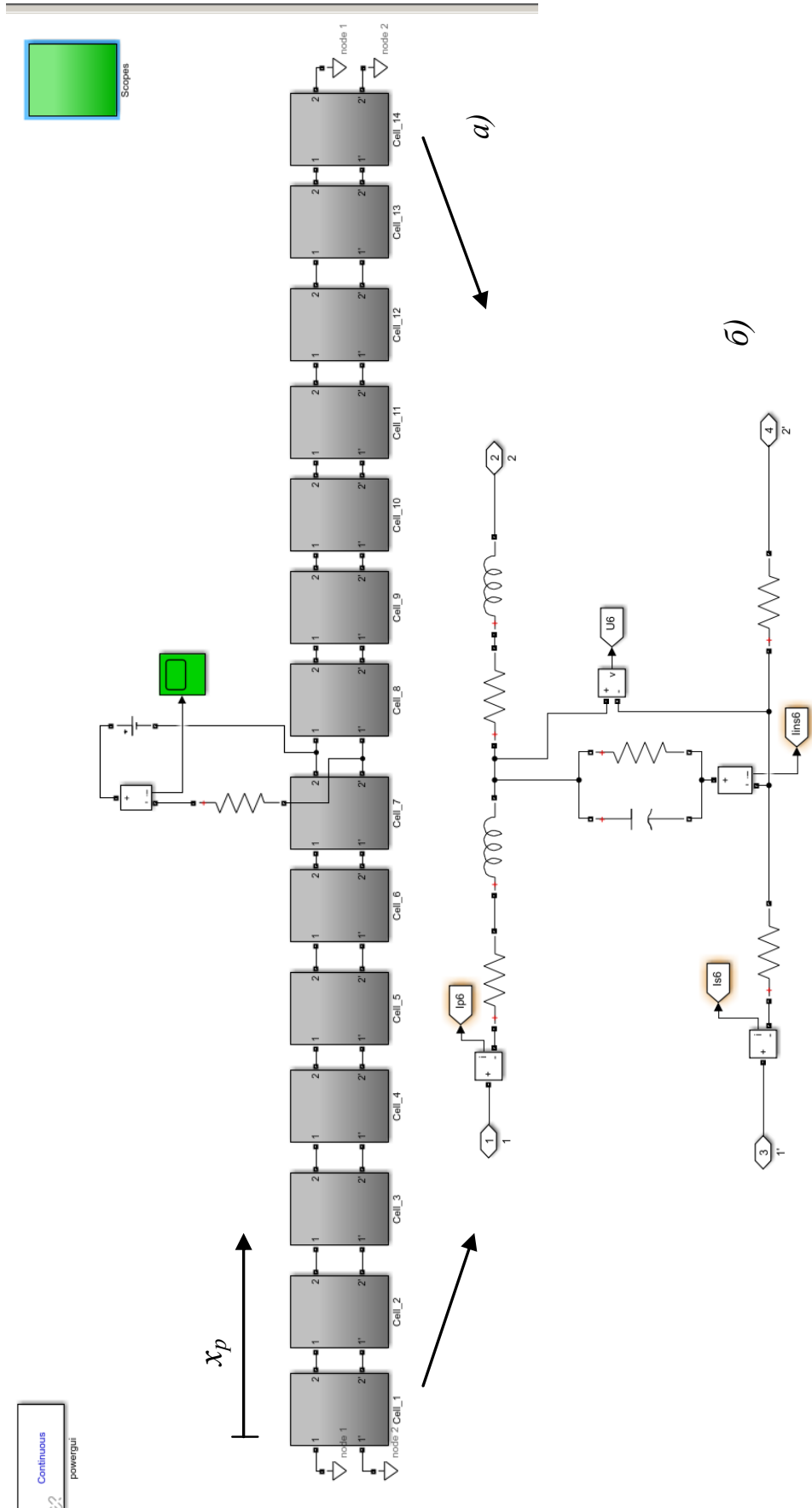


Рис. 2.9. Simulink-модель підземного трубопроводу (а) та електрична схема кіс струму та напруги (б)

- ізоляційне покриття на трубі виконано на основі бітуму товщиною 20 мм і має $\varepsilon_r=2,5$ та поверхневий опір $3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$;
- питомий опір ґрунту приймався $-100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Результати розрахунку розподілу електричного потенціалу вздовж трубопроводу (падіння напруги на ізоляції), з яким пов'язана координатна вісь x_p , показано на рис. 2.10. При цьому значення джерела постійного струму в схемі на рис. 2.9 а, що моделює роботу пристрою для катодного захисту, прийнято з умови, що максимальне за модулем значення потенціалу дорівнює $-1,15 \text{ В}$. Як видно з цього рисунку, внаслідок розтікання електричного струму по трубі, електричний потенціал спадає при віддалені від точки підключення джерела живлення і на початку та в кінці трубопроводу дорівнює $-0,65 \text{ В}$. Хоча необхідне значення має бути $-0,85 \text{ В}$.

\

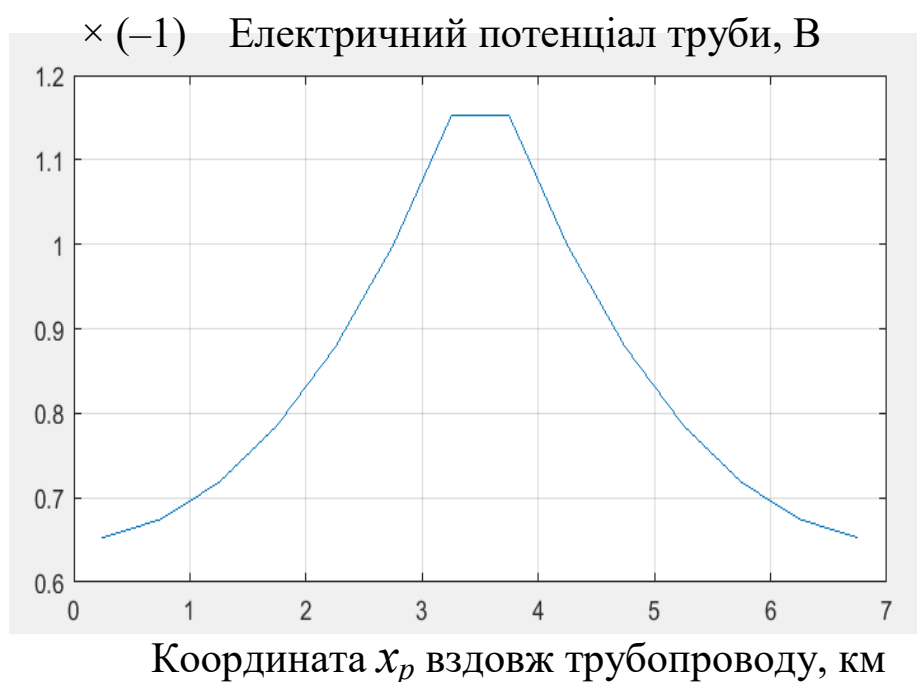


Рис. 2.10. Функціональна залежність рівня захисного потенціалу від координати відстані трубопроводу

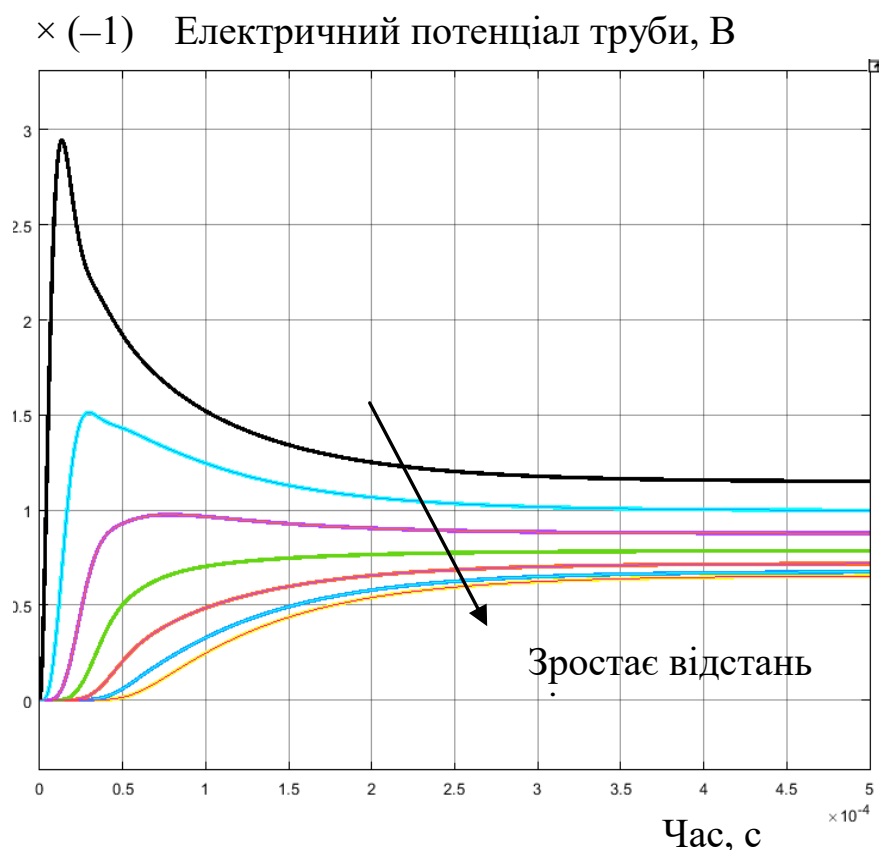


Рис. 2.11. Функціональна залежність рівня захисного потенціалу від часу

На рис. 2.11 показано характер зміни у часі електричного потенціалу на різних ділянках труби в перехідному процесі при підключенні до труби джерела постійного струму. Видно, що максимальний стрибок потенціалу має місце у точці приєднання такого джерела до труби і що перехідний процес затухає приблизно за час 0,4 мс. Цей час необхідно враховувати при побудові системи керування пристроєм катодного захисту.

Для врахування джерел викривлення потенціалу розглядається випадок, коли трубопровід прокладено поблизу повітряної лінії електропередачі високої напруги. При цьому в його сталевій трубі будуть протікати одночасно два струми – постійний струм від пристрою катодного захисту та змінний струм із частотою 50 Гц, обумовлений впливом повітряної лінії на цей трубопровід. Від співвідношення цих струмів, яке буде різним на різних ділянках трубопроводу, будуть залежити корозійні процеси в сталевій трубі і наявність таких струмів доцільно враховувати на етапі проектування трубопроводу.

Для розрахунків візьмемо трифазну повітряну лінію 330 кВ із номінальним струмом 2 кА. Геометричні розміри опори та спосіб розташування фазних провідників в такій лінії показані на рис. 2.12, а.

Електромагнітне поле в двовимірній постановці в поперечній площині xOy задовольняє наступному рівнянню для векторного магнітного потенціалу (комплексна величина) $\underline{A} = (0, 0, \underline{A}_z)$:

$$j\omega\sigma\underline{A} + \mu_0^{-1}\nabla \times (\nabla \times \underline{A}) = \delta_A \underline{I}_A + \delta_B \underline{I}_B + \delta_C \underline{I}_C, \quad (2.33)$$

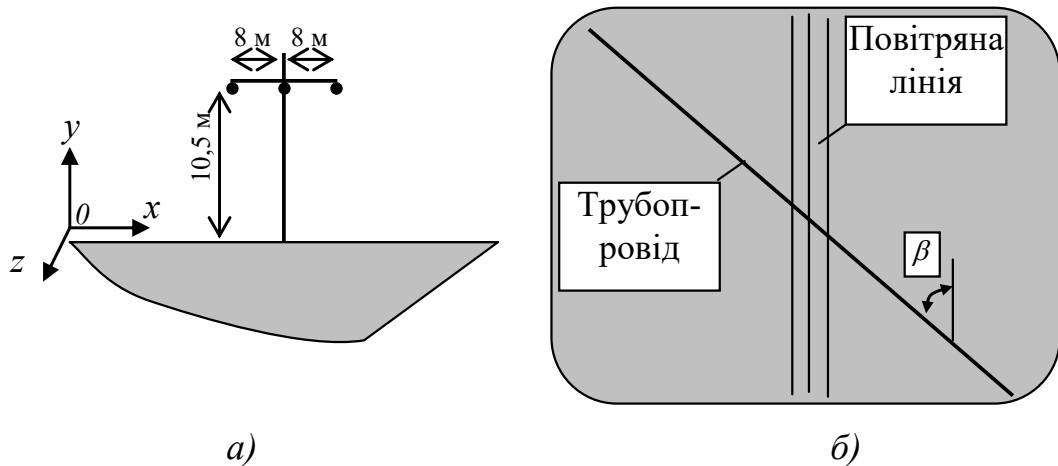


Рис. 2.12. Параметри магістральних ЛЕП напругою 330 кВ, враховані при моделюванні (а) та розташування у просторі ЛЕП та трубопроводу (б)

де σ - питома електропровідність ґрунту та повітря (задавалось відносно мале значення), а $\delta_A, \delta_B, \delta_C$ - дельта-функції Дірака, що задають просторове положення лінійних провідників зі струмом $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$, відповідно.

Значення напруженості індукованого електричного поля в довільній точки простору розраховується як:

$$\underline{E}_z = -j\omega \underline{A}_z,$$

де $\underline{E}_z = E_z \angle \varphi_E$.

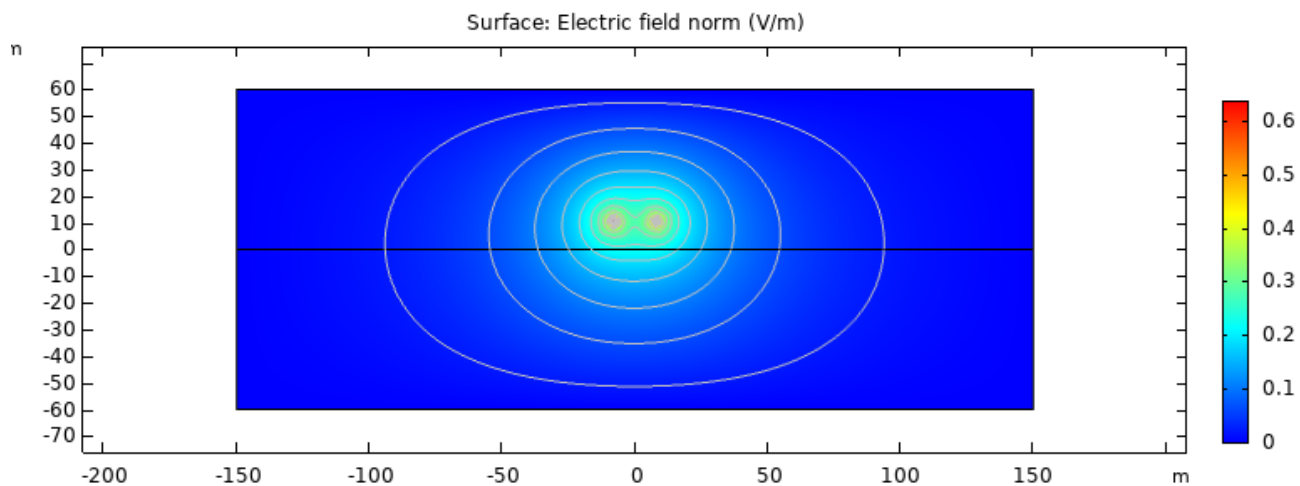
Для чисельного розрахунку диференціального рівняння (2.33) із граничною умовою – магнітна ізоляція на всіх зовнішніх границях розрахункової області використовувався метод скінчених елементів, реалізований в пакеті COMSOL Multiphysics. Значення електропровідності ґрунту приймалося як і в попередньому розділі – $0,01 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$.

Розподіл модуля напруженості електричного поля $E_z(x, y)$ в розрахунковій області із розмірами $120 \times 300 \text{ м}$ показано на рис. 2.13, а. Видно, що на поверхні ґрунту в зоні лінії значення напруженості складає $0,3\text{-}0,4 \text{ В/м}$. Розподіл напруженості електричного поля $E_z(x)$ та його фазового кута $\varphi_E(x)$ в ґрунті саме на глибині прокладання трубопроводу – $1,2 \text{ м}$ та вздовж поперечної координати x показано на рис. 2.13, б та в відповідно.

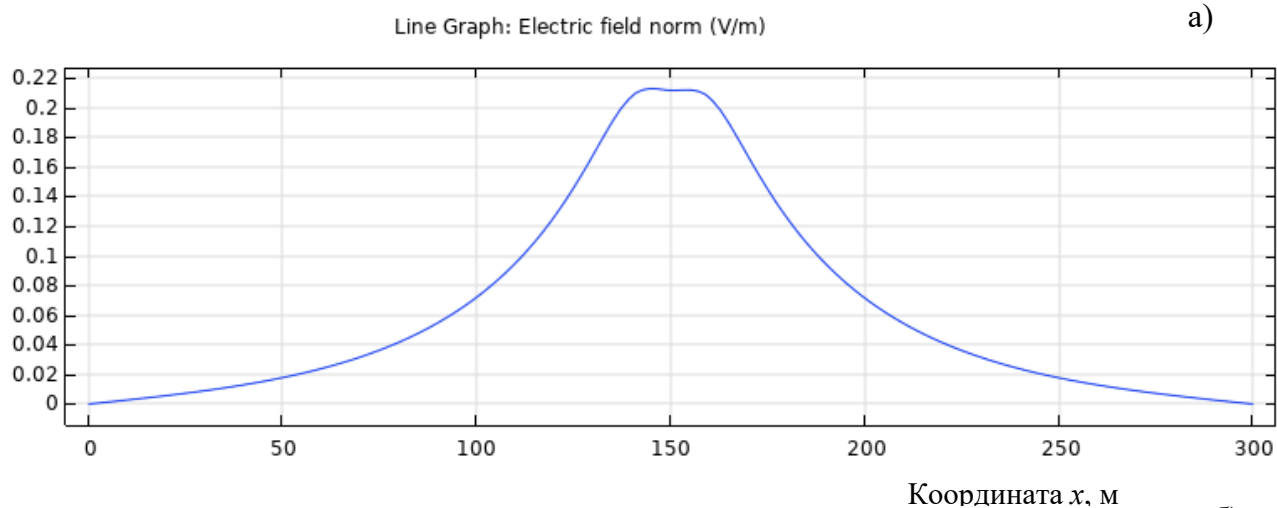
Отримані залежності доводять, що характерна відстань для такої лінії, коли значення магнітного поля зменшується в e -раз, складає біля 40 м , а фазовий кут електричного поля $\varphi_E(x)$ змінюється на приблизно 30° при перетині області під лінією. Отримані дані дозволяють визначити індуковане електричне поле в трубопроводі. Так, у випадку, коли трубопровід перетинає повітряну лінію під певним кутом β (рис. 2.12, б), значення електрорушійної сили, що діє у кожній комірці в залежності від її відстані від повітряної лінії та відносним напрямом, що характеризується кутом β , буде визначатися як

$$\underline{U}_{1,2} = \int_{x1,z1}^{x2,z2} \underline{E}_z \cos \beta dl . \quad (2.34)$$

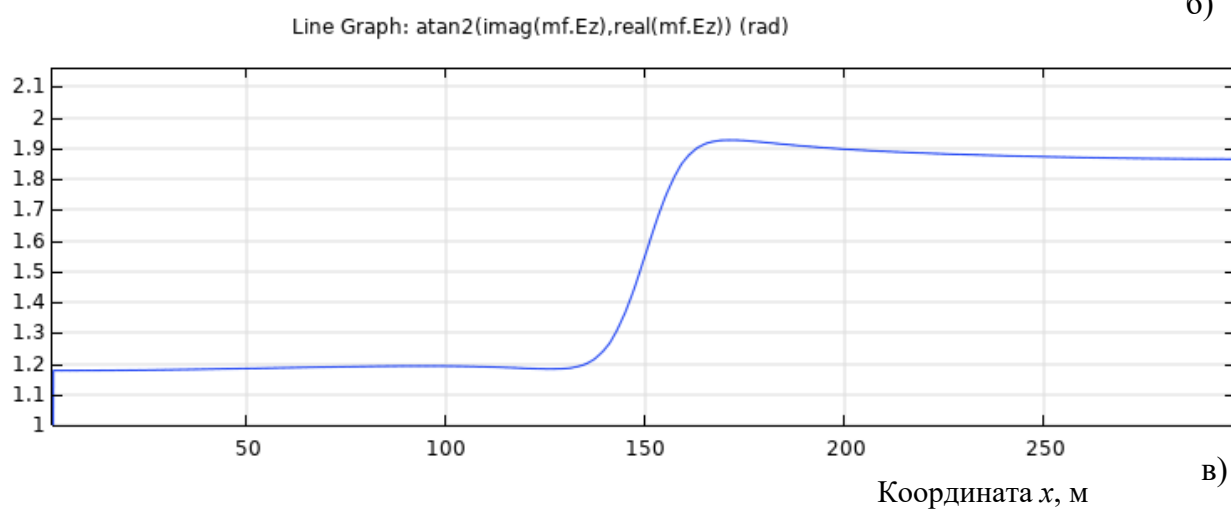
Зазначимо, що це значення напруги є комплексним, і тому важливо знати як амплітуду, так і фазовий кут, щоб задати для кожної комірки у імітаційній моделі трубопроводу відповідну синусоїдальну функцію. При цьому також враховується відстань цієї комірки до повітряної лінії.



a)



б)



в)

Рис. 2.13. Моделювання розподілу напруженості електричного поля (а) та
варіації розподілу захисного потенціалу (б)

Особливості протікання процесів АС-корозії в підземному трубопроводі розглянуто, наприклад, в роботах [42, 43]. Для кількісного аналізу цих процесів необхідно провести розрахунок як постійного струму в трубопроводі (DC-струм) так і змінного струму (АС-струм) і потім провести їх порівняльний аналіз. Так, в роботі [43] надаються певні обмеження до безпечного рівня на густину електричного АС-струму, що протікає із трубопроводу у ґрунт. Також згідно із ISO 18086, прийнятним є певне порогове значення АС напруги на трубопроводі відносно референтного електроду (електроду порівняння), яке для сталеві труби дорівнює $U_{AC} < 15$ В. За результатами цих робіт можна виділити два основних критерію відносно безпечного протікання процесів АС-корозії в трубопроводі, що знаходиться під впливом зовнішнього електромагнітного поля:

$$\text{критерій 1: } U_{AC} < 15 \text{ В;} \quad (2.35)$$

$$\text{критерій 2: } \text{при } 0,1 \text{ А/м}^2 < J_{DC} < 1 \text{ А/м}^2, J_{AC} / J_{DC} < 25, \quad (2.36)$$

$$\text{при } 1 \text{ А/м}^2 < J_{DC} < 20 \text{ А/м}^2, J_{AC} < 70 \text{ А/м}^2. \quad (2.37)$$

Запропонований набір критеріїв дозволяє визначити допустимі зони впливу АС потенціалу від точок нерівномірності (наявності трас повітряних ЛЕП) на систему СКЗ трубопроводу.

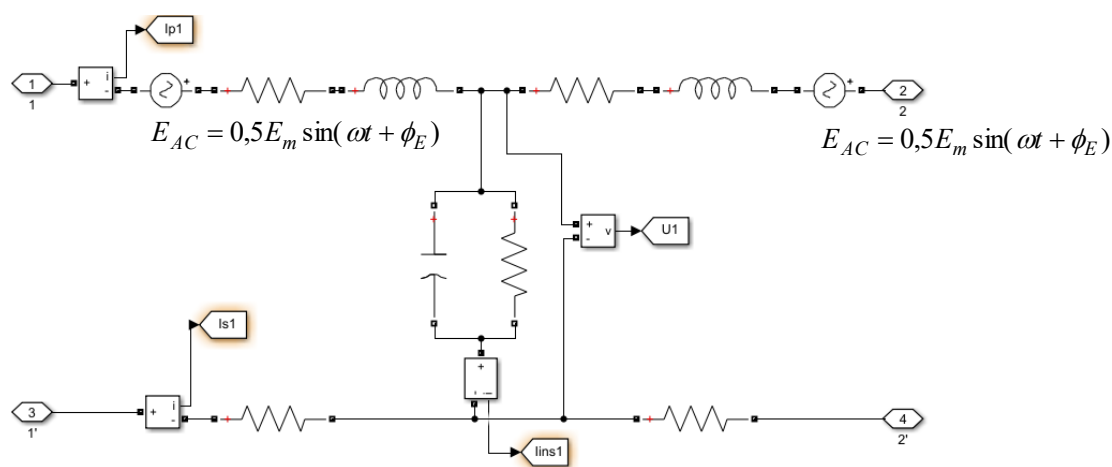


Рис. 2.14. Модель розрахунку захисного потенціалу
з додатковими джерелами ЕРС

Для розрахунку електричних процесів в трубопроводі розглянуто варіант, коли трубопровід перетинає простір під повітряною лінією під кутом $\beta = 45^\circ$. При цьому використовувалася Simulink-модель, яка містить 14 послідовно з'єднаних елементарних комірок та додаткові джерела напруги E_{AC} (рис. 2.14), значення яких розраховувалося за виразом (2.34) та результатами розрахунку електричного поля на рис. 2.13 в залежності від відстані кожної комірки від повітряної лінії.

Результати розрахунку миттєвих значень АС-напруги на ізоляції трубопроводу для різних комірок в усталеному режимі наведено на рис. 2.15, а. Моделювання даних процесів показало, що ці напруги мають різну амплітуду та фазу на різних ділянках трубопроводу.

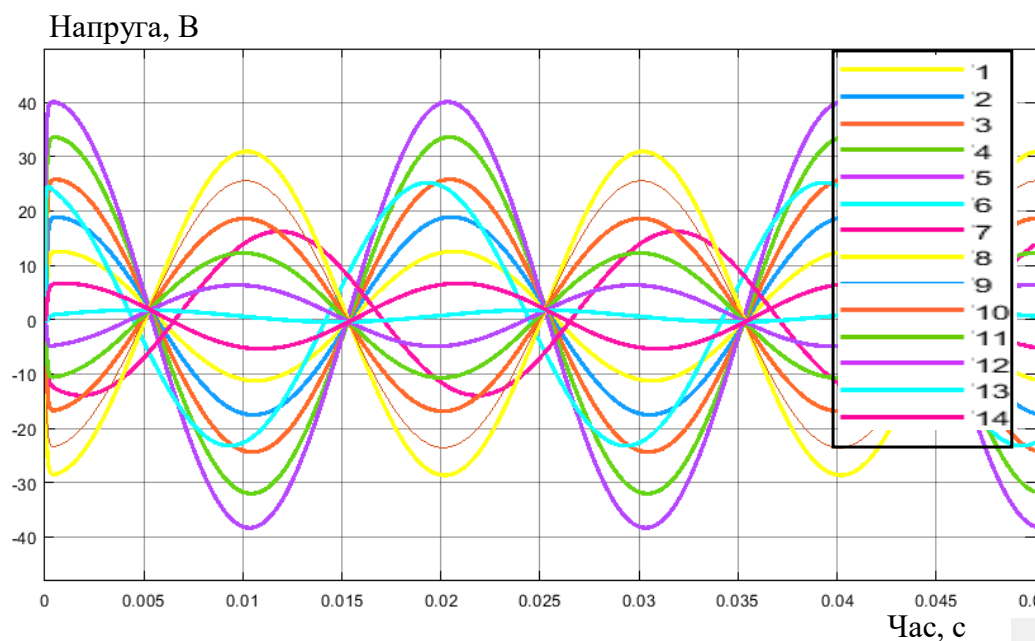


Рис. 2.15. Миттєві значення АС-напруги на ізоляції трубопроводу для різного номеру комірки в усталеному режимі

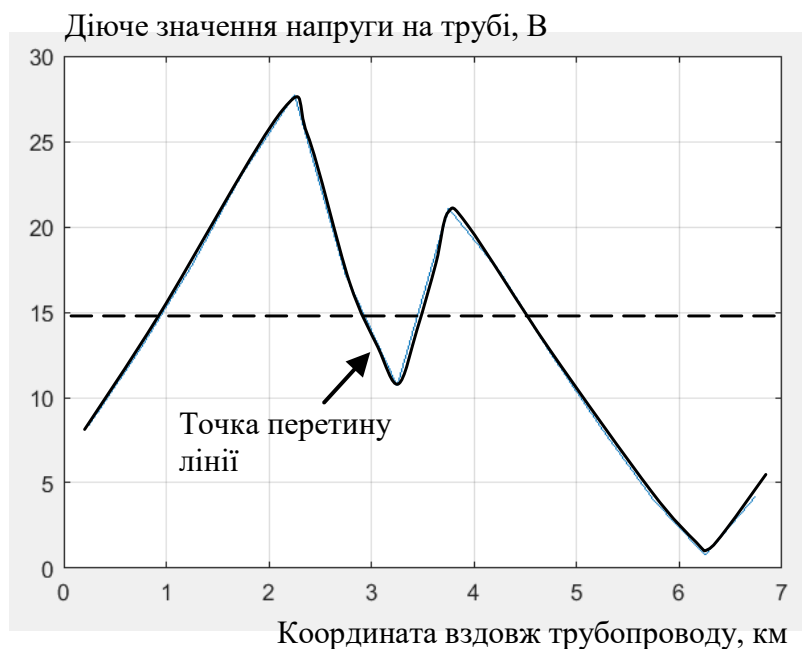


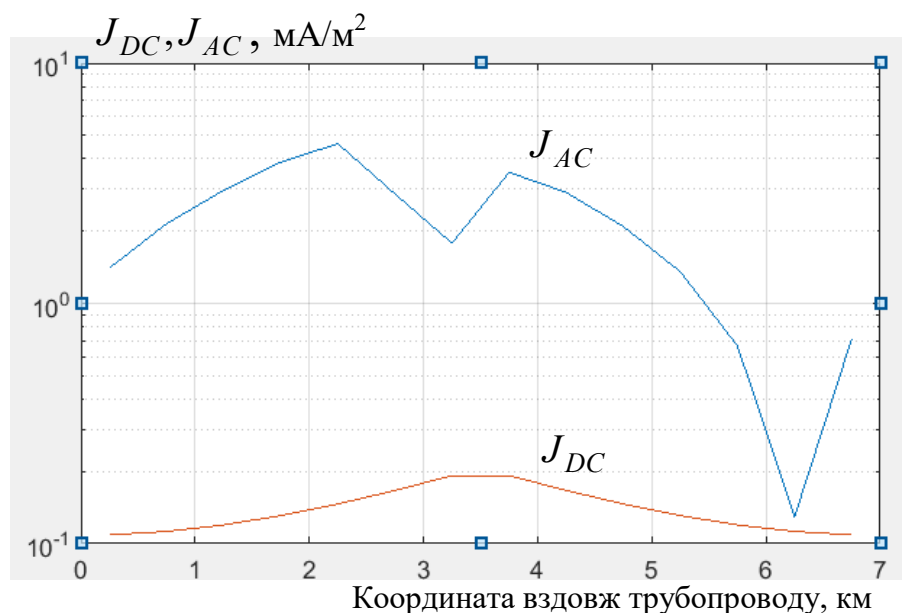
Рис. 2.16. Розподіл діючого значення АС-напруги вздовж трубопроводу

Найбільше значення цієї напруги досягається на ділянці поблизу від точки перетину трубопроводом простору під повітряною лінією. Видно, що на цих ділянках перевищується порогове значення напруги 15 В згідно з критерієм 1, вираз (2.35). Це значення показано на рисунку пунктирною лінією.

Для використання критерію 2 в роботі розраховувався розподіл густини електричного струму – постійного J_{DC} та змінного J_{AC} (діюче значення), що протікає від труби в ізоляцію та у ґрунт. Розподіл цих струмів вздовж трубопроводу показано на рис. 2.17, а. Співвідношення цих струмів – на рис. 2.17, б. Видно, що на деяких ділянках значення J_{AC}/J_{DC} перевищує допустиме порогове значення згідно із критерієм 2, вираз (2.36) – показано на рисунку пунктирною лінією.

Вплив електромагнітного поля повітряної лінії на підземний трубопровід, що прокладено поблизу від цієї лінії, призводить до виникнення змінного електричного струму в колі джерела живлення катодного захисту. В роботі розраховувався цей струм за допомогою амперметру (рис. 2.17, а), який

приєднано послідовно із джерелом постійного струму. Миттєве значення цього струму наведено на рис. 2.18. Вимірюючи на практиці цей струм і порівнюючи його із розрахунком можна оцінити інтенсивність впливу повітряної лінії на трубопровід.



а)



б)

Рис. 2.17. Розподіл AC та DC струмів вздовж трубопроводу (а) та відносне значення J_{AC}/J_{DC}

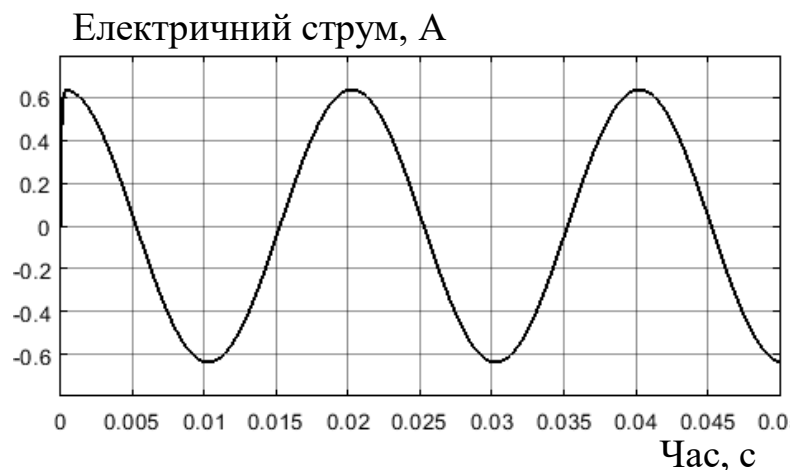


Рис. 2.18. Миттєве значення АС струму від повітряної ЛЕП

Проведені дослідження дозволяють вперше розробити рішення для зниження рівня електромагнітного поля лінії електропередачі та відповідно його впливу на процеси корозії підземного трубопроводу:

- в разі двоцепної повітряної лінії існує оптимальне чергування фазних провідників в лінії, при яких електричне поле в зоні розташування трубопроводу буде мінімальним [44];
- безпечна відстань від лінії до трубопроводу може бути визначена за результатами моделювання розподілу захисного потенціалу (рис. 2.13, б та наведеними критеріями (2.35)-(2.37);
- у разі перетинання трубопроводом простору під повітряною лінією, необхідно здійснювати цей перетин бажано кутом, наближеним до прямого. Це призведе до значного зменшення індукованої напруги і відповідно АС-струму.

2.4. Висновки до Розділу 2

1. Аналіз умов ефективного захисту від електрохімічної корозії електротехнічного комплексу «підземний трубопровід – група станцій катодного захисту» дозволив отримати такі унікальні особливості. Неоднорідність ґрунту впливає на градієнт захисного потенціалу катодних станцій, точкові

неоднорідності у вигляді перетинів залізничних колій, автомобільних доріг, кабельних підземних ліній електропередачі та стохастичний характер взаємного впливу заданих факторів на результуючий тип електромагнітного поля від групи катодних станцій.

2. Враховуючи обов'язкове дотримання суворих вимог до розподілу захисного потенціалу по всій довжині трубопроводу, у статті представлено математичне моделювання розподілу захисного потенціалу за обґрунтованих початкових умов та припущень. Припущення про однорідний характер ґрунту та постійний опір ізоляції дозволило отримати граничні значення зміни потенціалу залежно від фізичних параметрів трубопроводу, часу та відстані.

3. Використання запропонованих аналітичних та графічних залежностей для різних умов роботи катодних станцій від поздовжньої координати дозволяє значно покращити якість формування функції захисного потенціалу. Це характеризує отримані наукові результати стосовно оцінки енергоефективних режимів захисту підземних трубопроводів від електрохімічної корозії.

4. Результати моделювання зовнішнього електричного поля вздовж підземного трубопроводу виявили можливі межі зміни захисного потенціалу залежно від початкової фази напруги сусідніх станцій. Змінний характер функції захисного потенціалу на відстані 0–3000 м визначає необхідність та важливість врахування складних неоднорідностей для розробки універсального методу вибору технічних параметрів комплексу електротехнічного захисту та оптимального режиму роботи.

5. Вперше реалізовано новий підхід до розрахунку електричних процесів в підземному трубопроводі, який розташований поблизу повітряної лінії електропередачі та знаходиться під впливом її електромагнітного поля з метою аналізу корозійних процесів в цьому трубопроводі. Враховується наявність в трубопроводі пристрою для реалізації його катодного захисту. В основу такого підходу покладено використання методів теорії еквівалентних електричних кіл та теорії електромагнітного поля та їх комп'ютерна реалізація в пакеті Matlab/Simulink та COMSOL Multiphysics відповідно.

6. Проведено розрахунок процесів у сталевому ізолюваному трубопроводі, прокладеному у ґрунті на глибині 1,2 м, має протяжність 7 км та перетинає простір під повітряною лінією 330 кВ під кутом 45° . Показано, що в цьому випадку важливо враховувати як амплітуду так і фазу індукованого електричного поля в трубопроводі. Наведено розподіл вздовж трубопроводу як постійної так і змінної напруги відносно ґрунту. Для аналізу на основі цих даних корозійних процесів в трубопроводі, в роботі розглянуто два критерії відносно безпечного протікання процесів корозії в трубопроводі при одночасному протіканні як змінного так і постійного струмів. За результатами розрахунків встановлено, що на деяких ділянках трубопроводу, що досліджується, обидва ці критерії не задовольняються.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЖИМІВ СКЗ З ВЕНТИЛЬНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

3.1. Аналіз типових схемних рішень перетворювачів для СКЗ

Порівнюючи характеристики різних типів джерел струму СКЗ, можна зробити загальні висновки про їх переваги та недоліки. Напівпровідникові випрямлячі – надійні, добре регульовані, достатньо потужні перетворювачі електроенергії, що потребують мінімального обслуговування. Однак для їх застосування на трасі газопроводу необхідні джерела змінного струму (ЛЕП) напругою 0,22; 0,4; 6 і 10 кВ, тобто централізовані електричні мережі. Робота таких випрямлячів залежить від стійкої роботи лінії електропередачі. У даній роботі пропонується застосовувати гібридні схеми живлення з ВДЕ та накопичувачами енергії. ВЕС дають дешеву електроенергію і можуть бути встановлені на трасі у віддалених від територіальних громад районах. Однак нестійкий характер генерації від вітру і необхідність застосування акумуляторного господарства потребує обґрунтування потужності ВЕС та накопичувача. Обслуговування і ремонт електрогенератора з двигуном внутрішнього згоряння на трасі газопроводу складніше будь-якого з розглянутих джерел, однак, застосування їх при певних умовах можливе. Електрохімічні елементи через малі напруги і ємності можуть застосовуватися тільки в якості допоміжних або тимчасових джерел СКЗ. Таким чином, при виборі джерела живлення СКЗ необхідно вийти з конкретних умов захисту ділянки газопроводу та техніко-економічного обґрунтування вибраного варіанту захисту.

СКЗ – це комплекс засобів, призначених для катодної поляризації газопроводу зовнішнім потоком. У склад СКЗ входять джерело постійного (випрямленого) струму, анодне заземлення, катодний вивід газопроводу, електропроводи з'єднання (проводи, кабелі, шини), захисне заземлення. Складова частина електричного кола СКЗ, яка захищає газопровід це об'єм ґрунту, анодна та катодна ділянка електрохімічної системи (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Принципова схема СКЗ з перетворювачем

При використанні систем перетворення AC/DC найбільше поширення отримали трифазні та однофазні мостові схеми випрямлячів, що обумовлено масовим застосуванням тиристорів та транзисторів. Ці схеми є також основою для побудови більш складних схем багатofазних перетворювачів, що працюють, як правило, на протиЕРС або активно-індуктивному навантаженні. В цьому випадку, в припущенні нескінченно великої індуктивності ланцюга випрямленого струму, крива мережевого струму шестипульсного перетворювача, приведений на рис. 3.2 [67-69].

Форма кривої залежить від кута керування α , що задається системою імпульсно-фазового управління, кута комутації γ і визначається за виразом [57, 66, 70, 71]:

$$\gamma = \arccos (\cos \alpha - I_d X_{K*}) , \quad (3.1)$$

де I_d – відносне (у частках номінального) значення випрямленого струму;

X_k – відносне значення індуктивного опору контуру комутації, зведене до потужності трансформатора перетворювача (для некерованого перетворювача: $\alpha = 0$; $\cos \alpha = 1$ (рис. 3.4).

Порядкові номери вищих гармонік (ВГ) мережених струмів визначається виразом [57, 70, 75]:

$$n = kp \pm 1, \quad (3.2)$$

де p – пульсність перетворювача; $k=1; 2; 3 \dots$

Для мостового перетворювача, у якого $p = 6$, $n = 5; 7; 11; 13; 17; 19; 23; 25$.

Початкова фаза гармоніки визначається за формулою [57]:

$$\Psi_n = n\Psi \quad (3.3)$$

У практичних розрахунках Ψ зручно знаходити за формулою [57]:

$$\Psi = \arccos \frac{U_d}{U_{d0}}, \quad (3.4)$$

де U_d і U_{d0} – середнє значення випрямленої напруги перетворювача в режимах навантаження та холостого ходу відповідно.

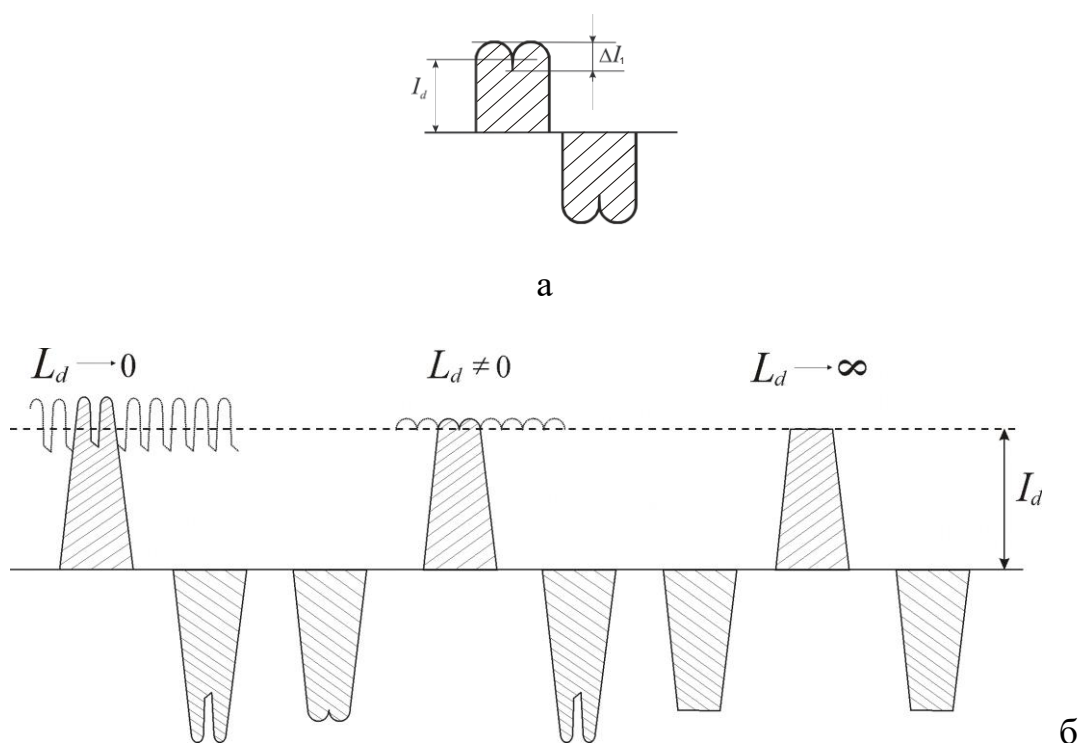


Рис. 3.2. Крива первинного струму 6-пульсного перетворювача (а) та вплив індуктивності трубопроводу на рівень пульсацій випрямленого струму (б)

У розглянутому випадку:

$$U_{do} = 1.35 E_2,$$

де E_2 – вторинна фазна ЕРС трансформатора.

Для некерованих перетворювачів, що працюють з кутом комутації γ_0 ,

$$\frac{I_n}{I_1} = K_{I(n)} = \frac{\sin \left[(n-1) \frac{\gamma_0}{2} \right]}{n(n-1) \frac{\gamma_0}{2}}.$$

Відомі спрощені формули для оцінки ВГ струму [57, 76].

Для керованих перетворювачів:

$$I_{n*} = \frac{1}{\left(n - \frac{5}{n}\right)^{1.2}}.$$

Для некерованих перетворювачів [57]:

$$I_n = \frac{I_1}{1.2 \left(n - \frac{5}{n}\right)} \quad (3.5)$$

або

$$I_n = 5.25 b_n S_p$$

де S_p – потужність перетворювача, МВА.

Розрахунки за формулою:

n	5	7	11	13	17	19	23	25
I_n	20.8	13.2	7,9	6,6	5,0	4,4	3,7	3,4

Якщо мостовий перетворювач підключається без трансформатора до шин, до яких приєднано також батареї конденсаторів, то крива мережевого струму набуває прямокутно-ступеневої форми ($\gamma \approx 0$). У цьому випадку:

$$\frac{I_n}{I_1} = K_{I(n)} = 1/n \quad (3.6)$$

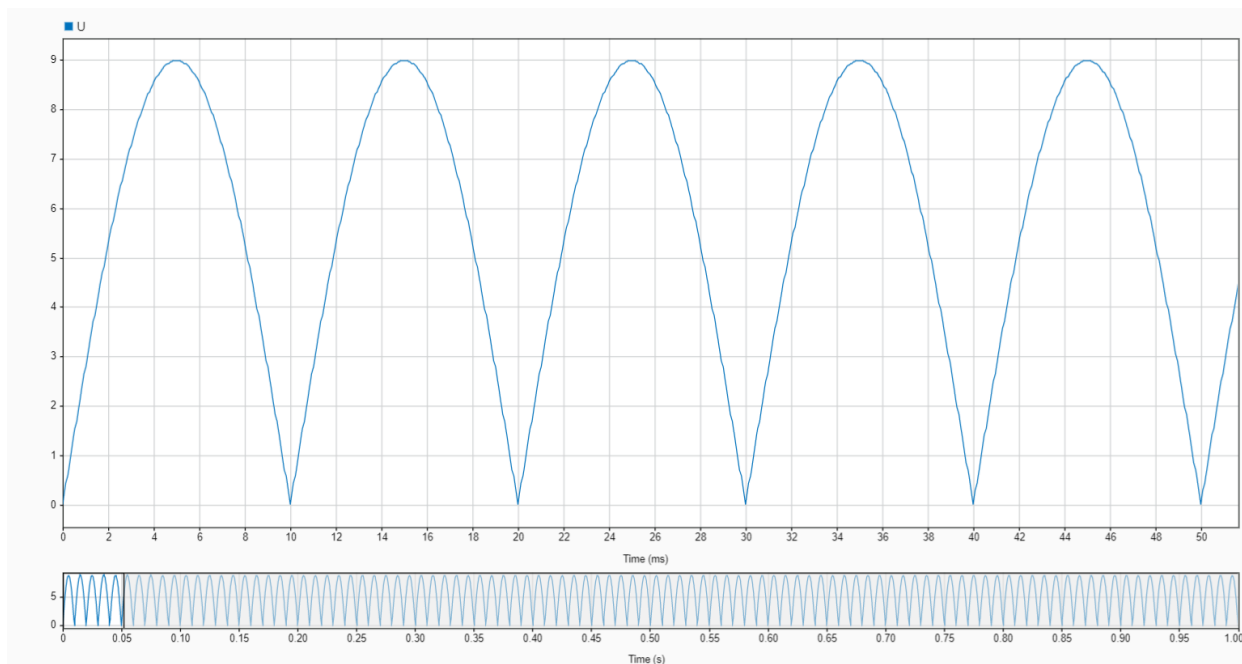


Рис. 3.3. Вихідний сигнал вентильного перетворювача з діодами

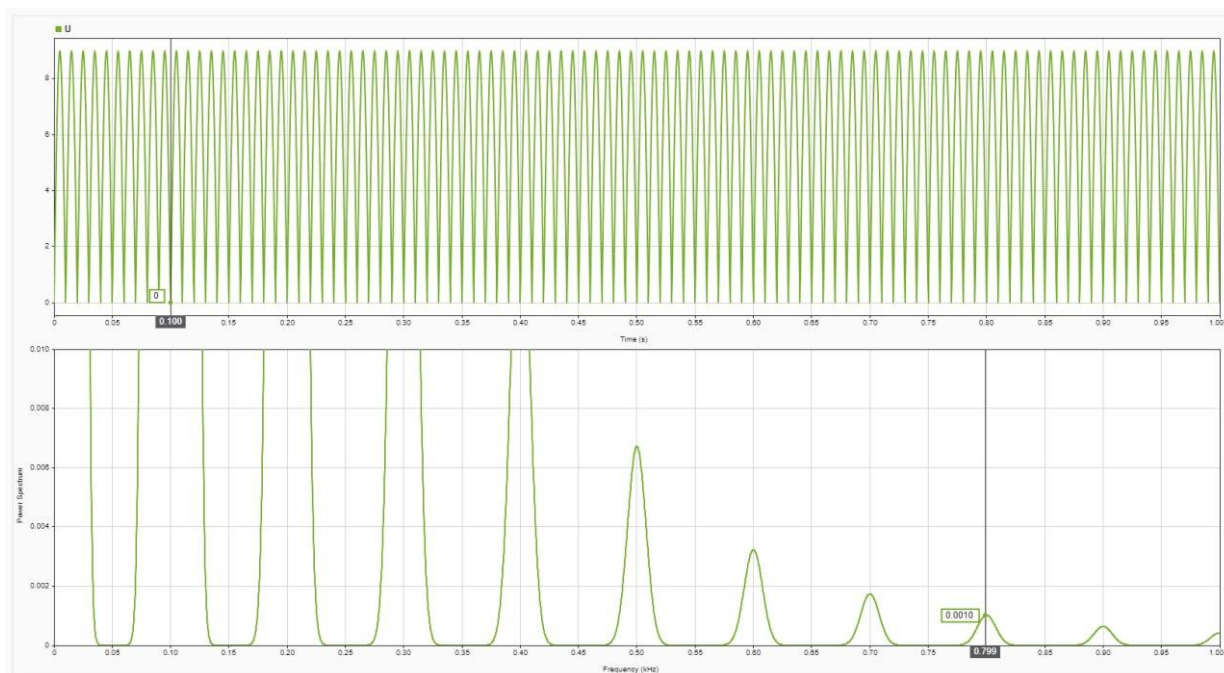


Рис. 3.4. Частотний спектр вихідного струму вентильного перетворювача з діодами

Залежність 3.6 широко використовується на практиці й у випадках, коли є трансформатор перетворювача. Однак значення при цьому виявляються завищеними: для $n = 5; 7$ похибка може сягати 10-15 %, для $n = 11; 13$ – до 20 %.

Наближено відносне діюче значення ВГ струму K_I , що генеруються 6-пульсним ВП, становить:

$$K_I = \sqrt{\frac{1}{5^2} + \frac{1}{5^2} + \frac{1}{5^2} + \dots} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} \approx 0.312.$$

Для 12-пульсних випрямлячів (одна зі схем, що дозволяє реалізувати 12-пульсний режим, спрощено представлена на рис. 3.5) $n = 11; 13; 23; 25 \dots$; $K_I = 0,133$.

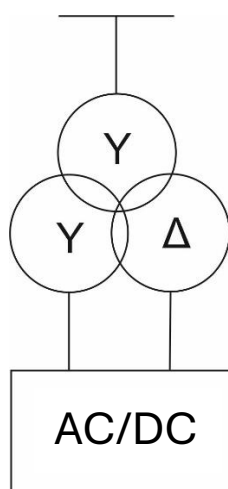


Рис. 3.5. Схема 12-пульсного випрямляча

3.2 Аналіз спектрального складу вихідного струму СЗК для різних схемних реалізацій перетворювачів

Нелінійні навантаження, що працюють у спокійному режимі. До таких можна віднести перетворювачі для станцій катодного захисту трубопроводів. Ці

установки довгостроково працюють з практично незмінним випрямленим струмом для реалізації захисного потенціалу [57, 77]:

$$\dot{I}_{n\Sigma} = \sum_{p=1}^n \dot{I}_{np}, \quad (3.8)$$

де $\dot{I}_{np}$ – комплекс струму n -ї гармоніки p -го джерела з урахуванням діючого значення I_{np} і початкової фази φ_{np} ; p – число навантажень.

При нехтуванні кутами комутації ВП можна скористатися простою залежністю [57, 78, 80]:

$$I_{n\Sigma} = \frac{S_{\Sigma} k_{n\Sigma}}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ}} n}, \quad (3.9)$$

де S_{Σ} – розрахункова повна потужність перетворювача; $k_{n\Sigma}$ – коефіцієнт, що враховує наявність зсуву по фазі між ВГ струму окремих перетворювачів у комплексній формі [57, 81]:

$$\dot{k}_{n\Sigma} = \sum_{p=1}^n \dot{k}_{np}, \quad (3.10)$$

де $\dot{k}_{np} = \frac{S_p}{S_{\Sigma}} e^{j\varphi_{np}}$; S_p – значення повної потужності p -го нелінійного навантаження.

При орієнтовних розрахунках в мережах з ВП можна приймати: $k_{n\Sigma} = 0,9$ для $n = 5; 7$; $k_{n\Sigma} = 0,75$ для $n = 11; 13$; для дугових і люмінесцентних ламп $k_{n\Sigma} = 1$ для всіх n .

У разі, коли нелінійними навантаженнями є 6-ти та 12-пульсні перетворювачі, середньоквадратичне значення повних потужностей, що дорівнюють $S_{\text{ср.кв}\Sigma}^{(6n)}$ і $S_{\text{ср.кв}\Sigma}^{(12n)}$ відповідно, еквівалентні струми ВГ визначають за формулою:

$$I_{ср.квn\Sigma} = \frac{S_{ср.кв}^{(6n)}}{\sqrt{3}U_{ном}n} \quad \text{для } n = 5; 7; 11; 13 \dots; \quad (3.11)$$

При 6-ти та 12-пульсних перетворювачів

$$I_{ср.квn\Sigma} = \frac{\sqrt{\left[S_{ср.кв}^{(6n)}\right]^2 + \left[S_{ср.кв}^{(12n)}\right]^2}}{\sqrt{3}U_{ном}n}. \quad (3.12)$$

Як відомо,

$$I_{ср.квn\Sigma} = \sqrt{M^2[I_{n\Sigma}] + \sigma_{I_{n\Sigma}}^2}. \quad (3.13)$$

Оскільки для розглянутих навантажень початкові фази ВГ розподілені рівномірно в діапазоні $0-2\pi$, то при наявності "спокійних" навантажень значення $S_{ср.кв\Sigma}$ можна визначити з виразу (3.11). Ця рекомендація справедлива, якщо повна потужність "спокійних навантажень" не перевершує 40 % від потужності різкозмінних навантажень. При цьому додаткова похибка визначення $I_{n\Sigma}$ не перевершить 10 %.

Застосування перетворення Фур'є для визначення інтергармонік

Безпосереднє застосування перетворення Фур'є

У загальному випадку ІГ діють як і ВГ, причому їх вплив може виявитися сильнішим, ніж вплив ВГ.

Наявність ІГ обумовлює виникнення додаткових втрат активної потужності та електроенергії. Якщо нелінійне навантаження з опором Z_0 , що є джерелом ВГ і ІГ, приєднане до джерела синусоїдальної ЕРС $e_I(t)$ з опором $Z_S(R_S, L_S)$, то струм $i(t)$ можна представити як [57, 82]:

$$i(t) = i_1(t) + i_{hh}(t) + i_{ih}(t),$$

де $i_1(t)$, $i_{hh}(t)$, $i_{ih}(t)$ – струми основної гармоніки (ВГ та ІГ відповідно).

або

$$i(t) = i_1(t) + \sum_{k=2}^{\infty} i_{hh\ k}(t) + \sum_{n=2}^{\infty} i_{ihn}(t).$$

Напруга на затискачах навантаження:

$$u_{AB}(t) = e_1(t) + i(t)R_s + L_s \frac{di}{dt}.$$

Таким чином оцінюється вплив інтергармонік на параметри режиму електричної мережі.

Для визначення амплітуд і частот ІГ можливе застосування перетворення Фур'є безпосередньо до графіків випадкових процесів $I(t)$ і $U(t)$, де $I(t)$ і $U(t)$ – огибаючі кривих графіків діючих значень струму і напруги. Очевидно, що розкладання буде характеризувати гармонічний склад конкретної реалізації випадкового процесу на інтервалі стаціонарності.

Дискретний спектр отримано шляхом гармонічного аналізу з використанням швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). З аналізу дискретного спектру випливає, що ІГ струму виявляються в діапазоні 0–2,5 Гц. Для оцінки енергії ІГ необхідно підсумувати квадрати їх діючих значень.

Спектр випадкового процесу зміни струму є безперервним. Енергія безперервного спектру при живленні СКЗ від мережі визначається площею під кривою спектру і чисельно дорівнює дисперсії процесу [57].

3.3 Методи і моделі визначення рівнів несинусоїдальності вихідного сигналу

Основною причиною несинусоїдальності є наявність вентильних перетворювальних установок та електроприймачів з нелінійною вольт-амперною характеристикою (ВАХ). Основний вплив надають вентильні перетворювачі, які в даний час широко застосовуються в промисловості й на транспорті.

Найбільш поширені вентильні перетворювачі на напівпровідниках (тиристорні перетворювачі), потужність яких весь час зростає. Вентильні перетворювачі широко застосовуються для перетворення змінного струму в постійний і використовуються в якості джерел живлення СКЗ.

Для оцінки енергетичної ефективності роботи СКЗ необхідна розробка аналітичних залежностей визначення рівнів вищих гармонік та показників несинусоїдальності напруги.

Виконаємо моделювання коефіцієнту викривлення синусоїдальності кривої напруги (K_U) в різних точках системи електропостачання для порівняння їх значення з нормами ДСТУ та EN50160. Для 6-фазної схеми випрямлення у викривленому спектрі враховують 5-у, 7-у, 11-у та 13-у гармоніки [57, 84].

Схема заміщення системи електропостачання має вигляд, представлений на рис.3.6.

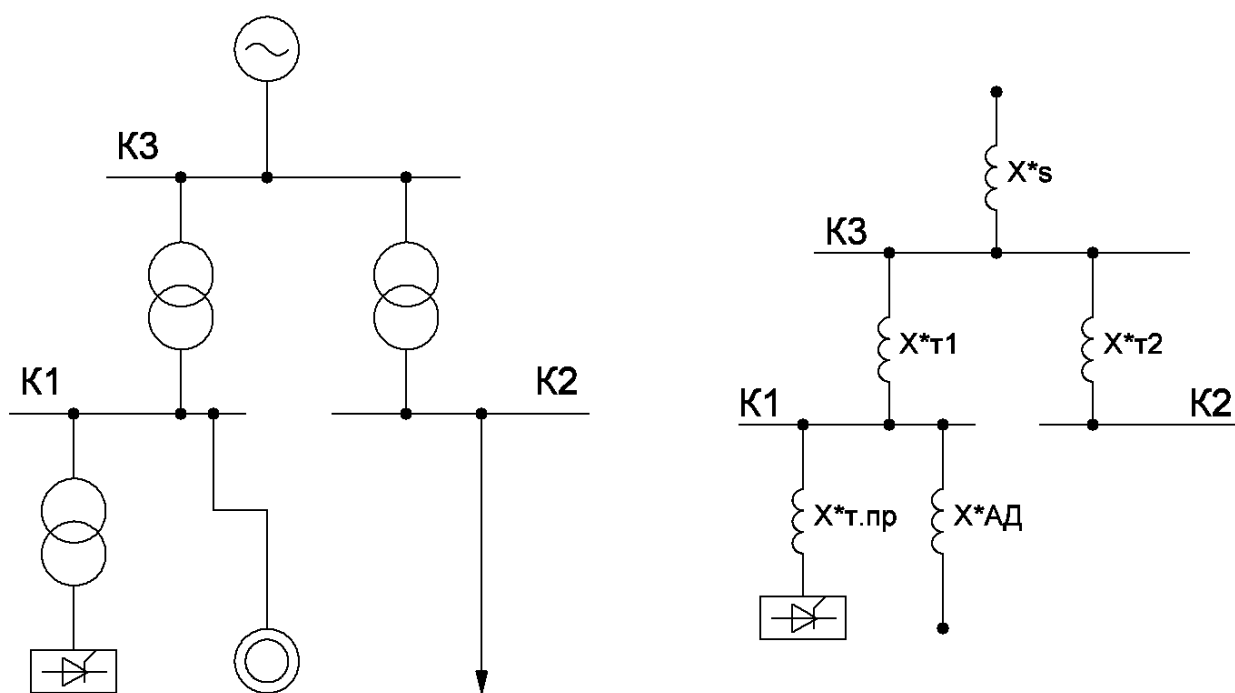


Рис. 3.6 Схема заміщення системи електропостачання СКЗ

Для розрахунку опорів елементів схеми заміщення приймаємо базисні умови:

- базисна потужність: S_6 ;
- відносний опір системи: $X_{*S} = S_6 / S_{кз}$;

- відносні опіри трансформаторів T1 та T2:

$$X_{*T1} = X_{*T2} = \frac{u_K}{100\%} \cdot \frac{S_6}{S_{HT}};$$

- відносний опір трансформатора перетворювача:

$$X_{*T.пр} = \frac{u_K}{100\%} \cdot \left(1 + \frac{K_\phi}{4}\right) \cdot \frac{S_6}{S_{ном.Т.пр}},$$

де: K_ϕ – коефіцієнт фазності (для 6-фазної схеми випрямлення $K_\phi = 0$), $S_{ном.Т.пр}$ – номінальна потужність трансформатора перетворювача, МВА.

- відносний опір асинхронних двигунів:

$$X_{*АД} = X_d'' \cdot \frac{S_6}{(P_{ном АД} \cdot n_{АД}) / \cos \phi_{АД}},$$

де: X_d'' – зверхперехідний опір двигунів, $P_{ном АД}$ – активна потужність одного асинхронного двигуна, МВт, $n_{АД}$ – кількість асинхронних двигунів.

Еквівалентування схеми відносно точки К1 (рис. 3.7):

- перший етап:

$$X_{*Z} = \frac{X_{*S} \cdot X_{*T2}}{X_{*S} + X_{*T2}}.$$

- другий (кінцевий) етап:

$$X_{*C} = \frac{(X_{*Z} + X_{*T1}) \cdot X_{*АД}}{X_{*Z} + X_{*T1} + X_{*АД}}.$$

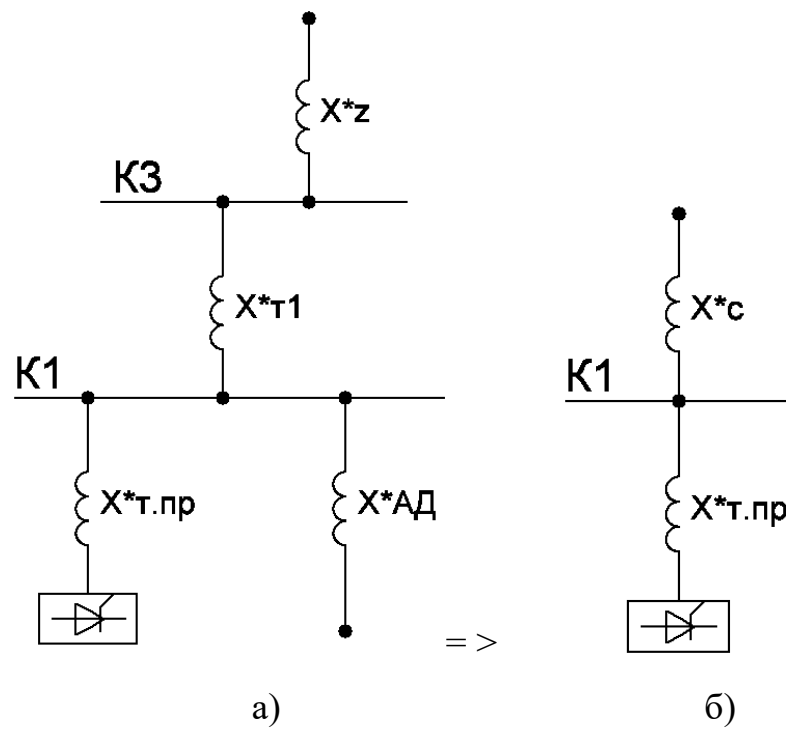


Рис. 3.7. Спрощена схема заміщення та еквівалентування: а – перший етап, б – другий етап

Коефіцієнт викривлення синусоїдальності кривої напруги в точці K1 [57, 92,93]:

$$K_{U\ K1} = X_{*C} \cdot \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{\sin\phi}{X_{*C} + X_{*T.пр}} - \frac{9}{\pi^2}}.$$

Знаючи K_U в точці K1, модель дозволяє знайти показники несинусоїдальності у будь-якій точці системи електропостачання:

- в точці K3:

$$K_{U\ K3} = K_{U\ K1} \cdot \frac{X_{*Z}}{X_{*T1} + X_{*Z}}$$

- в точці K2:

$$K_{U\ K2} = K_{U\ K3} \cdot \frac{X_{*T2}}{X_{*T2} + X_{*S}}.$$

3.4. Вплив вищих гармонік на енергетичну ефективність СКЗ

Енергетична ефективність процесів передачі та споживання електроенергії оцінюється комплексними показниками, в основі яких покладено принцип мінімізації кінцевого споживання електроенергії. Так, при зниженні якості електричної енергії виникають додаткові втрати електроенергії та порушується нормальна робота технологічного обладнання [57, 92, 94].

Оцінка негативного впливу процесів погіршення якості напруги в системах електропостачання гірничих підприємств має важливе значення для пошуку заходів підвищення енергоефективності та вибору параметрів корегуючих пристроїв [92, 95].

При наявності ВГ в системах електропостачання (СЕР) з'являються додаткові втрати в електричних машинах, трансформаторах і мережах [88, 89], ускладнюється компенсація реактивної потужності (КРП) за допомогою батарей конденсаторів (БК) [66, 88]; скорочується термін служби ізоляції електричних машин і апаратів [92]; погіршується робота пристроїв автоматики, телемеханіки і зв'язку, мають місце й інші негативні наслідки [90].

При роботі асинхронних двигунів (АД) в умовах несинусоїдальної напруги їх коефіцієнт потужності та обертовий момент на валу знижуються [92]. Практично вплив вищих гармонік на коефіцієнт потужності АД можна не враховувати [92]. Аналогічно це стосується моментів, що створюють ВГ струму: вони не перевищують кількох десятих відсотка моменту, що існують при промисловій частоті [92].

Батареї конденсаторів можуть тривало працювати при перевантаженні їх струмами ВГ не більше ніж на 30 %; допустиме підвищення напруги становить 10 % [92]. Однак в цих умовах термін їх служби скорочується. У автономних СЕР, як правило, БК можуть виявитися в режимі, близькому до резонансу струмів на частоті будь-якої з вищих гармонік або інтергармонік. Внаслідок перевантажень вони виходять з ладу [92].

Результати впливу інтергармонік (міжгармонік)

Струми інтергармонік викликають викривлення напруги залежно від амплітуди складових струму й опору системи електропостачання на відповідній частоті [91, 92]. Чим більше гамма-частот складових струму, тим більше ризик виникнення небажаних резонансних явищ, що можуть збільшити викривлення напруги і призвести до перевантаження або порушення роботи обладнання споживача [84-86]. Найбільш поширеними наслідками впливу інтергармонік є: тепловий ефект; низькочастотні коливання механічних систем; проблеми в роботі флуоресцентних ламп і електронного устаткування; створення перешкод сигналам захисту й управління в проводах електричної мережі; перевантаження пасивних фільтрів ВГ; перешкоди для телекомунікацій; акустичний вплив; насичення вимірювальних трансформаторів.

Вплив ВГ на системи імпульсно-фазового управління (СІФУ) та широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) перетворювачів може призвести до виникнення так званої гармонійної нестійкості, що полягає у появі на шинах багатопульсного перетворювача парної гармоніки або гармоніки, кратної трьом. При цьому в інверторному режимі перетворювача можливі порушення комутації; робота СІФУ також може виявитися нестійкою. Гармонічна нестійкість може виникнути при підключенні випрямляча до енергосистеми, потужність КЗ якої можна порівняти з потужністю установки, у випадку, коли є інші джерела ВГ (силові трансформатори, перетворювачі частоти), і асиметрія керуючих імпульсів СІФУ.

Додаткові втрати активної потужності ΔP_n , обумовлені несинусоїдальністю напруги, при встановленому режимі роботи елементів визначають за виразом [92, 104]:

$$\Delta P_n = \frac{\Delta P_{ном}}{z_{1*}^2} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{U_{n*}^2}{n\sqrt{n}}, \quad (5.3)$$

де $\Delta P_{ном}$ – номінальні втрати активної потужності в струмопровідних частинах електрообладнання, кВт; $z_{1*} = z_1/z_{ном}$ – відносний повний опір елемента мережі

струму основної частоти; $U_{n*} = U_n / U_{ном}$ – відносне значення гармоніки напруги порядку n ; n – число гармонік напруги, що враховуються.

Додаткові втрати в електричних двигунах пропорційні значенню:

$$\sum_{n=2}^n \frac{U_{nx}}{n\sqrt{n}} = \sum_{n=2}^n \Lambda_n U_{nx}^2, \quad (5.4)$$

де $\Lambda_n = 1/n\sqrt{n}$ – коефіцієнт гармонічних втрат.

3.5. Моделювання режимів роботи керованих та некерованих перетворювачів СКЗ

Для забезпечення надійного формування захисного потенціалу СКЗ при децентралізованому живленні зі Storage системою виконаємо моделювання імпульсного знижуючого регулятора постійної напруги (DC/DC перетворювач.

У електротехнічному комплексі живлення СКЗ електрична енергія накопичується від сонячних та вітрових електростанцій на напрузі 12-48 В. Для приведення постійних напруг цих джерел до необхідного рівня, його стабілізації або регулювання потрібні перетворювачі постійної напруги в постійну [69, 70]. Потужність таких перетворювачів для даних систем не перевищує 10 кВт. У разі таких потужностей доцільно застосовувати одно-каскадні перетворювачі [70].

У дисертаційній роботі розглянуто базові схеми перетворювачів, що здійснюють прямі (одно-каскадні) перетворення постійної напруги в постійну без використання будь-якого проміжного перетворення, наприклад постійної напруги в змінну з подальшим перетворенням змінної напруги в постійну. Вивчення і дослідження цих перетворювачів здійснюється з використанням Matlab/Simulink/. Дане середовище програмування дає змогу отримувати основні характеристики розглянутих перетворювачів двома способами:

- «звичайним», змінюючи обраний параметр і реєструючи значення досліджуваних величин під час кожної симуляції з наступною побудовою необхідних характеристик;
- програмним, в якому зняття та побудова основних характеристик відбувається автоматично.

Схема імпульсного знижувального регулятора постійної напруги показана на рис. 3.6 *а*. Розрахункові схеми заміщення регулятора на комутаційних інтервалах представлені на рис. 3.6 *б, в* [70]. Під час періоду несучої частоти (T) послідовно утворюються два комутаційних інтервали.

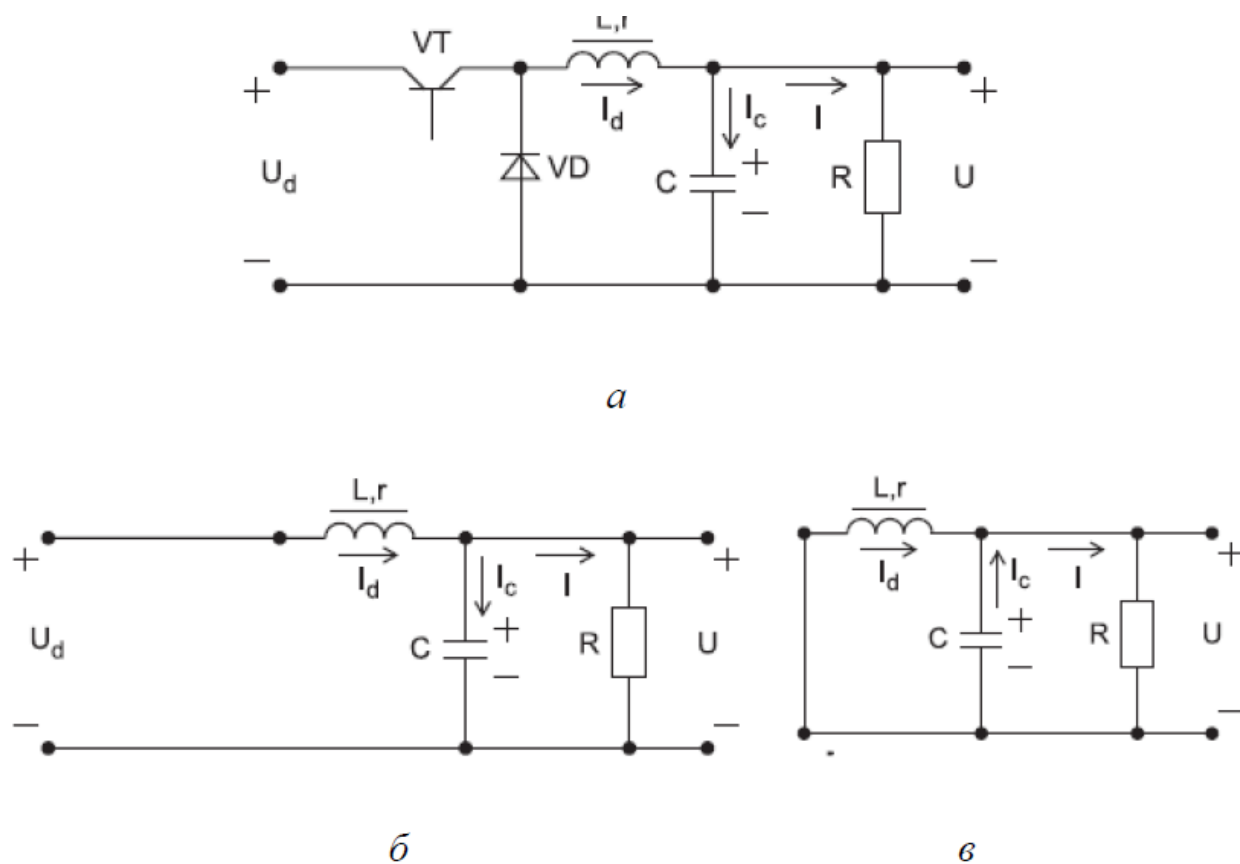


Рис. 3.6. Розрахункова схема DC/DC регулятора (*а*) та його схеми заміщення (*б, в*) на комутаційних інтервалах

Моделювання режимів перетворювачів проводилось на моделі (рис. 3.7) при початкових умовах, характерних для систем зберігання енергії. При цьому варіювався індекс шпаруватості перетворювача (рис. 3.8). Визначними особливостями отриманих моделей є можливість прогнозування рівня захисного потенціалу у залежності від напруги на акумуляторі (що прямо залежить з рівнем заряду). Це дає можливість визначити ефективні зони захисту трубопроводів при груповому захисті та різних структурах та станах накопичувачів.

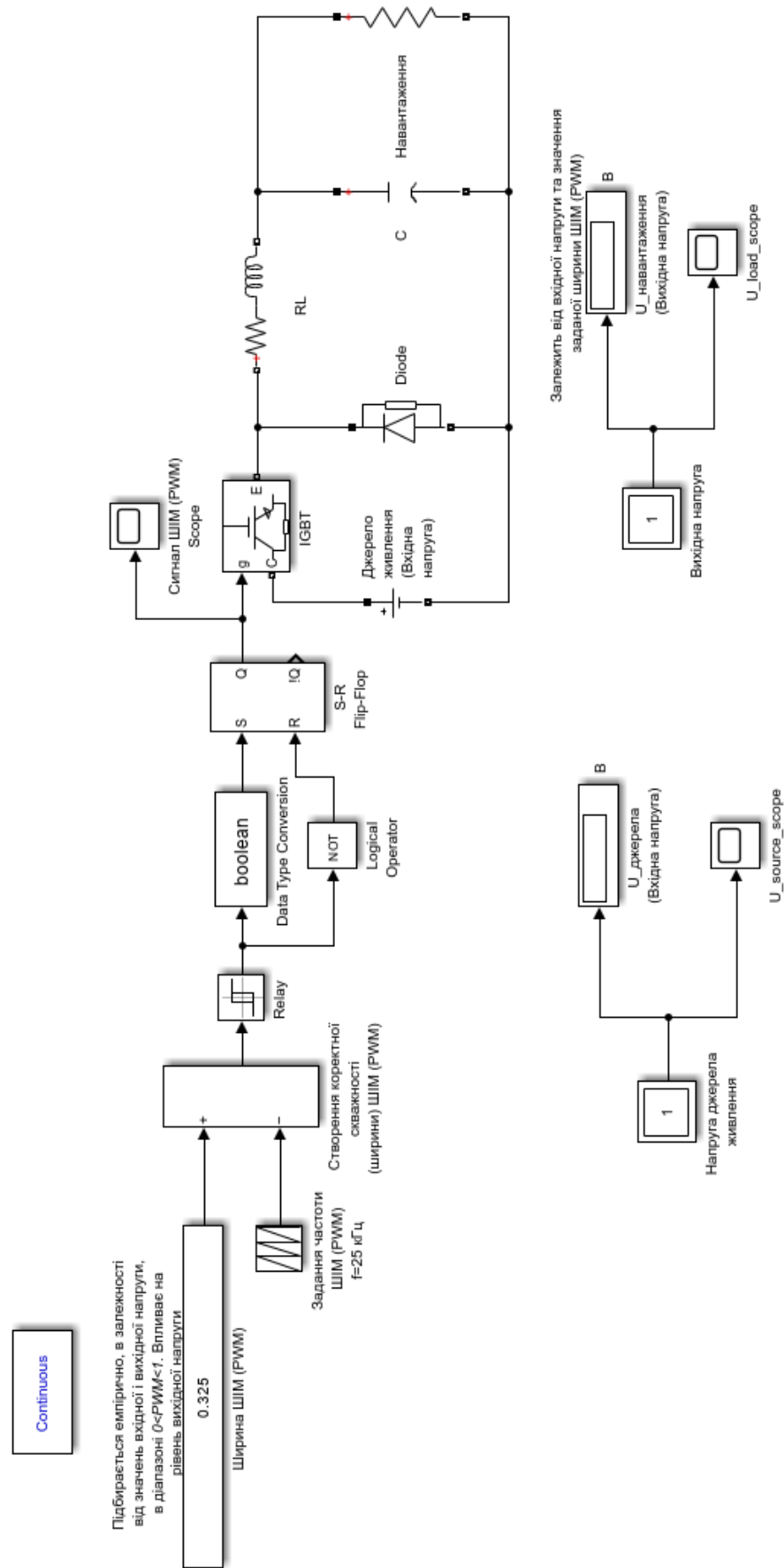


Рис. 3.7. Simulink модель DC/DC перетворювача

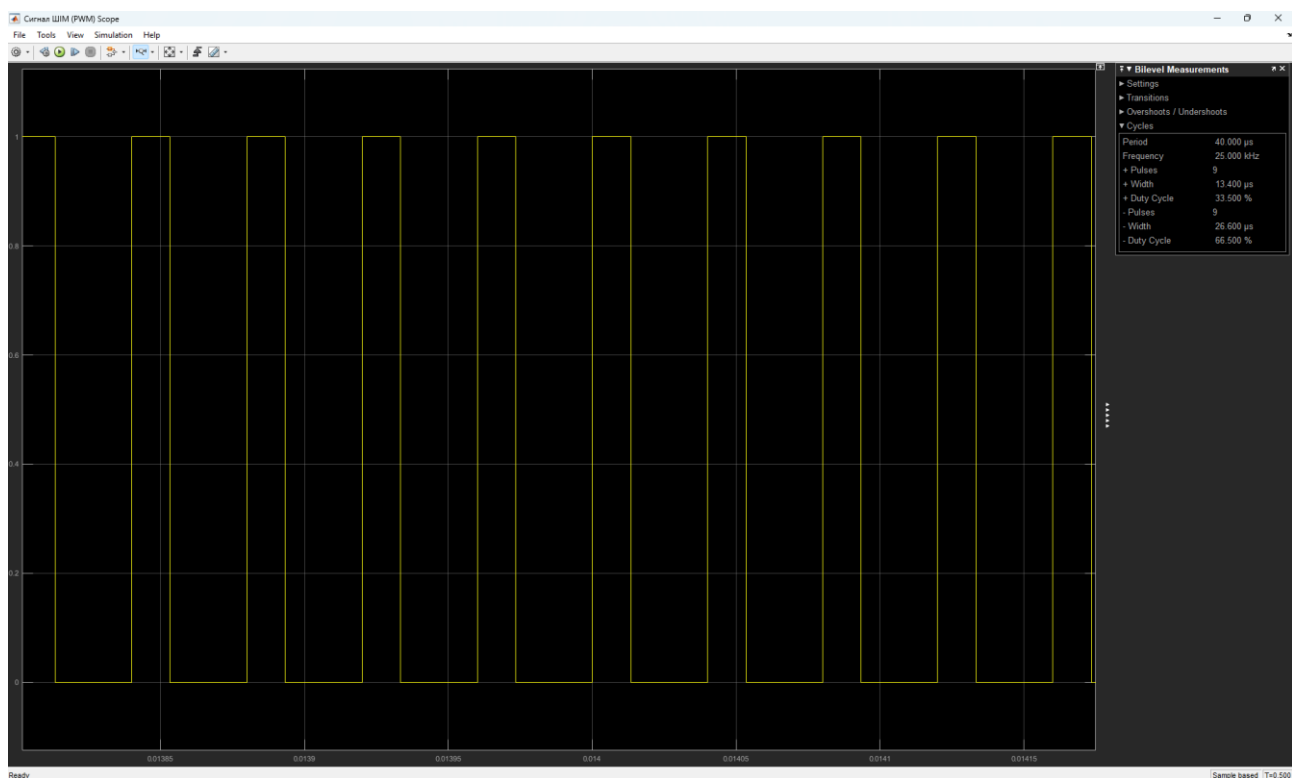


Рис. 3.8. Сигнал ШІМ при шпаруватості 33,5 %

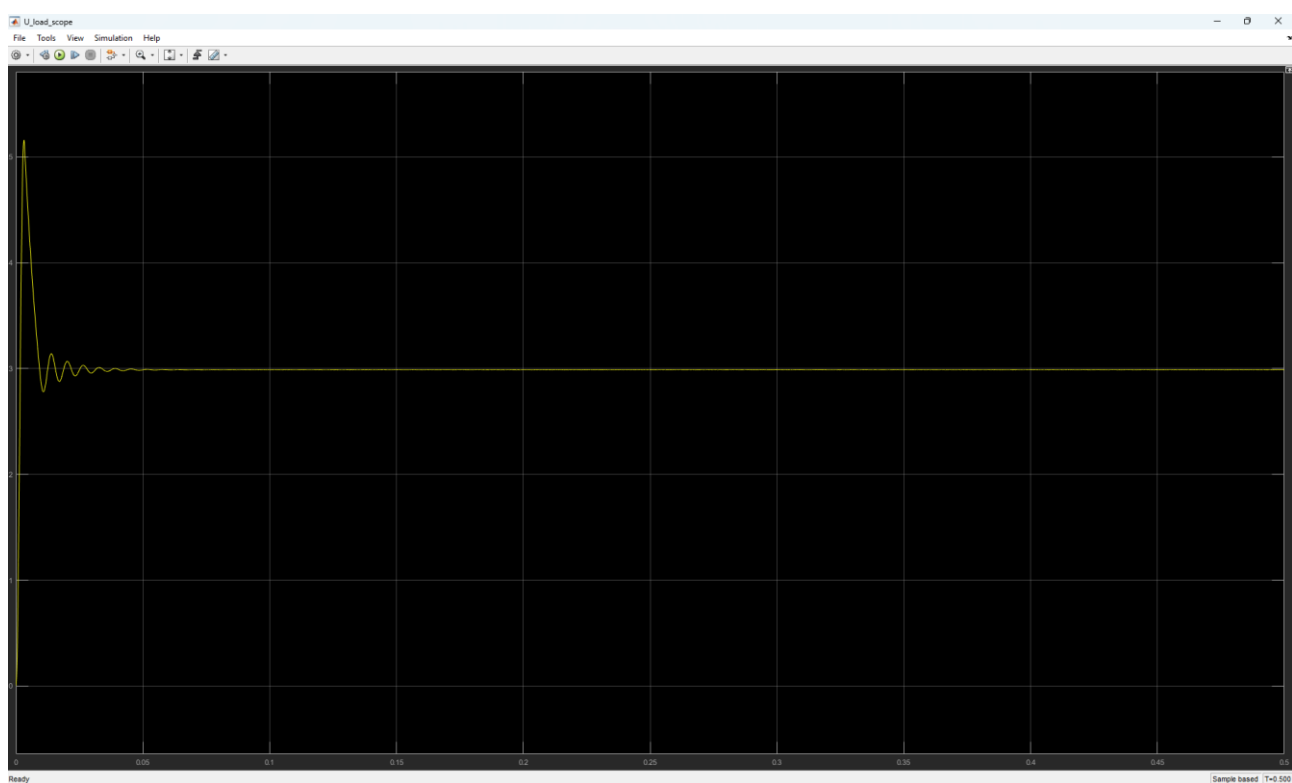


Рис. 3.9. Перехідний процес стабілізації вихідної напруги DC/DC перетворювача

3.6. Висновки по розділу 3

1. Враховуючи різноманіття схем живлення СКЗ та можливість децентралізованого живлення систем захисту від електрохімічної корозії, для забезпечення максимальної енергетичної ефективності при використанні електроенергії в перетвореному вигляді та переході до новітніх принципів побудови систем електропостачання необхідно врахування рівнів електромагнітної сумісності та стану мережі живлення в розрахунках параметрів комплексного джерела живлення.

2. Математичні моделі розрахунку спектрального складу вищих гармонік струму та напруги у децентралізованих системах електропостачання СКЗ формують нові залежності для визначення показників енергетичної ефективності, які відрізняються від існуючих можливостями врахування канонічних гармонік та інтергармонік від роботи вентильних перетворювачів.

3. Можливості інноваційних рішень побудови систем електропостачання СКЗ з відновлюваними джерелами енергії та Storage-системами дозволяють сформулювати новітні підходи до формування рівнів захисного потенціалу через оптимальні значення вихідного сигналу DC/DC перетворювача, режими якого відрізняються від існуючих можливостями врахування параметрів схем заміщення трубопроводів та умов прокладання траси.

4. Нелінійний характер залежностей додаткових втрат активної потужності від режиму вентильного перетворювача дозволив сформулювати нові критерії вибору раціонального режиму системи електропостачання, відмінні особливості яких полягають у врахуванні максимальних значень втрат при виборі типу та потужності електрообладнання станцій катодного захисту. Найбільші значення втрат потужності спостерігаються в зоні середніх значень кутів керування перетворювачів $80 \dots 110^\circ$.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ
СКЗ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

4.1. Визначення початкових умов та рівнів припущення

Для достовірних розрахунків показників енергетичної ефективності системи електропостачання з нелінійними навантаженнями необхідно розробити узагальнену схему трансформаторної підстанції, яка б враховувала кількість приєднань, що знаходяться у роботі та їх режимні показники. Раніше були відсутні моделі місцевих та районних підстанцій, в складі яких були виділені опори перетворювачів енергії (випрямлячі, перетворювачі частоти, інвертори станцій катодного захисту) [57, 96].

Еквівалентна модель підстанції 6/0,4 кВ представлена на рис. 4.1.

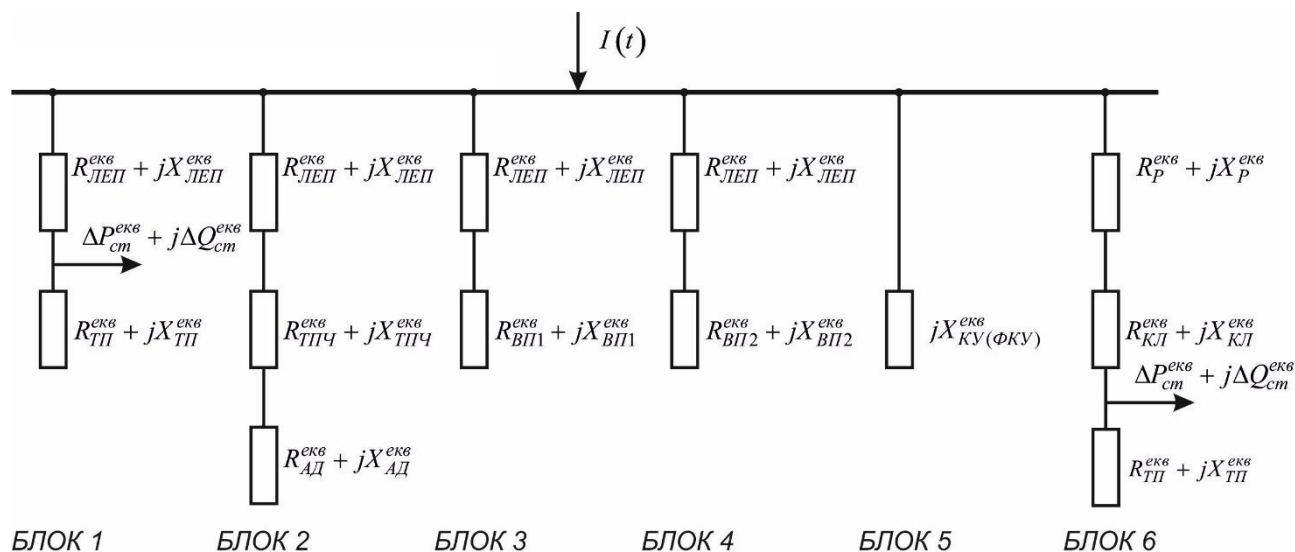


Рис. 4.1. Узагальнена модель трансформаторної підстанції 6/0,4 кВ

В схемі лінії електропередач представлені комплексними опорами. Окремими приєднаннями показано трансформаторні блоки живлення СКЗ (блок 1), асинхронні двигуни з частотним керуванням (блок 2), випрямлячі живлення СКЗ (блок 3 та 4), компенсуючі пристрої (БК та/або ФКУ) (блок 5), ланки приєднання джерел розподіленої генерації від СЕС та ВЕС (блок 6).

Запропонована модель характерна для трансформаторних підстанцій 6/0,4 кВ, від яких отримують живлення промислові підприємств України та муніципальний сектор. Модель володіє новими можливостями для оцінки втрат потужності та електроенергії в електричних мережах, які полягають в поелементному врахуванні кількості та потужності споживачів з перетворювачами енергії. Це дозволяє підвищити точність розрахунків, оскільки враховується специфічний характер навантаження СКЗ.

Отримані залежності та еквівалентну модель підстанції можливо використовувати в новітніх моделях побудови децентралізованих систем електропостачання з використанням елементів концепції Smart Grid [97, 98], що відрізняється від існуючих моделей. Характер залежностей має універсальний характер та може бути використано для розвитку децентралізованих мікромереж.

Науковцями НТУ «Дніпровська політехніка» проводився комплексний тривалий моніторинг рівняв захисного потенціалу для трубопроводів різних діаметрів, глибини прокладання, умов впливу неоднорідностей (залізничні колії, міський електротранспорт, автомагістралі тощо). Результати наведено на рисунках 4.2-4.5. Для порівняння наведено розподіл потенціалу вздовж траси трубопроводу при віддаленості від населених пунктів та будь-яких джерел блукаючих струмів (рис. 4.6).

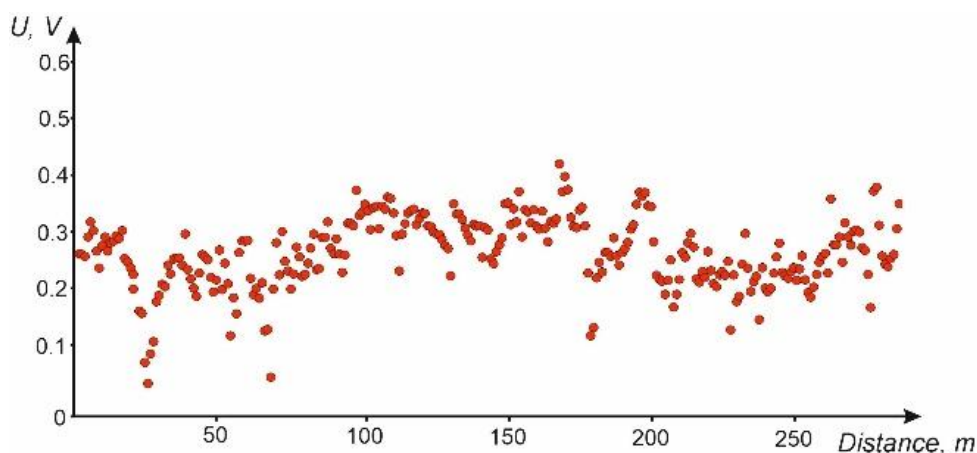


Рис. 4.2. Залежність рівнів захисного потенціалу від дистанції при наявності пошкодження ізоляції

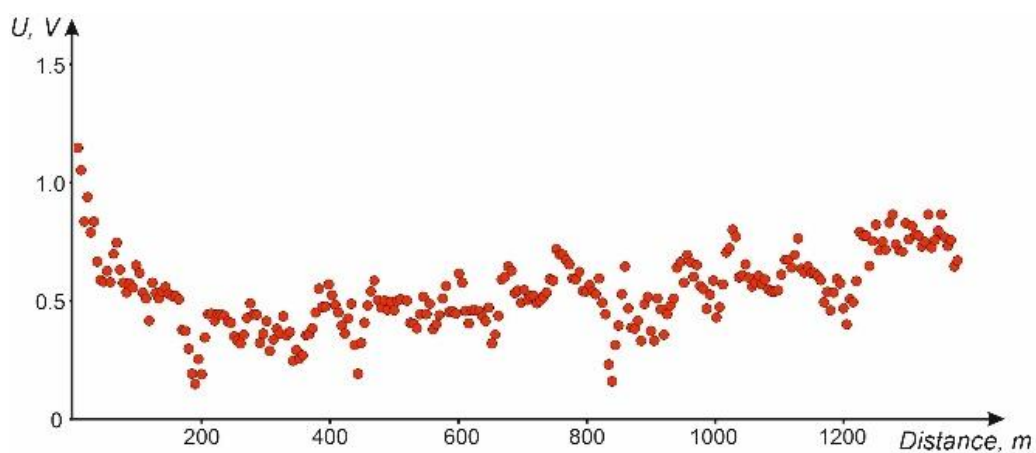


Рис. 4.3. Залежність рівнів захисного потенціалу від дистанції при наявності пошкоджень на дистанції 200, 420 та 825 м

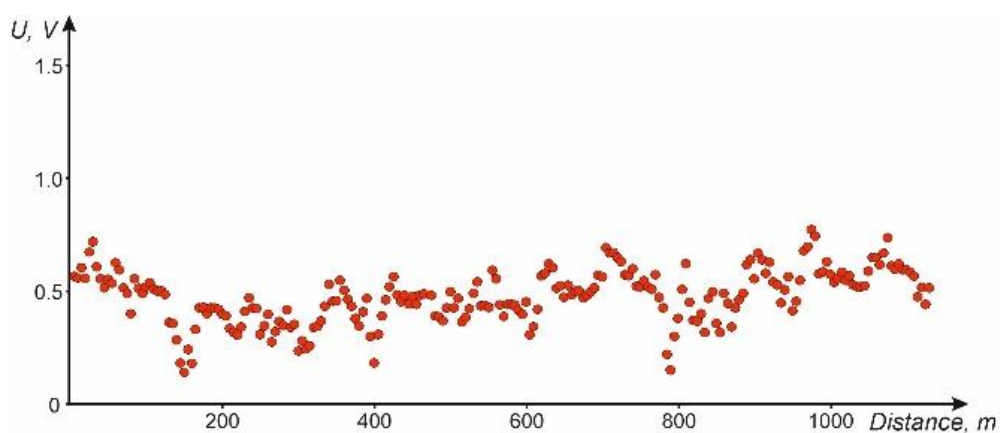


Рис. 4.4. Залежність рівнів захисного потенціалу від дистанції при суміжній роботі СКЗ

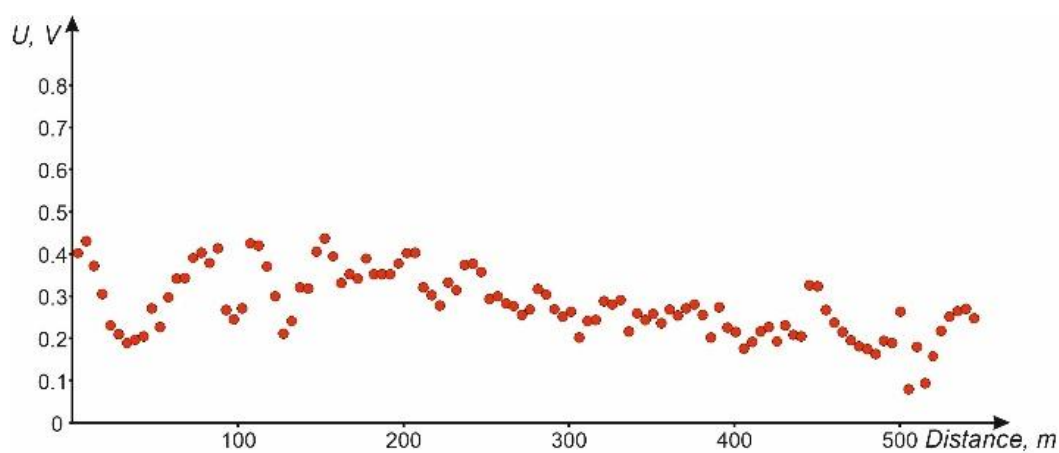


Рис. 4.5. Залежність рівнів захисного потенціалу від дистанції при наявності змінної складової

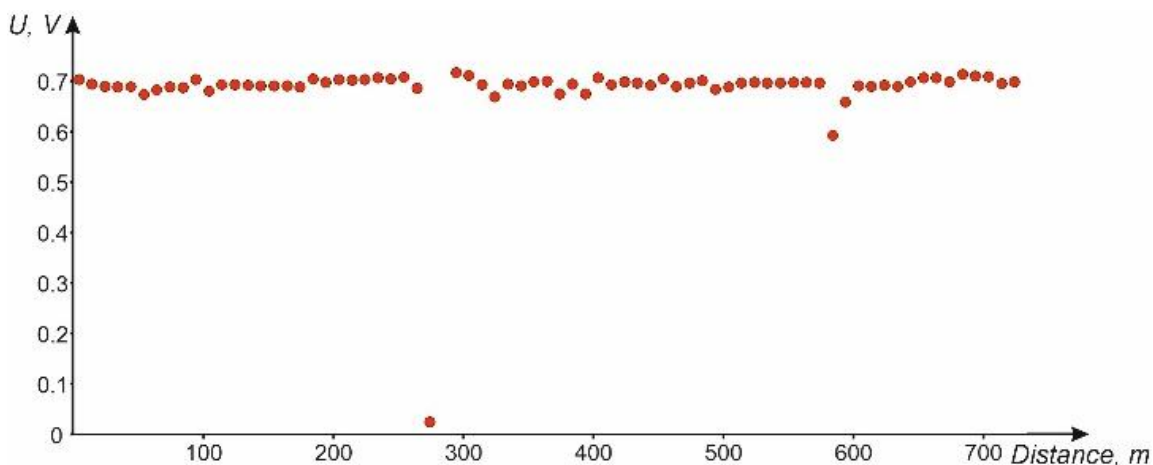


Рис. 4.6. Залежність рівнів захисного потенціалу від дистанції в умовах прокладання без блукаючих струмів

Оцінка отриманих результатів розподілу захисного потенціалу дозволяє говорити про кореляцію з результатами моделювання. Отже, для вибору параметрів комплексного джерела живлення необхідне врахування імовірнісного характеру електричних навантажень від СКЗ [96, 102, 115].

4.2. Дослідження стохастичного характеру електричних навантажень станцій катодного захисту

Складові повної потужності при несиметричному та нелінійному складі навантаження системи електропостачання характеризують енергетичну ефективність передачі та перетворення енергії. Для спрощення аналізу часто використовують енергетичні коефіцієнти, отримані з урахуванням складових потужностей. У даній роботі виникла необхідність розробки алгоритму визначення основних енергетичних показників, який враховуватиме всі можливі режими роботи СКЗ та склад іншого комплексного навантаження. В якості показників пропонується використовувати відомі складові повної потужності та енергетичні коефіцієнти, що визначаються за цими складовими [54, 96, 105].

У системах змінного струму для оцінки раціональності використання електричної енергії використовуються складові повної потужності (повна

потужність містить три основні складові: активна потужність P , реактивна потужність Q , потужність зворотної послідовності (пульсуюча) S_2 , потужність нульової послідовності (прихована) S_0 і потужність викривлення D , а також наступні енергетичні коефіцієнти: коефіцієнт потужності k_m , коефіцієнт зсуву k_{ϕ} та коефіцієнт викривлення $k_{\text{вик}}$ [66, 104, 106].

Вочевидь, що при зміні фазності живлення СКЗ значення енергетичних коефіцієнтів будуть змінюватися, що обумовлено зміною складових повної потужності. Аналіз цих процесів дозволить визначити алгоритм розрахунку цих коефіцієнтів для виявлення найбільш ефективних з погляду споживання електроенергії у мікромережах обмеженої потужності.

Коефіцієнт потужності вентильного перетворювача СКЗ [66, 107]:

$$k_{i\phi} = \frac{P_{i\phi}}{S_{i\phi}}, \quad (4.1)$$

де $i\phi$ – фазність живлення перетворювача.

Коефіцієнт потужності визначає ступінь використання повної потужності, що забирається з мережі.

Коефіцієнт зсуву [66, 107]:

$$k_{i\phi} = \sqrt{\frac{P_{i\phi}^2}{P_{i\phi}^2 + Q_{i\phi}^2}}. \quad (4.2)$$

У симетричних колах цей коефіцієнт дорівнює косинусу кута зсуву основної гармоніки струму щодо синусоїдальної напруги живлення ($\cos\phi$).

Коефіцієнт викривлення [66, 107]:

$$k_{i\text{вик}} = \sqrt{\frac{P_{i\phi}^2 + Q_{i\phi}^2}{P_{i\phi}^2 + Q_{i\phi}^2 + D_{i\phi}^2}}. \quad (4.3)$$

При симетричному навантаженні фаз у трифазній системі цей коефіцієнт визначається, як і в однофазних колах, відношенням діючого значення основної гармоніки мережного струму до діючого значення цього струму та визначає ступінь викривлення мережного струму. При синусоїдальному струмі коефіцієнт викривлення дорівнює одиниці.

Багатофазний коефіцієнт викривлення [66, 107]:

$$k_{\text{вик}} = \sqrt{\frac{\sum_{v=2}^{\infty} I_{(L1)v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{(L2)v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{(L3)v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Nv}^2}{I_{(L1)1}^2 + I_{(L2)1}^2 + I_{(L3)1}^2 + I_{N1}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{(L1)v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{(L2)v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{(L3)v}^2 + \sum_{v=2}^{\infty} I_{Nv}^2}}. \quad (4.4)$$

При аналізі динаміки зміни значень складових повної потужності та енергетичних коефіцієнтів скористаємося відносними значеннями зазначених величин. Зміна коефіцієнтів представимо у вигляді функції зміни активної потужності СКЗ. Такий підхід дозволяє виділити зони ефективної роботи системи катодного захисту (рис. 4.7).

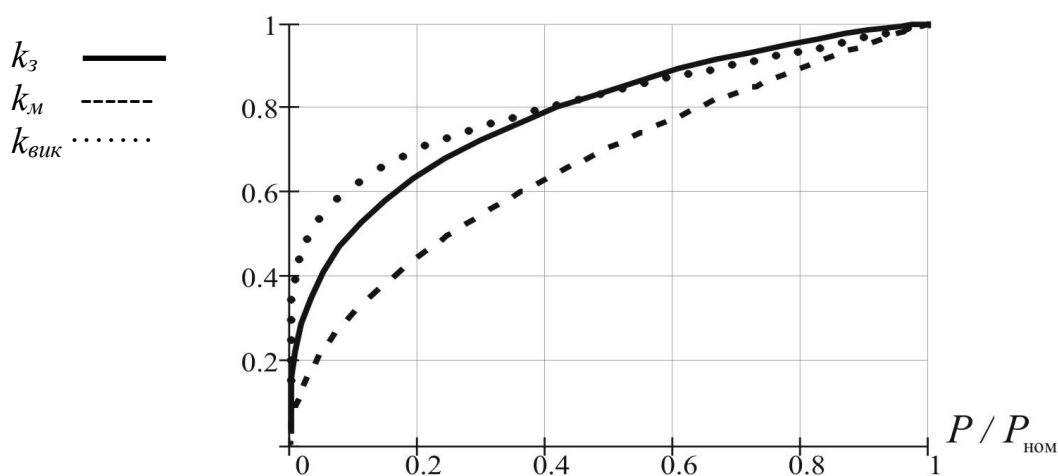


Рис. 4.7. Значення енергетичних коефіцієнтів при зміні потужності СКЗ

Експериментальні дослідження показали, що характер зміни електричних навантажень від СКЗ носить випадковий характер, тобто для моделювання показників графіків зміни потужності потрібно вказати які значення вона може приймати і з якою ймовірністю. Випадкова величина зветься дискретною, коли вона може отримувати дискретну множину значень. Дискретна випадкова величина задається таблицею [109, 110, 115]:

$$\xi \rightarrow \begin{pmatrix} x_1 x_2 x_3 \dots x_n \\ p_1 p_2 p_3 \dots p_n \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

де x_i – можливе значення випадкової величини; p_i – відповідна ймовірність того, що випадкова величина приймає значення x_i .

Ймовірності повинні задовольняти двом умовам:

- всі значення p_i позитивні;
- сума всіх p_i дорівнює одиниці, тобто $\sum_i p_i = 1$.

Математичним очікуванням приймаємо число [115]:

$$\tilde{X} = \sum_i^N x_i \cdot p_i. \quad (4.6)$$

Дисперсія випадкової величини [121]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_i^N (x_i - \tilde{X})^2. \quad (4.7)$$

Електричні навантаження, які носять імовірнісний характер підпорядковується нормальному закону розподілу, якщо її щільність ймовірності визначається як:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(x - \tilde{X})^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4.8)$$

Важливість закону нормального розподілу для практики пояснюється центральною граничною теоремою, яка стверджує, що при досить загальних умовах початкового розподілу випадкової величини x при кількості дослідів N , що прямує до нескінченності, розподіл випадкової величини прагне до нормального розподілу із середнім значенням $\bar{X}$ та дисперсією σ .

Значення функції щільності ймовірності для нульового значення середнього від значення дисперсії наведені на рис. 4.8 [115].

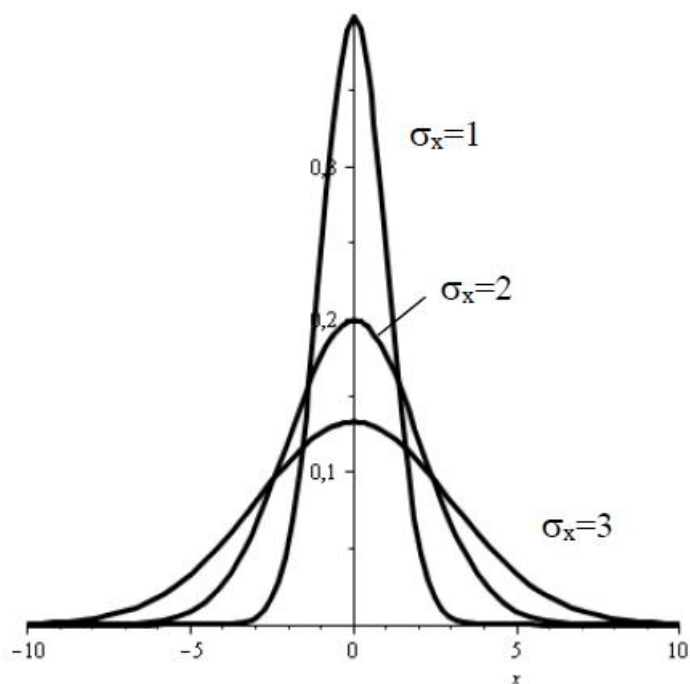


Рис. 4.8. Щільності ймовірності для нульового значення середнього від значення дисперсії

Імітаційне моделювання виконаємо на основі методу Монте-Карло [115]. При цьому величина, яку планується знайти для дослідження – значення активної потужності P , яку споживає СКЗ. Маємо отримати таку випадкову величину x , щоб $\hat{X} = m$ з дисперсією b^2 . Розглянемо N незалежних випадкових величин x_i . Якщо N достатньо велике, то згідно з центральною граничною теоремою розподіл суми x_i буде наближатися до нормального розподілу з параметрами [115]:

$$P \left\{ \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - m \right] < \frac{3b}{\sqrt{N}} \right\} = 0,997. \quad (4.9)$$

Тобто різниця між середнім значенням випадкової величини x_i та дійсним середнім значенням величини m практично зі 100% ймовірністю не перевищує величини $\frac{3b}{\sqrt{N}}$ і ця величина буде зменшуватись при збільшенні N [115].

Імітаційне моделювання на основі методу Монте-Карло виконано за допомогою вбудованих функцій *Microsoft Excel* (рис. 4.9).

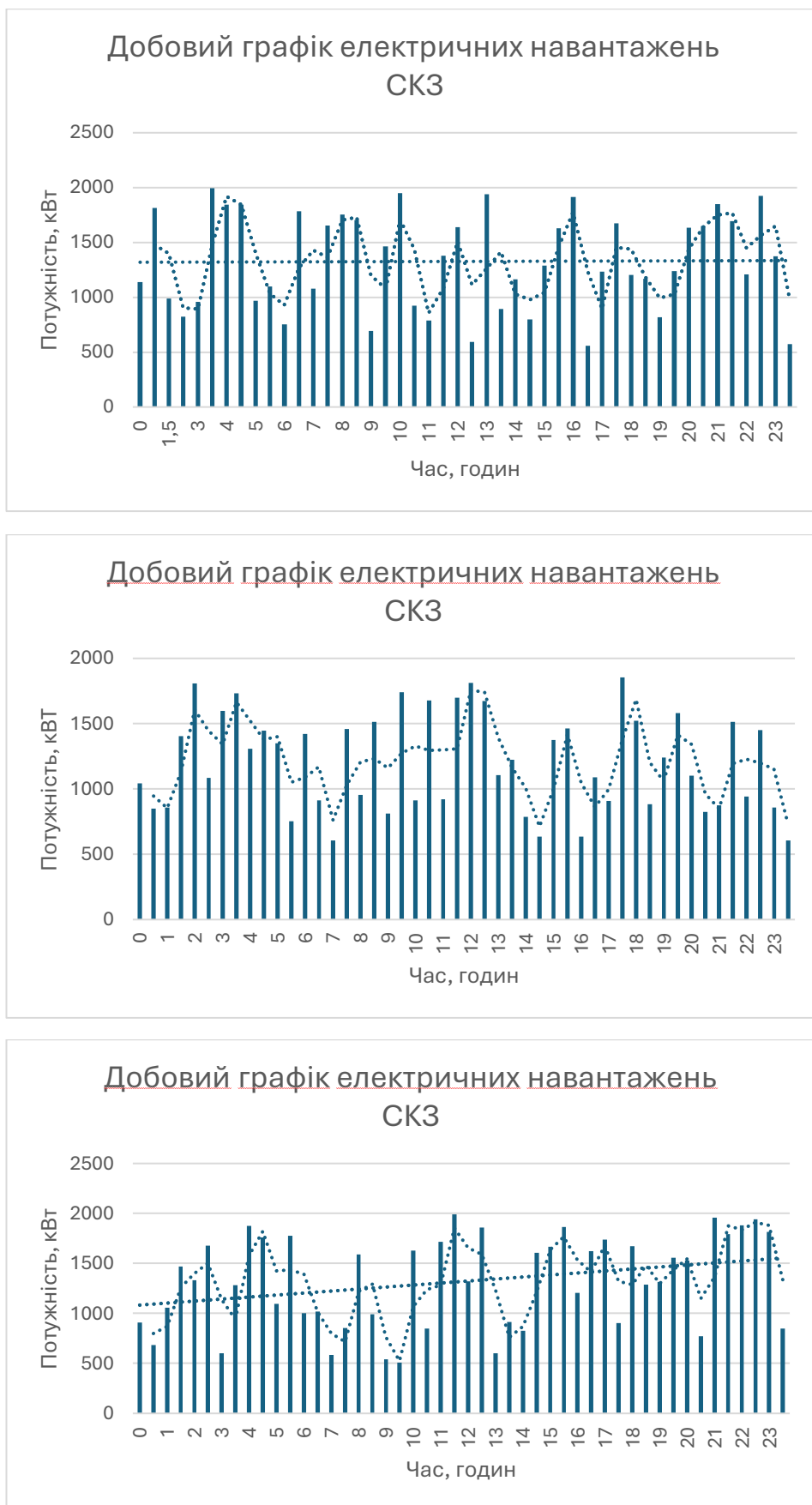


Рис. 4.9. Результати імітаційного моделювання графіків електричних навантажень СКЗ

4.3 Розробка цифрової моделі гібридної сонячної електростанції

Всі представлені елементи моделі сонячної електростанції, що застосовуються, є стандартними блоками програмного комплексу Simulink/MATLAB, документація яких доступна у довідковій системі програми, або за посиланням [112, 113].

Блоки, які моделюють змінне навантаження споживачів – *Three Phase Dynamic Load* (Трифазне динамічне навантаження). Особливість цього блоку у можливості задання графіку навантажень СКЗ, як вектора з необхідною дискретністю (у випадку даного дослідження 1 година) з робочого простору MATLAB. Задання графіку навантажень відбувається через вхід PQ (рис. 4.11), інші ж входи є «силовими» через яке відбувається споживання електроенергії при моделюванні. Вектор навантаження задається як добуток між вектором вихідних даних у відносних одиницях та встановленої потужності споживачів.

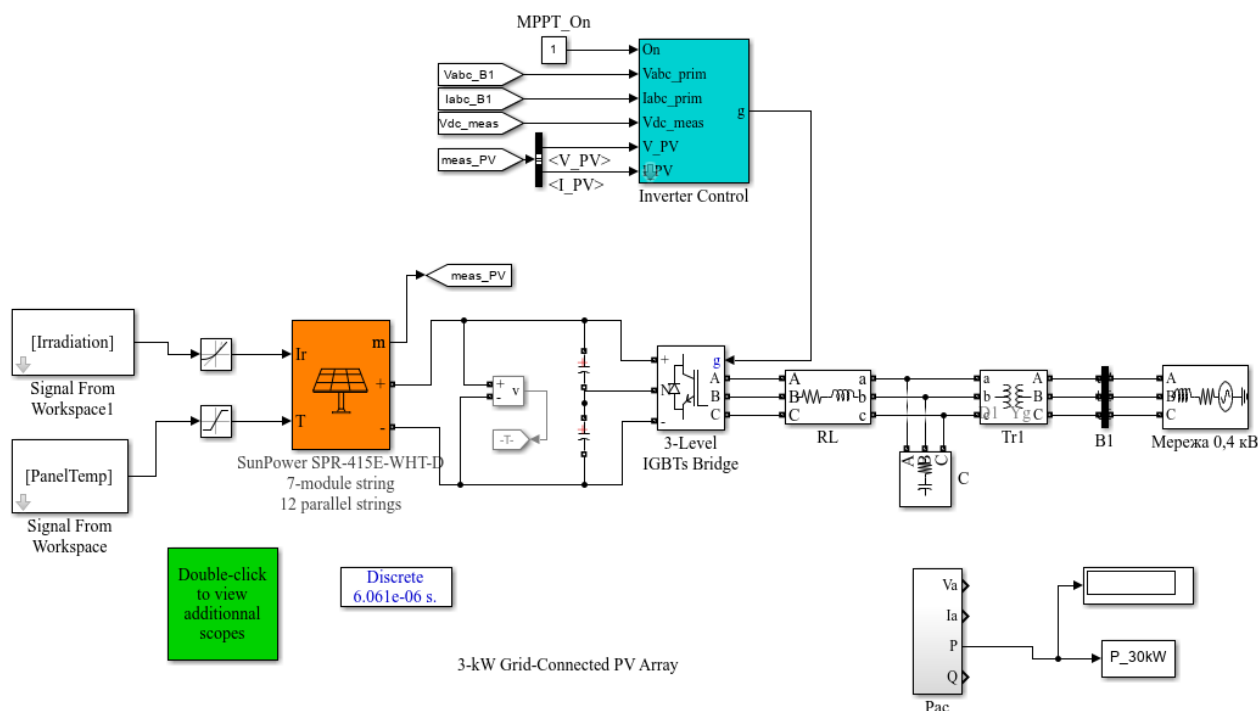


Рис. 4.10. Модель сонячної електростанції у Simulink [113]

Моделювання роботи СЕС та ВЕС відбувалось у два етапи. На першому етапі відбувається моделювання генерації СЕС та ВЕС окремо від основної

моделі. (рис. 4.10 та рис. 4.12.). Це дозволяє знизити необхідність у обчислювальних ресурсах та прискорити моделювання. Іншим аспектом є неможливість застосування деяких блоків MATLAB в режимі моделювання *Phasor*, який є оптимальним для дослідження саме режимів роботи мереж змінного струму, що не потребують дослідження складних перехідних процесів та високої частоти дискретизації. Вихідними даними для моделювання моделей з ВДЕ є дані щодо сонячної інсоляції та вітру відповідно [109, 114]. Результатом моделювання цих складових загальної моделі є вектори з даними генерації електроенергії, які були приведені до дискретності 1 година, що відповідає дискретності роботи основної моделі мікромережі.

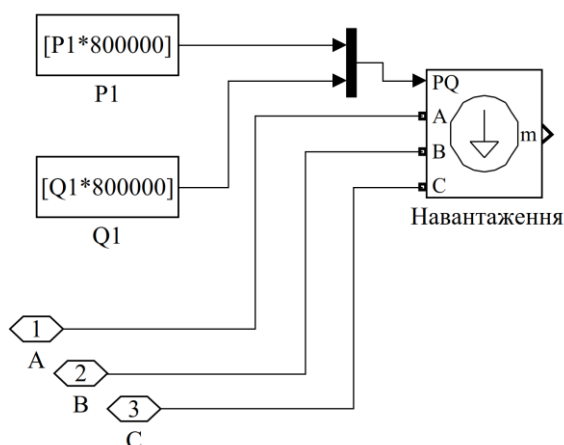


Рис. 4.11. Приклад блоку динамічного трифазного навантаження [113]

4.4. Розробка цифрової моделі вітрової електростанції

На рис. 4.3 зображено структурну модель електричної мережі, яка інтегрована з ВЕС через лінію електропередачі. Це джерело живлення забезпечує передачу електроенергії від ВЕС до мікромережі з можливістю приєднання СКЗ та іншого трифазного навантаження.

Вимірювальний блок відповідає за зняття значень фазних напруг (V_{abc}) та струмів (I_{abc}) на лінії. Отримані дані передаються до блоку розрахунку потужності, де здійснюється обчислення активної ($P_{wind04kV}$) та реактивної ($Q_{wind04kV}$) потужності на виході ВЕС. Результати розрахунків відображаються

у вигляді графіків генерації потужності, що дозволяє відслідковувати роботу ВЕС у реальному часі та зберігати результати до баз даних.

Блок моделювання вітру здійснює прийом швидкості вітру як вхідного параметра і відповідно до цього керує роботою ВЕС. Модель вітрогенератора підключена до мережі через трифазний інвертор, який відповідає за перетворення потужності.

На рис. 4.12 зображено модель сонячної електростанції (СЕС) з встановленою потужністю 3 кВт, яка інтегрована в електричну мережу з номінальною напругою 0,4 кВ.

Сонячні панелі в цій моделі представлені системою SunPower SPR-415E-WHT-D, яка складається з 3 послідовно з'єднаних модулів та 4 паралельних рядів. Вплив на генерацію електричної енергії здійснюють два ключові параметри: інсоляція та температура панелей.

Для забезпечення управління та контролю, напруга (V_{PV}) та струм (I_{PV}), що генеруються панелями, вимірюються і передаються на контролер інвертора. Контролер інвертора, у свою чергу, використовує ці дані для регулювання роботи інвертора, а також забезпечує оптимізацію роботи панелей через систему MPPT (Maximum Power Point Tracking).

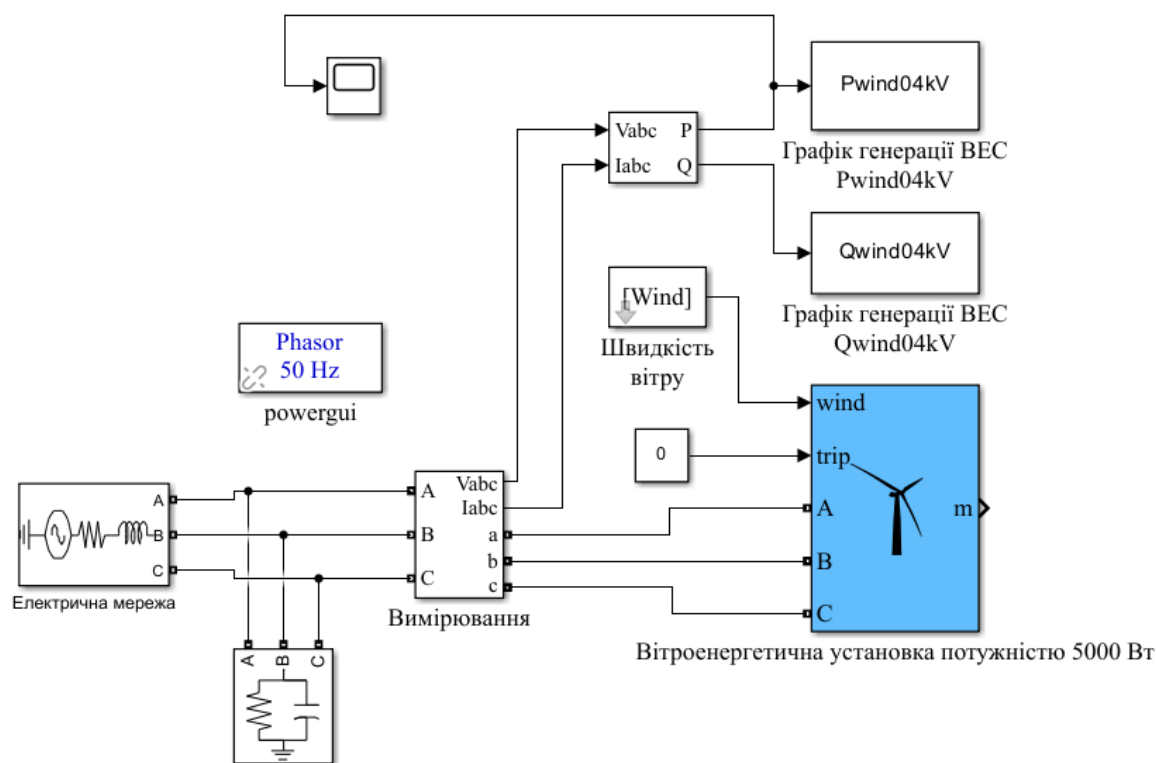


Рис. 4.12. Модель ВЕС потужністю 5 кВт [113]

Інвертор у цій системі виконує перетворення постійного струму (DC), що надходить від сонячних панелей, у змінний струм (AC), який далі передається до електричної мережі через лінію 0,4 кВ. Лінія 0,4 кВ служить для підключення інвертора до трифазної електричної мережі, забезпечуючи передачу енергії до мережі.

Вимірювальний блок здійснює моніторинг фазних напруг (V_{abc}) та струмів (I_{abc}) на виході інвертора, які потім використовуються для розрахунку активної (P_{3kW}) та реактивної (Q_{3kW}) потужності. Результати розрахунків генерованої потужності (P_{3kW} та Q_{3kW}) виводяться у вигляді графіків до баз даних, які далі використовуються для моделювання роботи мікромережі.

P, кВт

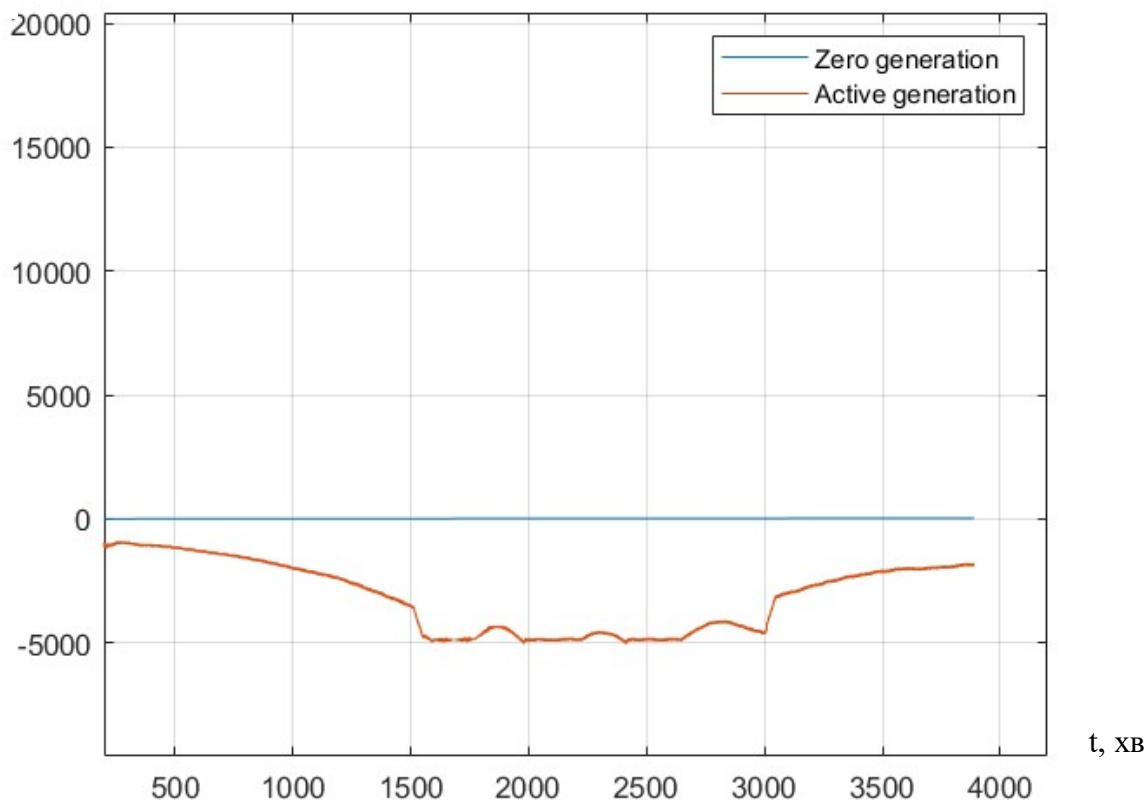


Рис. 4.13. Приклад змодельованого графіка генерації ВЕС потужністю 5 кВт

4.5. Моделювання рівнів генерації електроенергії для трьох географічних регіонів України у програмі HelioScore

Для достовірності результатів дослідження виконано моделювання режимів генерації електроенергії сонячної електростанції для трьох географічних регіонів України (Дніпропетровська, Одеська та Закарпатська області). Результати моделювання наведено у Додатку Г.

Вихідні дані моделювання:

Профіль діяльності: газотранспортна система України.

Кількість робочих годин в робочому дні: цілодобово.

Кількість робочих місяців у році: 12 місяців.

Згідно з технічним завданням повинно бути забезпечено автономну роботу наступних СКЗ потужністю 1000-2500 Вт.

У роботі пропонується використати систему накопичення електроенергії (наприклад літієву систему зберігання BOS-G).

Розраховуємо акумуляторну систему накопичення енергії під інвертор яка залежить від декількох факторів [85]:

- **Потужність інвертора $P_{\text{інв}}$** — максимальна потужність, яку інвертор може забезпечити. $P_{\text{інв}} = 5 \text{ кВт}$.
- **Час автономної роботи $T_{\text{авт}}$** — час, протягом якого система повинна працювати без заряджання ($T_{\text{авт}} = 24 \text{ год}$).
- **Напруга системи $V_{\text{системи}}$** — номінальна напруга інвертора та АКБ, $V_{\text{системи}} = 400 \text{ В}$.
- **ККД інвертора $\eta_{\text{інв}}$** — коефіцієнт корисної дії інвертора, $\eta_{\text{інв}} = 97,6\%$.
- **Рівень розряду АКБ DOD** — максимальний глибокий розряд акумулятора, що дозволений без значного зниження терміну служби $DOD = 80 \%$.

Розраховуємо необхідну енергію системи накопичення:

$$E_{\text{Storage}} = \frac{P_{\text{інв}} \cdot T_{\text{авт}}}{\eta_{\text{інв}}} \quad (4.10)$$

$$E_{\text{Storage}} = \frac{5000 \cdot 24}{0,976} = 123 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Розраховуємо необхідну ємність АКБ:

$$C_{\text{Storage}} = \frac{E_{\text{Storage}}}{U_{\text{інв}} \cdot DOD} \quad (4.11)$$

$$C_{\text{Storage}} = \frac{123000}{400 \cdot 0,8} = 385 \text{ А} \cdot \text{год}.$$

Для забезпечення автономної роботи протягом 24 годин при потужності інвертора 5000 Вт, необхідна акумуляторна батарея із ємністю 385 А·год при напрузі системи 400 В.

Енергоємність цієї батареї дорівнює: $E_{\text{Storage}} = 123 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Енергоємність розрахована для повної потужності інвертора для забезпечення автономної роботи протягом 24 годин, але виходячи з даних моделювання коефіцієнтів графіків електричних навантажень СКЗ для децентралізованої системи електропостачання коефіцієнт максимуму K_m не перевищує 1,64, тому потужність системи накопичення доцільно приймати на рівні 50% від розрахованої.

4.6. Розробка методики вибору параметрів комплексного джерела живлення СКЗ

Ефективність роботи сучасних систем катодного захисту підземних сталевих трубопроводів залежать від правильного вибору точок приєднання СКЗ до об'єкту, який захищається та можливістю реалізації певних рівнів захисного потенціалу при стохастичних умовах зміни опору ґрунту, зміни температури та вологості навколишнього середовища. Організація microgrid-системи катодного захисту потребує групового приєднання СКЗ до мережі зі складною топологією та забезпечити синхронізовану роботу активних станцій при різних умовах та віддаленості від «ведучої» станції. При цьому необхідно забезпечити якісні параметри електроживлення для коректної роботи системи керування станції [54].

Вимоги ДСТУ EN 50160:2014 та ГОСТ 13109-97 стосовно якості електроенергії в мережах 0,4 кВ показують, що на затискачах електроприймачів тривале значення коефіцієнтів несиметрії за зворотною та нульовою послідовністю не повинно перевищувати 2%. Значення коефіцієнта викривлення синусоїдальності у тривалому режимі роботи допускається не більше 8%. Проведений комплексний моніторинг параметрів електричних режимів СКЗ в умовах трьох регіонів України показав, що при живленні станцій від електричних мереж загального призначення виконання необхідних ГОСТ норми по несинусоїдності через різке збільшення рівня генерації вищих гармонік та інтергармонік практично неможливе. Ситуація значно погіршилася для

віддалених електричних мереж сільських територіальних громад під час воєнного стану, коли постачальнику послуг неможливо виконати умови якості напруги у системах обмеженої потужності. Рішення полягає в тому, щоб використовувати у якості джерел живлення СКЗ автономні електроенергетичні структури з поєднанням сонячної, вітрової генерації та системи накопичення енергії. Вибір параметрів даного комплексу та їх потужності має відбуватись з урахуванням реальних показників електричних навантажень, які створюються СКЗ, особливостей регіону та економічних критеріїв. Тому має вирішуватись задача пошуку оптимального рішення з поєднанням електричних та економічних кількох рівнопріоритетних критеріїв.

При аналізі складу комплексних структур електроживлення виникають завдання, що мають кілька розв'язків. Останні відносяться до розряду багатоваріантних та виникають, коли кількість змінних більша за кількість умов, що задають. При цьому потрібно знайти найкраще рішення серед потенційно можливих за прийнятими критеріями.

Основним завданням управління режимами СКЗ є безперебійне електропостачання, зважаючи на потенційні ризики порушення живлення під час воєнного стану. Тому головним критерієм даного ієрархічного рівня вважається мінімум загальних витрат, тобто витрат, що порівнюють з урахуванням фактору часу одноразові капіталовкладення та щорічні витрати (економічний критерій).

Однак специфіка рішення така, що запропоновані структури можуть містити кілька джерел розподіленої генерації та систему накопичення, призначення якої – забезпечувати надійне електропостачання у темний період доби. У випадку підвищених вимог до якості напруги на вводах у СКЗ необхідно передбачити додаткові капіталовкладення на установку пристроїв активної або пасивної фільтрації. За такої постановки проблеми до першого пріоритету належать економічні показники, показники надійності та якості електроенергії.

Визначимо основні критерії вибору оптимальної комбінації [112]:

- загальні витрати на спорудження електрогенеруючого комплексу - B_{Σ} ;
- коефіцієнт викривлення синусоїдальності напруги - K_U ;

- тривале відхилення напруги – δU ;
- показник короткочасного флікєру напруги – P_{st} ;
- показник довготривалого флікєру напруги – P_{lt} ;
- індекс *SAIDI*;
- індекс *SAIFI*.

Зміна коефіцієнтів, які відповідають за якість електроенергії має випадковий характер, оскільки їх значення залежать від вітрових сценаріїв та сонячної інсоляції. До параметрів, які залежать від режиму роботи СКЗ, належать індекси надійності. Розглядаючи багатокритеріальну задачу вибору, необхідно визначати співвідношення режимних параметрів за всіх можливих рішень.

Можливі оцінки при вирішенні багатоваріантної задачі – це такі можливі комбінації комплексного джерела живлення:

- Сонячна електростанція (СЕС) зі Storage-системою;
- Вітрова електростанція (ВЕС) зі Storage-системою;
- СЕС та ВЕС зі Storage-системою.

Для вирішення задачі необхідно скласти математичну модель, що адекватно відображає процеси, що відбуваються в системі.

Завдання прийняття рішення полягає у виборі серед безлічі можливих рішень (їх називають також варіантами, планами тощо) такого рішення, яке було б у певному сенсі найкращим (оптимальним) [115].

Кожне можливе рішення характеризується певним ступенем досягнення мети. Відповідно до цього має бути уявлення про переваги і недоліки рішень, на підставі якого одне рішення надається перевагу іншому. Оптимальне рішення – це таке, яке приймається на підставі пріоритетних оцінок і яке є кращим за інші можливі рішення. Ці переваги практично виражаються у різній формі, та його математична формалізація може скласти складну залежність.

На відміну від загальної задачі прийняття рішень у багатокритеріальній задачі, заздалегідь відома певна інформація про переваги прийняття рішення. Це відомості про те, що цільові функції необхідно для нашого дослідження мінімізувати. При цьому може бути відома та використана інша додаткова

інформація про переваги. Для опису переваг при прийнятті рішень використовують математичне поняття, яке називається відношенням [115].

Для знаходження основних критеріїв використовуються заздалегідь встановлені алгоритми, які відповідають кожному з можливих режимів роботи.

Із трьох можливих рішень необхідно вибрати найкраще. Примітно, що усім критеріїв необхідно мінімізувати [5, 6]. Отже, у даній роботі розглянута багатокритеріальна задача, в якій — сім критеріїв та три можливі рішення (оцінок). Алгоритм знаходження раціонального режиму побудуємо на основі теорем рішень оптимальних за Парето. Цей метод досить повно висвітлений у літературі, широко використовується для вирішення багатокритеріальних завдань і, що особливо важливо для даної роботи, може бути досить легко реалізований у програмному вигляді для проектування подібних систем [114]. Складемо таблицю критеріїв (табл. 4.1) та оцінок у загальному вигляді для розробки шляху пошуку рішень:

Таблиця 4.1 – Критерії оптимізації

Критерії	CEC+Storage $X^{(11)}$	BEC+Storage $X^{(12)}$	CEC+BEC+Storage $X^{(13)}$
B_{Σ}	X_{11}	X_{21}	X_{31}
K_U	X_{12}	X_{22}	X_{32}
δU	X_{13}	X_{23}	X_{33}
P_{st}	X_{14}	X_{24}	X_{34}
P_{lt}	X_{15}	X_{25}	X_{35}
$SAIDI$	X_{16}	X_{26}	X_{36}
$SAIFI$	X_{17}	X_{27}	X_{37}

У таблиці представлені три рішення, які відповідають трьом різним компоновкам автономного електрогенеруючого комплексу.

Критерії представлені у вигляді матриць-стовпців.

$$X^{(11)} = \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ X_{13} \\ X_{14} \\ X_{15} \\ X_{16} \\ X_{17} \end{bmatrix}, \quad X^{(12)} = \begin{bmatrix} X_{21} \\ X_{22} \\ X_{23} \\ X_{24} \\ X_{25} \\ X_{26} \\ X_{27} \end{bmatrix}, \quad X^{(13)} = \begin{bmatrix} X_{31} \\ X_{32} \\ X_{33} \\ X_{34} \\ X_{35} \\ X_{36} \\ X_{37} \end{bmatrix}. \quad (4.12)$$

Значення масивів заповнюються рішеннями своїх цільових функцій, які визначаються окремо кожному компоненту комплексу. Алгоритм знаходження безлічі рішень має конструктивний характер і складається з декількох етапів.

Визначимо основні позначення:

$$X = X_1 = \{x^{(11)}, x^{(12)}, \dots, x^{(1n_1)}\}. \quad (4.13)$$

Залежність (2) представляє безліч можливих рішень. Якщо $n_1 = 1$, то $X_1 = \{x^{(11)}\} = \text{opt}_{\succ} X$, що означає наявність єдиного можливого рішення. Тому стає зрозуміло, що з розгляду багатокритеріальних задач $n_1 > 1$ (у даній роботі $n_1 = 3$).

Перший крок алгоритму полягає у попарному порівнянні рішення $x^{(11)}$ з кожним з інших рішень. Якщо для деякого $i \in \{2, 3, \dots, n\}$ виконується співвідношення $x^{(11)} \succ x^{(1i)}$, то рішення $x^{(1i)}$ видаляють з множини X_1 – воно не може бути оптимальним. Інакше кажучи, коли $x^{(11)} \sim x^{(1i)}$, що означає нерозрізність цих рішень, або коли $x^{(1i)} \succ x^{(11)}$, то рішення зберігають. Після порівняння рішення $x^{(11)}$ також слід видалити з X_1 . При цьому, якщо ні для якого $i = 2, 3, \dots, n_1$ не виявилось виконанням умова $x^{(1i)} \succ x^{(11)}$, то рішення $x^{(11)}$ є оптимальним і воно запам'ятовується. Множина рішень, які залишились в результаті перебору, позначимо через $X_2 = \{x^{(21)}, x^{(22)}, \dots, x^{(2n_2)}\}$, при чому $n_2 < n_1$.

Другий крок аналогічний першому і полягає в попарному порівнянні рішення $x^{(21)}$ з кожним із рішень $x^{(22)}, x^{(23)}, \dots, x^{(2n_i)}$. Усі рішення $x^{(2i)}$, для яких

$x^{(21)} \succ x^{(2i)}$ з множини X_2 виключають. Далі видаляють рішення $x^{(21)}$. При цьому, якщо ні для якого $i = 2, 3, \dots, n_2$ не виявилось виконанням співвідношення $x^{(2i)} \succ x^{(21)}$, то $x^{(21)} \in opt_{\succ} X_2$. Крім того $x^{(21)} \in opt_{\succ} X_1$, і рішення $x^{(21)}$ запам'ятовується. Насправді, співвідношення $x^{(11)} \succ x^{(21)}$ не може існувати, оскільки рішення $x^{(21)}$ не було видалено з X_1 на першому кроці. Співвідношення $x^{(1i)} \succ x^{(21)}$ для $x^{(1i)} \in X_1/X_2, i \neq 1$, також не може бути виконано, оскільки $x^{(1i)} \succ x^{(21)}$, оператор " $\succ$ " транзитивний. Врахувавши $x^{(11)} \succ x^{(1i)}$ та $x^{(1i)} \succ x^{(21)}$, випливає, що $x^{(11)} \succ x^{(21)}$. Множину, яка залишилась після виключення позначають через $X_3 = \{x^{(31)}, x^{(32)}, \dots, x^{(3n_3)}\}$, $n_3 < n_2$. Якщо $X_3 \neq \emptyset$, то переходять до наступного кроку та закінчують перебір рішень.

Алгоритм такий, що, згідно з транзитивністю відношення " $\succ$ ", рішення $x^{(k1)}$, оптимальне на множині X_k , буде оптимальним і на множині X_{k-1} , $k = 2, 3, \dots, n$, а значить, і на вихідній множині X_1 .

Оскільки множина X_1 містить кінцеве число елементів, через кінцеве число кроків процедура закінчиться. Рішення, що зберігаються в пам'яті, утворюють непусту множину $opt_{\succ} X$, пошуком якої займався алгоритм.

Складність поданого алгоритму полягає у визначенні найменшого та найбільшого можливого числа попарних порівнянь, яке знадобиться для знаходження всієї множини $opt_{\succ} X$. Найменша кількість порівнянь $n_1 - 1$ реалізується при $x^{(11)} \succ x^{(1i)}$. У «довгому варіанті» доведеться порівнювати між собою всі можливі пари рішень, і тому максимальна кількість порівнянь дорівнює $n_1(n_1 - 1)/2$. Для даного дослідження $n_1 = 3$, отже, максимально можлива кількість операцій попарного порівняння дорівнює трьом.

4.7. Висновки по розділу 4

1. Введення певного рівня припущень та початкових умов для моделювання електротехнічної системи катодного захисту враховує комплексний склад електричного навантаження трансформаторної підстанції напругою 6/0,4 кВ, та можливості приєднання несиметричних та нелінійних вентильних перетворювачів (випрямлячів, перетворювачів частоти та інверторів).

2. Результати моделювання рівнів розподілу захисного потенціалу СКЗ за координатою відстані трубопроводу підтверджено даними експериментального моніторингу для кількох регіонів України, що дозволяє довести стохастичний характер зміни електричних навантажень на мережу та застосувати імовірнісні методи моделювання показників графіків електричних навантажень від СКЗ.

3. Цифрові моделі, створені у Matlab/Simulinc мають універсальний характер та дозволяють моделювати електричні режими СЕС та ВЕС як у автономному, так і у гібридному режимі роботи при обмежених або острівних режимах централізованої енергосистеми.

4. Моделювання режимів річної генерації електроенергії сонячною електростанцією потужністю 3 кВт для трьох регіонів України професійним програмним продуктом HeliioScore показав практично ідентичні результати, що важливо для обґрунтування потужності елементів електричної схеми СМГ та параметрів Storage-системи та розробки методики вибору параметрів комплексного джерела живлення.

5. Обґрунтовано методику вибору структури автономного електрогенеруючого комплексу з відновлюваними джерелами енергії для СКЗ. Обґрунтовані важливі енергетичні критерії прийняття рішення за показниками надійності, якості електроенергії та мінімуму загальних витрат, що відрізняється від існуючих можливістю обрати оптимальний варіант при компромісних взаємовиключних рішеннях за різних умов інсоляції, сили вітру та вартості логістичних перевезень для регіонів України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ

1. У дисертаційній роботі вирішена задача створення енергоефективних комплексів живлення станцій катодного захисту з відновлюваними джерелами енергії, що відрізняються від існуючих можливостями мінімізації потужності інверторів та визначення оптимального розподілу захисного потенціалу.

2. Розроблена уточнена математична та комп'ютерна модель електротехнічної системи «джерело живлення – вентильний перетворювач станції катодного захисту – трубопровід», яка відрізняється від існуючих можливістю врахування фізичних параметрів трубопроводу та ізоляції, гідрогеологічних особливостей ґрунтів у області прокладання трубопроводу, точкових неоднорідностей, викликаних полімерними вставками та можливість одночасної реалізації безпечних рівнів потенціалу групою активних станцій.

3. Реалізовано принципи децентралізації концепції Smart Grid для об'єктів газотранспортної критичної інфраструктури України, що дозволяє застосувати нові підходи до організації електропостачання СКЗ у важкодоступних, віддалених та постраждалих від воєнних дій регіонів. При цьому вибір структури та параметрів електрогенеруючих комплексів має врахувати, на відміну від існуючих методів, комплексні показники особливих режимів СКЗ, надійності та якості електропостачання в автономних електричних мережах.

4. Створено універсальний метод вибору технічних параметрів комплексу електрохімічного захисту та оптимального режиму роботи джерел генерації на основі даних моделювання зовнішнього електричного поля вздовж підземного трубопроводу, що виявили можливі межі зміни захисного потенціалу залежно від початкової фази напруги сусідніх станцій з урахуванням змінного характеру функції захисного потенціалу на відстані 0–3000 м. Це доводить необхідність та важливість врахування складних точкових неоднорідностей для досягнення максимальної надійності та енергетичної ефективності систем захисту.

5. Вперше реалізовано інноваційний підхід до моделювання та прогнозування електричних процесів в підземному трубопроводі, який розташований поблизу повітряної лінії електропередачі та знаходиться під впливом її електромагнітного поля з метою аналізу корозійних процесів в цьому трубопроводі. Комп'ютерна реалізація в пакеті Matlab/Simulink та COMSOL Multiphysics дозволяє дослідити довільні варіанти та геометричні розміри конструкцій ЛЕП та кути перетину траси трубопровода з повітряними лініями.

6. При моделюванні процесів у сталевому ізолюваному трубопроводі виявлено закономірності, що враховують амплітуду та фазу індукованого електричного поля в трубопроводі. Це дозволило обрати два критерії безпечного протікання корозії у металоконструкції з урахуванням змінного та постійного струмів. Досліджуючи усю множину початкових умов отримано зони з ділянками трубопроводу, де виконання обох критеріїв неможливе.

7. Досліджені спектральні склади первинних та вторинних струмів вентильних перетворювачів СКЗ при децентралізованих та гібридних схемах приєднання для забезпечення максимальної енергетичної ефективності при використанні електроенергії в перетвореному вигляді та переході до новітніх принципів побудови систем електропостачання. При цьому визначено рівні електромагнітної сумісності перетворювачів з мережею живлення при «послаблених» режимах централізованої енергосистеми.

8. Моделювання режимів річної генерації електроенергії від сонячних та вітрових електростанцій для різних регіонів України професійним програмним дозволило розробити методику вибору структури електрогенеруючого комплексу СКЗ за кількома критеріями, що важливо для обґрунтування потужності елементів електричної схеми та параметрів Storage-системи з урахуванням територіального розташування та транспортної логістики.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tkachenko M., Kosteniuk Y. State of the Gas Transportation System: Current Challenges and Risks. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy*. 2022. Т. 243. С. 29–40.
2. Бігу Ж. Газотранспортна система як складова критичної інфраструктури. *Південноукраїнський правничий часопис*. 2024. №2. С. 99–104.
<https://doi.org/10.32850/sulj.2024.2.16>.
3. *Нафтогаз*. URL: <https://utg.ua/utg/psg/description/>.
4. *Спорудження магістральних трубопроводів: підручник* / Я. Дорошенко. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. С. 563.
5. *Трубопровідний транспорт газу* / М. Ковалко, В. Грудз, Б. Михалків. Київ : АренаЕКО, 2002. С. 600.
6. *ТОВ "Оператор ГТС України"*. URL: <https://tsoua.com/news/ogtsu-zdijsnyv-remont-magistralnogo-gazogonu-urengoj-pomary-uzhgorod/>
7. Слатова О., Капцова Н. І. Визначення енергетично оптимальних режимів роботи поршневих газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях. *Комунальне господарство міст. Серія: «Економічні науки»*. 2018. Т. 139. С. 147–151. URL: <https://khges.kname.edu.ua/index.php/khges/article/view/5120>.
8. *Нафтогаз*. URL: <https://utg.ua/utg/media/chairman-column/2016/prezident-ukrtransgazu-pronspektuvav-kompresornu-stanczyu-v-dolin.html>.
9. *Трубопровідний транспорт газу: підручник* / О. Сусак, М. Касперович, М. Андріїшин. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2013. С. 345.
10. Кодекс 2:2021. Газорозподільчі системи. Рекомендації щодо проектування, будівництва, контролювання за будівництвом, введення та виведення з експлуатації газорозподільчих систем. Чинний від 01.09.2022. Київ, 2022. 92 с.
11. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. Чинний від 01.06.2020. Київ, 2019. 109 с.

12. *Нафтогаз*. URL: <https://utg.ua/utg/psg/underground-gas-storages/>
13. Romaniuk V. INTEGRATED APPROACH TO THE DIAGNOSTICS OF UKRAINE'S GAS TRANSMISSION SYSTEM. *Sworld-Us Conference Proceedings* : 1(usc31-00). 2025. С. 47–54. URL: <https://doi.org/10.30888/2709-2267.2025-31-00-003>.
14. Білецький В., Фик М. Основи транспорту природних вуглеводнів. Харків : НТУ ХПІ, 2019. 274 с.
15. Білецький В., Світлий Ю. Транспорт трубопровідний. Велика українська енциклопедія. URL: https://vue.gov.ua/%D0%A2%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82_%D1%82%D1%80%D1%83%D0%B1%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%B9.
16. Римські акведуки — шедеври інженерії. *Свідки Єгови*. URL: <https://www.jw.org/uk/бібліотека/журнали/g201411/акведуки-римська-інженерія/>.
17. Білявський М. Світові інфраструктурні проекти в галузі трубопровідного транспорту. *Трубопровідний транспорт*. 2013. Т. 6. С. 24–27. URL: <https://utg.ua/utg/media/tt-journal/2013/tt-84-6-11-2013.html>.
18. Проєктування в нафтогазовій інженерії : конспект лекцій / Л. Ширін та ін. Дніпро : НТУ ДП, 2018. 107 с.
19. ISO 13623:2017. Petroleum and natural gas industries — Pipeline transportation systems. — 3rd ed. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. 118 с.
20. ASME B31.8-2022. Gas transmission and distribution piping systems. — New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2022. 224 с.
21. ДСТУ 4219:2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. Чинний від 01.12.2003. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 72 с.
22. ДСТУ Б В.2.7-73-98. Труби поліетиленові для подачі горючих газів. Технічні умови. Чинний від 01.08.2001. Київ : Держбуд України, 1998. 43 с.

23. ДБН В.2.5-41:2009. Газопроводи з поліетиленових труб. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Чинний від 01.08.2010. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 149 с.
24. Штойко І. Методи розрахунку залишкового ресурсу труб магістральних нафтогазопроводів з урахуванням їх корозійно-водневої деградації : дис. ... канд. / Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. Львів, 2018. 175 с.
25. Вовк О., Зайченко С., Чвертко Є. Аналіз аварій на магістральних трубопроводах за період 2005 – 2015 рр. *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*. 2017. Т. 4. С. 113–118.
26. Gaurina-Međimurec, Novak N., Mavar, K., Simon, K., & Djerdji, F. Accidents in Oil and Gas Pipeline Transportation Systems. *Energies*, 18(15), 4056. <https://doi.org/10.3390/en18154056>.
27. Acton M. R., Acton O. J., Robinson C. A. Review of natural gas transmission pipeline incidents to derive ignition probabilities for risk assessment. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*. 2016.
28. 12th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970 – 2022) <https://www.egig.eu/reports>.
29. Rosman Muhammad Aizadt. TEMPERATURE PREDICTION IN HOT TAPPING PROCESS FOR HIGH PRESSURE PIPELINE. 2017. <https://www.semanticscholar.org/paper/TEMPERATURE-PREDICTION-IN-HOT-TAPPING-PROCESS-FOR-Rosman/2caa507e6aea062143dc61e01ecfab8e5fcadde1>.
30. Федорович І. Результати дослідження впливу чинників на аварійність лінійної частини газопроводів. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету. Економічні науки*. 2010. Т. 18. С. 326–331.
31. Omale J. I., Ohaeri E. G., Mostafijur K. M., Szpunar J. A., Fateh F., & Arafin, M. Through-Thickness Inhomogeneity of Texture, Microstructure and Mechanical Properties After Rough and Finish Rolling Treatments in Hot-Rolled API

5L X70 Pipeline Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. doi:10.1007/s11665-020-05280-0.

32. Qiao Q., Cheng G., Wu W., Li, Y., Huang H., & Wei Z. Failure analysis of corrosion at an inhomogeneous welded joint in a natural gas gathering pipeline considering the combined action of multiple factors. *Engineering Failure Analysis*. 2016. 64, pp. 126–143. doi:10.1016/j.engfailanal.2016.02.015.

33. Hakimian Soroosh, Bouzid Hakim & Hof, Lucas. Corrosion failures of flanged gasketed joints: A review. *Journal of Advanced Joining Processes*. 9. 2024. 100200. 10.1016/j.jajp.2024.100200.

34. Girgin S. & Krausmann E. Analysis of pipeline accidents induced by natural hazards (Brussels, Belgium, European Union, 2014).

35. Psyrras N., Kwon O., Gerasimidis S., & Sextos, A. Can a buried gas pipeline experience local buckling during earthquake ground shaking? *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2028. №116, pp. 511–529. doi:10.1016/j.soildyn.2018.10.027.

36. Інтернет видання Полтавщина <https://poltava.to/news/66817/>

37. Orazem M. Underground pipeline corrosion - 1st ed.. Woodhead Publishing, 2014. 328 c.

38. Hassan M., Hussein Farh, Mohamed El Amine Ben Seghier, Tarek Zayed. A comprehensive review of corrosion protection and control techniques for metallic pipelines. *Engineering Failure Analysis*. Volume 143. Part A. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106885>.

39. Liang H., Wu Y., Han B., Lin N., Wang J., Zhang Z., & Guo Y. Corrosion of Buried Pipelines by Stray Current in Electrified Railways: Mechanism, Influencing Factors and Protection. *Applied Sciences*. 15(1). 264. 2025. <https://doi.org/10.3390/app15010264>.

40. Chen X., Su Y., Wang H., & Zhou Q. Analysis of Corrosion Behavior and Cathodic Protection of Steel Pipeline Under Alternating Current Interference. *Coatings*. 2025. 15(4). 454. <https://doi.org/10.3390/coatings15040454>.

41. Lv X., Wang C., Liu J., Sand W., Nabuk Etim I.-I., Zhang Y., Xu A., Duan J., & Zhang R. The Microbiologically Influenced Corrosion and Protection of Pipelines: A Detailed Review. *Materials*, 2024. 17(20), 4996. <https://doi.org/10.3390/ma17204996>.
42. Ueli M. Angst. A Critical Review of the Science and Engineering of Cathodic Protection of Steel in Soil and Concrete. *CORROSION* 1 December 2019. 75 (12): 1420–1433. <https://doi.org/10.5006/3355>.
43. AL-ABKAL Fatemah. Failure analysis of corroded underground pipeline. Conference: *Civil and Environmental Engineering for Resilient, Smart and Sustainable Solutions*. 2025. pp. 539-548. 10.21741/9781644903414-59.
44. Allen J., Bard Larry, Faulkner R. ELECTROCHEMICAL METHODS Fundamentals and Applications. 3rd ed. 2022. 1104 p.
45. Liang H., Wu Y., Han B., Lin N., Wang J., Zhang Z., & Guo Y. Corrosion of Buried Pipelines by Stray Current in Electrified Railways: Mechanism, Influencing Factors, and Protection. *Applied Sciences*. 2025. 15(1), 264. <https://doi.org/10.3390/app15010264>.
46. Marshall E. Parker, Edward G. Peattie. Pipeline Corrosion and Cathodic Protection. *Gulf Professional Publishing*. 1988. 166 p. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06941-7>.
47. Alireza Bahadori. Cathodic Corrosion Protection Systems. *Gulf Professional Publishing*. 2014. 492 p.
48. Електрична схема катодного захисту URL: <https://faculty.kfupm.edu.sa/me/hussaini/corrosion%20engineering/05.03.04.htm>.
49. Катодний захист як елемент електромережі URL: <https://www.dairyland.com/knowledge-base/improve-your-cp-system-performance-without-adding-another-anode-bed/>.
50. Стратегія низьковуглецевого розвитку. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf.

51. Концепция «зеленого» энергетического перехода Украины до 2050 року. URL:http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article;jsessionid=12D73B364595AE9BC3059133CE27EA7A.app1?art_id=245434883&cat_id=35109.

52. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг №308 від 14.03.2018 «Про затвердження правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку».

53. Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг №307 від 14.03.2018 «Про затвердження Правил ринку».

54. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник. Г.Г. Півняк, О.В. Кириленко, О.О. Азюковський, Ю.А. Папаїка, І.М. Луценко ; за ред. Г.Г. Півняка. 6-те вид. Дніпро. НТУ «ДП». 2024. 710 с.

55. Стійкість режиму енергосистеми з розподіленою генерацією: навчальний посібник. За ред. Г.Г. Півняка. Дніпро. Грані. 2024. 243 с.

56. Трансформація енергетики України в «інтелектуальну» ресурсно незалежну систему: навч. посіб. За ред. Г.Г. Півняка. Дніпро. НТУ «ДП». 2023. 56 с.

57. Папаїка Ю.А., Півняк Г.Г., Жежелев І.В. Енергетична ефективність систем електропостачання. Дніпро. НТУ «ДП». 2018. 149 с.

58. Electromagnetic compatibility in electric power systems: textbook for institutions of higher education. Zhezhelenko I.V., Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Saenko Yu.L, 2 nd edition. Dnipro. National Mining University. 2013. 239 p.

59. Transients in Electric Power Supply Systems. Textbook for institutions of higher education: under the editorship of G.G. Pivnyak / G.G. Pivnyak, I.V. Zhezhelenko, Y.A. Papaika; Ministry of Education and Science of Ukrainian, National Mining University – 5-th edition, revised and expanded: Translation from Ukrainian. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2016. 382 p.

60. Математичне моделювання електромагнітних процесів передачі енергії: навч. посібник. Півняк Г.Г. та ін. Дніпропетровськ. НГУ. 2003. 145 с.

61. Основи вітроенергетики: підручник. Півняк Г.Г. та ін. М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Дніпро. НГУ. 2015. 335 с.
62. Сенсори і сенсорні системи: підручник у 2-х т. Н. Нойбергер, Г.Г. Півняк, В.В. Ткачов; М-во освіти і науки України. НТУ «Дніпровська політехніка». Дніпро. НТУ «ДП». 2021. Т.1. 199 с.
63. Сенсори і сенсорні системи: підручник у 2-х т. Н. Нойбергер, Г.Г. Півняк, В.В. Ткачов; М-во освіти і науки України. НТУ «Дніпровська політехніка». Дніпро. НТУ «ДП». 2021. Т.2. 208 с.
64. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії: монографія / А.К. Шидловський, А.А. Долінський, І.М. Карп, О.В. Кириленко, Г.Г. Півняк та ін. Київ. Українські енциклопедичні знання. 2007. 560 с.
65. Sustainable Development of Industrial Regions. *Advanced Engineering Forum. Monograph.* G. Pivnyak, R. Dychkovskiy, O. Vagonova. *Trans Tech Publication Ltd.* Zurich. Switzerland. 2017. № 22. 194 p.
66. Реактивна потужність в електричних мережах: монографія. І.В. Жежеленко, Г.Г. Півняк, Г.Г. Трофімов, Ю.А. Папаїка. М-во освіти і науки України. Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП». 2020. 72 с.
67. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє топологічне забезпечення. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 6. С. 44-50.
68. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних енергетичних мереж та їхні перспективи в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 52-50.
69. Кириленко О.В., Якименко Ю.І., Жуйков В.Я., Денисюк С.П. Перетворювачі параметрів електроенергії в Smart-системах енергетики. *Пр. Інституту електродинаміки НАН України. Спецвипуск (Мат. І Міжнар. наук.-техн. конф. «Інтелектуальні енергетичні системи - ІЕС'10»)*. 2010. С. 17-23.
70. Промислова електроніка: Моделювання пристроїв силової електроніки в MATLAB Simulink. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для

здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «системи електропостачання» / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янка КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019. 95 с.

71. Lubna Mariam, Malabika Basu and Michael F. Conlon A Review of Existing Microgrid Architectures. *Journal of Engineering*. vol. 2013. Article ID 937614.

72. Кириченко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Тран І.В. Проблеми інтеграції відновлювальних джерел електроенергії в «слабкі» електричні мережі. *Технічна електродинаміка*. 2012. №3. С. 25-26.

73. Стогній Б.С., Сопель М.Ф. Основи моніторингу в електроенергетиці Про поняття моніторингу. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 62-68.

74. Ромашко В.Я., Вербицький Є.В., Киричик Є.І. Аналіз втрат енергії в системі відбору максимальної потужності сонячної батареї. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 55-57.

75. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. Шидловський А.К., Новський В.О., Жаркін А.Ф. Київ. Інститут електродинаміки. 2013. 378 с.

76. Системи електропостачання із джерелами розподіленої генерації. Жаркін А.Ф., Денисюк С.П., Попов В.А. Київ. НПП «Видавництво «Наукова думка» НАН України». 2017. 232 с.

77. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Малахатка Д.О. Комплексне покращення якості електроенергії та забезпечення електробезпеки в локальних системах електропостачання при застосуванні гібридних фільтрокомпенсуючих перетворювачів. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 69-77.

78. Жаркін А.Ф., Попов В.А., Ткаченко В.В. Оптимальне секціонування повітряних розподільчих мереж в умовах застосування розподіленої генерації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 61-69.

79. Нормативно-правове регулювання якості напруги в електричних мережах з джерелами розосередженої генерації. Жаркін А.Ф., Палачов С.О., Новський В.О. Київ. Інститут електродинаміки НАН України. 2018. 161 с.

80. Волков І.В., В.П. Стяжкін, П.П. Подейко. Пригнічення гармонік струму живлення потужних однофазних навантажень. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 36-42.

81. Волков І.В., Каршенів Д.П. Універсальні математичні моделі імпульсних випрямлячів із змішаним RLC-навантаженням у ланцюги постійного струму. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 4. С. 30-36.

82. Волков І.В., Подольний С.В. Імпульсний резонансний перетворювач постійної напруги з дозованим відбором та передачею енергії. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 1. С. 10-16.

83. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж. Проект. AF-Mercados EMI; Національна комісія з регулювання електроенергетики України; European Bank; EXERGIA; RAMBOLL. 2011.

84. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії. Шидловський А.К. та ін. Київ. Українські енциклопедичні знання. 2007. 560 с.

85. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник. С.О. Кудря. Київ. НТУУ "КПІ". 2012. 489 с.

86. Power engineering and information technologies in technical objects control: 2016 annual proceedings / Edited By Genadiy Pivnyak, Olexandr Beshta, Mykhaylo Alekseyev. *CRC Press Taylor & Francis Group*, 2020. 294 p. ISBN 978-0-367-73640-8.

87. Блінов І., Олефір Д., Парус Є. Модель оптимального використання ресурсів гідроелектростанцій на ринку електричної енергії. *Технічна Електродинаміка*. 2022. № 4. С. 42-47.
<https://doi.org/10.15407/techned2022.04.042>.

88. Кириленко О.В., Блінов І.В., Парус Є.В., Трач І.В. Оцінка ефективності використання систем накопичення електроенергії в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 44-54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.044>.

89. Блінов І.В., Трач І.В., Парус Є.В., Дерев'янка Д.Г., Хоменко В.М. Регулювання напруги та реактивної потужності в розподільних електричних мережах шляхом використання розосереджених відновлюваних джерел енергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 58-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>.
90. Кириленко О.В., Блінов І.В., Денисюк С.П., Зайцев Є.О., Васильченко В.І. Впровадження базових міжнародних стандартів Smart Grid в Україні: Сучасний стан справ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 4. С. 44–53.
91. Танкевич С.Є., Блінов І.В., Кириленко В.В. Україна та світ: нормативне забезпечення інтелектуальних електроенергетичних систем за концепцією Smart Grid. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2014. № 4 (89). С. 38-44.
92. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник. І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Саенко. Д. Нац. гірнич. ун-т. 2009. 319 с.
93. Pivnyak G., Zhezhelenko I., Papaika Y. Normalization of voltage quality as the way to ensure energy saving in power supply systems. *CRC Press/Balkema – Taylor & Francis Group: Power Engineering Control and Information Technologies in Geotechnical Systems*. Leiden, The Netherlands. 2013 annual publication. P. 11-18.
94. Папаїка Ю.А. Жежеленко І.В., Лисенко О.Г. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2018. № 100. С. 25-30.
95. Гриб О. Г. , Сиротин Ю. О., Гапон Д. А., Дяченко А. В., Иерусалимова Т. С., Бортніков О. В. Аналіз споживання електроенергії з контролем якості в розподільних мережах. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки*. Харків. ХНТУГС. 2015. С. 9–10.

96. Жежеленко І.В., Папаїка Ю.А. Лисенко О.Г., Родна К.С. Застосування індивідуальних графіків вищих гармонік в задачах електромагнітної сумісності та енергоефективності гірничих підприємств. *Гірнича електромеханіка та автоматика*. 2019. № 101. С. 3-7.

97. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. Інститут електродинаміки НАН України. Київ. Ін-т електродинаміки НАН України. 2016. 400 с.

98. Janik P. Photovoltaic Power Generation Assessment Based on Advanced Signal Processing and Optimisation Techniques. Wroclaw: Publishing house of Wroclaw University of Science and Technology Wroclaw. 2014.

99. Janik P., Kosobudzki G., Schwarz. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system. *Higher Education Press and Springer-Verlag* .Berlin Heidelberg. 2017. DOI 10.1007/s11708-017-0469-3.

100. Standard IEC61000-2-4–2002. Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 2-4: environment-compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.

101. Standard IEC61000-2-12–2002. Electromagnetic compatibility (EMC)–Part 2-12: environment-compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems.

102. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник. Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. Д. Національний гірничий університет. 2009. 376 с.

103. Kowalski Z. Jakosc energii elektrycznej. Lodz. 2007. 620 p.

104. Papaika Y. Lysenko O., Kosobudzki G. Power Quality and Resonances in Power Supply Systems with non-sinusoidal Loads. *Advanced engineering forum*. Trans Tech Publication. Switzerland. 2017. P. 143-150.

105. Quality of electric power supply systems in Polish Transmission Systems. Overview of domestic and international contracts and requirements for

system connectivity and transmission services. University of Mining and Metallurgy (AGH) Krakow. 2002.

106. Gryb O.G. Gapon D. A., Borodin D.V., Diachenko A.V., Ierusalimova T.S. Monitoring of electrical energy on the traction substation input. *Електротехніка і електромеханіка*. Харків. НТУ «ХПІ». 2015. № 5. С. 61–65.

107. Kim T., Wang A., Powers E.J., Grady W.M., Arapostathis A. Detection of Flicker Caused by High-frequency Interharmonics. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.* Warsaw. Poland, 5 p. May 1-3. 2007.

108. Santoso S. & Hansen D. Practical solution for broadband and timevarying interharmonic problems. *IEEE Trans. Power*. vol. 22. no. 2. pp. 1228–1234.

109. Smolenski R. Conducted electromagnetic interference (EMI) in Smart Grids. London. Springer. 2017, 198 p.

110. Papaika Yu. Pivnyak G., Zhezhelenko I. Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise power supply. *Науковий вісник НГУ*. 2016. № 5. С. 62-66.

111. Carbone R., Rosa F. D., Langella R. and Testa A. A new approach to model AC/DC/AC conversion systems. *IEEE Trans. Power Del.* vol. 20, no. 3. pp. 2227–2234, Jul. 2005.

112. Папаїка Ю.А. Рогоза М.В., Лисенко О.Г. Проблеми електромагнітної сумісності в задачах надійності та ефективності електропостачання з урахуванням тенденцій концепції Smart Grid. *Вісник Кременчуцького Національного Університету імені Михайла Остроградського*. 2018. випуск 4/2018(111). С. 16-22.

113. MATLAB Documentation — mathworks.com.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>

114. D.R. Kiran. Total Quality Management. 2017.

115. Байда Є. І. Метод Монте-Карло: навчально-методичний посібник Харків. НТУ «ХПІ». 2024. 74 с.

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Публікації у фахових виданнях:

1. Азюковський О., Бабенко М. (2025). ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СТАНЦІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ТРУБОПРОВОДІВ НА ОСНОВІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ. *Електротехнічні та інформаційні системи*. 108, 3-7. <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-108-1>.
 2. Расцветаев В.О., Азюковський О.О., Пащенко О.А., Яворська В.В., Бабенко М.В. (2025). Неруйнівні методи оцінки впливу газогідратів на міцність магістральних трубопроводів. *Технічна інженерія*, 2(96), 322-330. [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-322-330](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-322-330).
 3. Расцветаев В.О., Азюковський О.О., Пащенко О.А., Бабенко М.В., Васильченко Д.О. (2025). Термодинамічні та кінетичні аспекти формування газогідратів у магістральних трубопроводах. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2(57), 7-14. <https://jdmi.donntu.edu.ua/arkhiv-zbirky/>
- Наукові праці у виданнях іноземних держав або виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз*
4. Aziukovskyi O.O., Papaika Y.A., Gorev V.N., Babenko N.V. (2024). REGULATIONS OF THE FORMATION OF PROTECTIVE POTENTIAL OF UNDERGROUND STEEL PIPELINES UNDER CONDITIONS OF HETEROGENEOUS ENVIRONMENT. *Technical Electrodynamics*. 2024(2), pp. 23–29. (Scopus). <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.023>.
 5. Aziukovskyi O.O., Papaika Yu.A., Babenko M.V. (2024). CONSIDERATION OF THE VARIABLE STORAGE POTENTIAL OF UNDERGROUND STEEL PIPELINES IN THE DEVELOPMENT OF ELECTRICAL COMPLEXES FOR THEIR PROTECTION AGAINST

ELECTROCHEMICAL CORROSION. Technical Electrodynamics. 2024(5), pp. 85–93. (Scopus). <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.085>.

6. Aziukovskyi O., Papaika Yu., Podoltsev O., Babenko M., Shykhov S. (2024). SIMULATION OF THE OPERATION MODES OF THE CATODIC PROTECTION COMPLEX OF PIPELINES IN THE APPROACH OF OVERHEAD POWER LINES. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2024, (6). pp. 73–78. (Scopus). <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/073>.

7. Aziukovskyi O.O., Pivniak H.H., Babenko M.V., Shykhov S.K. (2025). Influence of the protective potential distribution of a steel underground pipeline on electrochemical corrosion processes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2025, (2). pp. 155–163. (Scopus). <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-2/155>.

Праці апробаційного характеру

8. Азюковський О.О., Папаїка Ю.А., Бабенко М.В. (2024). Змінна складова захисного потенціалу від електрохімічної корозії підземних сталевих трубопроводів. XVIII міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки – 2024» (м. Київ, 25-27 червня 2024 року).

9. Aziukovskyi, O., Shykhov, S., & Babenko, M. (2025). Optimization of Hot Blast Stove Emissions Through Automated Control System Configuration. *Physical and Chemical Geotechnologies*, 9(1), 091002. <https://doi.org/10.15407/pcgt.25.02>.

Патенти на корисну модель

10. Расцветаев В. О., Азюковський, О.О., Коровяка, Є.А., Ігнатов А.О., Пащенко О. А., Хоменко В.Л., Бабенко М.В., Шихов С.К. (2025). Пристрій для регулювання температурного режиму в трубопроводах. Патент на корисну модель № 161729, Україна.

ДОДАТОК Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор Національного технічного
університету

«Дніпровська політехніка»

_____ д.т.н., професор Павличенко А.В.

«__» _____ 2026 р.

ДОВІДКА

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи

Бабенка Миколи Володимировича на тему:

***«Енергоефективна електротехнічна система катодного захисту
підземного сталевих трубопроводу»***

Ми, що нижче підписалися, підтверджуємо впровадження результатів дисертаційної роботи «Енергоефективна електротехнічна система катодного захисту підземного сталевих трубопроводу» здобувача Бабенка Миколи Володимировича в навчальний процес на кафедрі електроенергетики та електропривода за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» трьох освітніх рівнів – бакалавр, магістр, доктор філософії Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» у наступних освітніх компонентах:

- у лекційному курсі «Монтаж та експлуатація електрообладнання» використано методiku вибору параметрів комплексного джерела живлення для станцій катодного захисту підземних сталевих трубопроводів, запропонована Бабенком М.В;

- у лекційному курсі «Інтелектуальне електропостачання Smart Grid у системах розподіленої генерації» під час розгляду усталених та перехідних режимів роботи електричних мереж і систем використовуються запропоновані Бабенком М.В. підходи врахування впливу відновлюваних джерел енергії на режим роботи централізованої енергосистеми;

- у лекційному курсі «Автоматизоване проектування електротехнічних та електромеханічних комплексів» використовується рівень припущень та початкових умов для проектування автономних електрогенеруючих комплексів з відновлюваними джерелами енергії;

- у лекційному курсі «Наукові та інноваційні задачі електромагнітної сумісності» використано удосконалену Бабенком М.В. математичну модель визначення рівнів вищих гармонік при роботі вентильних перетворювачів станцій катодного захисту.

Завідувач кафедри

електроенергетики, д.т.н., професор



Юрій ПАПАЇКА

Завідувач кафедри

електропривода, к.т.н., доцент



Сергій ХУДОЛІЙ



**АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОД ФЕРОСПЛАВІВ»**

вул. Електрометалургів, 310, м. Нікополь, Дніпропетровська область, Україна, 53200
тел.: (0566) 654-236, (0566) 696-123, (0566) 630-802(803)
e-mail: 01@nzf.com.ua, www.nzf.com.ua, код згідно з ЄДРПОУ 00186520

Від 21.01.26 № 27-4005

На № _____ від _____

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. головного енергетика

АТ «Нікопольський завод феросплавів»

Малишко М.М.

«21» січня 2026 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
Бабенка Миколи Володимировича на тему:
«Енергоефективна електротехнічна система катодного захисту підземного
сталевих трубопроводу»**

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи Бабенка М.В. були впроваджені у виробничу діяльність АТ «Нікопольський завод феросплавів», зокрема при плануванні розвитку систем електропостачання та інтеграції відновлюваних джерел енергії для надійного електропостачання об'єктів критичної інфраструктури:

- у роботі розроблено цікавий підхід до децентралізованого живлення станцій катодного захисту підземних сталевих трубопроводів. Це дозволило орієнтувати системи захисту підземних металоконструкцій АТ «Нікопольський завод феросплавів» на активні системи захисту з вентильними перетворювачами;
- розроблені у дисертаційній роботі аналітичні моделі визначення рівнів захисного потенціалу дозволяють врахувати геометричні розміри трубопроводів та склад ґрунтів, що особливо важливо для різноманітних умов прокладання та наявності джерел блукаючих струмів. Ця проблема частково вирішена на АТ «Нікопольський завод феросплавів» завдяки результатам даної дисертаційної роботи.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Бабенка М.В. дозволило підвищити надійність та енергетичну ефективність внутрішньозаводських систем електропостачання та систем живлення станцій катодного захисту.

Від НТУ «ДП»:

Професор, завідувач кафедри електропривода

_____ **Сергій ХУДОЛІЙ**

Аспірант кафедри електропривода

_____ **Микола БАБЕНКО**

026486



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

«KITVIS»

02095, м. Київ, вул. Княжий Затон, буд. №16-В, офіс 66;

тел.: +38(044) 570-32-62;

тел.моб.: +38(050) 570-32-61;

e-mail: kitvis@ukr.net

КОМПЛЕКСНІ ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ

Вих. № 3748-ВК від 17.10.2025р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «KITVIS»

Оришин О.М.

«17» жовтня 2025р.

про впровадження результатів дисертаційної роботи

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Бабенка Миколи Володимировича

«ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СИСТЕМА КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ПІДЗЕМНОГО СТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДА»

Розроблені в дисертаційній роботі Бабенка М.В. розглядається електротехнічна система катодного захисту, орієнтована на відновлювані джерела енергії для живлення розподіленої системи станцій катодного захисту (СКЗ), що надає нові можливості електропостачання в умовах важкодоступних, віддалених та малонаселених регіонів країни. У роботі розроблено нові підходи та отримали розвиток існуючі щодо розрахунку та конфігуруванню роботи micro Smart Grid системи на основі гібридних альтернативних джерел, що дозволяє вирішувати питання автономності, стабілізації рівня захисного потенціалу у динамічних режимах з врахуванням впливу блукаючих струмів та наявності полімерних поздовжніх вставок на трубопроводах, що відрізняється від існуючих методик розподілу СКЗ та їх живлення від централізованих систем електропостачання.

Директор



Олександр ОРИШИН

ДОДАТОК В

Результати моніторингу рівнів захисного потенціалу

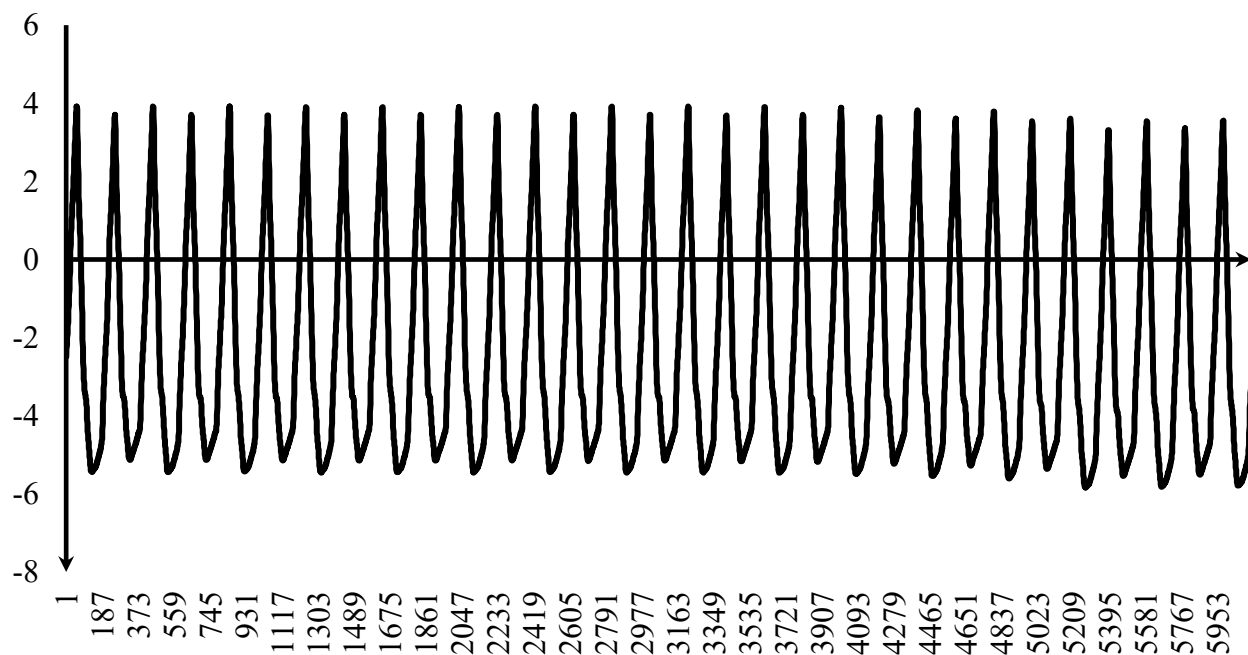


Рис. Д.В.1. Потенціал підземного сталевого трубопроводу, сформований СКЗ з однофазним діодним випрямлячем

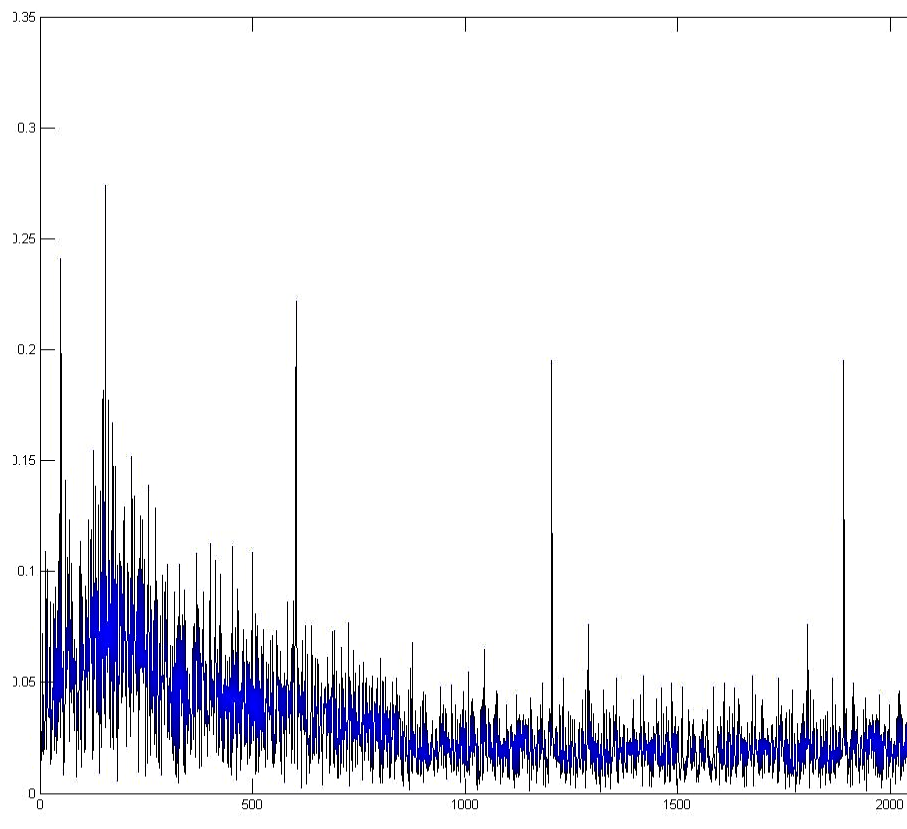


Рис. Д.В.2. Потенціал трубопроводу, що сформований СКЗ в режимі низькочастотних комутацій силових ключів та малої вихідної напруги



Рис. Д.В.3. Різниця потенціалів на відстані 10 метрів від залізничної колії



Рис. Д.В.4. Потенціал трубопроводу в зоні дії струмів, що блукають

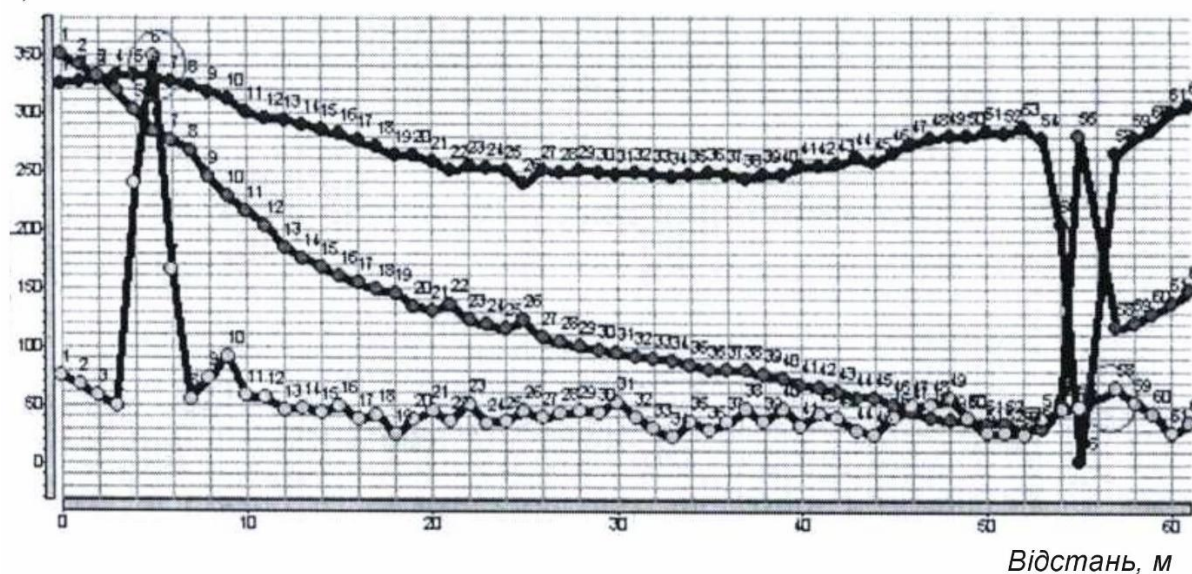
$U, \text{ мВ}$ 

Рис. Д.В.5. Фіксація місць пошкодження захисної ізоляції

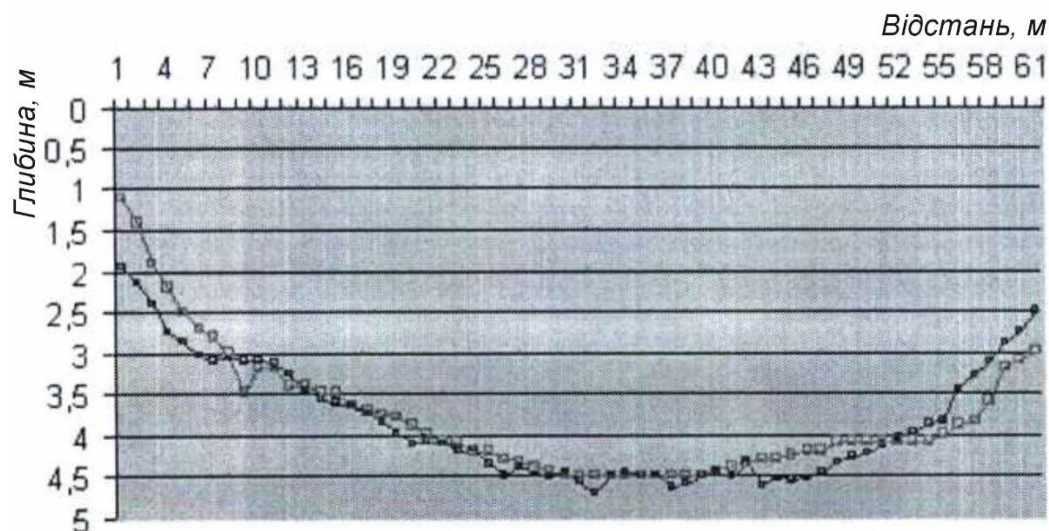


Рис. Д.В.6. Виміри глибини водойми з човна до осі газопроводу та до поверхні дна

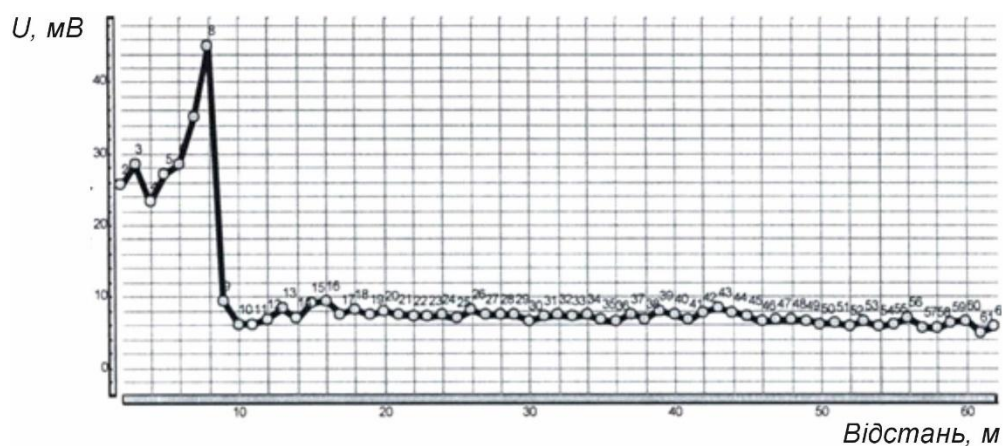
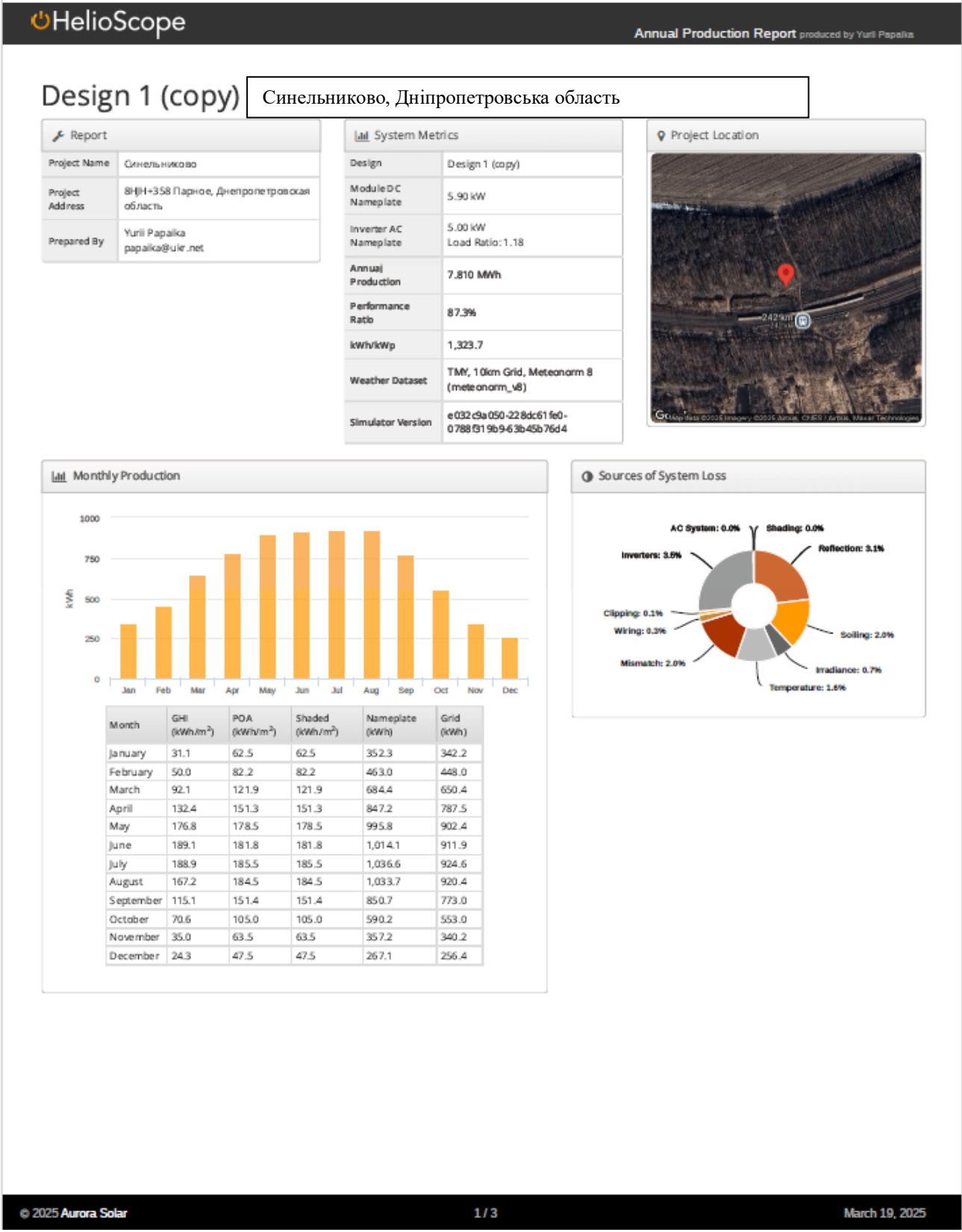


Рис. Д.В.7. Залежність потенціалу від відстані (електрична антена трасошукача «Спрут-17»)

ДОДАТОК Г

Моделювання річної генерації електроенергії в умовах трьох регіонів України



Annual Production			
	Description	Output	% Delta
Irradiance (kWh/m²)	Annual Global Horizontal Irradiance	1,272.8	
	POA Irradiance	1,515.5	19.1%
	Shaded Irradiance	1,515.5	0.0%
	Irradiance after Reflection	1,458.7	-3.1%
	Irradiance after Soiling	1,439.4	-2.0%
	Total Collector Irradiance	1,439.4	0.0%
Energy (kWh)	Nameplate	8,492.3	
	Output at Irradiance Levels	8,433.0	-0.7%
	Output at Cell Temperature Derate	8,297.8	-1.6%
	Output After Mismatch	8,132.4	-2.0%
	Optimal DC Output	8,108.8	-0.3%
	Constrained DC Output	8,097.0	-0.1%
	Inverter Output	7,813.1	-3.5%
	Energy to Grid	7,809.9	0.0%
	Temperature Metrics		
	Avg. Operating Ambient Temp	13.2 °C	
	Avg. Operating Cell Temp	20.7 °C	
Simulation Metrics			
	Operating Hours	4646	
	Solved Hours	4646	

Condition Set			
Description	Condition Set 1		
Weather Dataset	TMY, 10km Grid, Meteonorm 8 (meteonorm_v8)		
Solar Angle Location	Meteo Lat/Lng		
Transposition Model	Perez Model		
Temperature Model	Sandia Model		
Temperature Model Parameters	Rack Type	a	b
	Fixed Tilt	-3.56	-0.075
	Flush Mount	-2.81	-0.0455
	East-West	-3.56	-0.075
	Carport	-3.56	-0.075
Soiling (%)	J	F	M
	2	2	2
Irradiation Variance			
Cell Temperature Spread			
Module Binning Range			
AC System Derate			
Module & Component Characterizations	Type	Component	Characterization
	Module	JKM990N-72HL4-80V (Jinko Solar)	Spec Sheet Characterization, PAN
	Inverter	SUN-SKSG0xLP1-EU (Deye)	Spec Sheet

Components		
Component	Name	Count
Inverters	SUN-SKSG0xLP1-EU (Deye)	1 (6.00 kW)
AC Home Runs	6 mm2 (Copper)	1 (80.9 m)
Home Runs	12 AWG (Copper)	1 (3.4 m)
Combiners	2 Input Combiner	1
Strings	10 AWG (Copper)	2 (62.7 m)
Module	Jinko Solar, JKM990N-72HL4-80V (590W)	10 (5.90 kW)

Wiring Zones			
Description	Combiner Poles	String Size	Stringing Strategy
Wiring Zone	12	3-9	Along Racking

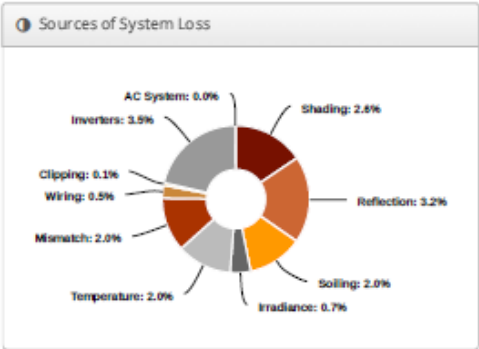
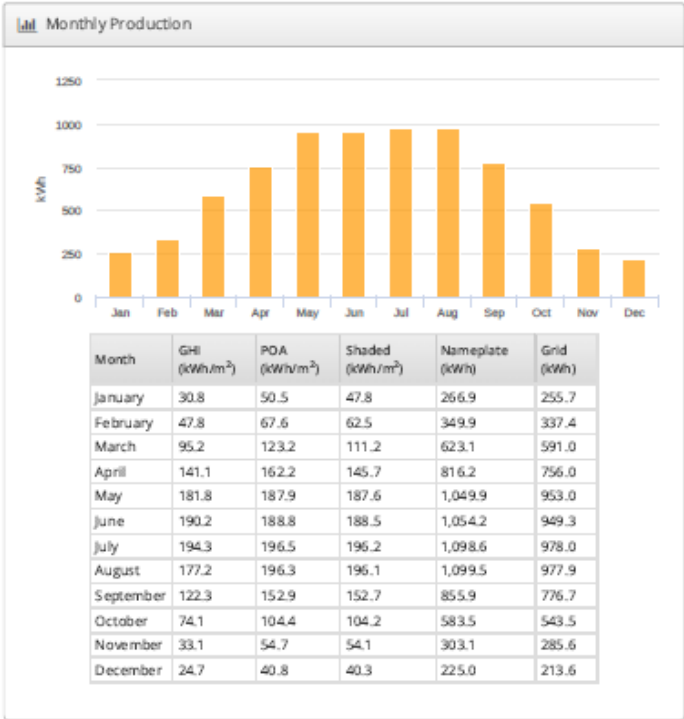
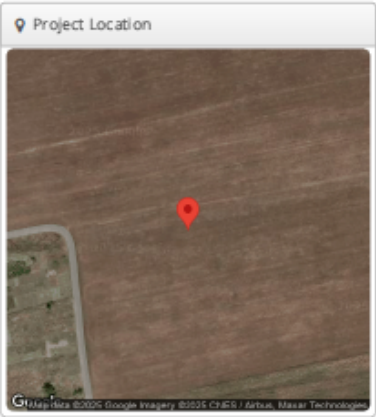
Field Segments									
Description	Racking	Orientation	Tilt	Azimuth	Intrarow Spacing	Frame Size	Frames	Modules	Power
Field Segment 1	Fixed Tilt	Portrait (Vertical)	Module: 40° Surface: 0°	Module: 180° Surface: 180°	0.6 m	5x5	1	10	5.90 kW

Design 1

Зоря, Одеська область

Report	
Project Name	11
Project Address	QX8C+9WG Заря Труда, Одесская область
Prepared By	Yurii Papalka papalka@ukr.net

System Metrics	
Design	Design 1
Module DC Nameplate	5.90 kW
Inverter AC Nameplate	5.00 kW Load Ratio: 1.18
Annual Production	7.618 MWh
Performance Ratio	84.6%
kWh/kWp	1,291.1
Weather Dataset	TMY, 10km Grid, Meteonorm 8 (meteonorm_v8)
Simulator Version	e032c9a050-228dc61fe0-0788f319b963b45b76d4



Annual Production			
	Description	Output	% Delta
Irradiance (kWh/m²)	Annual Global Horizontal Irradiance	1,312.7	
	POA Irradiance	1,526.0	16.2%
	Shaded Irradiance	1,486.8	-2.6%
	Irradiance after Reflection	1,439.9	-3.2%
	Irradiance after Soiling	1,411.1	-2.0%
	Total Collector Irradiance	1,411.1	0.0%
Energy (kWh)	Nameplate	8,325.7	
	Output at Irradiance Levels	8,263.7	-0.7%
	Output at Cell Temperature Derate	8,099.8	-2.0%
	Output After Mismatch	7,940.7	-2.0%
	Optimal DC Output	7,903.9	-0.5%
	Constrained DC Output	7,896.6	-0.1%
	Inverter Output	7,620.0	-3.5%
	Energy to Grid	7,617.7	0.0%
Temperature Metrics			
Avg. Operating Ambient Temp		14.3 °C	
Avg. Operating Cell Temp		21.6 °C	
Simulation Metrics			
Operating Hours		4638	
Solved Hours		4638	

Condition Set			
Description	Condition Set 1		
Weather Dataset	TMY, 10km Grid, Meteonorm 8 (meteonorm_v8)		
Solar Angle Location	Meteo Lat/Lng		
Transposition Model	Perez Model		
Temperature Model	Sandia Model		
Temperature Model Parameters	Rack Type	a	b
	Fixed Tilt	-3.56	-0.075
	Flush Mount	-2.81	-0.0495
	East-West	-3.56	-0.075
	Carport	-3.56	-0.075
Soiling (%)	J	F	M
	A	M	J
Irradiation Variance	J	F	M
	A	M	J
Cell Temperature Spread			
4° C			
Module Binning Range			
-2.5% to 2.5%			
AC System Derate			
0.50%			
Module & Component Characterizations	Type	Component	Characterization
	Module	JKM990N-72HL4-80V (Jinko Solar)	Spec Sheet Characterization, PAN
	Inverter	SUN-SKSG00LP1-EU (Deye)	Spec Sheet

Components		
Component	Name	Count
Inverters	SUN-SKSG00LP1-EU (Deye)	1 (6.00 kW)
AC Home Runs	6 mm2 (Copper)	1 (9.6 m)
Home Runs	12 AWG (Copper)	1 (7.7 m)
Combiners	2 Input Combiner	1
Strings	6 mm2 (Copper)	2 (5.4 m)
Module	Jinko Solar, JKM990N-72HL4-80V (590W)	10 (5.90 kW)

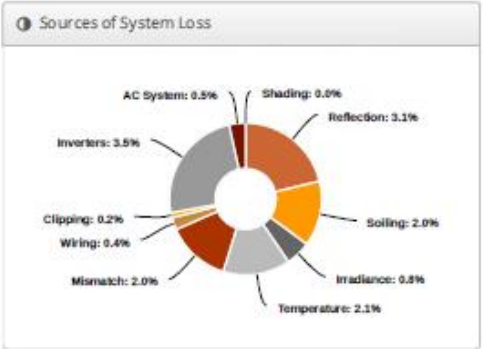
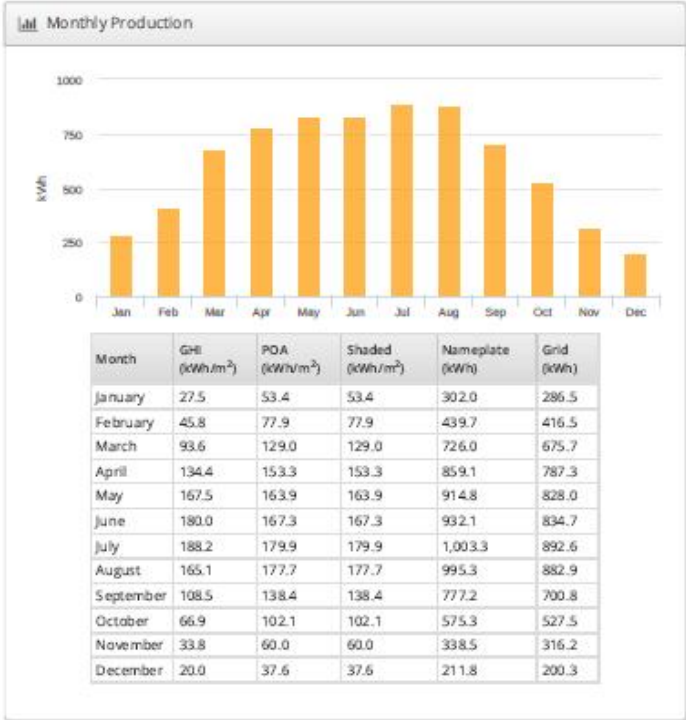
Wiring Zones			
Description	Combiner Poles	String Size	Stringing Strategy
Wiring Zone	12	5-5	Along Racking

Field Segments									
Description	Racking	Orientation	Tilt	Azimuth	Interrow Spacing	Frame Size	Frames	Modules	Power
Field Segment 1	Fixed Tilt	Portrait (Vertical)	Module: 30°	Module: 180°	12.0 m	2x1	5	10	5.90 kW

Design 1 Велика Бахта, Закарпатська область

Report	
Project Name	Закарпаття
Project Address	SMC8+SRX Великая Бахта, Закарпатская область
Prepared By	Yurii Papalika papalika@ukr.net

System Metrics	
Design	Design 1
Module DC Nameplate	5.90 kW
Inverter AC Nameplate	5.00 kW Load Ratio: 1.18
Annual Production	7,349 MWh
Performance Ratio	86.5%
kWh/kWp	1,245.6
Weather Dataset	TMY, 10km Grid, Meteorom 8 (meteorom_v8)
Simulator Version	e032c9a050-228dc61fe0- 0788f319b9-63b45b76d4



Annual Production			
	Description	Output	% Delta
Irradiance (kWh/m²)	Annual Global Horizontal Irradiance	1,231.5	
	POA Irradiance	1,440.5	17.0%
	Shaded Irradiance	1,440.5	0.0%
	Irradiance after Reflection	1,396.6	-3.1%
	Irradiance after Soiling	1,368.6	-2.0%
	Total Collector Irradiance	1,368.6	0.0%
Energy (kWh)	Nameplate	8,075.1	
	Output at Irradiance Levels	8,013.5	-0.8%
	Output at Cell Temperature Derate	7,848.8	-2.1%
	Output After Mismatch	7,695.0	-2.0%
	Optimal DC Output	7,666.5	-0.4%
	Constrained DC Output	7,654.3	-0.2%
	Inverter Output	7,386.0	-3.5%
	Energy to Grid	7,349.0	-0.5%
Temperature Metrics			
Avg. Operating Ambient Temp		13.9 °C	
Avg. Operating Cell Temp		21.5 °C	
Simulation Metrics			
Operating Hours		4653	
Solved Hours		4653	

Condition Set													
Description		Condition Set1											
Weather Dataset		TMY, 10km Grid, Meteonorm 8 (meteonorm_v8)											
Solar Angle Location		Meteo Lat/Lng											
Transposition Model		Perez Model											
Temperature Model		Sandia Model											
Temperature Model Parameters	Rack Type	a	b	Temperature Delta									
	Fixed Tilt	-3.56	-0.075	3°C									
	Flush Mount	-2.81	-0.0455	0°C									
	East-West	-3.56	-0.075	3°C									
	Ground	-3.56	-0.075	3°C									
Soiling (%)	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Irradiation Variance		5%											
Cell Temperature Spread		4° C											
Module Binning Range		-2.5% to 2.5%											
AC System Derate		0.50%											
Module & Component Characterizations	Type	Component						Characterization					
	Module	JKM590N-72HL4-80V (Jinko Solar)						Spec Sheet Characterization, PAN					
	Inverter	SUN-5KSG0xLP1-EU (Deye)						Spec Sheet					

Components		
Component	Name	Count
Inverters	SUN-5K-SG0xLP1-EU (Deye)	1 (6.00 kW)
Main Runs	12 AWG (Copper)	1 (4.8 m)
Combiners	2 Input Combiner	1
Strings	10 AWG (Copper)	2 (14.2 m)
Module	Jinko Solar, JKM590N-72HL4-80V (590W)	10 (5.90 kW)

Wiring Zones			
Description	Combiner Poles	String Size	Stringing Strategy
Wiring Zone	12	3-9	Along Racking

Field Segments									
Description	Racking	Orientation	Tilt	Azimuth	Interrow Spacing	Frame Size	Frames	Modules	Power
Field Segment 1	Fixed Tilt	Portrait (Vertical)	Module: 45°	Module: 180°	12.0 m	2x1	5	10	5.90 kW

