

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШИХОВ Станіслав Кирилович

УДК 652.1:586.24

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СИСТЕМА КАТОДНОГО ЗАХИСТУ
ПІДЗЕМНОГО СТАЛЕВОГО ГАЗОПРОВОДУ
З НЕОДНОРІДНОЮ СТРУКТУРОЮ**

Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Галузь знань: 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

С.К. Шихов

Науковий керівник: Азюковський Олександр Олександрович, к.т.н., доцент

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Шихов С.К. Електротехнічна система катодного захисту підземного сталевих газопроводу з неоднорідною структурою – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», МОН України, Дніпро, 2026.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка присвячена вирішенню наукової задачі з підвищення надійності та енергоефективності систем протикорозійного захисту підземних сталевих трубопроводів із неоднорідною структурою шляхом вдосконалення та використання електротехнічних систем катодного захисту за рахунок врахування електротехнічних параметрів трубопроводу, його ізоляції, навколишнього ґрунту та режимів роботи випрямлячів суміжних станцій катодного захисту.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 143 найменувань та 2 додатків.

Вступ надає інформацію про актуальність теми дослідження, формулює мету та задачі, об'єкт, предмет і науково-прикладну задачу досліджень, обґрунтування методів, наукової новизни й практичної значимості одержаних результатів, визначає особистий внесок здобувача, а також наводить відомості щодо публікацій і апробацій, представляє структуру дисертації.

У **першому розділі** проведено комплексний аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку у сфері електрохімічного захисту підземних сталевих трубопроводів. Вивчено структуру газотранспортної системи (ГТС) України, та документи, що нормують ринок постачання природного газу, роботу газопроводів та їх захист від корозії в Україні і світі. Проаналізовані сучасні тенденції науково-прикладних досліджень та інженерно-технічних рішень у сфері електрохімічного захисту підземних сталевих трубопроводів, наведено класифікацію засобів

протикорозійного захисту та вимоги до станцій катодного захисту, її типова структура та комерційні рішення на ринку України. Також досліджені сучасні тенденції, щодо зростання популярності і використання поліетиленових трубопроводів в газопровідних мережах.

Другий розділ присвячено опановуванню існуючих методів формування захисного потенціалу вздовж підземних сталевих трубопроводів та розрахунку параметрів типової СКЗ. Досліджені існуючі еквівалентні схеми заміщення системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід» та явищ, що впливають на параметри цієї системи. Наведено удосконалену математичну модель та схему заміщення із врахуванням індуктивної та ємнісної складової та зосереджених неоднорідностей. Розглянуто типове схемотехнічне виконання випрямлячів в складі станцій катодного захисту.

У **третьому розділі** досліджені впливи форми вихідної напруги та спектрального складу струму силових випрямлячів в складі станцій катодного захисту на розподіл захисного потенціалу вздовж трубопроводу. Розглянута робота СКЗ із транзисторними випрямлячами та впливу стану ізоляції на струми стікання / натікання на трубопровід.

Четвертий розділ присвячено суміжній роботі СКЗ, що електрично з'єднані одним трубопроводом та дослідженню їх впливів один на одну. Проведено комп'ютерне моделювання роботи випрямлячів станцій катодного захисту та розроблено алгоритми керування та технічні рекомендації, що спрямовані на компенсацію перетікання струмів між суміжними станціями та мінімізацію різниці потенціалів у зонах неоднорідностей.

У загальних **висновках** наведено узагальнені кількісні та якісні результати дисертаційного дослідження.

У **додатках** наведено список публікацій здобувача за темою дисертації, акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження.

Наукова новизна результатів дисертації: розроблено метод керування силовими ключами випрямлячів станцій катодного захисту з метою мінімізації різниці потенціалів між суміжними станціями; удосконалено математичну модель

системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід» шляхом врахування, опору кабельних ліній, розтікання аноду, індуктивної та ємнісної складових, власного потенціалу споруди та параметрів неоднорідних вставок; набули подальшого розвитку методи оцінки формування захисного потенціалу трубопроводів за допомогою спектрального аналізу потужності вихідних сигналів випрямлячів в складі СКЗ; дістали подальшого розвитку засоби імітаційного моделювання режимів роботи систем електрохімічного захисту за рахунок використання еквівалентної схеми заміщення трубопроводу як складного чотириполюсника.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає в застосуванні запропонованої інженерної методики для вибору та конфігурування силових перетворювачів СКЗ залежно від електротехнічних характеристик трубопроводу. Це дозволяє мінімізувати шкідливі впливи струмів перетікання між суміжними станціями, знижує витрати електричної енергії та запобігає прискореній локальній корозії. Наведені рекомендації використано та впроваджено на базі ТОВ «Дайвер» при проектуванні і обслуговуванні систем електрохімічного захисту на підводних переходах магістральних нафтогазопроводів МН «Кременчук – Херсон», МГ «Прогрес» та інші), з метою подовження їх експлуатаційного періоду.

В роботі сформульовано перспективні напрямки подальших досліджень, які дозволять розширити та поглибити інженерно-технологічні засоби із підвищення енергоефективності катодного захисту підземних сталевих трубопроводів за рахунок врахування електротехнічних параметрів системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід».

Ключові слова: електрохімічна корозія, станція катодного захисту, енергоефективність, математична модель, ефективність, електротехнічна система, електротехнічне обладнання, алгоритм керування, система керування, імітаційне моделювання, спектральний аналіз, гармоніки, електротехнічні параметри, силові перетворювачі, випрямлячі.

ABSTRACT

Shykhov S.K. Electrotechnical system of the cathodic protection for the underground steel gas pipeline with diverse composition – Manuscript.

Thesis for a scientific degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.) in specialty 141 – Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

The thesis is a completed research work devoted to resolving the scientific problem of improving the reliability and energy efficiency of corrosion protection systems for underground steel pipelines with a heterogeneous structure by improving and utilizing electrical cathodic protection systems, taking into account the electrical parameters of the pipeline, its insulation, the surrounding soil, and the operating modes of the rectifiers at adjacent cathodic protection stations.

The thesis includes an introduction, four chapters, general conclusions, a list of 143 references and 2 appendices.

The **Introduction** provides information on the relevance of the research topic, formulates the purpose and objectives, the object, subject, and scientific and applied research problem, justifies the methods used, and discusses the scientific novelty and practical significance of the results obtained; it also identifies the candidate's personal contribution, provides information on publications and examination, and outlines the structure of the thesis.

The **first chapter** presents a comprehensive analysis of the current state and development trends in the field of electrochemical protection of underground steel pipelines. It examines the structure of Ukraine's gas transmission system (GTS) and the regulations governing the natural gas supply market, the operation of gas pipelines, and their protection against corrosion in Ukraine and worldwide. Current trends in scientific and applied research and engineering solutions in the field of electrochemical protection of underground steel pipelines are analyzed; a classification of corrosion protection methods is provided, along with requirements for cathodic protection stations, their typical structure, and commercial solutions available on the Ukrainian market. The paper

also examines current trends regarding the growing popularity and use of polyethylene pipelines in gas transmission networks.

The **second chapter** is devoted to an overview of existing methods for generating a protective potential along underground steel pipelines and calculating the parameters of a typical cathodic protection system. The chapter investigates existing equivalent circuit models of the «cathodic protection station–soil–pipeline» system and the factors that influence the parameters of this system. An improved mathematical model and equivalent circuit are presented, taking into account inductive and capacitive components as well as concentrated inhomogeneities. A typical circuit design for rectifiers used in cathodic protection stations is considered.

The **third chapter** explores the effects of the output voltage waveform and the spectral composition of the current from power rectifiers in cathodic protection stations on the distribution of the protective potential along the pipeline. It examines the operation of cathodic protection systems with transistor rectifiers and the effect of insulation condition on leakage and inflow currents in the pipeline.

The **fourth chapter** is devoted to the operation of adjacent cathodic protection stations that are electrically connected by a pipeline and to the study of their mutual effects. Computer simulations of the operation of cathodic protection station rectifiers were conducted, and control algorithms and technical recommendations were developed to compensate for current flow between adjacent stations and minimize potential differences in areas of inhomogeneity.

The general **conclusions** present the summarized quantitative and qualitative results of the thesis research.

The **appendices** contain a list of the candidate's publications on the thesis topic, as well as reports on the implementation and application of the results of the thesis research.

Scientific novelty of the thesis results: a method has been developed for controlling the power switches of cathodic protection station rectifiers in order to minimize the potential difference between adjacent stations; the mathematical model of the “cathodic protection station–soil–pipeline” system has been improved by taking into account the resistance of cable lines, anode spread, inductive and capacitive components, the

structure's potential, and the parameters of heterogeneous inserts; methods for assessing the formation of protective potential in pipelines using spectral analysis of the output power signals from rectifiers within cathodic protection systems have been further developed; tools for simulation modeling of the operating modes of electrochemical protection systems have been further developed through the use of a equivalent circuit model representing the pipeline as a complex four-pole network.

The practical significance of the research findings lies in the application of the proposed engineering methodology for selecting and configuring power converters for the CPS system based on the electrical characteristics of the pipeline. This minimizes the harmful effects of leakage currents between adjacent stations, reduces electrical energy consumption, and prevents accelerated localized corrosion. The recommendations presented have been used and implemented by LLC «Diver» in the design and maintenance of electrochemical protection systems at underwater crossings of major oil and gas pipelines (including the «Kremenchuk–Kherson» and «Progress» pipelines, among others), with the aim of extending their service life.

This thesis identifies promising areas for further research that will make it possible to expand and refine engineering and technological methods for improving the energy efficiency of cathodic protection of underground steel pipelines by taking into account the electrical parameters of the «cathodic protection station–soil–pipeline» system.

Keywords: electrochemical corrosion, cathodic protection station, energy efficiency, mathematical model, efficiency, electrical system, optimization, electrical equipment, control algorithm, control system, simulation modeling, spectral analysis, harmonics, electrical parameters, power converters, rectifiers.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. O. Aziukovskyi, S. Shykhov Formation of the protective potential of underground steel pipelines in the context of the development of modern converter technologies, Coll.res.pap.nat.min.univ. Dnipro, 2024. №79. P. 210–221. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.210> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: аналіз апіорної інформації про об'єкт дослідження, формалізований опис моделі, підготовка і обробка даних моделювання, ілюстрацій і діаграм, математичні розрахунки та формулювання висновків).

2. Азюковський, О. О., Шихов, С. К. Станції катодного захисту підземних сталевих трубопроводів як джерела полігармонійних сигналів. Електротехнічні та інформаційні системи. Дніпро, 2024. №106. С. 15–19. <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-3> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: постановка дослідного завдання, обґрунтування методології досліджень, підготовка ілюстрацій та аналіз отриманих результатів).

3. Aziukovskyi O., Papaika Y., Podoltsev O., Babenko M., Shykhov S. Simulation of the operation modes of the cathodic protection complex of pipelines in the approach of overhead power lines. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. Dnipro, 2024. № 6. P. 73 - 78. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/073> (Стаття в періодичному науковому виданні Scopus, квартиль Q3. Особистий внесок здобувача: представлення схеми заміщення підземного сталевих трубопроводу).

4. Aziukovskyi, O O; Pivniak, H H; Babenko, M V; Shykhov, S K Influence of the protective potential distribution of a steel underground pipeline on electrochemical corrosion processes. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. Dnipro, 2025. № 2. P. 155 – 163. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-2/155> (Стаття в періодичному науковому виданні Scopus, квартиль Q3. Особистий внесок здобувача: аналіз апіорної інформації про об'єкт дослідження, формалізований

опис математичної моделі системи «СКЗ – ґрунт – трубопровід» та проведення розрахунків).

5. Азюковський, О. О., & Шихов, С. К. Симетричні і несиметричні режими роботи суміжних станцій катодного захисту. Електротехнічні та інформаційні системи. Дніпро, 2026 № 109. С. 91–96. <https://doi.org/10.32782/EIS/2026-109-11> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: постановка дослідного завдання, обґрунтування методології досліджень, підготовка даних моделювання та графіків та формулювання висновків).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

Шихов С. К. Вплив стану ізоляції підземних сталевих трубопроводів на рекомендований тип випрямляча в складі станції катодного захисту. XVI Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», м. Дніпро, 04–06 березня 2026 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2026. С. 245-247. URL: https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Scientific_Spring_2026.pdf (Тези доповіді)

О.О. Азюковський, С.К. Шихов методи мінімізації корозійних ризиків викликаних роботою суміжних станцій катодного захисту. Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: XX міжнар. конф., м. Дніпро, 5 грудня 2025 р. Дніпро: НТУ "ДП", 2025. С. 21-25. URL: https://pzks.nmu.org.ua/ua/science/2025_fin.pdf (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, моделювання досліджуваного об'єкту та критичний аналіз результатів)

Шихов С. К. Моделювання підземного сталевих трубопроводу з урахуванням його електротехнічних параметрів, XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», м. Дніпро, 26–28 березня 2025 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2025. С. 168-169. URL: https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Scientific_Spring_2025.pdf (Тези доповіді)

Aziukovskyi, O., Shykhov, S., & Babenko, M. (2025). Development of Protective Potential for Underground Steel Pipelines in the Context of Modern Converter

Technologies. Physical and Chemical Geotechnologies, 9(1), 091002. URL: https://pcgt.in.ua/archives/2025/PCGT_2025_091002.php (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, обґрунтування методології досліджень та формулювання висновків*)

Азюковський О. О., Шихов С. К. Сучасні тренди катодного захисту підземних сталевих трубопроводів. Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2023. м. Дніпро, 15 грудня 2023 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2023. С. 24-26. URL: https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_2023.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, підготовка ілюстрацій та формулювання висновків*)

S. K. Shykhov., DC rectifiers as a part of cathodic protection systems of underground steel gas pipelines. The Seventh International Scientific Multidisciplinary Conference of Students and Beginner Scientists «Modern Technologies: Improving the Present and Impacting the Future», Dnipro, November 23-24, 2023. Дніпро: Український державний університет науки і технологій; 2023. Р. 91. URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/abb93fc9-5526-4240-bc90-438a004e4fbc> (*Тези доповіді*)

Азюковський О. О., Шихов С. К., Бабенко М.В. Станція катодного захисту підземних сталевих трубопроводів як джерело полігармонійних сигналів. Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2022. м. Дніпро. 25 грудня 2022 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 52-54. URL: https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_%202022.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, моделювання досліджуваного об'єкту, підготовка ілюстрацій та формулювання висновків*)

Патент на корисну модель:

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. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1891913/> (*Патент на корисну модель. Особистий внесок здобувача: патентний пошук*)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	5
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	8
ЗМІСТ	11
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
ВСТУП.....	14
1. РОЗДІЛ СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПРИКЛАДНИХ РОЗРОБОК У ГАЛУЗІ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ.....	22
1.1 Газотранспортна система України	22
1.2 Аналіз міжнародних і вітчизняних організаційних вимог щодо транспортування газу та заходів протикорозійного захисту н/г трубопроводів.	25
1.3 Аналіз існуючих засобів електрохімічного захисту в Україні і закордоном.	41
1.4 Поліетиленові трубопроводи у світі	55
Висновки	59
2. РОЗДІЛ ЗАКОНИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ФОРМУВАННЯ ЗАХИСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ	62
2.1 Формування захисного потенціалу підземних сталевих трубопроводів та розрахунок типової СКЗ.....	62
2.2 Розрахунок типової станції катодного захисту.....	66
2.3 Моделі системи «СКЗ– ґрунт – трубопровід».....	69
2.4 Види неоднорідностей на підземному трубопроводі.....	84
2.5 Математична модель системи «СКЗ– ґрунт – трубопровід».....	89
2.6 Види випрямлячів у складі СКЗ	95
Висновки	120
3. РОЗДІЛ АНАЛІЗ ВПЛИВІВ ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ НА РОЗПОДІЛ ЗАХИСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ	122
3.1 Параметри моделі.....	122
3.2 Методи дослідження сигналів	127
3.3 Спектр випрямлячів	131
3.4 Вплив індуктивних і ємнісних елементів моделі на роботу системи «СКЗ – ґрунт – трубопровід».....	150

3.5 Робота транзисторного випрямляча із ШІМ за різного стану ізоляції відрізка газопроводу	164
3.6 Модифікація моделі системи «СКЗ – ґрунт – трубопровід»	168
Висновки	175
4. РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СУМІЖНИХ СТАНЦІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ	178
4.1 Робота двох суміжних станцій катодного захисту на один трубопровід.....	178
4.2 Робота двох суміжних СКЗ за різного стану ізоляції трубопроводу	182
4.3 Вплив частоти на L та C складові	185
4.4 Припустима густина струму корозії	187
4.5 Три СКЗ, що працюють суміжно на один трубопровід	192
4.6 Рекомендації	205
Висновки	209
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	212
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	216
ДОДАТОК А	232
ДОДАТОК Б	236

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГРМ – газорозподільна мережа;

ГРС – газорозподільна станція;

ГТС – газотранспортна система;

ЕХЗ – електрохімічний захист;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

СКЗ – станція катодного захисту;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Українська газотранспортна система представляє собою комплекс об'єктів критичної інфраструктури, що забезпечує надійне функціонування приватних господарств і підприємств по всій території країни. Ринок постачання природного газу складається із: 40% побутових споживачів, 25% підприємств комунальної теплоенергетики, 33% непобутових споживачів та 2% бюджетних установ і організацій [1]. При цьому за даними НКРЕКП близько 97 % обсягів постачання природного газу населенню здійснює ТОВ «ГК «Нафтогаз України» [2], що становить 9,6 млн споживачів [3].

Серед країн Європейського Союзу Україна виділяється однією з найбільш протяжних і розгалужених мереж газопровідного транспорту. До Газотранспортної Системи (ГТС) України входять близько 33,2 тис. км магістральних трубопроводів, що є другим показником в Європі (перше місце посідає Німеччина з 40 тис. км магістральних трубопроводів) [4], та розвинена Газорозподільна мережа (ГРМ), яка за даними НКРЕКП сягає близько 290 тис. км [5]. Однак, стан цих трубопроводів є далеким від задовільного, оскільки (Рис. 1): 0,1% трубопроводів старші за 50 років і потребують негайної заміни; 30% вже вичерпало свій амортизаційний ресурс і експлуатується більше 35 років; 29% трубопроводів знаходяться на межі вичерпання ресурсу і функціонують понад 30 років; 40% на етапі старіння і перейшли межу в 20 років, для якої характерний зниження працездатності, посилення корозійних процесів та постійний ріст інтенсивності відмов [6].

Такий значний період експлуатації, а отже тривалий вплив навколишнього середовища на метал трубопроводу, призводить до протікання корозійних процесів, що в свою чергу є причиною погіршення фізико-механічних властивостей матеріалу стінок труби. У результаті, сталь стає більш крихкою, а в її структурі з'являються дефекти у вигляді тріщин, які можуть призвести до руйнування трубопроводу, нещасних випадків, втрати продукту, жахливих екологічних наслідків та небажаних позапланових витрат на пошук пошкоджень і відновлення його цілісності.



Рис. 1. Стан сталевих газопроводів за часом експлуатації

Втрати від корозії оцінюють в 2,5 трильйона доларів США, що еквівалентно 3,4% світового валового внутрішнього продукту (ВВП) (2013) [7]. Катодний захист становить 23% всього світового ринку засобів протикорозійного захисту. На 2022 рік він оцінювався в 5,3 млрд доларів, і очікується його зростання до 7,3 млрд доларів до кінця 2028 року [8]. Це свідчить про зростання важливості запобігання корозії, як засобу скорочення промислових втрат і витрат на технічне обслуговування, а також запобігання нещасних випадків та аварій.

Проблеми електрохімічного захисту у світі та Україні вивчали такі видатні вчені, як Baeckmann, W. V., & Schwenk, W., Wyatt, B. S., & Irvine, D. J., A. W. Peabody, Герасименко Ю. С., Чвірук В. П., Сахненко М. Д., Веліченко О. Б.,

Никифорчин Г.М, Крижанівський Є.І. та інші. Роботи цих дослідників представляють собою потужну теоретичну основу сучасних засобів електрохімічного захисту підземних сталевих трубопроводів.

Під терміном протикорозійного захисту підземних сталевих трубопроводів розуміється комплекс заходів, метою яких є максимально можливе сповільнення протікання корозійних процесів. Для досягнення цієї мети використовуються пасивні і активні методи електрохімічного захисту. Під пасивними методами зазвичай мають на увазі використання різноманітних ізоляційних покриттів, що забезпечують захист металу трубопроводу від корозійного впливу навколишнього середовища (грунту). Активні методи, в контексті підземних газопроводів, представлені станціями катодного захисту зовнішнім струмом, що встановлюються вздовж нитки газопроводу. Їх завданням є зниження потенціалу споруди відносно потенціалу навколишнього ґрунту, таким чином утворюється струм, що натікає на трубопровід в місцях погіршення ізоляції, і пригнічуються механізми протікання електрохімічної корозії.

В дослідженнях пов'язаних із станціями катодного захисту, використовуються схеми заміщення підземного трубопроводу, різних конфігурацій, що приймають до уваги різні елементи системи, в залежності від теми дослідження. Часто джерело живлення приймається суто постійним, а схема заміщення, що використовується, представляється виходячи із припущень, що труба є однаковою і однорідною вздовж усієї нитки газогону. Однак, у випадку мережевих СКЗ, роль джерела постійної напруги виконують випрямлячі різних конфігурацій, вихідний сигнал не є суто постійним. Крім того, таких станцій вздовж трубопроводу встановлюється декілька, тим самим утворюється ланцюг, який електрично пов'язує суміжні СКЗ через трубопровід. А отже вони їх вихідні сигнали впливають один на одного і провокують струми, що перетікають по трубопроводу. З іншого боку, в наслідок проведення робіт із відновлення трубопроводу, відповідними організаціями його електротехнічна структура із часом значно ускладнюється. До можливих випадків відносяться: заміна пошкодженої ділянки із використанням труби іншого діаметру, матеріалу ізоляції,

або самої труби (зокрема використання поліетиленових труб). В результаті великого значення набувають питання підвищення надійності, та забезпечення ефективного протикорозійного захисту трубопроводів, що набувають неоднорідної структури за час їх експлуатації

Таким чином, розробка нових і вдосконалення існуючих методів, технологій і моделей, а також надання рекомендацій, метою яких є підвищення надійності та енергоефективності систем катодного захисту підземних сталевих трубопроводів за рахунок використання моделей трубопроводу, врахування особливостей роботи випрямлячів суміжних СКЗ та неоднорідної структури трубопроводу є актуальною задачею, оскільки вдосконалення станцій катодного захисту пов'язано зі збільшенням експлуатаційного періоду трубопроводів, зменшенням витрат коштів на заходи із діагностики і реконструкції у зв'язку з їх пошкодженням, а також економією електроенергії, за рахунок підвищення енергоефективності.

Основною **метою** дисертаційної роботи є підвищення надійності та енергоефективності систем протикорозійного електрохімічного захисту підземних сталевих трубопроводів із неоднорідною структурою завдяки удосконаленню математичних моделей системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід» та розробці рекомендації щодо технічного забезпечення суміжних станцій катодного захисту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **дослідницькі задачі**:

1. Провести критичний аналіз і логічне узагальнення сучасного стану і тенденцій розвитку у сфері електрохімічного захисту підземних сталевих трубопроводів, існуючих методів формування захисного потенціалу, апаратних рішень станцій катодного захисту та нормативно-технічної бази щодо експлуатації трубопроводів, у т.ч. з неоднорідною структурою.

2. Удосконалити математичну модель та еквівалентну схему заміщення системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід» із введенням параметрів індуктивної та ємнісної складової та зосереджених неоднорідностей ізоляції і металу.

3. Виконати дослідження впливу форми вихідної напруги та спектрального складу струму силових випрямлячів станції катодного захисту на закономірності розподілу захисного потенціалу вздовж трубопроводу.

4. Провести комп'ютерне імітаційне моделювання роботи перетворювачів станцій катодного захисту з реалізацією алгоритмів керування, що спрямовані на компенсацію перетікання струмів між суміжними станціями та мінімізацію різниці потенціалів у зонах неоднорідностей.

5. Розробити інженерні рекомендації щодо технічного забезпечення суміжних станцій катодного захисту та їх практичного впровадження на реальних об'єктах інфраструктури.

Об'єкт дослідження: Процеси формування просторово-часового розподілу захисного потенціалу в підземних сталевих трубопроводах із наявними електротехнічними неоднорідностями.

Предмет дослідження: математичні моделі системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід», алгоритми та методи керування силовими перетворювачами електротехнічних систем катодного захисту підземних трубопроводів неоднорідної структури.

Науково-прикладна задача дослідження: Подальше вдосконалення законів керування і практичних напрацювань зі використання електротехнічних систем катодного захисту підземних сталевих трубопроводів з урахуванням неоднорідності їх структури, стану ізоляційного покриття, фізико-хімічних властивостей ґрунту а також особливостей роботи випрямлячів суміжних станцій катодного захисту для мінімізації негативних впливів, що провокують утворення надмірних струмів стікання через ізоляцію та струмів перетікання трубопроводом.

Методи дослідження. Для формування рекомендації щодо технічного забезпечення суміжних станцій катодного захисту, в основу досліджень покладено методи: розрахунку електричних кіл для побудову схеми заміщення системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід»; теорії спектрального аналізу для аналізу вихідного сигналу випрямлячів; диференційне числення, теорія несинусоїдальних струмів та математичного моделювання для розробки та

валідації поведінки системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід» за різних конфігурацій її елементів. Для імітаційного моделювання використано програмний продукт MATLAB (Simulink).

Наукова новизна одержаних результатів.

У дисертаційній роботі запропоновано нові та вдосконалено відомі методи, математичні моделі й алгоритми аналізу та керування електротехнічними системами катодного захисту підземних сталевих газопроводів із неоднорідною структурою, а саме:

1. Вперше розроблено метод керування силовими ключами випрямлячів у мережевих електротехнічних системах катодного захисту за рахунок формування керуючих впливів на основі алгоритмічної мінімізації різниці потенціалів що утворюються суміжними станціями, на границях між відрізками із значно відмінними електротехнічними параметрами, що, на відміну від відомих алгоритмів локальної стабілізації струму, забезпечує оперативне реагування на різкі зміни структури трубопроводу та усуває ризики виникнення локальних анодних зон на ділянках неоднорідностей.

2. Удосконалено математичну модель електротехнічної системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід» за рахунок врахування індуктивної та ємнісної складових, опору кабельних ліній, розтікання аноду, власного потенціалу споруди та параметрів неоднорідних вставок, що, на відміну від відомих суто резистивних моделей, забезпечує можливість адекватної оцінки просторового розподілу струмів (натікання/стікання та поздовжнього протікання) при живленні від перетворювачів із несинусоїдною формою вихідної напруги.

3. Набув подальшого розвитку метод оцінки ефективності формування захисного потенціалу трубопроводів за рахунок застосування спектрального аналізу потужності вихідних сигналів високочастотних інверторних перетворювачів, що, на відміну від попередніх підходів, які ігнорували вищі гармоніки, дозволяє визначати вплив імпульсних складових струму на параметри електрохімічного захисту в умовах реактивного характеру навантаження.

4. Набули подальшого розвитку засоби імітаційного моделювання режимів роботи систем електрохімічного захисту за рахунок використання розробленої еквівалентної схеми заміщення трубопроводу як складного чотиріполюсника, що, на відміну від існуючих засобів моделювання однорідних ліній, дозволяє аналізувати закономірності просторово-часового розподілу захисного потенціалу залежно від топології силового випрямляча та наявності електротехнічних аномалій труби.

Практична значимість одержаних результатів:

Практична цінність роботи полягає у створенні інженерної методики вибору та конфігурування силових перетворювачів СКЗ залежно від електротехнічних характеристик трубопроводу. Запропоновані алгоритми керування дозволяють мінімізувати шкідливі струми перетікання між суміжними станціями, що знижує витрати електричної енергії та запобігає прискореній локальній корозії. Отримані результати дисертаційного дослідження використано та впроваджено у виробничий процес ТОВ «Дайвер» при проектуванні систем електрохімічного захисту на підводних переходах магістральних нафтогазопроводів (зокрема МН «Кременчук – Херсон», МГ «Прогрес»), що забезпечило подовження їх експлуатаційного ресурсу.

Особистий внесок здобувача. Всі теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто. Внесок здобувача в отримання наукових і прикладних результатів підтверджується самостійним дослідженням і розробкою теоретичних засад і методологічних аспектів науково-прикладної задачі, яка розв'язувалась. У дисертації не були використані ідеї співавторів наукових робіт.

Здобувачем виконано дослідження функціонування систем протикорозійного захисту підземних сталевих трубопроводів, що набувають неоднорідної структури. Особисто здобувачем удосконалено математичну модель електротехнічної системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід» шляхом врахування індуктивної та ємнісної складових, власного потенціалу споруди та параметрів неоднорідних вставок. Проведено оцінку формування

захисного потенціалу підземних сталевих трубопроводів з використанням спектрального аналізу потужності вихідних сигналів випрямлячів. Усі результати комп'ютерного моделювання, аналіз отриманих даних, інтерпретація результатів та формулювання висновків у межах теми виконані здобувачем особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи пройшли апробацію на конференціях: XVI Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» (м. Дніпро, Україна, 2026 р.); XX Міжнародної конференції з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості (м. Дніпро, Україна, 2025 р.); , XV Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» (м. Дніпро, Україна, 2025 р.); Physical and Chemical Geotechnologies (м. Дніпро, Україна, 2025 р.); Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2023 (м. Дніпро, Україна, 2023 р.); ». The Seventh International Scientific Multidisciplinary Conference of Students and Beginner Scientists «Modern Technologies: Improving the Present and Impacting the Future» (м. Дніпро, Україна, 2023 р.); Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2022 (м. Дніпро, Україна, 2022 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 5 статей. Із зазначених статей 2 статті опубліковані у періодичних наукових виданнях, що індексуються у Scopus, 3 статті — у науковому фаховому виданні України категорії Б. Крім того, за темою дисертації опубліковано 7 праць апробаційного характеру у збірниках матеріалів міжнародних наукових, міжнародних науково-практичних, міжнародних науково-технічних конференцій. Також прийнято участь у створення 1 патенту на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 237 сторінки, з яких основний зміст викладений на 202 сторінках друкованого тексту і містить 158 рисунки, 6 таблиць, список використаних джерел зі 143 найменувань та 2 додатків.

1. РОЗДІЛ

СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПРИКЛАДНИХ РОЗРОБОК У ГАЛУЗІ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ НАФТОГАЗОПРОВОДІВ

1.1 Газотранспортна система України

Історія Української Газотранспортної системи сягає вже понад 100 років [9], і є однією з найбільше розгалужених серед країн Європи. Першим із українських міст газифікація відбулася у Львові в 1858 році [10], а в 1971 році почалася газифікація останнього обласного центру – м. Кропивницький [11]. Для забезпечення економічної і енергетичної безпеки України, живлення внутрішніх споживачів побутового і промислового секторів природним газом, а також генерації тепла, необхідна надійна і безперебійна робота газотранспортної системи (ГТС) та газорозподільних мереж (ГРМ). Вони складаються з значної кількості елементів, однак саме трубопроводи є основою транспортування газу від місць зберігання та видобутку до споживачів.

До основних структурних елементів ГТС відносяться:

Магістральні газопроводи є головними артеріями ГТС, які транспортують природний газ від місць видобутку або імпорту до місць споживання, а також до кордонів з іншими країнами для подальшого експорту. Магістральні газопроводи є об'єктами державного значення. Виникнення аварійних ситуацій на будь-якій ділянці такого трубопроводу може призвести до великих матеріальних втрат та екологічних наслідків. Деякі з основних магістральних газопроводів України включають [12]:

- Уренгой-Помари-Ужгород (1984 рік, 1 420 мм діаметр): Один із найважливіших газопроводів, через який проходить значний обсяг російського газу до Європи.

- Прогрес (1988 рік, 1400 мм діаметр): Газопровід, який також є частиною транзитної системи до Європи.
- Союз (1980 рік, 1420 мм діаметр): Газопровід, що використовується для транспортування газу як в межах України, так і для експорту.

Компресорні станції використовуються для підвищення тиску газу в магістральних газопроводах, що необхідно для його транспортування на великі відстані [13]. Без цих станцій тиск газу в трубах поступово знижувався б, що ускладнило б транспортування. В Україні налічується понад 70 компресорних станцій, які розташовані вздовж магістральних газопроводів. Вони оснащені потужними газотурбінними і електропривідними компресорами.

Газорозподільні станції відповідають за зниження тиску газу до рівня, який є безпечним і придатним для кінцевих споживачів, включаючи промислові підприємства, електростанції, а також житловий сектор. Ці станції також виконують функцію обліку та контролю якості газу [14].

Газорозподільна система представляє собою промисловий комплекс для транспортування природного газу від газорозподільних станцій до споживачів [14]. До її складу входять об'єкти і споруди на газопроводах від місць надходження газу в ГРМ до пунктів призначення, такі як:

- підземні та/або надземні газопроводи, високого, середнього та низького тиску
- газорегуляторні та шафові регуляторні пункти які містять обладнання для зниження і підтримання тиску
- засоби та системи електрохімічного захисту
- контрольно-вимірювальні пункти
- системи контролю та управління
- переходи через природні і штучні перешкоди
- будівлі, споруди та інше обладнання

Газопровідні мережі за тиском [15] поділяються на:

- газопроводи високого тиску I та II категорії з тиском від 0,6 до 1,2 МПа та від 0,3 до 0,6 МПа відповідно
- газопроводи середнього тиску з тиском від 0,005 до 0,3 МПа
- газопроводи низького тиску з тиском до 0,005 МПа

Відповідно системи газопостачання відрізняються різною кількістю ступенів які варіюються від однієї (живлення споживачів тільки по газопроводам одного тиску) до трьох (живлення по газопроводам трьох тисків: високого, середнього та низького).

Підземні сховища газу є важливою складовою ГТС України, що дозволяє зберігати надлишки газу, зокрема, в літній період, коли попит на газ низький, і використовувати їх у зимовий період, коли попит зростає [16]. Загальний обсяг зберігання у 12 українських підземних сховищах газу складає близько 31 мільярда кубометрів. Основні сховища розташовані в Західній Україні, що стратегічно важливо для забезпечення постачання газу до Європи.

Для забезпечення безперебійної та безпечної роботи ГТС використовуються сучасні **системи управління і моніторингу**. Ці системи забезпечують контроль за тиском, обсягом та якістю газу, а також автоматичне управління процесами транспортування [17]. Вони дозволяють швидко реагувати на будь-які зміни в роботі системи та запобігати можливим аваріям.

Обладнання для очищення та осушення газу забезпечує якість природного газу перед його подачею в трубопроводи. Газ проходить процеси очищення від механічних домішок, пилу, конденсату, а також осушення для видалення вологи [18]. Це обладнання розташоване на газопереробних станціях і деяких компресорних станціях.

Перед Газотранспортною Системою України стоїть багато як організаційно-правових так і технологічних викликів, таких як, виснаження родовищ, імпортна залежність, зниження обсягів транзиту, втрати при розподілі, низькі інвестиції, тощо [19]. Незважаючи на це вона повинна забезпечувати надійне, безперебійне і безпечне постачання газу, що є важливою і складною задачею через застарілу інфраструктуру. Серед чинників які безпосередньо впливають на безпеку

газопроводів, відповідно до звітів Європейської бази даних з інцидентів на газопроводах дев'ятнадцяти європейських постачальників газу, корозія є першою за небезпечністю причиною пошкоджень на газопроводах (майже чверть усіх інцидентів) (Рис. 2) [20].



Рис. 2. Розподіл інцидентів на газопроводах дев'ятнадцяти європейських постачальників газу за 2013-2022 роки

1.2 Аналіз міжнародних і вітчизняних організаційних вимог щодо транспортування газу та заходів протикорозійного захисту н/г трубопроводів

Проектування, будівництво та експлуатація трубопроводів, а також заходи їх протикорозійного захисту здійснюються відповідно до чинних будівельних норм та нормативних документів. Документи, що нормують функціонування ГТС на найвищому рівні і регламентують ринок постачання природного газу наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Аналіз документів, що регламентують ринок постачання природного газу.

Назва нормативного документу	Основні положення, що регламентує документ	Літературне джерело
Закон України «Про ринок природного газу»	Документ регламентує правові засади функціонування ринку природного газу в Україні. Закон спрямований на імплементацію європейського законодавства у сфері енергетики та створення ефективного, конкурентного та прозорого ринку природного газу в Україні. Основні принципи закону полягають в: • вільній конкуренції; • захисті прав споживачів; • безпеці постачання природного газу; • можливості інтеграції з ринками газу інших держав.	[21]
Кодекс Газотранспортної Системи	В документі наведено правила функціонування ГТС України, а також стандарти та вимоги до всіх суб'єктів ринку природного газу, які взаємодіють із газотранспортною системою.	[22]
Кодекс Газорозподільних Систем	Регулювання взаємовідносин операторів газорозподільних мереж та споживачів. Документ включає заходи правового забезпечення, техніко-економічні та	[23]

	організаційні основи функціонування газорозподільних систем, також основні обов'язки оператора ГРМ (контроль якості газу, обслуговування інфраструктури, тощо).	
Директива 2009/73/ЄС	Документ визначає правила щодо транспортування, розподілу, постачання та зберігання природного газу. Метою його впровадження є створення конкурентного, безпечного та екологічно сталого ринку природного газу в Європейському Союзі. Документ встановлює вимоги до видів діяльності (транспорт, постачання, виробництво), забезпечення доступу, захисту прав споживачів та незалежності національних регуляторів.	[24]
Регламент (ЄС) № 715/2009	Встановлює недискримінаційні правила доступу до мереж передачі природного газу, з метою сприяння виникненню добре функціонуючого, прозорого і безпечного оптового ринку газу в ЄС. Він визначає вимоги до визначення тарифів, прозорості інформації, правил балансування та сприяє транскордонній торгівлі газом. А також створення Європейської мережі операторів газотранспортних систем.	[25]

Наведені документи регламентують відносини суб'єктів на ринку природного газу і функціонують за спільними принципами, оскільки є логічним продовженням виконання зобов'язань України за Договором про заснування

Енергетичного Співтовариства [26]. В результаті виконання відповідних положень Газотранспортна система України є невід’ємною частини ГТС Європейського союзу.

Таблиця 1.2 – Аналіз документів, що регламентуються транспортування газу.

Назва нормативного документу	Основні положення, що регламентує документ	Літературне джерело
ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування і забудова територій»	Документ надає вимоги до розміщення газопроводів при плануванні і забудові територій населених пунктів. Визначаються відстані між підземними газопроводами та спорудами, іншими трубопроводами та інженерними мережами, а також правила перетину перешкод і комунікацій. Надаються обмеження на забудову в межах охоронних зон трубопроводів. Більшість вимог надається для сталевих труб, однак згадується використання поліетиленових із посиленням на відповідні нормативні акти. Метою документу є забезпечення безпечної експлуатації трубопровідних мереж та зменшення ризиків аварій в межах населених пунктів.	[27]
ДБН В.2.5-20:2018 «Газопостачання»	Вимоги до проектування, будівництва, капітальному ремонті, технічному переоснащенні та експлуатації систем газопостачання. Норми відносяться до системи газопостачання з надлишковим тиском не більше 1,2 МПа. Визначаються	[15]

	вимоги до різних елементів систем газопостачання, організацію контрольно-вимірювальних пунктів, встановлення електрозрівняльних перемичок, ізолюючих фланцевих та муфтових з'єднань та заходи і правила проектування трубопроводів з метою забезпечення безпечної та ефективної роботи систем газопостачання для різнотипних споживачів. Окрім того обговорюються умови використання і прокладання газопроводів із поліетиленових труб.	
Правила Безпеки Систем Газопостачання	Регулювання безпечної експлуатації систем газопостачання, включаючи будівництво, реконструкцію, експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт газопроводів і газових установок. Встановлюються вимоги до випробувань, введення в експлуатацію, технічного обстеження та обслуговування, а також електрохімічного захисту газопроводів. Мета документа — запобігання аваріям, вибухам і нещасним випадкам при користуванні системами газопостачання. Норми відносяться до газопроводів під тиском не більше 1,2 МПа, для промислових, сільськогосподарських підприємств та житлових будинків. Ці вимоги стосуються як сталевих так і	[28]

	поліетиленових трубопроводів, а також їх з'єднань.	
Кодекс Усталеної Практики «Газорозподільчі Системи»	Документ встановлює вимоги до проектування, будівництва та експлуатації газорозподільних мереж з тиском до 1,2 МПа. Він визначає правила розміщення мереж, допустимі відстані, методи контролю якості монтажу, вимоги до захисних покривів та електрохімічного захисту, а також випробувань газопроводів. Описується порядок введення, експлуатація та виведення трубопроводу з експлуатації. Окрім того формуються вимоги до поліетиленових труб для будівництва нових та реконструкції існуючих сталевих газопроводів.	[29]
СОУ 49.5- 30019801- 115:2014 «Правила технічної експлуатації магістральних газопроводів»	Галузевий нормативний документ, який встановлює загальні принципи експлуатації, технічного обслуговування, ремонту, діагностики та модернізації магістральних газопроводів, організацію робіт і ведення технічної документації. Крім того документ описує вимоги і норми організації експлуатації та ремонтних робіт для об'єктів газопостачання таких як: компресорні станції, підземні сховища газу, газорозподільні та газовимірювальні станції. Основна мета — забезпечити безпечну,	[13]

	ефективну та безперебійну роботу газотранспортної системи України.	
ДБН В.2.5-41:2009 «Газопроводи із поліетиленових труб»	Описуються правила проектування, будівництва та реконструкції газопроводів із поліетиленових труб, з тиском до 1,0 МПа. Наводяться вимоги до поліетиленових труб, методики розрахунку трубопроводів на міцність та стійкість, процедури реконструкції підземних сталевих газопроводів із використанням поліетиленових труб, методи зварювання поліетиленових труб; з'єднання поліетиленових труб зі сталевими; методи контролю якості будівельно-монтажних робіт; порядок випробування та приймання.	[30]
ДСТУ Б В.2.7-73-98 «Труби поліетиленові для подачі горючих газів. Технічні умови»	Визначаються вимоги до поліетиленових труб для систем газопостачання, такі як: розміри, технічні характеристики труб, методи випробувань, правила приймання, транспортування та зберігання. Також регламентуються заходи безпеки та охорони довкілля при виробництві і використанні труб. Стандарт гармонізований з міжнародними нормами і є придатним для цілей сертифікації.	[31]
ДСТУ Б В.2.7-179:2009 «Деталі з'єднувальні для	Документ надає технічні вимоги до з'єднувальних деталей для труб із поліетилену типів ПЕ 80 і ПЕ 100, які	[32]

газопроводів із поліетиленових труб. Технічні умови»	використовуються для будівництва та ремонту газопроводів, що транспортують горючі гази під тиском до 1,0 МПа. Стандарт регламентує вимоги до матеріалів, конструкції, розмірів, методів зварювання, технічних характеристик, випробувань та безпеки. Він спрямований на забезпечення надійності з'єднань і безпеки експлуатації трубопровідних систем.	
ДСТУ Б В.2.7-177:2009 «Перехідники поліетилен-сталь для газопроводів із поліетиленових труб. Технічні умови»	Регламентується технічні умови до перехідників "поліетилен-сталь", які застосовуються для з'єднання поліетиленових та сталевих труб у газопроводах із максимальним робочим тиском до 1,0 МПа. Стандарт встановлює вимоги до параметрів та розмірів переходів ПЕ/сталь, технічних характеристик, методів контролю, маркування, безпеки, транспортування, зберігання та монтажу. Він спрямований на забезпечення герметичності, довговічності та безпеки таких з'єднань.	[33]
ISO 13623:2017 «Petroleum and natural gas industries — Pipeline transportation systems»	Міжнародний стандарт, що встановлює вимоги та рекомендації для проектування, будівництва, випробувань, введення і виведення з експлуатації та обслуговування трубопровідних систем, для транспортування нафти та природного газу.	[34]

	Відноситься як до сухопутних, так і до морських металевих трубопроводів.	
ASME B31.8-2022 «Gas Transmission and Distribution Piping Systems»	Американський стандарт, який встановлює вимоги для проектування, виготовлення, встановлення, перевірки та випробувань систем газопроводів, що використовуються для транспортування газу. Стандарт визначає вимоги до труб, як сталевих так і виготовлених з поліетилену, методи зварювання, випробувань, матеріалу ізоляції, контролю корозії, аварійного реагування на аномальні режими роботи та організації безпечної експлуатації.	[35]
EN 12007-1:2012 «Gas infrastructure. Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar»	Серія європейських стандартів, що описує вимоги до трубопроводів, для максимального робочого тиску до 16 бар. Включаючи їх проектування, будівництво, введення в експлуатацію, виведення з експлуатації, технічного обслуговування, реконструкції, розширення, тощо. Конкретні функціональні вимоги до поліетиленових трубопроводів наведені в EN 12007-2, до сталевих трубопроводів - в EN 12007-3, а до реконструкції трубопроводів - в EN 12007-4.	[36, 37, 38, 39]

Проектування, будівництво та експлуатація трубопроводів здійснюються відповідно до чинних будівельних норм та нормативних документів. У межах населених пунктів передбачається підземне прокладання газопроводів за умови надійного протикорозійного захисту [15, 27]. Наведені документи представляють

собою набір вимог до систем транспортування природного газу та їх елементів. Крім того під час аналіз відмічається зростання посилань на поліетиленові трубопроводи, в тому числі в контексті їх використання для реконструкції трубопроводів із сталі. Як результат підтверджується ймовірність появи трубопроводів із складною неоднорідною структурою.

Таблиця 1.3 – Аналіз нормативних вимог до електрохімічного захисту трубопроводів.

Назва нормативного документу	Основні положення, що регламентує документ	Літературне джерело
ДСТУ 4219:2003 «Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії»	Документ регламентує вимоги щодо протикорозійного захисту магістральних трубопроводів. Зокрема, він встановлює: критерії корозії (корозійна активність, блукаючі струми, температура, тощо); вимоги, методи і матеріали для нанесення захисних покриттів; правила проектування і монтаж систем електрохімічного захисту; а також, методи контролю стану протикорозійного захисту. Документ призначений для забезпечення ефективного захисту магістральних трубопроводів від корозії, що сприяє підвищенню їх надійності та довговічності.	[40]
ДСТУ Б В.2.5-29:2006 «Газопроводи підземні сталеві.	Стандарт встановлює вимоги до захисту від корозії трубопроводів систем газопостачання із тиском до 1,2 МПа. Основні аспекти стандарту включають:	[41]

Загальні вимоги до захисту від корозії»	критерії та чинники корозії; використання захисних покриттів (пасивного захисту) та електрохімічного захисту (активного захисту); проектування і оцінка ефективності електрохімічного захисту; заходи щодо обмежень блукаючих струмів. Документ призначений для забезпечення надійної та безпечної експлуатації підземних газопроводів шляхом впровадження комплексного захисту від корозії, що включає як пасивний, так і активний захист.	
ВБН В.2.3-00018201.01.01.01-96. «Система антикорозійного захисту об'єктів нафтогазового комплексу. Основні положення. Загальні вимоги.»	Надає уніфіковані методи і засоби що застосовуються під час електрохімічного захисту об'єктів нафтогазового комплексу. Встановлюються основні положення та загальні вимоги до систем антикорозійного захисту, такі як: обладнання, матеріали та вироби для антикорозійного захисту. Регламентує порядок проектування, будівництва, експлуатації та контролю систем захисту від підземної, атмосферної та внутрішньої корозії. Документ встановлює єдині технічні вимоги до антикорозійного захисту для підприємств нафтогазового комплексу України, незалежно від форм власності. Він охоплює всі етапи - від проектування до експлуатації	[42]

	систем антикорозійного захисту об'єктів нафтогазової галузі.	
320.03329031.008– 97 «Інструкція з електрохімічного захисту підземних газопроводів та підземних резервуарів зрідженого газу»	Інструкція регламентує роботи із проектування, будівництва та експлуатації засобів електрохімічного захисту для підземних споруд систем газопостачання (газопроводи та резервуари) із тиском до 1,2 МПа. Документ визначає вимоги, порядок та правила проектування, експлуатації та контролю систем ЕХЗ. Наводяться вимоги до пасивного та активного захисту, зокрема наводяться методи розрахунку установок катодного, протекторного та дренажного захисту. Інструкція також містить порядок виконання монтажних та налагоджувальних робіт. Її мета — забезпечення надійної та довготривалої протикорозійної роботи сталевих елементів систем газопостачання в умовах підземного середовища.	[43]
ISO 15589-1:2015 «Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems»	Міжнародний стандарт, що описує вимоги до катодного захисту підземних та наземних сталевих трубопроводів. Документ встановлює критерії електрохімічного захисту, передумови та вимоги для застосування катодного захисту, параметри установок катодного захисту, анодів, ізолюючих з'єднань та засобів контролю. Він також описує методи технічного обслуговування, моніторингу та оцінки	[44]

	ефективності захисту від корозії. Стандарт застосовується до нових і діючих трубопроводів, включаючи ті, що проходять через агресивні середовища. Його мета — забезпечення надійності та безпеки експлуатації трубопровідних систем шляхом мінімізації ризику корозійного пошкодження.	
EN 12954:2019 «General principles of cathodic protection of buried or immersed onshore metallic structures»	Цей європейський стандарт описує загальні принципи впровадження та управління системою катодного захисту підземних трубопроводів від корозійних впливів. Він визначає критерії захисту, регламентує принципи проектування, встановлення, експлуатації та технічного контролю систем катодного захисту, вимоги до елементів систем електрохімічного захисту, а також методи контролю потенціалу та оцінки корозійної активності. Стандарт є основою для забезпечення довготривалого антикорозійного захисту трубопровідної інфраструктури.	[45]
NACE SP0169-2024 «Control of External Corrosion on Underground or Submerged	Один із найвідоміших галузевих стандартів, мета якого надання критеріїв для запобігання та контролю корозії підземних або занурених металевих трубопроводах. Стандарт розглядає контроль корозії; проектування трубопроводів; вимоги до покриттів; критерії, проектування,	[46]

Metallic Piping Systems»	встановлення та технічного обслуговування систем катодного захисту в підземних системах трубопроводів; контроль блукаючих струмів. Стандарт широко застосовується у нафтогазовій промисловості США та за кордоном і визнається як міжнародна практика у сфері електрохімічного захисту. Його положення є основою для розробки національних технічних норм і галузевих інструкцій.	
--------------------------	---	--

Протикорозійний захист повинен бути обов'язково передбачений в усіх проектах будівництва підземних споруд систем газопостачання [43]. Основними методами придушення корозійних впливів є використання ізолюючих покриттів і катодної поляризації, які забезпечують комплексний електрохімічний захист. Усі наведені документи притримуються схожого алгоритму в процесі проектування електрохімічного захисту трубопроводів, який полягає у визначенні критеріїв та чинників корозії, після чого іде вибір або визначення параметрів існуючого ізоляційного покриття та проектування засобів катодного захисту. Представлені в таблиці міжнародні стандарти є основою для розробки багатьох національних норм (зокрема в Україні).

Українські протикорозійні засоби для газопроводів спираються на ДБН В.2.5-20:2018 «Газопостачання» [15], що надає вимоги щодо проектування систем газопостачання в тому числі наголошуючи увагу на забезпеченні надійного електрохімічного захисту від ґрунтової корозії та корозії блукаючими струмами зовнішніх підземних сталевих газопроводів відповідно до ДСТУ Б В.2.5-29 [41], інструкції 320.03329031.008 [43]. Організація EX3 також включає закладання контрольно вимірювальних пунктів кожні 100-150 метрів у містах, 200 м – у

селищах, та 500 м – поза населених пунктів, а також в точках підвищеної корозійної небезпеки, таких як повороти газопроводу, місця максимального зближення з джерелами блукаючих струмів, перетину перешкод та колій, тощо.

Згідно з документом «Системи газопостачання. Газопроводи підземні сталеві. Загальні вимоги до захисту від корозії» [41] засоби електрохімічного захисту представлені такими заходами як: раціональний вибір траси, захисних покриттів, типу електрохімічного захисту і методів обмеження блукаючих струмів. Крім того наводяться методи ремонту, контролю і перевірки якості виконаних робіт, а також вимірювання параметрів захищеності вже існуючих газопроводів (такі як питомий опір ґрунту, густина катодного струму, захисний потенціал, тощо).

Згідно з розглянутими документами, за умови відсутності блукаючих струмів, значення поляризаційних потенціалів підземних сталевих трубопроводів повинно знаходитись в межах між -0,85 В та -1,15 В. Якщо немає можливості провести вимірювання, значення сумарних потенціалів (з поляризаційною і омичною складовою) необхідно підтримувати в межах від - 0,9 В до - 2,5 В (для мастикових покриттів) або - 3,5 В (для покриттів з екструдованого поліетилену) [41]. У випадку наявності джерел блукаючих струмів, увага приділяється унеможливленню появи анодних та знакозмінних зон, за одночасної умови підтримання мінімальних миттєвих потенціалів не менше величини стаціонарного потенціалу, або - 0,7 В, якщо визначити його неможливо.

Якщо підтримання зазначених потенціалів технічно унеможливлено, або не є раціональним допустимо використання пом'якшеного критерію захищеності:

$$E_{\text{зах}_{\min}} = E_c - 0,1 \text{ В}$$

Де E_c – стаціонарний потенціал газопроводу.

Проектування системи електрохімічного захисту здійснюється на основі корозійних вишукувань відповідних організацій [41]. В процесі досліджень визначаються:

- Питомий опір ґрунту
- Наявність і характер блукаючих струмів

- Поточний стан об'єкту захисту
- Розріз ґрунту
- Розташування вже існуючих станцій катодного захисту та їх режим роботи

На основі отриманих даних визначаються параметри системи електрохімічного захисту [40]. Для установок дренажу такими параметрами є:

- Зона захисту
- Сила струму дренажу
- Опір дренажного кола

Для протекторного захисту:

- Сила захисного струму
- Опір розтіканню струму протектора

Для станцій катодного захисту визначаються наступні параметри:

- Зона захисту
- Сила захисного струму
- Напруга перетворювача
- Опір розтіканню струму анодного заземлення

Для контролю ефективності роботи ЕХЗ здійснюється вимірювання потенціалів газопроводу в контрольно-вимірювальних пунктах обладнаних відповідно до ДБН В.2.5-20 [15]. Контроль якості протикорозійного захисту здійснюється за допомогою різномісних обстежень із різною періодичністю. Так експлуатаційний контроль включає:

- Візуальний огляд, профілактика, поточний ремонт
- Контроль потенціалів
- Контроль струму, напруги, часу роботи станцій
- Контроль стану фланців
- Контроль стану металу трубопроводу в шурфах

Проаналізована документація в більшості випадків або не нормує вимоги до джерела постійного струму станцій катодного захисту, або не надає значної уваги особливостям роботи випрямлячів, як джерел живлення СКЗ. Крім того майже не

приділяється увага випадкам неоднорідної структури нитки трубопроводу і її можливих впливів на його протикорозійну захищеність.

1.3 Аналіз існуючих засобів електрохімічного захисту в Україні і закордоном

Трубопроводи є критично важливими елементами інфраструктури, що забезпечують транспортування води, нафти, газу та інших ресурсів. Переважна більшість газопроводів у світі і Україні представлена транспортною системою підземних сталевих трубопроводів. Так, майже 99% магістральних трубопроводів в США [47] та 60% розподільних трубопроводів в ЄС [48] виготовлено із сталі. При цьому через значний відсоток тривало експлуатованих трубопроводів в газотранспортній мережі України (30% експлуатується більше 35 років; 29% функціонують понад 30 років [6]), організаційні і фінансові складнощі її модернізації, відсоток сталевих газопроводів є ще більшим. Вони характеризуються високими показниками механічної стійкості до впливу геотектонічних зсувів ґрунту і довготривалим терміном експлуатації, мінімальною залежністю від сезонних та погодних факторів, що є критичним для забезпечення безперебійного транспортування газу. З іншого боку сталеві трубопроводи мають значну схильність до корозії, яка призводить до винесення матеріалу із конструкції що призводить до погіршення механічних характеристик газогону, появи тріщин, пітінгів та отворів.

Протягом експлуатації газопроводи піддаються впливам комбінацій різних фізико-хімічних чинників таких як температура, водневмісні і корозійно-агресивні елементи середовища. Ці фактори знижують їх міцність та надійність. Корозійне руйнування металу є наслідком його хімічної або електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем. Для підземних трубопроводів основними видами корозії є:

Ґрунтова корозія. Вона виникає через контакт металу з вологим ґрунтом, який може містити агресивні іони, такі як хлориди та сульфати. Особливо небезпечні

ділянки з пошкодженим ізоляційним покриттям, де метал безпосередньо взаємодіє з ґрунтом.

Мікробіологічна корозія. Її поява спричинена діяльністю мікроорганізмів, які продукують корозійно-активні речовини, наприклад, сірководень.

Механічні удари, коливання, пульсації тиску та вібрація помітно прискорюють розвиток внутрішніх корозійних процесів у трубопроводах і сприяють утворенню втомних мікротріщин у матеріалі, особливо в місцях підвищених напружень, таких як зварні шви, подряпини, задирки, що виникають на етапах виробництва та монтажу, а також виробничі дефекти. Значна довжина трубопроводів та специфічні умови їх експлуатації призводять до комплексного впливу корозійних і механічних факторів. Коливання температур, різноманітні типи ґрунтів та виникнення пластичних деформацій створюють умови для формування корозійних гальванічних пар і прискорюють процес старіння металу трубопроводу. Як показують дослідження щороку через корозійний вплив виходять з ладу 2-3% підземних металевих споруд [49]. Деградація мільйон тон металів під впливом корозійних процесів завдає збитків близько 3-5% внутрішнього валового продукту промислово розвинутих країн. При цьому до збитків можна відносити не тільки прямі втрати, які можливо підрахувати (витрати на матеріали і виготовлення нових конструкцій на заміну зруйнованим), а і непрямі втрати, які визначити не завжди просто, як то: зниження надійності конструкцій, наслідки нещасних випадків пов'язаних з відмовою обладнання [50], простій обладнання під час ремонту, втрати та псування продукції, високими допусками на корозію, тощо.

За механізмом перебігу найбільш поширеною у випадку сталевих підземних трубопроводів є електрохімічна корозія [51], яка представляє собою окиснення металу, яке супроводжується хімічними реакціями та переносом електричних зарядів між металом і навколишнім середовищем, при обов'язковій присутності електроліту (наприклад води).

Як результат неоднорідності структури та складу самого металу, різного доступу кисню, та інших причин, різні ділянки поверхні металу мають різні потенціали. Як наслідок, утворюються корозійні гальванічні пари (Рис. 3), де

ділянка з більш від'ємним потенціалом стає анодом, а менш від'ємна - катодом. А отже, в металі перебігають два одночасних процеси: катодний (відновлювальний) процес та анодний (окислювальний) процес. [52]

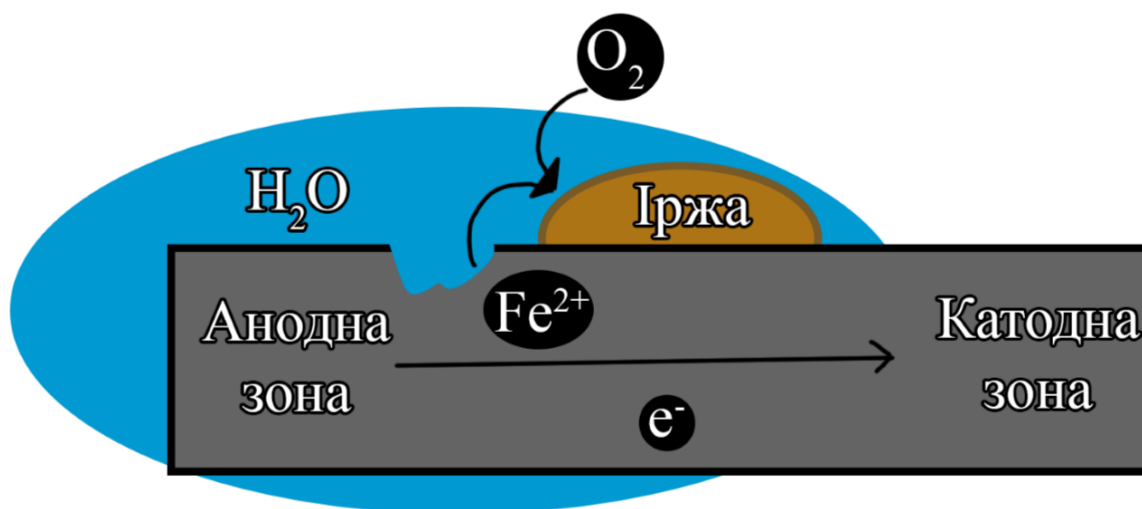


Рис. 3. Процес електрохімічної корозії

На аноді відбувається окислювальний процес, під час якого позитивні іони металу переходять в розчин, а вільні (валентні) електрони, що утворилися, переміщуються до менш від'ємного катоду. В результаті, анод втрачає і іони і електрони, тобто руйнується (кородує).

Під час катодного процесу відбувається асиміляція надлишкових (валентних) електронів з металу, яке називається деполяризацією. Під час деполяризації, молекулами чи атомами деполяризатора, що знаходяться у розчині, помітне зменшення маси металу не відбувається.

Для існування корозійної гальванічної пари в підземному сталевому трубопроводі повинні утворитися наступні умови [51]:

- Існування анодної зони
- Існування катодної зони
- Наявність електричного шляху, що з'єднує анод і катод, зазвичай це буде сам трубопровід.
- Анод і катод повинні бути занурені в електроліт, зазвичай це вологий ґрунт.

Як наслідок, між анодом і катодом утворюється струм, напрямком якого протилежний руху електронів, що рухаються від катоду до аноду. Але оскільки

струм може протікати лише по замкнутому ланцюгу, тому далі струм буде стікати з аноду в розчин, а потім натікати на катод із електроліту.

Корозія суттєво скорочує термін служби трубопроводів, особливо якщо присутній водень, що виділяється із транспортованого продукту. Водень здатний проникати в метал і дифундувати до зовнішньої стінки труби, що в умовах електрохімічної корозії відбувається під час катодного процесу.

Сорбований металом водень змінює швидкість розчинення заліза, створюючи локальні осередки корозії, такі як пітинги й корозійні тріщини. Наводнена сталь у поєднанні з ненасиченим воднем анодом, призводить до утворення короткозамкненої гальванопари з неполярним катодом, що багаторазово прискорює процеси корозії, та може перевищити її звичайну швидкість більш ніж у тисячу разів.

Корозійні пошкодження призводять до зменшення товщини стінок труб, утворення дефектів, таких як раковини, тріщини та отвори. Це, в свою чергу, знижує несучу здатність трубопроводу, підвищує концентрацію напружень у пошкоджених зонах та збільшує ризик виникнення аварійних ситуацій. Дослідження показують, що наявність корозійних дефектів може суттєво зменшити залишковий ресурс трубопроводу, особливо за наявності циклічних навантажень, які сприяють розвитку втомних тріщин.

Для зменшення впливу корозії та продовження терміну служби підземних сталевих трубопроводів застосовуються такі заходи:

- Пасивний захист: нанесення ізоляційних матеріалів, що запобігають контакту металу з агресивним середовищем.
- Активний захист: використання електрохімічних методів для зниження корозійної активності металу.
- Регулярний моніторинг та обслуговування: своєчасне виявлення та усунення пошкоджень, заміна зношених ділянок трубопроводу.
- Використання корозійно-стійких матеріалів: застосування сталей з підвищеною стійкістю до корозії або альтернативних матеріалів, таких як полімери чи композити.

Електрохімічний захист від корозії базується на зміні електрохімічного потенціалу металевої поверхні, що дозволяє суттєво знизити швидкість корозійних процесів або повністю їх припинити. Класифікація методів ЕХЗ[53] наведено на Рис. 4 Існує два основних напрямку розвитку методів ЕХЗ: пасивні та активні.

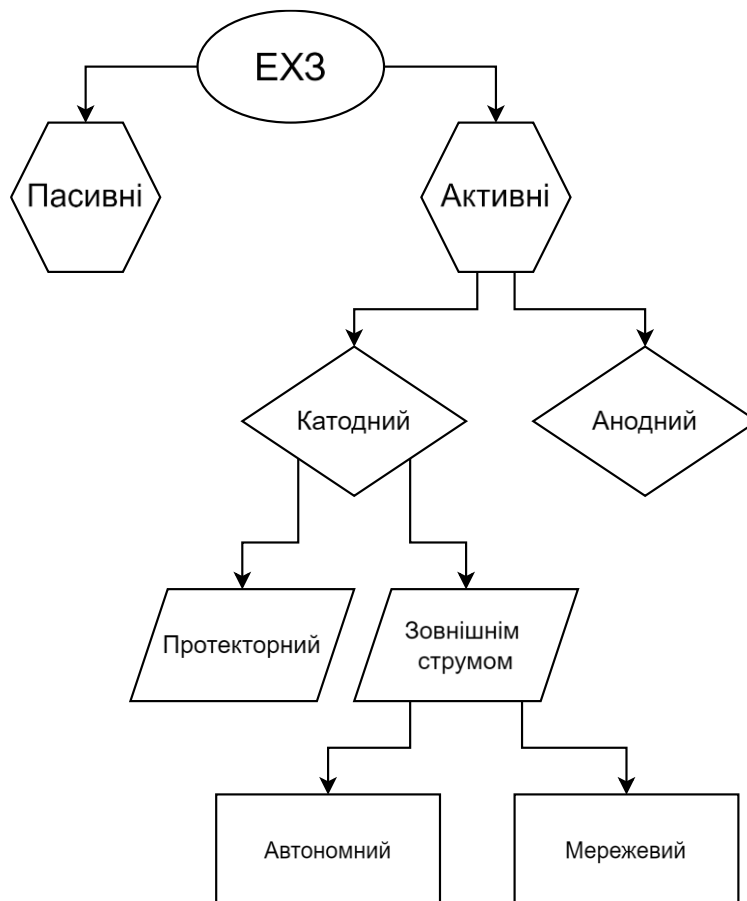


Рис. 4. Класифікація методів ЕХЗ

Пасивний тип протикорозійного захисту представлено різноманітними покриттями, головним завданням яких є ізолювати метал трубопроводу від корозійного середовища [51]. Основними напрямками розвитку пасивних методів ЕХЗ є вивчення захисних покриттів органічного походження та розробка «розумних» покриттів.

Захисні органічні покриття [54, 55, 56] - це складні продукти, що складаються з різних переривчастих твердих функціональних добавок, зазвичай відомих як «пігменти», які містяться в безперервній полімерній фазі, відомій як «зв'язуюча речовина». Такі покриття зазвичай розглядаються як ті, що функціонують,

забезпечуючи бар'єр між металом та навколишнім середовищем, в ідеалі забезпечуючи високу стійкість до руху іонів.

Розумні покриття зазвичай класифікуються на основі методів приготування, функціональних і реактивних компонентів, а також їх використання та застосування. До типових покриттів належать [57]: самовідновлювані[58, 59], самоочищувальні[60, 61] та мікрокапсульні[62, 63] покриття.

В реальності усі покриття незалежно від їх природи і якості не можуть забезпечити повну ізоляцію металу труби від навколишнього середовища протягом усього терміну експлуатації. Це проявляється у вигляді, пошкоджень, подряпин, та отворів утворюються під час функціонування, транспортування та монтажу газогону. Метал у місцях утворення таких дефектів починає взаємодіяти з корозійним середовищем, що значно прискорює корозію і підвищує ризики утворення каверн, пітінгів, тріщин і витоків. На практиці виключно пасивний захист підземних трубопроводів майже ніколи не захищає трубопровід самостійно, а завжди разом із засобами активного захисту. Основним завданням пасивного захисту є зменшення площі відкритого металу, тим самим зменшуючи струм необхідний для його активного захисту. Активні методи ЕХЗ поділяються на анодний та катодний захист.

Анодний захист використовується для захисту металів, що утворюють на своїй поверхні пасивну плівку, наприклад, нержавіючих сталей або титанових сплавів. Цей метод полягає в підключенні металевої конструкції до анода електролітичної системи та підвищенні її потенціалу до рівня, при якому на поверхні металу утворюється захисний оксидний шар. Цей шар запобігає подальшій корозії. Так як, анодний захист застосовують при експлуатації обладнання в середовищах з високою електропровідністю і виготовленого із матеріалів, що досить легко пасивуються[53], це забезпечує високу ефективність роботи таких методів у сфері взаємодії з літій-сульфуровими батареями[64, 65, 66, 67, 68] та аерокосмічній індустрії[69, 70, 71].

Катодний захист є найпоширенішим методом активного захисту підземних споруд, при якому металеву конструкцію роблять катодом у спеціальній

електрохімічній системі. Це досягається шляхом подачі струму на конструкцію, що захищається (наприклад, трубопровід), від якогось зовнішнього джерела. Коли подається достатній струм, вся конструкція має один потенціал; таким чином, позбавляючись анодних і катодних ділянок. Метою катодного захисту є зниження потенціалу металу до рівня, при якому корозія або значно сповільнюється, або повністю припиняється.

У протекторному (гальванічному) методі захисту до захищуваної конструкції приєднують протектори — спеціальні аноди з металів, що мають нижчий електрохімічний потенціал, ніж основний метал. Протекторні метали (магній, цинк, алюміній) кородують замість основного металу, захищаючи його. Цей метод не потребує зовнішнього джерела живлення, але потребує регулярної заміни протекторів через їх зношування.

Протекторні системи захисту зазвичай використовуються для захисту невеликих систем або коли зовнішнє джерело живлення недоступне[72], за умови якщо його струм є достатнім для компенсації блукаючих струмів. Таким чином використання гальванічного захисту активно використовується для захисту залізобетону[73, 74, 75, 76] та морського застосування, такого як нафтові вишки, корпуси кораблів, та пірси[73, 74, 77, 78].

Метод захисту зовнішнім струмом передбачає підключення металу, що захищається, до негативного полюса джерела постійного струму. Позитивний полюс підключають до інертного анода (графіт, платина або чавун)[72]. Електричний струм змінює потенціал металу таким чином, що корозія сповільнюється або припиняється.

Станції катодного захисту зовнішнім струмом умовно можливо поділити на дві великі підгрупи: автономні та мережеві.

Автономні станції представлені установками, що живляться від незалежних або відновлювальних джерел електроенергії [79, 80], що не потребують постійного підключення до електричної мережі. Вони є незамінними у випадках їх розташування в віддалених регіонах, проведення електричних мереж куди неможливе чи нераціональне. Для автономних станцій катодного захисту

основними генераторами потужності можуть виступати різноманітні засоби забезпечення незалежного живлення.

Перший метод це забезпечення автономного живлення за допомогою використання різних генераторів, таких як класичні дизельні або газові мотор-генератори [81] або термоелектричні генератори [82, 83], що перетворюють теплову енергію в електричну.

Наступне джерело, це використання гнучких електретних генераторів [84]. Новітні рішення включають використання гнучких електретних генераторів, які можуть генерувати енергію з вібрацій або механічної енергії довкілля (наприклад, від хвиль або вітру). Ці генератори використовують механічну енергію для захисту металевих конструкцій, що робить їх ідеальними для важкодоступних місць.

Простим та очевидним рішенням є сонячні електростанції [81, 85, 86, 87]. Таке рішення є особливо популярним для регіонів з високою інсоляцією, і недостатньо розвиненою мережею електрифікації, забезпечуючи надійну та автономну роботу систем електрохімічного захисту. Одна із ранніх робіт [81] датується 1987 роком і присвячена використанню альтернативних джерел енергії для катодного захисту. У дослідженні описується використання сонячних панелей для катодного захисту металевих конструкцій, зокрема газових та нафтових свердловин, у віддалених місцях, де немає доступу до електромережі. У цій роботі сонячні панелі розглядаються як економічно вигідне джерело енергії для катодного захисту у віддалених районах. На відміну від традиційних систем катодного захисту з сонячними панелями, де використовуються акумулятори для забезпечення постійного струму, пропонується метод катодного захисту без використання акумуляторів, де сонячні панелі перезаряджають захищену конструкцію, коли енергія доступна.

Згодом технології відновлювальних джерел енергії розвинулись, а тренд до зеленої енергетики набув потужності. Сучасні дослідження у цьому напрямку представлені роботами по типу [85]. В роботі описується система катодного захисту підземного трубопроводу з використанням сонячної енергії. Наводиться процес проектування системи катодного захисту для конкретного трубопроводу,

приймаючи до уваги його характеристики. Дослідження демонструє, що використання сонячної енергії для катодного захисту трубопроводу є ефективним та економічно вигідним рішенням

Логічним продовженням ідеї є реалізація гібридних систем [87, 88, 89]. Сутність таких систем полягає в комбінуванні генерації потужностей, що генерується від сонячних панелей, вітрових турбін та інших альтернативних джерела енергії задля компенсації нестабільностей від кожного окремого джерела. У дослідженні [88] описується моделювання та симуляція гібридної системи відновлюваної енергетики для живлення установки катодного захисту. Розроблена гібридна система складається з: вітрової турбіни, сонячних панелей та акумуляторної батареї. Для перевірки отриманої системи ряд досліджень, які включають: моделювання системи в MATLAB/SIMULINK; аналіз продуктивності системи при різних погодних умовах; оцінку ефективності виробництва енергії від вітру та сонця; аналіз роботи акумуляторної системи зберігання енергії. Результати показують, що: система здатна адекватно забезпечувати живлення установки катодного захисту, працює без перебоїв при різних погодних умовах та забезпечує безперервне електропостачання.

Сегмент автономних систем катодного захисту активно розвивається в районах із складною та протяжною географією, такі як Африка та Америка, де повсякчасна електрифікація ускладнена, а погодні умови та сонячна інсоляція, навпаки є сприятливими для впровадження відновлювальних джерел енергії.

З іншого боку мережеві катодні станції розташовуються в регіонах, де проблеми нестачі енергетичних ресурсів не стоять, через це новітні розробки сфокусовані у сфері розробки та модернізації алгоритмів для підвищення ККД та життєвого циклу станції та об'єкту, що захищається. Новітні рішення, що пропонуються, налічують:

1. Встановлення дублюючої станції катодного захисту, що захищає від струму натікання, що викликаний специфічним джерелом(наприклад, метро)[90].
2. Вивчення оптимальних параметрів аноду(склад, розташування, тощо), за допомогою методів математичного моделювання та штучного інтелекту[91, 92].

3. Моделювання роботи станції катодного захисту за для розробки та подальшого впровадження новітніх алгоритмів керування роботою станції катодного захисту[93, 94].

Основним завданням катодного електрохімічного захисту полягає в приглушенні анодних струмів корозійних гальванічних пар, що утворюються в матеріалі труби, за допомогою катодних струмів зовнішнього джерела. Інакше кажучи, якщо струм, що натікає на трубопровід, більше ніж струм, що стікає з нього, то анодний процес заміниться на катодним [53]. З цією метою на трубопровід встановлюються станції катодного захисту, що штучно знижують його потенціал відносно корозійного середовища, тим самим формують ланцюг протікання струму СКЗ – заземлюючий анод – земля – трубопровід. Типова схема підключення СКЗ до підземного сталевого трубопроводу зображена на Рис. 5. До її складу входять:

1. Основний блок станції катодного захисту в якому розташовуються основні елементи: трансформатор, перетворювач і система керування;
2. Анодний заземлювач різної конфігурації;
3. Об'єкт, що захищається;
4. Контактні пристрої
5. Кабельні лінії

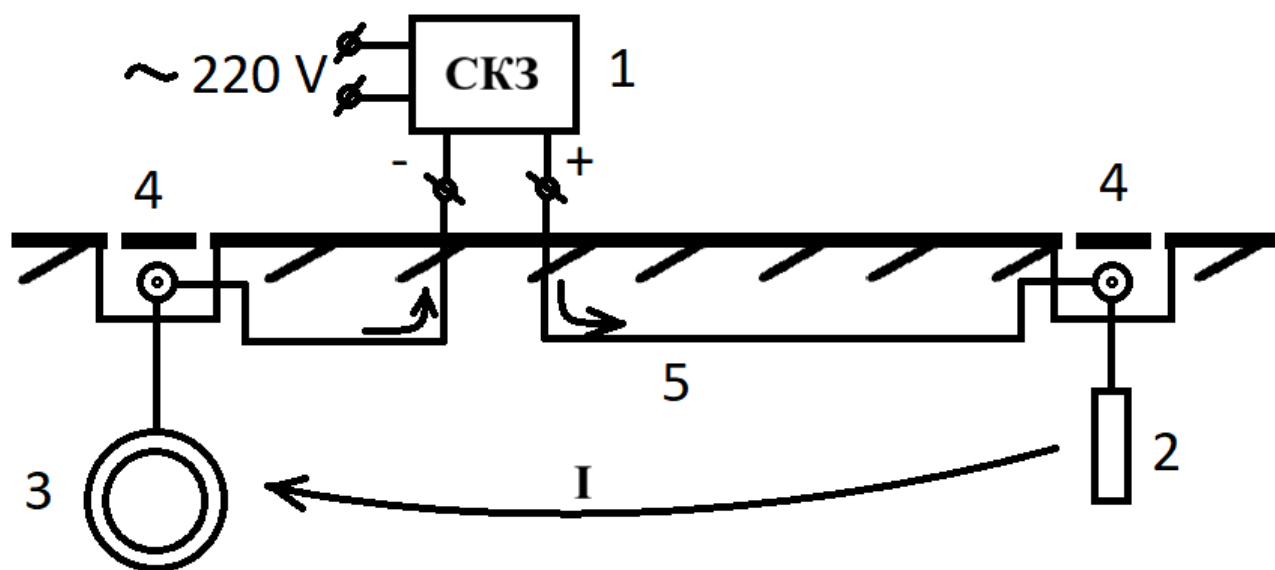


Рис. 5. Типове конструктивне виконання катодного захисту трубопроводу

Також вздовж трубопроводу організуються контрольно вимірювальні пункти та встановлюються електроди порівняння, що забезпечують можливість контролю і зворотного зв'язку у системі.

Основний блок станції, в якому розташовуються ключові елементи системи катодного захисту, можуть значно відрізнитися своєю структурою, як з точки зору конструктивних рішень так і функціональними можливостями, що впливають на ефективність чи швидкодію електрохімічного захисту. Живлення станції зазвичай здійснюється від побутової мережі змінного струму 220 В 50 Гц, яка послідовно знижується і перетворюється в постійний струм за допомогою випрямляча. Він також може включати панель керування, сигналізацію про перевищення/недосягнення рівня захисту і, за необхідності, підключатися до центрального моніторингового комп'ютера. Також можуть включатися інші функції, залежності від вимог і умов експлуатації.

Нормативною документацією надаються технологічні вимоги до перетворювачів станцій катодного захисту[40]:

- Плавне або ступеневе регулювання
- Зміна напруги або струму від 10 до 100%
- Пульсація струму не більше ніж 3%
- Напруга спрацювання захисту станції не менше 250 В
- Ступінь захисту IP34
- Повітряне або масляне охолодження
- Максимальна температура трансформатора 120 С
- Рівень шуму не більше 60 дБ
- Можливість роботи без обслуговування не менше 6 місяців
- Коефіцієнт корисної дії не менше 70%
- Коефіцієнт потужності не менше 80%
- Наявність лічильників часу і електроенергії
- Експлуатаційний термін не менше 10 років

Як джерела постійного струму станції катодного захисту, як правило, використовуються перетворювачі різної конструкції, що живляться від мережі змінного струму. Перетворювачі дозволяють регулювати захисний струм у широких межах, забезпечуючи захист трубопроводу за будь-яких умов. Як джерела живлення установок катодного захисту використовуються повітряні лінії 0,4; 6; 10 кВ.

За методом керування параметрами станції катодного захисту можна поділити на три групи: перетворювачі з ручним регулюванням параметрів; автоматичні перетворювачі; автоматичні перетворювачі з функцією телеконтролю та управління.

Перетворювачі з ручним регулюванням вихідної напруги, використовуються, коли параметри об'єкта, що захищається і необхідний захисний струм незмінні досить довгий час. Метод регулювання залежить безпосередньо від конструкції випрямляча і може виконуватись як механічним перемиканням обмоток силового трансформатора, так і коригування режиму роботи блока керування силовими ключами випрямляча.

З автоматичною підтримкою заданих параметрів. У випадку постійно змінних умов середовища (блукуючі струми, зміна питомого опору ґрунту, інші фактори), в яких нерідко працюють системи катодного захисту, використовуються перетворювачі з автоматичним режимом регулювання параметрів. Стабілізація вихідних параметрів СКЗ виконується або по значенню заданого вихідного струму СКЗ або заданого потенціалу на об'єкті що захищається, відносно мідно-сульфатного електроду порівняння. Такі СКЗ надають більш надійного електрохімічного захисту у порівнянні із не автоматичними установками.

Третя група перетворювачі із системами телемеханіки. Оскільки, із розвитком систем автоматики, інтеграція інформаційних засобів стала невід'ємною складовою технологічних систем, станції катодного захисту із функцією телеконтролю і керування стали безперечним трендом. Такі установки відрізняються від попередньої групи виключно наявністю інформаційних сигналів, що оброблюються і виводяться для керування на системи телемеханіки. За рахунок

чого реалізується дистанційне керування і регулювання параметрами станції катодного захисту.

За принципом роботи силової схеми найбільш розповсюджені типи СКЗ представлені у вигляді трансформаторного і інверторного виконання.

Перша група є традиційним типом станцій, які використовуються в катодному захисті вже давно. Вони складаються з трансформатора і схеми випрямляча. Випрямляч може бути як некерованим, на основі діодів, так і керованим, з використанням тиристорів або транзисторів. Такі станції можуть бути однофазними або трифазними і відомі своєю простотою та надійністю. Регулювання рівня вихідної напруги реалізується або керованим випрямлячем у складі станції, або за допомогою використання трансформаторів з відгалудженнями.

З іншого боку, типовий сучасний випрямляч станції катодного захисту представлено інверторними високочастотними перетворювачами. Приклад структури такого випрямляча представлено на Рис. 6. До їх переваг відносяться масо-габаритні параметри, високий ККД та значний діапазон регулювання. Крім того їх порівняно легко інтегрувати до різноманітних систем автоматичного керування для забезпечення гнучкого управління процесами електрохімічного захисту від корозії.

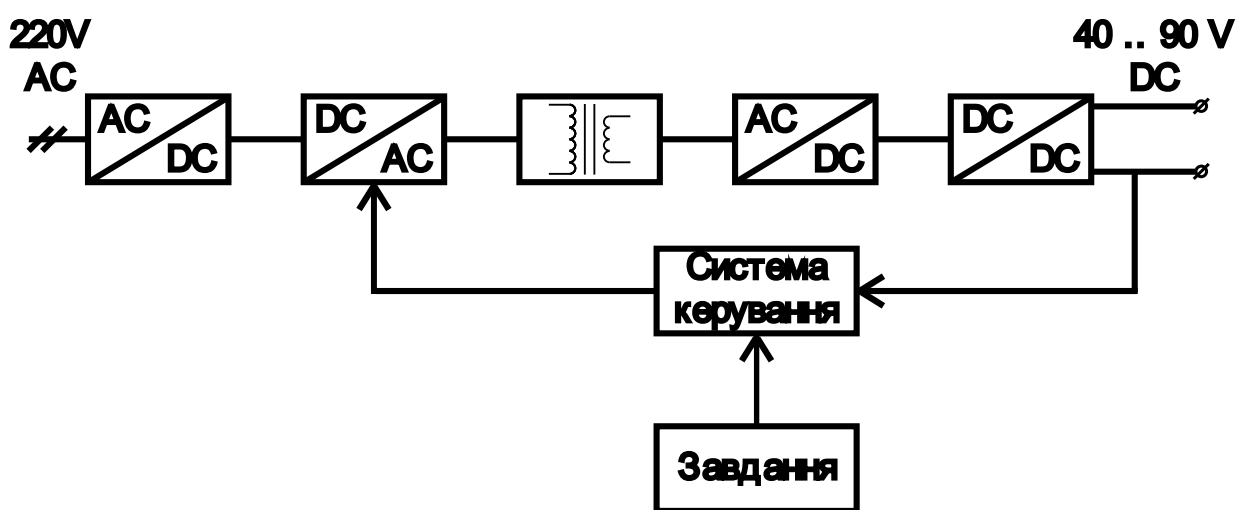


Рис. 6. Структура СКЗ із інверторним високочастотним перетворювачем

Випрямлення змінної напруги відбувається за наступним алгоритмом: Високовольтний випрямляч здійснює початкове перетворення вхідної змінної напруги у постійну. Після чого із отриманої постійної напруги формується високочастотна змінна напруга, яка потім понижується за допомогою трансформатора до заданого рівня. Далі отримана високочастотна напруга знову перетворюється на постійну і відбувається остаточне формування вихідного сигналу шляхом регулювання цієї напруги. Це може досягатися використанням керованих випрямлячів, або за допомогою DC/DC перетворювачів.

Кожен тип випрямляча відповідає конкретним експлуатаційним потребам, і вибір залежить від таких факторів, як необхідна точність контролю струму, умови навколишнього середовища, доступність місця встановлення та бюджетні обмеження.

На комерційному ринку подібні станції представлені, але не обмежені наступними лініями виробів:

- Станція катодного захисту трансформаторного типу з ручним керуванням УПТЕ-М [95] – надає можливості ручного керування параметрами захисту на основі аналогової індикації. Лінійка станцій виготовляється під потужності 0.6, 1.2, 3, 5 кВт, регулювання вихідних параметрів станції регулюється в діапазоні від 10 до 100 відсотків від номіналу.
- Станція катодного захисту інверторна з автоматичним управлінням ППАУ [96]. Реалізоване як ручне управління параметрами так і автоматична стабілізація вихідного струму, напруги та поляризаційного потенціалу. Діапазон потужностей: 0.6, 1, 1.2, 2, 2.4, 3, 5 кВт.
- Станції катодного захисту ЕЛКОН [97]. Розроблена на основі резонансного високочастотного перетворювача. Забезпечує підтримку заданого струму, автоматичну підтримку захисного потенціалу. Потужності: 0.6, 1.5, 3, 5 кВт.
- Перетворювач електричний катодного захисту ПЭКЗ [98]. Представлений у потужностях 0.6, 1.2, 2.4, 3, 5 кВт, з діапазоном регулювання від 3 до 100 відсотків від номіналу.

- Перетворювачі катодного захисту від корозії типів В-ОПЕК [99]. Випускаються в трансформаторному та інверторному виконаннях з ручним та автоматичним регулюванням захисного потенціалу, як через інтерфейс установки так і засобами телеметрії. Потужності 0.6, 1.2, 3, 5 кВт.
- Перетворювачі катодного захисту ПКЗ.ПВЕК [100]. Із автоматичною підтримкою параметрів та заданого захисного потенціалу, ручним локальним і дистанційним керуванням. Під потужності 0.2, 0.6, 1.2, 2, 3, 5 кВт.

Окрім зазначених комерційних станцій катодного захисту на ринку присутня значна кількість підприємств, які представляють свої рішення з катодного захисту як під замовлення так і за тендерами державних закупівель. Джерелом живлення усіх загаданих станцій катодного захисту слугує звична побутова мережа 220 В змінного струму, що обумовлюється запланованим використанням в межах населених пунктів, де підключення до даної мережі є широкодоступним.

1.4 Поліетиленові трубопроводи у світі

З іншого боку використання поліетиленових трубопроводів в системах газопостачання виглядає привабливою альтернативою. Вони не потребують заходів із забезпечення протикорозійного захисту, а отже відсутні витрати на його проектування, створення та експлуатацію. Як наслідок, відсоток поліетиленових труб серед розподільчих газопроводів незмінно зростає. Так, в США їх частка вже становить 60% від загальної кількості основних розподільчих газогонів [47], а в ЄС хоча кількість сталевих труб і продовжує домінувати, але постійно зменшується[48].

Крім того доступність, легкість і гнучкість є значною перевагою поліетиленових труб [101]. Їх менша вага та більша гнучкість у порівнянні із сталевими трубами спрощує транспортування матеріалів та монтаж нових газопроводів.

Безумовно, з точки зору наведених переваг, відсутності потреби в електрохімічному захисті поліетиленовий трубопровід має привабливі

характеристики і порівнянні із сталевим, однак він має свої недоліки, які роблять його дуже неоднозначною заміною.

Хоча поліетиленові труби все більш широко зустрічаються в газорозподільних мережах, їх використання обмежується газопроводами низького та середнього тиску, і максимальним тиском до 1,0 МПа [30]. При цьому під час укладання поліетиленових газопроводів необхідно враховувати специфічні особливості матеріалу труб: високий коефіцієнт лінійного подовження (в 10-12 разів більший ніж у сталевих) і менші в порівнянні з металевими трубами механічну міцність і твердість [30].

Поліетиленові труби легко піддаються впливу ультрафіолету, високих температур і тиску, як наслідок швидко деградують під впливом цих факторів. [101, 102]. Крім того, механічна міцність труб з поліетилену нижча, ніж у сталевих [103]. Поліетиленові труби мають низьку стійкість до повільного росту тріщин, що може призвести до передчасної втрати герметичності.

Як наслідок наведених властивостей важко точно спрогнозувати термін служби [104], особливо при порівнянні із сталевими трубами, для яких методологія оцінки технічного стану та залишкового ресурсу вже розроблена і відточена.

Останні роки якість і довговічність поліетиленових трубопроводів помітно зросла і вони знаходять своє застосування в промисловості та нафтогазовому секторі. Нормативна документація вже регламентує їх використання для прокладання нових трубопроводів і відновлення існуючих сталевих [30], а період експлуатації, згідно інформації виробників, сягає 50 років. Однак, не дивлячись на все це, є певна впевненість, що трубопроводи з маловуглецевої та низьколегованої сталі, що повсюдно застосовувались у минулі декади, і продовжують застосовуватися зараз у складі систем газопостачання, не скоро поступляться своїм місцем трубопроводам із пластмаси. Особливо це стосується магістральних трубопроводів великого діаметра і високого тиску.

Щодо зростаючої популярності пластикових труб, вони активно просуваються в багатьох сферах, таких як будівництво, нафтогазова промисловість, водопостачання та водовідведення, сільське господарство та хімічна

промисловість. Підвищений попит провокується ростом урбанізації, еволюцією будівельних практик та оновленням застарілої інфраструктури міст. Труби із поліетилену високої щільності продовжують впевнено посувати сталеві труби у нафтогазовій галузі [105]. Як наслідок, постійний попит на оновлення та прокладання нових трубопроводів, як для водопостачання так і транспортування вуглеводнів і не тільки, призводить до щорічного росту ринку пластикових труб.

Global Thermoplastic Pipe Market Share, By Application, 2024

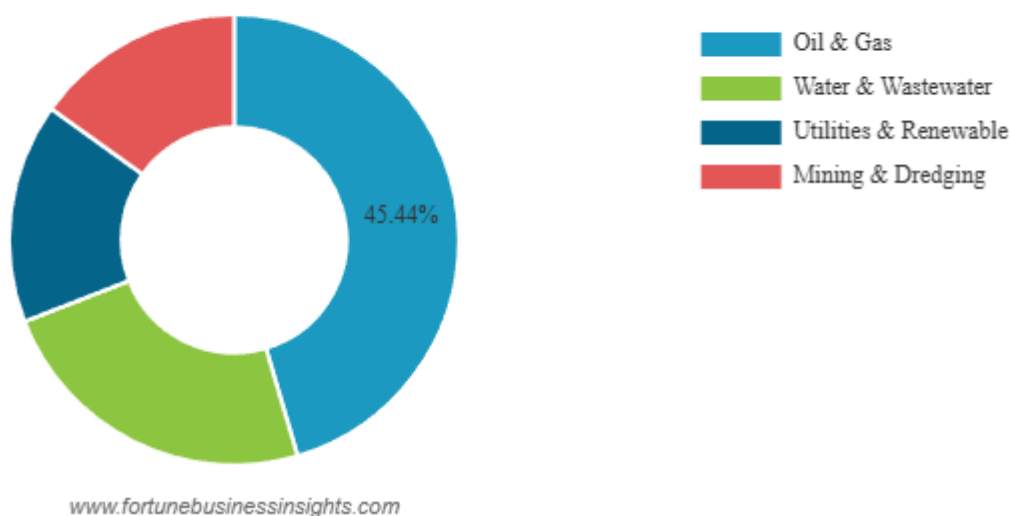


Рис. 7. Частка ринку термопластикових труб за галуззю їх використання [105]

Обсяг світового ринку пластикових труб у 2024 році оцінювався в 60,46 млрд доларів США і, за прогнозами, збільшиться з 64,58 млрд доларів США у 2025 році [106]. Середньорічний темп зростання ринку становить 6,75%.

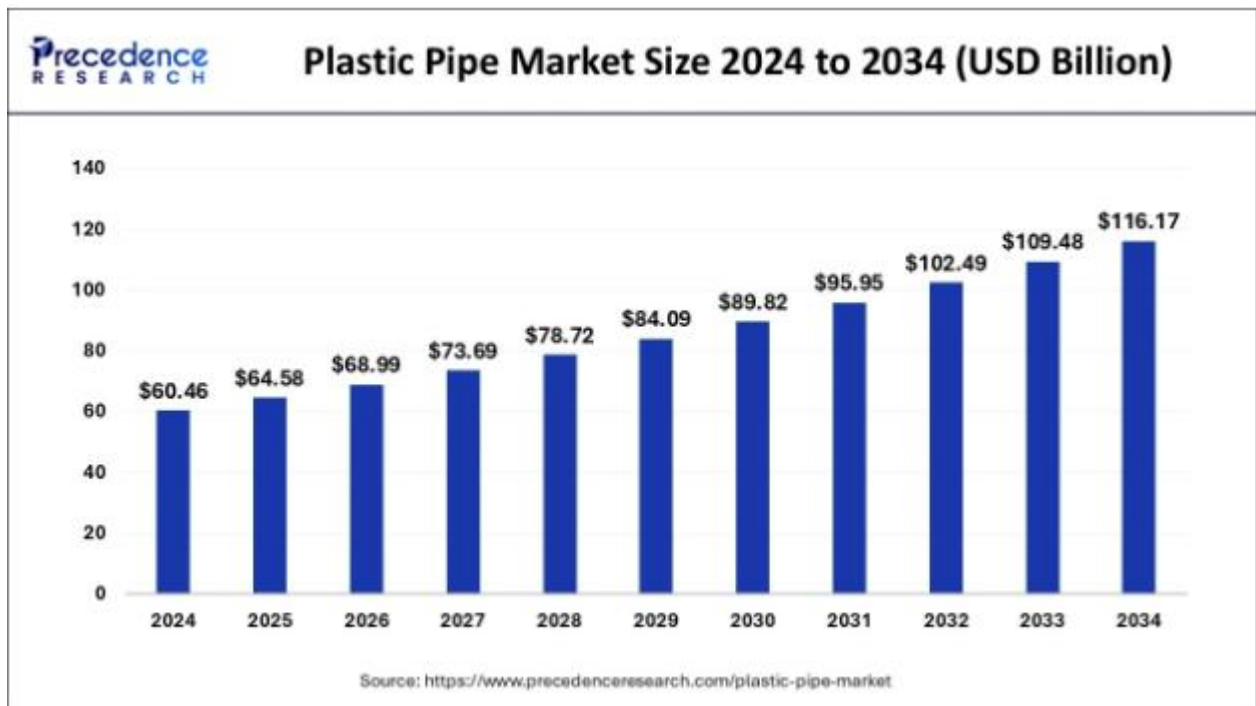


Рис. 8. Ринок пластикових труб 2024 - 2034[106]

При цьому найбільшу часту ринку (46% в 2024 році) становить Азійсько-Тихоокеанський регіон, друге місце посідає Північна Америка (25 %) і третім за розміром є європейський ринок (20%) [107].

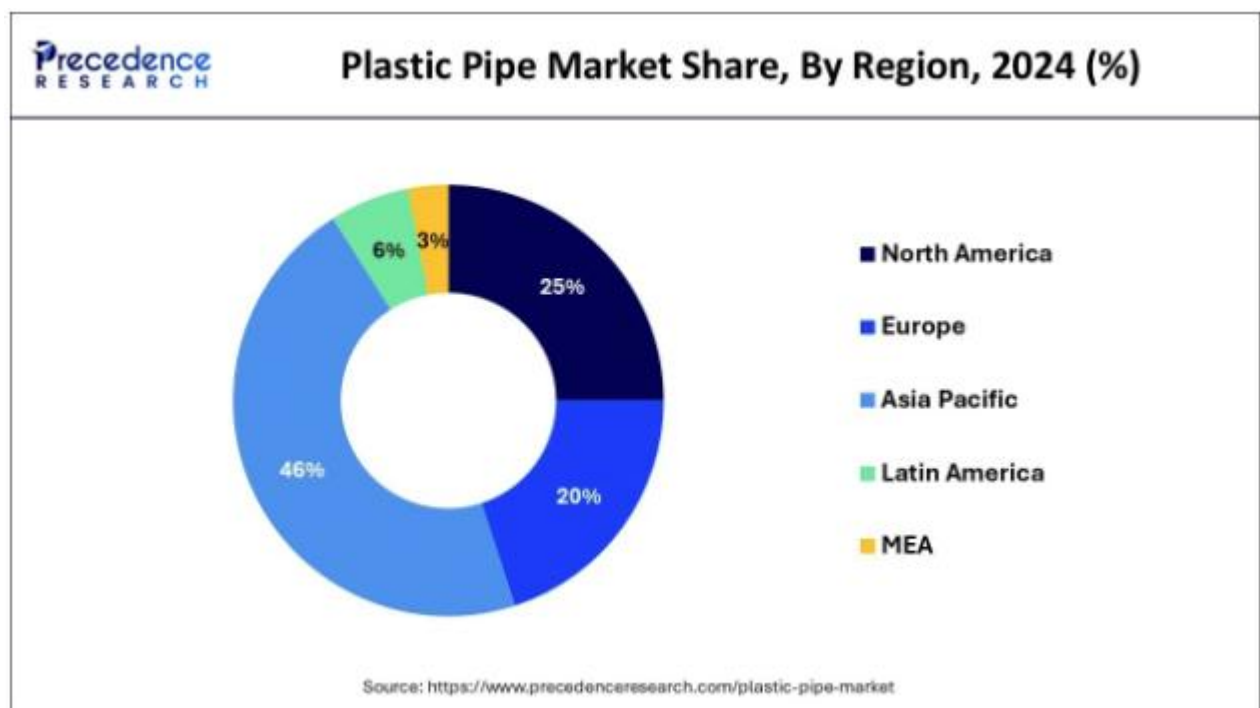


Рис. 9. Частка ринку пластикових труб за регіонами [107]

За матеріалом пластикові труби представлені полівінілхлорид (PVC), зшитий поліетилен (PEX), хлорований полівінілхлорид (CPVC) і поліетилен (PE). а найбільш популярним серед них є полівінілхлорид [106, 107].

Висновки

Підземні сталеві трубопроводи на даний момент представляють собою основний метод транспортування природного газу до споживачів. Під час їх експлуатації, трубопроводи зазнають різноманітних впливів від навколишнього середовища, які призводять до пошкодження їх цілісності, що в свою чергу провокує небажані і небезпечні наслідки. Оскільки майже чверть усіх пошкоджень підземних сталевих трубопроводів викликані корозійними впливами навколишнього середовища на метал трубопроводу, наявність засобів протикорозійного захисту є обов'язковою вимогою до трубопроводів.

Ці засоби поділяються на дві основні групи: пасивний і активний захисти. При цьому в розрізі електрохімічного захисту підземних сталевих трубопроводів під пасивним захистом, в більшості випадків, зазвичай, мають на увазі різнотипні ізоляційні покриття, що виключають контакт металу із середовищем. А під активним захистом представляють станції катодного захисту зовнішнім струмом.

Такі станції формують захисний потенціал вздовж підземного сталевого трубопроводу, тим самим придушуючи процеси електрохімічної корозії в місцях, де метал, через погіршення ізоляційних властивостей покриттів, починає взаємодіяти із навколишнім ґрунтом. Електричний ланцюг системи катодного захисту протікає від позитивного полюсу джерела постійної напругу, через аноди у ґрунті і сам ґрунт, і натікає на трубопровід, що захищається, який підключений до від'ємного полюсу станції катодного захисту.

Аналіз публікацій та нормативних документів, як вітчизняних так і міжнародних, дав змогу звернути увагу на те, що через розгалужену топологію газопровідних систем та їх довготривалий термін експлуатації, вони піддаються різноманітним впливам навколишнього середовища, які безпосередньо впливають

на їх стан та роботу систем електрохімічного захисту, що в свою чергу впливає на процес формування захисного потенціалу вздовж нитки трубопроводу. Крім того помітний ріст популярності трубопроводів із поліетилену, та їх використання для прокладання і відновлення трубопроводів, що допускається нормативною документацією, не може не впливати на роботу систем катодного захисту і потребує дослідження.

Для подальшого визначення напрямку розвитку необхідно виконати наступні кроки:

- Класифікувати неоднорідності, що є або утворюються на трубопроводах в процесі його функціонування;
- Здійснити аналіз методів розрахунку електротехнічних параметрів систем катодного захисту;
- Здійснити аналіз математичних моделей систем катодного захисту;
- Розробити нову або вдосконалити існуючі математичну модель електрохімічної системи катодного захисту підземного сталевих трубопроводу з неоднорідностями;
- Розглянути типові схемотехнічні рішення випрямлячів у складі станцій катодного захисту, а також їх вихідні сигнали;
- Дослідити вплив вихідних сигналів випрямлячів на процес формування потенціалу захисту підземного сталевих трубопроводу з електротехнічними неоднорідностями;
- Визначити параметри і умови, що характеризують вплив схемотехнічного рішення перетворювачів станції катодного захисту на корозійну ситуацію підземних сталевих трубопроводів з неоднорідностями;
- Визначити ступінь впливу на зміну за часом та довжиною трубопроводу значення потенціалу захисту, станцій катодного захисту, які працюють сумісно та гальванічно з'єднані підземним сталевим трубопроводом з електротехнічними неоднорідностями;

- Синтезувати закони автоматичного керування станціями катодного захисту, які пов'язані гальванічно підземним сталевим трубопроводом з електротехнічними неоднорідностями, з метою усунення ризиків виникнення локальних анодних зон на ділянках неоднорідностей.

2. РОЗДІЛ

ЗАКОНИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ФОРМУВАННЯ ЗАХИСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

2.1 Формування захисного потенціалу підземних сталевих трубопроводів та розрахунок типової СКЗ

Як було зазначено в пункті 1.3 максимальної ефективності засоби електрохімічного захисту досягають за умови їх комбінованого використання за метою забезпечення антикорозійного захисту. Таким чином для ефективного використання катодного захисту, необхідно прикладати його до ізольованого трубопроводу, що на порядки зменшує споживання електричного струму із випрямляча, у порівнянні із неізольованим трубопроводом [108], а також збільшує зону захисту однієї станції. При цьому довжина труби, що захищається одним анодом, визначається не опором ґрунту, а опором металу самого трубопроводу.

Зазвичай для визначення захисного потенціалу проводяться відповідні дослідження, на основі яких вже підбираються налаштування станції катодного захисту. Теоретичні методи розрахунку розповсюдження потенціалу по трубі представлені наведеними нижче залежностями.

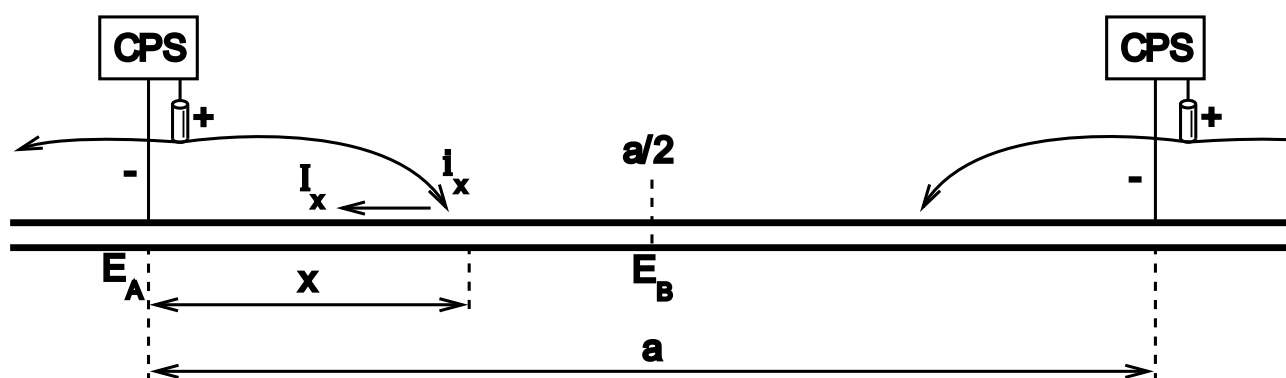


Рис. 10. Трубопровід із катодним захистом, з анодами віддаленими один від одного на відстань a

Припустимо, що струм надходить у трубу з боку ґрунту через пористе ізоляційне покриття, повертаючись до анода через трубу (Рис. 10). Тоді зміна

загального струму у трубі на відстані x на одиницю довжини - I_x , в точці x дорівнює сумарному струму, що надходить у трубу в точці x , і описується рівнянням:

$$\frac{dI_x}{dx} = -2\pi r i_x \quad (2.1)$$

де r — радіус труби; i_x — щільність струму на поверхні труби на відстані x від точки з'єднання.

За законом Ома зміна потенціалу вздовж труби визначається

$$\frac{dE_x}{dx} = -R_L I_x \quad (2.2)$$

де R_L — опір металеві труби на одиницю довжини. Підставивши (2.1) в вираз (2.2), отримуємо:

$$\frac{d^2 E_x}{dx^2} = R_L (2\pi r i_x) \quad (2.3)$$

При малих значеннях i_x поляризація поверхні труби є лінійною функцією справжньої щільності струму i_x' біля основи пор в покритті дорівнює:

$$E_x = k_1 i_x' \quad (2.4)$$

Припустивши, що опір покриття труби на одиницю площі z обернено пропорційний загальній площі перетину пор, справжня щільність струму збільшується із z , і дорівнює:

$$i_x' = k_2 z i_x \quad (2.5)$$

Поєднавши вирази (2.4) та (2.5), отримуємо:

$$E_x = k z i_x \quad (2.6)$$

де $k = k_1 k_2$.

Підставляючи вираз (1.6) до рівняння (1.3), отримуємо:

$$\frac{d^2 E_x}{dx^2} = \left(\frac{R_L 2\pi r}{kz} \right) E_x \quad (2.7)$$

Рішення диференційного рівняння дає падіння потенціалу E_x вздовж трубопроводу нескінченної довжини, що вимірюється від точки підключення джерела постійного струму (випрямляча) із потенціалом E_A . Воно представлено експоненційною залежністю від відстані від точки підключення [108].

$$E_x = E_A \exp \left[- \left(\frac{2\pi r R_L}{kz} \right)^{1/2} x \right] \quad (2.8)$$

E_x та E_A представляють різницю між поляризованим потенціалом трубопроводу при прикладеному катодному захисті та корозійним, власним або природнім потенціалом трубопроводу за відсутності струму. R_L – опір труби радіуса r на одиницю довжини, k – константа, z – опір покриття труби на одиницю площі.

Це рівняння виводиться з припущення, що поляризація катодно захищеної поверхні є лінійною функцією густини струму. При цьому для $x \rightarrow \infty$ E_x дорівнює 0.

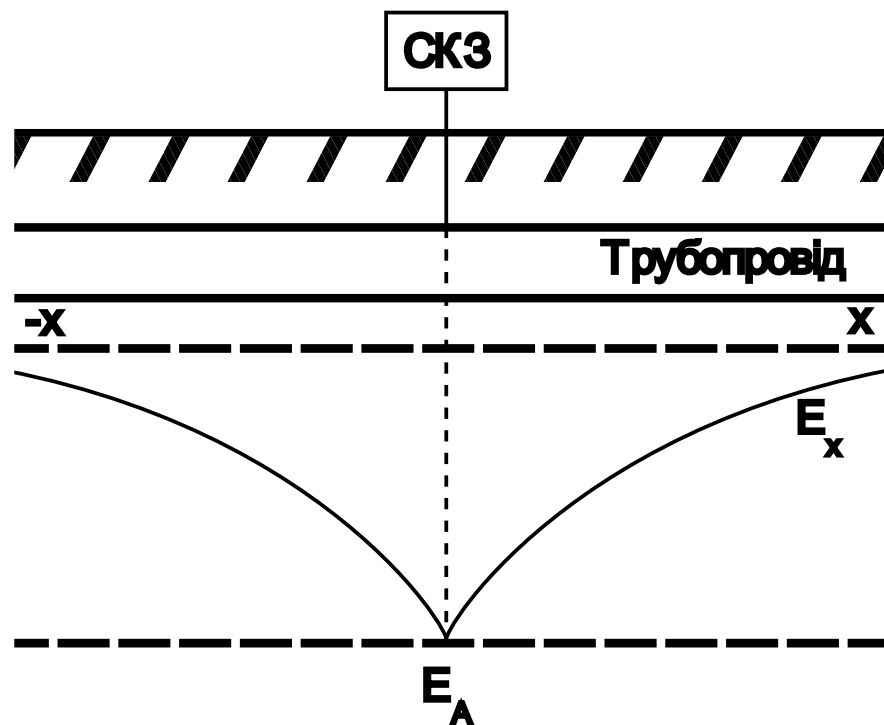


Рис. 11 Схема розподілу потенціалу вздовж трубопроводу під захистом станції нескінченної довжини

Звичайно на реальному трубопроводі неможливо розглядати стацію нескінченної довжини. Для скінченного трубопроводу, половина відстані до наступної точки підключення дорівнює $a/2$ і є довжиною трубопроводу, що підлягає захисту, а потенціал E_x при $a/2$ представлений потенціалом E_B . Впливає, що струм у трубопроводі при $a/2 = 0$, або $(dE_x/dx)_{x=a/2} = 0$. Із цих граничних умов отримуємо:

$$E_x = E_B \cosh \left[\left(\frac{2\pi r R_L}{kz} \right)^{1/2} \left(x - \frac{a}{2} \right) \right] \quad (2.9)$$

Та

$$E_A = E_B \cosh \left[- \left(\frac{2\pi r R_L}{kz} \right)^{1/2} \frac{a}{2} \right] \quad (2.10)$$

Із рівняння видно, що довжина трубопроводу, який може бути захищений одним анодом, збільшується зі зменшенням опору труби, і збільшенням опору покриття. Для збереження максимальної ефективності захисний потенціал повинен зберігатися в відповідному діапазоні (між -0,85 В та -1,15 В згідно з [41]).

Струм у нескінченному трубопроводі в будь-якій точці x визначається підстановкою похідної (1.8) в (1.2) і дорівнює:

$$I_x = \sqrt{\left(\frac{2\pi r R_L}{kz} \right)} \frac{E_A}{R_L} \exp \left[- \sqrt{\left(\frac{2\pi r R_L}{kz} \right)} x \right] \quad (2.11)$$

Сумарний струм при $x = 0$ (іноді його називають струмом дренажу), помножений на 2, щоб врахувати струм, який тече з обох боків трубопроводу до точки з'єднання, дорівнює:

$$I_A = \frac{2E_A}{R_L} \sqrt{\left(\frac{2\pi r R_L}{kz} \right)} \quad (2.12)$$

Аналогічно, для скінченної труби маємо:

$$I_A = \frac{2E_B}{R_L} \sqrt{\left(\frac{2\pi r R_L}{kz} \right)} \sinh \left[\sqrt{\left(\frac{2\pi r R_L}{kz} \right)} \frac{a}{2} \right] \quad (2.13)$$

Висновок

Аналіз існуючих рівнянь, що описують розподіл потенціалу вздовж трубопроводу, що захищається катодним захистом показав, що існують диференціальні рівняння, на основі яких отримано вирази для теоретичної станції нескінченної довжини, та станції скінченної довжини. У другому випадку вираз виходить із припущення, що станція захищає половину відстані між двома суміжно розташованих станцій. Результат представляє собою експоненціальну залежність від відстані від точки підключення джерела постійного струму, у якій враховуються такі параметри як опір трубопроводу на одиницю довжини та опір покриття труби на одиницю площі.

2.2 Розрахунок типової станції катодного захисту

Згідно з 320.03329031.008 «Інструкція з електрохімічного захисту підземних газопроводів та резервуарів зрідженого газу» [43] для організації надійного електрохімічного захисту підземних сталевих газопроводів необхідно забезпечувати катодну поляризацію поверхні металу, а також відвід блукаючих струмів електрифікованого транспорту. При відсутності блукаючих струмів поляризаційні потенціали сталі повинні знаходитись в межах від $-0,85$ В до $-1,15$ В.

Захисна щільність електричного струму (А/м), на основі якої визначаються параметри катодного захисту, розраховується за формулою:

$$J_3 = K_n \frac{\Delta U_3}{R_{i3}}$$

Де, $\Delta U_3 = U_3 - U_c$ – зміщення захисного потенціалу внаслідок катодної поляризації металу, В; U_3 – захисний потенціал, необхідний для електрохімічного захисту трубопроводу, (при розрахунку катодного захисту захисний потенціал приймається максимальним ($U_3 = 1,15$ В), а для протекторного – мінімальним ($U_3 = 0,85$ В)); U_c – стаціонарний потенціал трубопроводу, виміряний без впливу блукаючих струмів (якщо невідомо приймається $0,7$ В); K_n – коефіцієнт, що враховує нерівномірність захисного струму і неоднорідність ізоляційного покриття (для розрахунків прийнято брати $K_n = 1,3$); R_{i3} – електричний опір ізоляційного покриття, Ом $\cdot$ м². $R_{i3} = 400 - 500$ Ом $\cdot$ м² – для трубопроводів, що проектуються, $R_{i3} = 40 - 50$ Ом $\cdot$ м² – для тривало експлуатованих трубопроводів.

Для проектування системи катодного захисту необхідно визначити наступні її параметри:

- Захисна зона станції катодного захисту;
- Кількість станцій катодного захисту;
- Захисний струм станції катодного захисту;
- Вихідна напруга та потужність станцій катодного захисту.

Захисна зона визначається формулою:

$$l_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8\Delta U_3}{\pi d_{\Gamma} J_3 r_{\Gamma}}}$$

d_{Γ} – діаметр газопроводу, м; r_{Γ} – повздовжній опір газопроводу, Ом/м.

Кількість станцій катодного захисту для трубопроводу, шт:

$$n_k = K_e \frac{L_{\Gamma}}{l_k}$$

L_{Γ} – загальна довжина газопроводу; K_e – коефіцієнт екранування, для врахування електричного впливу суміжних станцій, а також щільність поряд розташованих комунікацій і споруд. Значення коефіцієнту екранування відрізняється для різних населених пунктів (1,8 – для міста, 1,4 – для селища, тощо).

Захисний струм станції катодного захисту визначається:

$$I_{k_{\Gamma}} = J_3 \cdot S_{\Gamma}$$

$S_{\Gamma} = S_T \cdot l_k$ – зовнішня поверхня газопроводу, м²; S_T – зовнішня поверхня одного метра труби, м².

Вихідна напруга і потужність дорівнює:

$$U_{k_{\Gamma}} = K_3 I_{k_{\Gamma}} (R_a + R_k)$$

$$W_{k_{\Gamma}} = R_3 I_{k_{\Gamma}}^2 (R_a + R_k)$$

K_3 – коефіцієнт, що враховує старіння захисного покриття, для розрахунків приймається рівним 2; R_k – електричний опір з'єднувальних кабелів, Ом (Залежить від переріз кабелю і визначається згідно з ПУЕ [109]); R_a – опір розтіканню анодного заземлення, Ом. Визначається розмірами, формою та розташуванням у ґрунті анодного заземлення. Для трубчастої форми, розташованої вертикально:

$$R_a = \frac{0,16\rho_{\Gamma}}{l_3} \left(\ln \frac{2l_3}{d_3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{4h + l_3}{4h - l_3} \right)$$

l_3 – довжина анодного заземлювача, м; d_3 – діаметр анодного заземлювача, м; h – відстань від поверхні землі до анодного заземлювача, м; ρ_{Γ} – питомий електричний опір ґрунту, Ом · м.

Горизонтальне розташування анодів:

$$R_a = \frac{0,16\rho_r}{l_3} \left(\ln \frac{2l_3}{d_3} + \ln l_3 + \frac{\sqrt{l_3^2 + 16h^2}}{4h} \right)$$

Також існують інші конфігурації анодного заземлення, які можуть відрізнятись від простих конфігурацій формою, розмірами та наявністю активатора. Так наприклад, для анодного заземлювача незначної довжини, що розташований у ґрунті горизонтально, опір розтіканню дорівнює:

$$R_a = \frac{0,16\rho_r}{l_3} \cdot \ln \frac{2l_3}{d_3}$$

Для анода у формі штаби, що розташована горизонтально:

$$R_a = \frac{\rho_r}{\pi l_3} \cdot \ln \frac{1,5l_3}{\sqrt{b \cdot h}}$$

Де b – ширина штаби, м.

Для горизонтального анодного заземлювача значної довжини:

$$R_a = \frac{0,16\rho_r}{l_3} \left(\ln K_3 l_3 + \ln \frac{l_3}{2h} \right)$$

Де $K_3 = \frac{2}{d_3}$ – для трубчастого заземлювача; $K_3 = \frac{\pi}{b}$ – для штабового заземлювача.

Вертикальний трубчастий анод в активаторі:

$$R_a = \frac{0,16\rho_r}{l_a} \left(\ln \frac{2l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4h + l_a}{4h - l_a} + \frac{\rho_a}{\rho_r} \ln \frac{d_a}{d_3} \right)$$

Де l_a – довжина активатора, м; d_a – діаметри активатора, м; ρ_a – питомий електричний опір активатора, Ом.м.

Горизонтальний анод трубчастої форми незначної довжини, в активаторі:

$$R_a = \frac{0,16\rho_r}{l_a} \cdot \ln \frac{2l_a}{d_a}$$

Горизонтальний анод трубчастої форми значної довжини, в активаторі:

$$R_a = \frac{0,16\rho_r}{l_a} \left(\ln \frac{2l_a}{d_a} + \ln \frac{l_a}{2h} + \frac{\rho_a}{\rho_r} \ln \frac{d_a}{d_3} \right)$$

Де, для полосового анода значної довжини $d_a = \frac{4b_a}{\pi}$, $d_3 = \frac{2b_a}{\pi}$; b_a – ширина активатора, м.

Оптимальна кількість анодних заземлень дорівнює:

$$N_{\text{опт}} = l_{\text{к}} \sqrt{\frac{8,76 \cdot R_{\text{а}} \cdot C_{\text{е}}}{C_{\text{з}} \cdot \eta \eta_{\text{е}} \eta_{\text{н}} E_{\text{н}}}}$$

$C_{\text{е}}$ – вартість одного кВт.г електроенергії, грн/ кВт.г; $C_{\text{з}}$ – вартість спорудження одного заземлювача, грн; η – ККД перетворювача; $\eta_{\text{е}}$ – коефіцієнт екранування анодних заземлювачів; $\eta_{\text{н}}$ – коефіцієнт використання анодних заземлювачів; $E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт ефективності.

Також приймаються до уваги інші параметри анодних заземлювачів, такі як: Регламентований або необхідний термін дії, що визначається вагою анодного заземлення, яка повинна відповідати нерівності:

$$G_{\text{а}} > K_{\text{н}} \cdot q_{\text{а}} \cdot l_{\text{к}} \cdot T_{\text{а}}$$

$$G_{\text{а}} = N_{\text{опт}} \cdot G_{\text{і}}$$

$G_{\text{і}}$ – вага анодного заземлювача, кг; $K_{\text{н}}$ – коефіцієнт нерівномірності розчинення анодного заземлювача; $q_{\text{а}}$ – електрохімічний еквівалент розчинення анодного заземлювача, кг.А/рік; $T_{\text{а}}$ – регламентований термін дії анодного заземлення, для розрахунків приймається рівним терміну дії перетворювача станції катодного захисту.

Щільність електричного струму на кожному анодному заземлювачі та стікаючий в ґрунт струм:

$$J_{\text{а}} = \frac{l_{\text{к}}}{N \cdot S_{\text{а}}}$$

$$i_{\text{а}} = \frac{l_{\text{к}}}{N}$$

$J_{\text{а}}$ – щільність електричного струму, А/м²; $i_{\text{а}}$ – електричний струм анодного заземлювача, А; $S_{\text{а}}$ – робоча поверхня анодного заземлювача, м²; N – загальна кількість анодних заземлювачів, шт.

2.3 Моделі системи «СКЗ– ґрунт – трубопровід»

Однак, необхідно розуміти, що наведені вище розрахунки описують систему катодного захисту на рівні початкового наближення, і отримані результати уточнюють і перевіряють даними вимірювань. У випадку складності або неможливості проведення експериментів для детального дослідження та моделювання процесів, що відбуваються в системі катодного захисту зазвичай застосовуються різноманітні електричні схеми заміщення. Основним завданням яких є представляти достатнє наближення своїх властивостей до поведінки досліджуваної системи із метою її аналізу, визначення розподілу потенціалів, струмів, оцінки ефективності електрохімічного захисту, тощо.

У науковій та технічній літературі зустрічається значна кількість варіантів схем заміщення катодного захисту. Їх різноманітність може бути обумовлена наступними чинниками:

Складність модельованого об'єкту: геометрія та довжина траси трубопроводу; різні типи та ступінь зношеності ізоляційного покриття, параметри ґрунту, його тип, електропровідність, стан забрудненості техногенними впливами, а також їх сезонні коливання; наявність джерел блукаючих струмів, таких як електрифікований транспорт, тощо. Така різноманітність чинників суттєво впливає на склад і структуру електричних схем заміщення системи катодного захисту.

Крім того кожна конкретна модель слугує конкретним завданням, які визначаються задачами які ставить перед собою дослідник. Такими завданнями можуть бути, наприклад: спрощена оцінка майбутнього катодного захисту; попередній аналіз витрат енергії або матеріалу анодів; визначення впливу зміни одного чи декількох параметрів системи, тощо. Залежно від поставлених цілей еквівалентні схеми, можуть мати різну деталізацію, та різні набори параметрів, що використовуються для врахування взаємодій між елементами системи катодного захисту.

Також слід зазначити, що різні дослідники, для опису одних і тех самих впливів, можуть використовувати різні технічні підходи під час складання своїх схем заміщення. Це може бути як наслідком впливу різних наукових шкіл так і індивідуальним баченням в контексті визначених цілей і завдань дослідження. Так,

одні і теж самі елементи системи можуть бути розглянуті, як спрощено, так і детально (наприклад вплив, форми і матеріалу аноду, наявності обсіпки, його зношеність із часом, тощо). Таким чином вже існує значна кількість різноманітних моделей, кожна з яких є релевантною за певних умов.

У цій главі розглядаються деякі схеми заміщення, які були представлені різними авторами під час їх роботи в цьому науковому напрямку. Їх аналіз дає змогу опанувати принципи, що покладені в основу побудови моделей катодного захисту, а також оцінити їх переваги, обмеження та сфери доцільного використання.

В більшості навчальної та довідкової літератури система катодного захисту описується схемою заміщення, яка складається із виключно резистивних компонентів.

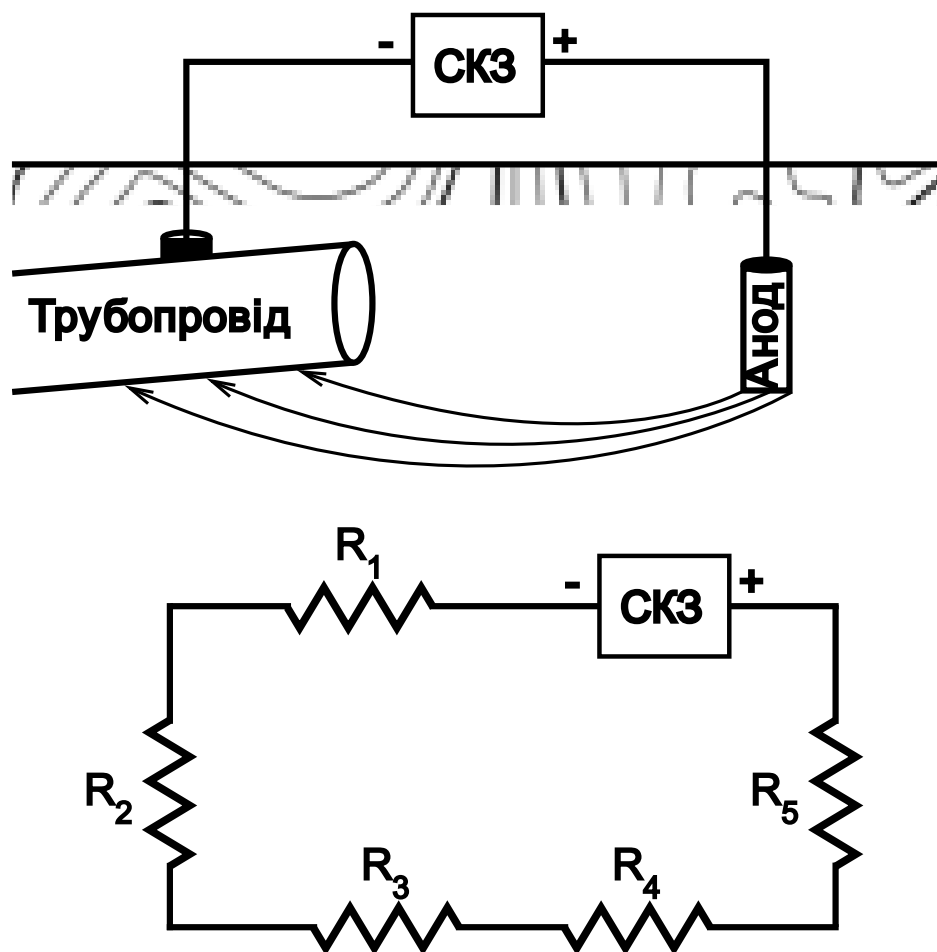


Рис. 12. Найпростіша схема заміщення катодного захисту

R_1 – опір кабелю; R_2 – опір трубопроводу; R_3 – перехідний опір трубопровід – ґрунт; R_4 – опір розтікання анодного струму; R_5 – опір кабелю для підключення аноду;

Так в [53] описується методика розрахунку катодного захисту трубопроводу зовнішнім струмом. Для цього визначаються наступні параметри системи: довжину ділянки трубопроводу, що захищають, м; діаметр трубопроводу: зовнішній D_3 і внутрішній D_v , мм; питомий електроопір ґрунту, Ом.м; перехідний опір «трубопровід – ґрунт»; опір сталі та ізоляції.

На практиці питомий електроопір ґрунту визначаються за допомогою вимірювань, однак для отримання наближеного значення використовуються табличні значення.

Виходячи із припущення, що трубопровід є однорідним за своєю структурою, повздовжній опір визначається формулою:

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi \cdot \delta (D - \delta)}$$

ρ_T – питомий електроопір трубної сталі, Ом · мм²/м; D – зовнішній діаметр трубопроводу, мм; δ – товщина стінки, мм.

Перехідний опір «трубопровід – ґрунт» R_{Π} визначає якість ізоляційного покриття. Для отримання величини перехідного опору проводять вимірювання методом катодної поляризації ділянки трубопроводу. На основі отриманих даних визначають за формулою:

$$R_{\Pi} = \frac{\pi D R_T x^2}{\left(\ln \frac{U_1}{U_2} \right)^2}$$

Де x – відстань між осями трубопроводу, в яких виміряні потенціали U_1 і U_2 .

При цьому величина перехідного опору змінюється з часом за експоненціальним законом:

$$R_{\Pi}(\tau) = R_{\Pi n} \cdot e^{-\beta \tau}$$

$R_{\text{пн}}$ – перехідний опір на початку експлуатації; $R_{\text{п}}(\tau)$ – перехідний опір на момент часу τ ; β – показник швидкості старіння, 1/рік (для розрахунків береться $\beta = 0,125$);

Середній перехідний опір за нормативний термін служби $\tau_{\text{нс}}$:

$$R_{\text{п.ср}} = \frac{R_{\text{пн}}}{\beta \tau_{\text{нс}}} \cdot (1 - e^{-\beta \tau_{\text{нс}}})$$

Вхідний опір ізолюваного трубопроводу:

$$Z_{\text{ср}} = 0,5 \sqrt{R_{\text{т}} \cdot R_{\text{із}}}$$

$R_{\text{із}}$ – опір одиниці довжини ізоляції:

$$R_{\text{із}} = \frac{R_{\text{п}}}{\pi D}$$

Стала розподілення потенціалів і струмів вздовж трубопроводу, що характеризує інтенсивність змін різниці потенціалів по довжині трубопроводу:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{\text{т}}}{R_{\text{із}}}}$$

Потенціали на трубопроводі пов'язані наступним виразом:

$$E_{\text{min(max)}} = E_{\text{зах.min(max)}} - E_{\text{стац}}$$

$E_{\text{стац}}$ – природний або стаціонарний потенціал матеріалу трубопроводу;

$E_{\text{min(max)}}$ – прикладений на трубопровід потенціал для її захисту;

$E_{\text{зах.min(max)}}$ – захисний або загальний потенціал.

Зміна струму і потенціалів від довжини трубопроводу визначаються наступними виразами:

$$I(x) = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x} - \frac{I_{\text{max}} \rho_{\text{г}}}{\pi R_{\text{із}}} \cdot \sinh^{-1} \frac{x}{y}$$

$$E(x) = C_3 e^{\alpha x} + C_4 e^{-\alpha x} + \frac{I_{\text{max}} \rho_{\text{г}}}{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}$$

Де C_1, C_2, C_3, C_4 – стала інтегрування, з відповідних граничних умов; x – віддалення від точки дренажу; I_{max} – сила струму в точці дренажу; $\rho_{\text{г}}$ – питомий електроопір ґрунту; y – віддалення анодного заземлення від трубопроводу.

Вирази є дійсними за наступних припущень:

- Однорідний ґрунт;
- Трубопровід має постійний діаметр і товщину стінки;
- Незмінні властивості ізоляції, без дефектів і пошкоджень

Розглядаючи станцію катодного захисту «безкінечної довжини», при $x \rightarrow \infty$, прикладений потенціал наближається до 0, сталі інтегрування будуть дорівнювати:

$$C_1 = C_3 = 0$$

$$C_2 = I(x)$$

$$C_4 = E_{\max} - \frac{I_{\max} \rho_{\Gamma}}{\pi y}$$

Як наслідок вирази мають наступний вигляд:

$$I(x) = I_{\max} \left(e^{-\alpha x} - \frac{\rho_{\Gamma}}{\pi R_{i3}} \cdot \sinh^{-1} \frac{x}{y} \right)$$

$$E(x) = \frac{E_{\max}}{1 + \theta} \left(e^{-\alpha x} + \frac{y \cdot \theta}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right)$$

При цьому:

$$I_{\max} = \frac{E_{\max}}{2Z + \frac{\rho_{\Gamma}}{\pi y}}$$

$$\theta = \frac{\rho_{\Gamma}}{2\pi Z y}$$

Якщо розглядати системи яка складається з «короткого» відрізка трубопроводу, на кінцях якого підключені станції катодного захисту, то сталі інтегрування визначаються із наступних систем рівнянь:

$$\begin{cases} E_{\text{др}} = C_3 + C_4 + \frac{I_{\max} \rho_{\Gamma}}{\pi y} \\ E_{\min} = C_3 e^{\alpha x_m} + C_4 e^{-\alpha x_m} + \frac{I_{\max} \rho_{\Gamma}}{\pi \sqrt{x_m^2 + y^2}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{\max} = C_1 + C_2 \\ E_{\min} = R_{i3} \left(C_2 e^{-\alpha x_m} - C_1 e^{\alpha x_m} + \frac{I_{\max} \rho_{\Gamma}}{\pi R_{i3} \sqrt{x_m^2 + y^2}} \right) \end{cases}$$

x_m – половина довжини трубопроводу.

Підставивши отримані вирази:

$$I(x) = I_{max} \left\{ \frac{\cosh[\alpha(x_m - x)]}{\cosh(\alpha x_m)} + \frac{\rho_\Gamma \sinh(\alpha x)}{2\pi z \sqrt{x_m^2 + y^2} \cosh(\alpha x_m)} - \frac{\rho_\Gamma}{\pi R_{i3}} \cdot \sinh^{-1} \frac{x}{y} \right\}$$

$$E(x) = \frac{\left(E_{др} - \frac{I_{max} \rho_\Gamma}{\pi y} \right) \cdot \sinh[\alpha(x_m - x)] + \left(E_{min} - \frac{I_{max} \rho_\Gamma}{\pi \sqrt{x_m^2 + y^2}} \right) \sinh(\alpha x)}{\sinh(\alpha x_m)} + \frac{I_{max} \rho_\Gamma}{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}$$

I_{max} – струм в точці дренажу; $E_{др}$ – різниця потенціалів в точці дренажу

$$I_{max} = \frac{E_{др} \cosh(\alpha x_m) - E_{min}}{2z \left[\sinh(\alpha x_m) + \frac{\rho_\Gamma}{2\pi z y} \cosh(\alpha x_m) - \frac{\rho_\Gamma}{2\pi z \sqrt{x_m^2 + y^2}} \right]}$$

$$E_{др} = E_{min} \left[\frac{\sinh^2(\alpha x_m) + \frac{\rho_\Gamma}{2\pi z y} \sinh(\alpha x_m) \cosh(\alpha x_m) + 1}{\cosh(\alpha x_m)} \right]$$

Припустивши, що $E_{др} = E_{max}$, максимальна довжина плеча захисту однієї СКЗ буде дорівнювати: $x_m = l_{max}/2$.

Оскільки для захисту трубопроводу використовується декілька станцій катодного захисту, необхідно приймати до уваги їх взаємовплив. Для спрощення розрахунків вважається, що усі СКЗ є однаковими, а на кожну станцію К, впливають тільки суміжні станції К-1 і К+1, розташовані на відстані L. Розподіл прикладеної різниці потенціалів визначається наступним рівнянням:

$$E(x) = E_{max} \frac{e^{-\alpha(l-x)} + e^{-\alpha x} + \theta \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{1}{\sqrt{(l-x)^2 + y^2}} \right]}{(1 + e^{-\alpha})(1 + \theta) + \theta \left[\frac{1}{\sqrt{l^2 + y^2}} - \frac{1}{y} e^{-\alpha l} \right]}$$

Сила струму СКЗ:

$$I_{др} = \frac{E_{max}}{z(1 + 2e^{-\alpha l} + \theta)}$$

По середині між станціями, на відстані $x = l/2$, потенціал повинен дорівнювати $E(x) \geq E_{min}$. Для граничного випадку $E(x) = E_{min}$, за умови, що $l \gg 2y$ відстань між СКЗ визначається:

$$l = \frac{2}{\alpha} \ln \left[\frac{E_{max}}{K_B E_{min} (1 + \theta)} \right]$$

K_B – коефіцієнт впливу суміжної СКЗ

$$K_B = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{min}}{E_{max}} \right)^2 (1 + \theta)}}$$

Опір розтікання анодного заземлення визначається його конфігурацією.

Комбінована:

$$R_a = \frac{R_B \cdot R_\Gamma}{R_B + R_\Gamma}$$

Вертикальні електроди:

$$R_a = R_B = \frac{R_{1B}}{n_B + \eta_B}$$

Горизонтальні електроди:

$$R_a = R_\Gamma = \frac{R_{1\Gamma}}{n_\Gamma + \eta_\Gamma}$$

R_B, R_Γ – загальний опір розтіканню вертикальних і горизонтальних електродів; $R_{1B}, R_{1\Gamma}$ – опір розтіканню одиничного вертикального і горизонтального електроду; n_B, n_Γ – кількість електродів; η_B, η_Γ – коефіцієнт екранування;

Коефіцієнти екранування описують взаємний вплив заземлювачів, і визначається формулою:

$$\eta = \frac{2R_1}{R_\Pi + R_K}$$

R_Π, R_K – опір розтіканню центрального і крайнього електродів заземлення.

$$R_\Pi = R_1 + \frac{\rho_\Gamma}{\pi l_\Pi} \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} F_i$$

$$R_K = R_1 + \frac{\rho_\Gamma}{2\pi l_\Pi} \sum_{i=1}^{n-1} F_i$$

Де

$$F_i = \ln \left[\left(B_i + \sqrt{1 + B_i^2} \right) \sqrt{\frac{A_i + B_i + \sqrt{1 + (A_i + B_i)^2}}{A_i - B_i + \sqrt{1 + (A_i - B_i)^2}}} \right]$$

A_i, B_i – коефіцієнти

$$A_i = \frac{2h}{i \cdot a}$$

$$B_i = \frac{l_{\text{ц}}}{2i \cdot a}$$

a – відстань між серединами електродів; n – число електродів в заземленні.

Потужність СКЗ визначається:

$$P = I_{\text{др}} \cdot \delta E$$

$I_{\text{др}}$ – дренажний струм СКЗ; δE – напруга на виході СКЗ.

$$\delta E = I_{\text{др}}(R_a + R_{\text{пр}}) + |\delta E_1|$$

$R_{\text{пр}}$ – опір проводів.

$$R_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} \frac{L_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}}$$

$\rho_{\text{пр}}$ – питомий опір матеріалу проводів; $L_{\text{пр}}$ – довжина проводів; $S_{\text{пр}}$ – площа перерізу проводів; δE_1 – різниці потенціалів між точкою дренажу і кінцем ділянки захисту. Для нескінченної СКЗ $\delta E_1 = E_{\text{max}} - E(x)$, для скінченної на короткому трубопроводі $\delta E_1 = E_{\text{др}} - E_{\text{min}}$, для магістрального $\delta E_1 = E_{\text{max}} - E_{\text{min}}$

Переріз дренажного проводу впливає на втрати електроенергії станції катодного захисту, оскільки складає 10-50% усі втрат установки. Також становить помітну частину капітальних витрат на закладання системи.

Віддалення анодного заземлення від трубопроводу у впливає на довжину плеча захисту. Крім того, із збільшення відстані, зростає вартість спорудження, збільшується сила струму в точці дренажу (за однакової різниці потенціалів), зростає споживана потужність, що призводить до необхідності збільшувати переріз проводів і кількість анодів.

Наведена методика надає достатньо широкі можливості визначення параметрів майбутнього трубопроводу, за умови деяких наближень, таких як

відсутність складної топології трубопроводу, відсутності значних пошкоджень чи неоднорідностей. Крім того запропонована тут схема немає в своєму складі елементів, які б відображали потенціали, що присутні в системі. Один із можливих методів їх урахування представлено в роботі [110].

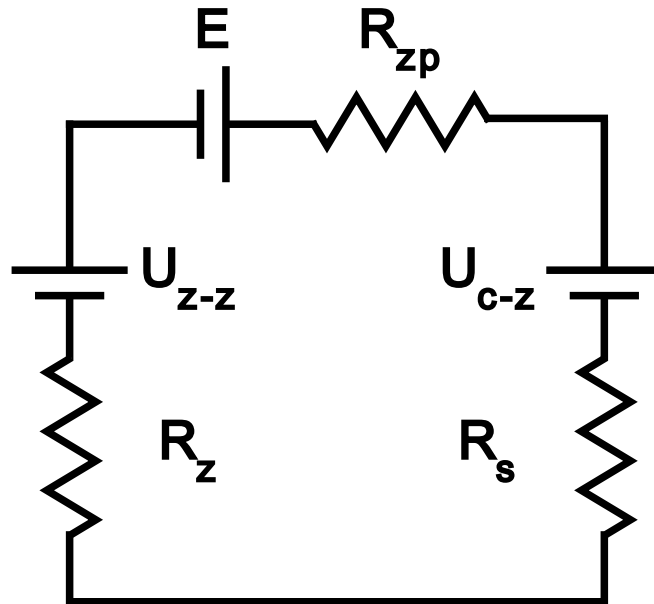


Рис. 13. Схема заміщення із урахуванням потенціалів

Схема складається з R_z – вхідний опір аноду; R_{zp} – опір джерела струму; R_s – вхідний опір підземного сталевих трубопроводу; U_{z-z} – різниця потенціалів у ґрунті біля заземлювача та нескінченно віддаленої точки; E – електрорушійна сила джерела струму; U_{c-z} – потенціал, зумовлений полем блукаючих струмів.

Як наслідок, струм що протікає в даній моделі, можливо розрахувати як:

$$I_z = \frac{\sum E}{\sum R} = \frac{E + U_{c-z} + U_{z-z}}{R_z + R_{zp} + R_s}$$

Наведена схема повторює структуру попередньої і має в своєму складі лише одне електричне коло, яке моделює трубопровід із незмінними параметрами, однак наявність джерел потенціалу робить її корисною для дослідження його розповсюдження.

З іншого боку [111, 112] представляють еквівалентну схему заміщення катодного захисту із подальшим розвитком представлених ідей.

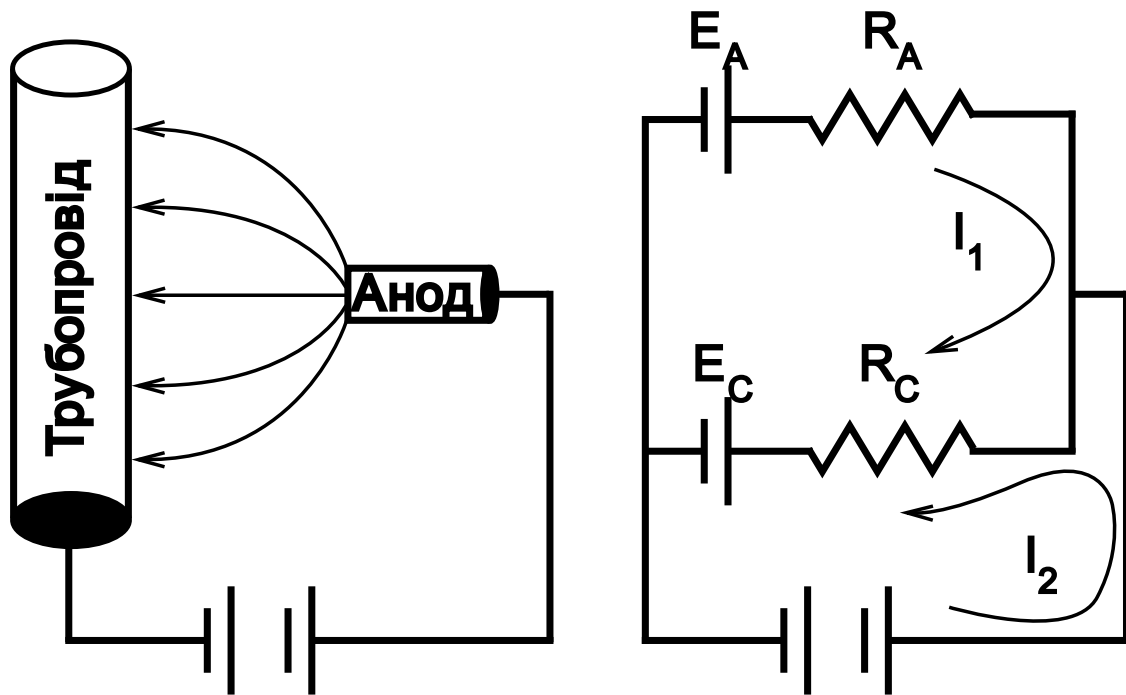


Рис. 14. Схема заміщення і декількома контурами

E_A – потенціал аноду; E_C – потенціал катоду; R_A – опір аноду; R_C – опір катоду; I_1 – струм з анодної зони; I_2 – струм з зовнішнього аноду;

Така схема не представляє велику кількість деталей щодо поведінки системи, однак доступно характеризує відсутність або наявність електрохімічного захисту об'єкту. При цьому помітною відмінністю від першої схеми (Рис. 12) є наявність джерел які симулюють потенціали, а відмінністю від другої (Рис. 13) є поява двох електричних кіл. Що призводить до появи двох струмів, що є значним покращенням, порівняно із моделями з одним контуром, оскільки більше відповідає реальному стану систем катодного захисту де загальний струм системи складається із двох струмів: струму, що протікає трубопроводом і струму, що стікає та натікає на трубопровід із ґрунту.

Різниця потенціалів між анодом і катодом в такій системі виражається наступним чином:

$$\Delta E = E_A - E_C$$

Для повного приглушення корозійних процесів струм корозії повинен наближатися до нуля:

$$I_C = \frac{E_A - E_C}{R_A + R_C} = 0$$

Це може бути досягнуто вирівнюванням потенціалу катоду і аноду. Еквівалентна схема описується наступною системою рівнянь:

$$E_A - E_C = I_1 R_A + R_C (I_1 + I_2)$$

$$I_1 = \frac{E_A - (E_C + R_C I_2)}{R_A + R_C}$$

За відсутності корозії $I_1 = 0$, тобто зберігається рівність:

$$E_C + R_C I_2 = E_A$$

За таких умов споруду трубопроводу можливо вважати катодно захищеною. При цьому шлях, який проходить струм від аноду до трубопроводу через навколишнє середовище може бути змодельований наступним чином (Рис. 15)

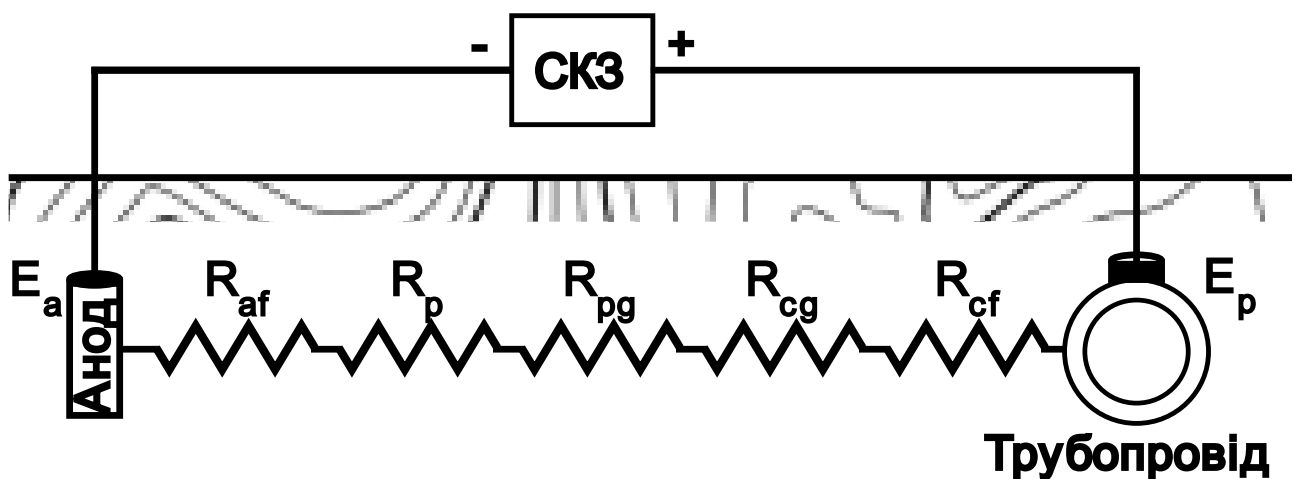


Рис. 15. Схема заміщення катодного захисту із детальною структурою опору між анодом і трубопроводом

E_a – потенціал аноду; E_p – потенціал трубопроводу; R_{af} – опір пасивної плівки матеріалу анода; R_p – опір засипки анода; R_{pg} – перехідний опір анода засипка – ґрунт; R_{cg} – перехідний опір трубопровід – ґрунт; R_{cf} – опір пасивної плівки металу трубопроводу.

На Рис. 15 показано трубу з вуглецевої сталі, закопану у ґрунті, анод, хімічну засипку навколо анода, дроти, що з'єднують трубу з вуглецевої сталі з анодом та ґрунт. Резистивний компонент гальванічного контуру, що показано на Рис. 15,

складається із набору послідовно з'єднаних резисторів, які моделюють різні елементи ланцюга по якому проходить струм від аноду станції катодного захисту до трубопроводу. Це в свою чергу формує структуру, яка за своїми властивостями подібна до структури конденсатору, де менші опори виконують роль обкладок, а більші – ізолятора. І хоча, це і може здійснювати деякий вплив на систему і відповідно може бути враховано під час складання її схеми заміщення, з ряду причин, таких як малий вплив на більшість досліджуваних параметрів та складність складання і розрахунку такої моделі, більшість дослідників цей вплив до уваги не приймають, значно спрощуючи цю складову.

В роботі [113] для реалізації визначення дефектів ізоляції методом електромагнітного контролю, відрізок трубопроводу моделюється комплексним лінійним опором.

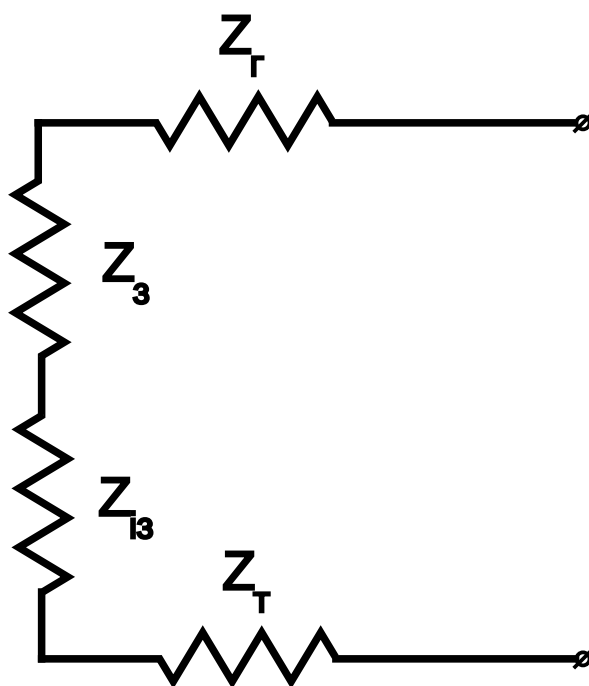


Рис. 16. Схема заміщення із комплексним лінійним опором

Дана модель в значній мірі призначена саме для ілюстрації роботи методу діагностування, що описується в статті, але все ж таки має спільні ознаки із звичними схемами заміщення. Де: Z_T – питомий лінійний опір ґрунту; Z_T – питомий лінійний опір трубопроводу; Z_{iz} – питомий лінійний опір ізоляції; Z_3 – питомий опір ґрунту до струмів витоку.

Робота [114] розглядає систему катодного захисту на основі нечіткої логіки, де відрізок трубопроводу, що захищається має наступну схему заміщення.

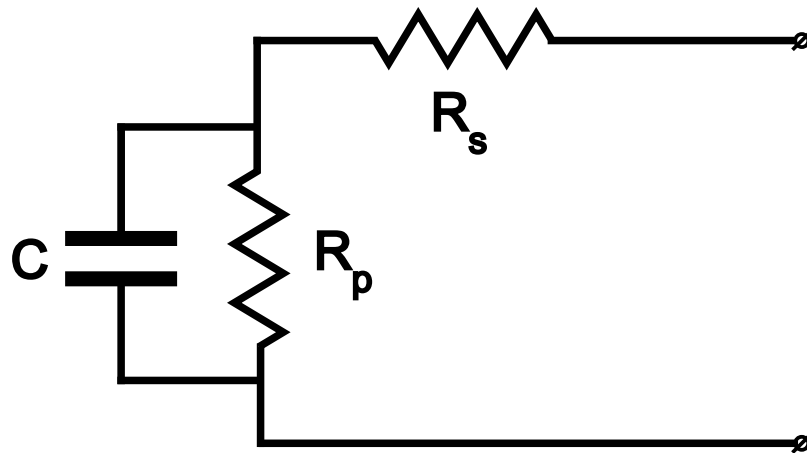


Рис. 17. Схема заміщення із ємнісною складовою

Де R_s – опір ґрунту; R_p – опір труби; C – ємність ізоляції. Дана схема цікава тим фактом, що на відміну до вже звичних резистивних складових додалася ємність, яка приймає до уваги вплив струмів витоку із ізоляції на катодний захист.

Модель з [115] представляє складну, розгалужену еквівалентну схему, метою якої є забезпечення можливості визначення пошкодження ізоляції.

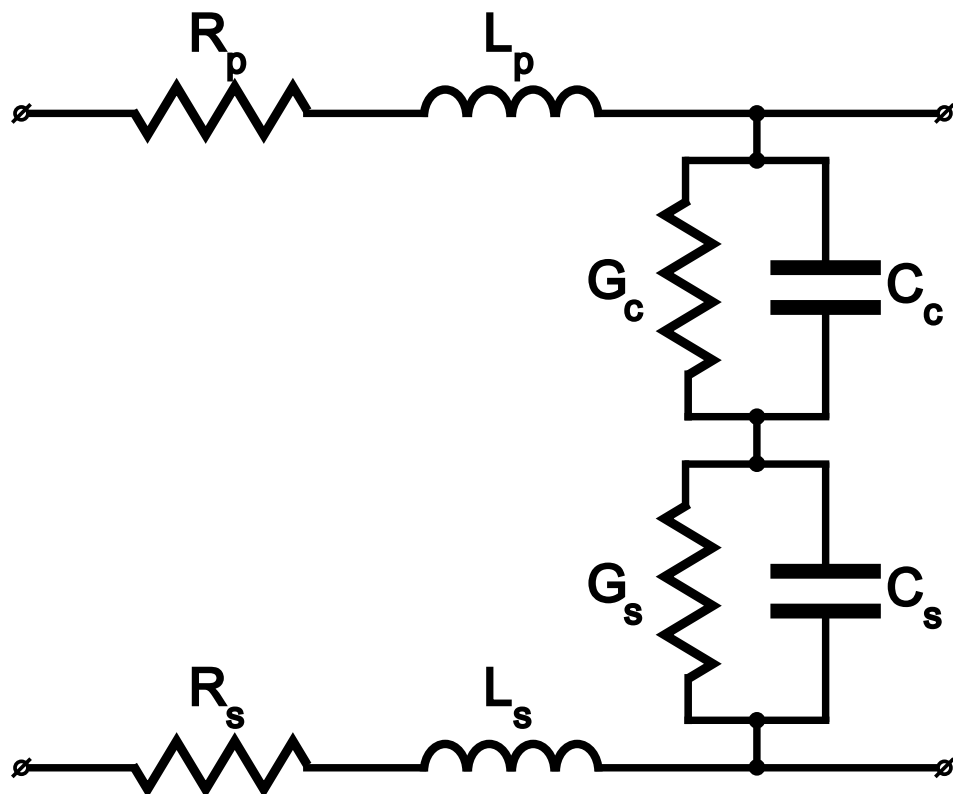


Рис. 18. Схема заміщення із ємнісною і індуктивною складовими

Де, R_p – опір трубопроводу; L_p – індуктивність трубопроводу; R_s – опір ґрунту; L_s – індуктивність ґрунту; G_s – провідність ґрунту; C_s – ємність ґрунту; G_c – провідність ізоляції; C_c – ємність ізоляції.

Виходячи із параметрів трубопроводу визначаються R_p та L_p :

$$R_p = \frac{1}{2r_p} \sqrt{\frac{f \mu_p \rho_p}{\pi}}$$

$$L_p = \frac{1}{2\pi r_p} \cdot \sqrt{\frac{\mu_p \rho_p}{\pi f}}$$

Де, r_p – радіус трубопроводу; f – частота; μ_p – магнітна проникність металу трубопроводу; ρ_p – питомий опір металу трубопроводу.

Опір ґрунту залежить від значної кількості факторів, однак приблизне значення можливо отримати за формулою:

$$R_s = 10^{-7} \pi^2 f$$

Параметри ізоляційного покриття такі як опір і ємність визначаються наступним чином:

$$R_c = 1,2 \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \left(\frac{r_p + \delta_c}{r_p} \right)$$

$$C_c = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln \left(\frac{(2r_p + 2\delta_c)}{(2r_p)} \right)}$$

ρ_c – питомий опір матеріалу ізоляції; δ_c – товщина ізоляційного покриття; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна; ε – відносна електрична проникність ізоляції; l – погонна довжина трубопроводу.

Наведені схеми заміщення підземного сталевго трубопроводу представляють різноманітні методи представлення його електричних параметрів і приймають до уваги різні аспекти його дослідження. Так найбільш простий і популярний варіант представлений послідовним з'єднанням декількох елементів, кожен з яких моделює одну із частин системи катодно захищеного трубопроводу. Більшість з цих елементів є активними опорами, які розраховуються виходячи із

ряду припущень. До таких припущень входить однорідність структури труби, та незмінність параметрів навколишнього середовища. Інші, більш розвинуті, варіанти схем заміщення додають більше деталей, таких як джерела напруги, що симулюють власні потенціали в системі, та ємнісні і індуктивні компоненти, присутність яких часто опускається. Крім того розгляд таких систем у вигляді схем із одиничним контуром не є досить коректним, оскільки загальний струм є сумою двох струмів: струму, що протікає трубопроводом і струму, що стікає та натікає на трубопровід із ґрунту. І хоча остання схема заміщення (Рис. 18) приймає до уваги більшість наведених вище зауважень, вона все ще не є розрахованою на стрибкоподібну зміну структури модельованої системи, що може бути представлено, як вставкою із поліетиленового трубопроводу із майже нескінченним опором, так і відрізком нового сталевого трубопроводу із опором значно меншим за сусідні ділянки. Такий випадок потребує подальшого розвитку схеми заміщення, для адекватної оцінки його впливу на роботу станції катодного захисту і суміжних ділянок трубопроводу.

2.4 Види неоднорідностей на підземному трубопроводі

Неоднорідності підземних сталевих трубопроводів можуть бути представленими різними факторами та включають різні аспекти структури трубопроводу та навколишнього середовища. Можливі причини появи електротехнічних відмінностей може бути обумовлено такими явищами як структурні неоднорідності металу трубопроводу, неоднорідності, що пов'язані із старінням, пошкодженнями та корозією, викликані сейсмічними та погодними впливами, а також впливом суміжних споруд і комунікацій, тощо.

Як вже згадувалось у першому розділі, для ізоляції трубопроводу від навколишнього середовища, з метою зменшення величини катодного струму, що споживається із станції катодного захисту, на трубопровід наносяться різнотипні покриття [116, 117]. Тип та якість цих покриттів, їх стан і ступінь старіння

безпосередньо впливають на величину опору ізоляції, що використовується під час розрахунку катодного захисту.

Підземні сталеві газопроводи, як правило, формуються з окремих відрізків труб (сегментів), які на місці будівництва з'єднуються між собою у єдину герметичну систему. З'єднання між трубами найчастіше виконується методом дугового зварювання [15], що забезпечує високу міцність, надійність трубопроводу, що прокладається, а також мінімізує ризик витоків газу. Використання зварних з'єднань дозволяє отримати суцільну конструкцію трубопроводу, яка здатна витримувати значний внутрішній тиск та дію агресивних факторів зовнішнього середовища [118]. Для забезпечення максимальної надійності майбутнього трубопроводу, він перевіряється і випробується на кожному етапі різноманітними методами. І хоча такі принципи прокладання забезпечують прийнятний рівень надійності, повністю запобігти деяким ризиків майже неможливо.

В результаті процесу зварювання, метал проходить через етапи плавлення і затвердіння, що призводить до формування неоднорідностей. Крім того існує можливість з'єднання труб з різною товщиною стінок, що може утворюватися з різного ряду причин, як наприклад, підключення відгалуджень, заміна пошкодженого сегменту новим, та інші. Неоднорідності матеріалу в зоні зварювання та різна товщина стінок труб, призводить до концентрації механічних напружень та порушення потоку продукту [119], що в свою чергу прискорює корозійне руйнування зварних з'єднань, провокує значні несправності в роботі трубопроводу, а також економічні та екологічні ризики.

Іншим видом з'єднування сегментів трубопроводів, що може бути використаний, є з'єднання за допомогою фланців. Фланцеві з'єднання в трубопроводах можуть суттєво впливати на ефективність катодного захисту внаслідок ряду факторів. Фланцеві з'єднання створюють сегментування трубопроводу, що перешкоджає рівномірному розподілу катодного захисного струму [111]. Це може призвести до накопичення струмів у певних ділянках і зростання потенціалів на межах між сегментами, збільшуючи ймовірність корозії

[120]. Неправильна обробка або нерівності на поверхнях фланців можуть призводити до утворення мікротріщин, а використання різних матеріалів для фланців і ущільнень може призводити до гальванічної корозії [121]. Для забезпечення ефективного катодного захисту важливо враховувати ці фактори при проектуванні та розподілі фланцевих з'єднань на трубопроводі.

З іншого боку, геометрія трубопроводу постійно знаходиться під впливом тиску ґрунту, що може виражатися у вигляді зсувів та сейсмічних вібрацій, які значно підвищують ризики пошкодження його цілісності [122]. Сейсмічні коливання, представлені диференціальним рухом ґрунту, можуть викликати локальне вигинання трубопроводів, особливо в умовах неоднорідного ґрунту. Це може призвести до значних пружно-пластичних реакцій, осьових деформацій та концентрації напружень, що може спричинити локальне вигинання трубопроводу. Виготовлення сталевих труб для газопроводів є складним технологічним процесом, спрямованим на досягнення необхідних міцнісних характеристик та герметичності готового виробу. Є два основні типи сталевих труб, що використовуються для прокладання трубопроводів – безшовні та зварні [29].

Безшовні труби виготовляються із заготовки, що проходить нагрівання та прокатку на спеціальних станах із подальшим прошиванням осьового каналу. Далі труба формується у каліброваних валках до необхідного діаметра та товщини стінки [123]. Така технологія забезпечує високу однорідність металу і відсутність зварних швів, що підвищує надійність труб при роботі під високим тиском.

Зварні труби виготовляються з гарячекатаного або холоднокатаного листового прокату. Металеву смугу (штрипс) формують у циліндричну заготовку на профілювальних станах, після чого краї з'єднують методом електрозварювання — найчастіше електродуговим або дуговим під флюсом [124]. У сучасному виробництві широко застосовується спіральне зварювання, що дозволяє отримувати труби великого діаметра з підвищеною стійкістю до внутрішнього тиску.

Після термомеханічної обробки гарячекатаної сталі спостерігаються розвиток неоднорідностей в текстурі та мікроструктурі на різних глибинах. Це в

більшій мірі впливає на механічні властивості сталі, такі як міцність та пластичність [125], однак також може провокувати появу гальванічних мікропар, що в свою чергу призводить до прискорення корозії.

Узагальнюючи, будь-які механічні або корозійні ушкодження поверхні труб, а також відмінності між суміжними ділянками можуть змінювати електричні характеристики трубопроводу, впливаючи на розподіл захисного потенціалу [126, 127].

Крім наведених вище факторів, що відносяться до факторів від яких залежать електричні параметри трубопроводу на систему катодного захисту впливають параметри навколишнього середовища, які формуються в результаті різних комплексних впливів, в тому числі і сезонних. В системі «станція катодного захисту – підземний сталевий трубопровід – ґрунт» струми стікання з трубопроводу залежать від електропровідності навколишнього корозійного середовища. Зміна вологості та температури впливає на провідність середовища, що, в свою чергу, призводить до значних сезонних коливань струмів (від 0,5 А до близько 7 А) при фіксованій напрузі на виході СКЗ [128]. Причиною даних змін є відмінність електротехнічних параметрів системи в точках контакту «трубопровід – середовище». Основним джерелом відмінностей пов'язаних із сезонністю є опади, мінімум яких припадає на зимовий і літній періоди.

Дослідження [129] підкреслює, що неврахування змін в електротехнічних параметрах навколишнього середовища може призводити до нераціональних режимів роботи системи протикорозійного захисту, що викликає надмірні витрати електричної енергії та матеріалів анодних заземлювачів. Крім цього у зоні суміжної роботи сусідніх СКЗ коливання значень захисного потенціалу трубопроводу, що викликано зміною електротехнічних параметрів, призводить до утворення різниці потенціалів. Впровадження адаптації режимів роботи СКЗ до сезонних змін, а також спільне керування кількома СКЗ мінімізує їх негативний впливу один на одного. Таким чином, основна увага приділена важливості адаптації систем катодного захисту до сезонних змін електротехнічних параметрів середовища для підвищення їх ефективності та зменшення витрат.

Згідно з [130] катодний захист призводить до надмірного утворення гідроксид-іонів (OH^-), що викликає окислення середовища. Це, в свою чергу, порушує баланс солей у ґрунті, що може призвести до утворення соляних відкладень на поверхні трубопроводу. Такі зміни в хімічному складі ґрунту можуть негативно вплинути на агроекологічні показники, зокрема на врожайність рослин і їх стійкість до хвороб. Зокрема, навіть незначне підкислення середовища (зниження рН) може призвести до зниження потенціалу металу на 0.06 В, що також вплине на хімічні реакції в ґрунті.

Дослідження підкреслює, що ці фактори можуть ускладнювати катодну реакцію в подвійному електричному шарі, зокрема через проблеми з дифузією кисню, що також може призвести до зниження поляризаційного струму або збільшення поляризаційного опору. Таким чином, катодний захист може мати значний вплив на навколишнє середовище і агроекологічні умови.

Кількість та тип анодів, їх конфігурація та матеріал анодної засипки що використовуються для катодного захисту впливають, опір розтікання аноду, а отже на загальну інтенсивність струму, що подається на метал трубопроводу [111, 127]. Збільшення кількості анодів може призвести до збільшення струму та покращення захисного потенціалу. Вибір матеріалу анодів КЗ може впливати на ефективність захисту. Наприклад, магнієві аноди мають вищу електродну активність, ніж аноди з інших матеріалів, що може призвести до більш ефективного захисту.

Іншим важливим параметром є взаємодія вже існуючого захисту з іншими комунікаціями. Якщо трубопровід перетинають інші металеві конструкції, це може призвести до електричного втручання, що вплине на рівень потенціалу [51]. Такі випадки викликають складно передбачувані зміни в рівні захисного потенціалу.

Усі наведені типи неоднорідностей представляють собою фактори, які в тому чи іншому вигляді можуть впливати на електротехнічної системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід» і тим самим змінювати ефективність роботи катодного захисту.

2.5 Математична модель системи «СКЗ– ґрунт – трубопровід»

У типовому випадку, як то розглянуті в главі 2.3 підземний сталевий трубопровід і навколишній ґрунт розглядаються як однорідна система, електричні параметри якої є незмінними в часі і вздовж траси прокладання. Як наслідок, досить просто отримати схему заміщення трубопроводу, параметри якої визначаються на основі цього припущення і дають змогу отримати початкове розуміння системи електрохімічного захисту, що особливо корисно на етапі проектування за умов обмеженості доступних даних вимірювань. З іншого боку, для вже існуючих трубопроводів такий підхід не може похизуватись значною точністю, через ряд чинників, що впливають на систему, такі як:

- Неоднорідність трубопроводу, яка може бути присутня через різні причини:
 - Дефекти під час виготовлення або прокладання трубопроводу
 - Набуті за час його експлуатації різнотипні пошкодження, каверни, піттинги
 - Різні діаметр і матеріал труб, в наслідок відновлення пошкоджених ділянок
- Неоднорідність ізоляційних покривів:
 - Через зношення ізоляції із часом
 - Відновлення пошкоджених ділянок новою або різнотипною ізоляцією
- Вплив зовнішніх джерел блукаючих струмів
- Вплив сусідніх комунікацій, які не підключені безпосередньо до системи електрохімічного захисту
- Взаємовплив сусідніх стацій катодного захисту

Усі наведені чинники впливають на результуючий потенціал трубопроводу, що призводить до його неоднорідного розподілення вздовж нитки трубопроводу. Неоднорідність потенціалу може мати негативний вплив на захищеність трубопроводу призводячи до послаблення його корозійної стійкості, або навіть прискорюючи корозійні процеси на окремих ділянках.

Для уникнення таких небажаних впливів необхідно якомога детальніше представляти процеси, що відбуваються на підземному сталевому трубопроводі. Для цього стають у нагоді різноманітні методи математичного моделювання, що представляють систему електрохімічного захисту із різною точністю.

В моделі підземного сталевого трубопроводу, яка використовується для дослідження різноманітних впливів, приймаються наступні припущення:

- Обидва плеча трубопроводу, що захищається є абсолютно ідентичними
- Відсутні зовнішні збурення такі як інші СКЗ, джерела блукаючих струмів, інші підземні комунікації
- Природний потенціал сталі у сухому ґрунті є постійним і дорівнює -0,3 В [53]

Модель підземного сталевого трубопроводу. В даній роботі для верифікації зроблених припущень і перевірки рекомендацій використовується модель підземного сталевого трубопроводу, яка базується на моделі, запропонованій в роботах [131, 132]. Еквівалентна схема вищезгаданої моделі показана на Рис. 19.

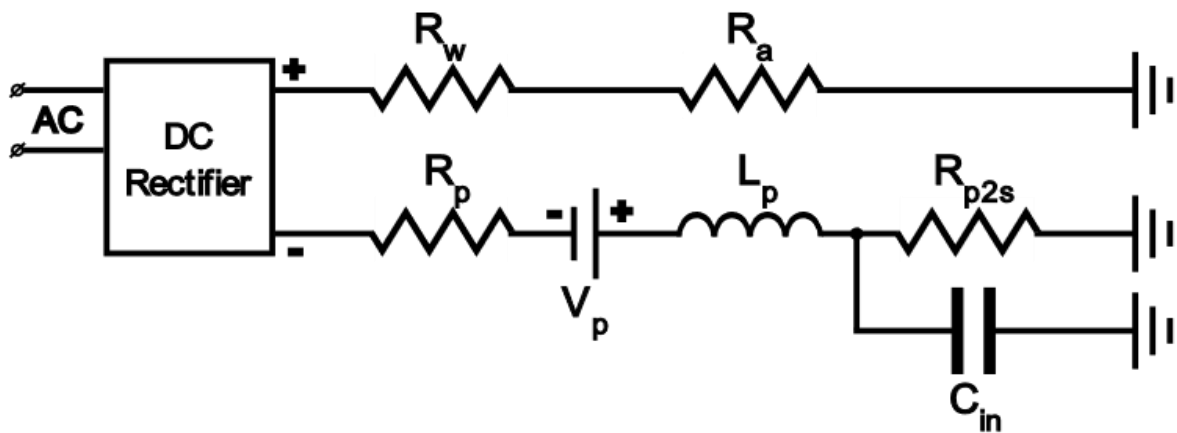


Рис. 19. Схема заміщення підземного сталевого трубопроводу з зосередженими параметрами

Де, R_w – це опір контактного провідника;

R_a – опір анода;

R_p , L_p – опір та індуктивність трубопроводу;

V_p – початкова напруга поляризації трубопроводу;

C_{in} – ємність ізоляції;

R_{p2s} – опір трубопровід - ґрунт.

Опір кабелю визначається його довжиною та перерізом.

$$R_w = \rho_{\text{пр}} \frac{L_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}}$$

Опір розтікання аноду залежить від його складу, конфігурації, кількості та параметрів ґрунту та анодної засипки. Кількість анодів визначається за формулою:

$$n = \frac{qIT}{G\eta}$$

q – електрохімічний еквівалент анодного матеріалу; G – маса одного анодного стрижня; $\eta = 0,4 \dots 0,6$ – коефіцієнт корисної дії; T – термін експлуатації; I – струм станції катодного захисту.

Опір розтікання одного стрижня визначається за формулою:

$$R_{a1} = \frac{\rho_{\text{г}}}{2\pi l_a} \ln \left(\frac{2l_a}{d} \sqrt{\frac{4h + 3l_a}{4h + l_a}} \right)$$

$\rho_{\text{г}}$ – питомий опір ґрунту Ом.м; l_a – довжина стрижня, м; d – діаметр стрижня, м; h – глибина залягання аноду (від поверхні землі до верхньої точки аноду), м.

Опір групи анодів дорівнює:

$$R_a = \frac{FR_{a1}}{n}$$

$F = 1.1 \dots 1.8$ – коефіцієнт екранування.

Опір, індуктивність трубопроводу та ємність ізоляції безпосередньо залежать від геометрії та матеріалу змодельованої труби (Рис. 20).

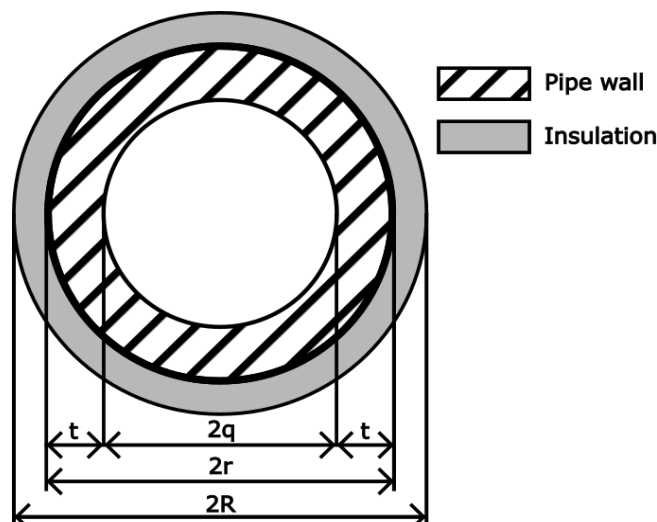


Рис. 20. Переріз трубопроводу

Активний опір трубопроводу R_p :

$$R_p = \frac{\rho}{\pi(D-t)t} l$$

Де, ρ – питомий електричний опір матеріалу трубопроводу в $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$. D – зовнішній діаметр труби; t – товщина стінки труби; l – довжина відрізка трубопроводу.

V_p визначається матеріалом труби.

Індуктивність трубопроводу визначається як індуктивність порожнистого прямого дроту круглого перерізу:

$$L_p = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right) + L_i$$

Де, μ_0 – магнітна стала; r – зовнішній радіус труби; L_i – внутрішня індуктивність, яка дорівнює :

$$L_i = \frac{\mu l}{2\pi m r} \frac{\sinh m t - \sin m t}{\cosh m t - \cos m t}$$

Де, μ – магнітна проникність матеріалу трубопроводу; t – товщина стінки труби;

$$m = \sqrt{2\omega\mu\gamma}$$

Де, $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; γ – електропровідність матеріалу.

Ємність трубопроводу можна приблизно розрахувати, розглядаючи ділянку трубопроводу як циліндричний конденсатор. У цьому випадку місце з'єднання метал-ізоляція є внутрішньою обкладкою конденсатора, а місце з'єднання ізоляція-земля - другою обкладкою конденсатора. В результаті ємність дорівнює:

$$C_{in} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{R}{r}}$$

ϵ_0 – електрична стала; ϵ – діелектрична проникність ізоляції; R – радіус трубопроводу в ізоляції.

Опір трубопровід - ґрунт визначається за формулою:

$$R_{p2s} = \frac{R_c}{A(2 - CE)}$$

Де, R_c - питомий опір ізоляції трубопроводу залежно від матеріалу покриття, Ом м²; A – площа поверхні труби; CE – ефективність покриття в залежності від стану та віку.

Площа поверхні труби дорівнює :

$$A = \pi D l$$

Перетворюємо схему заміщення до чотирьохполосника, у якого на вхід подається напруга випрямляча, а вихід представляють потенціал на трубопроводі:

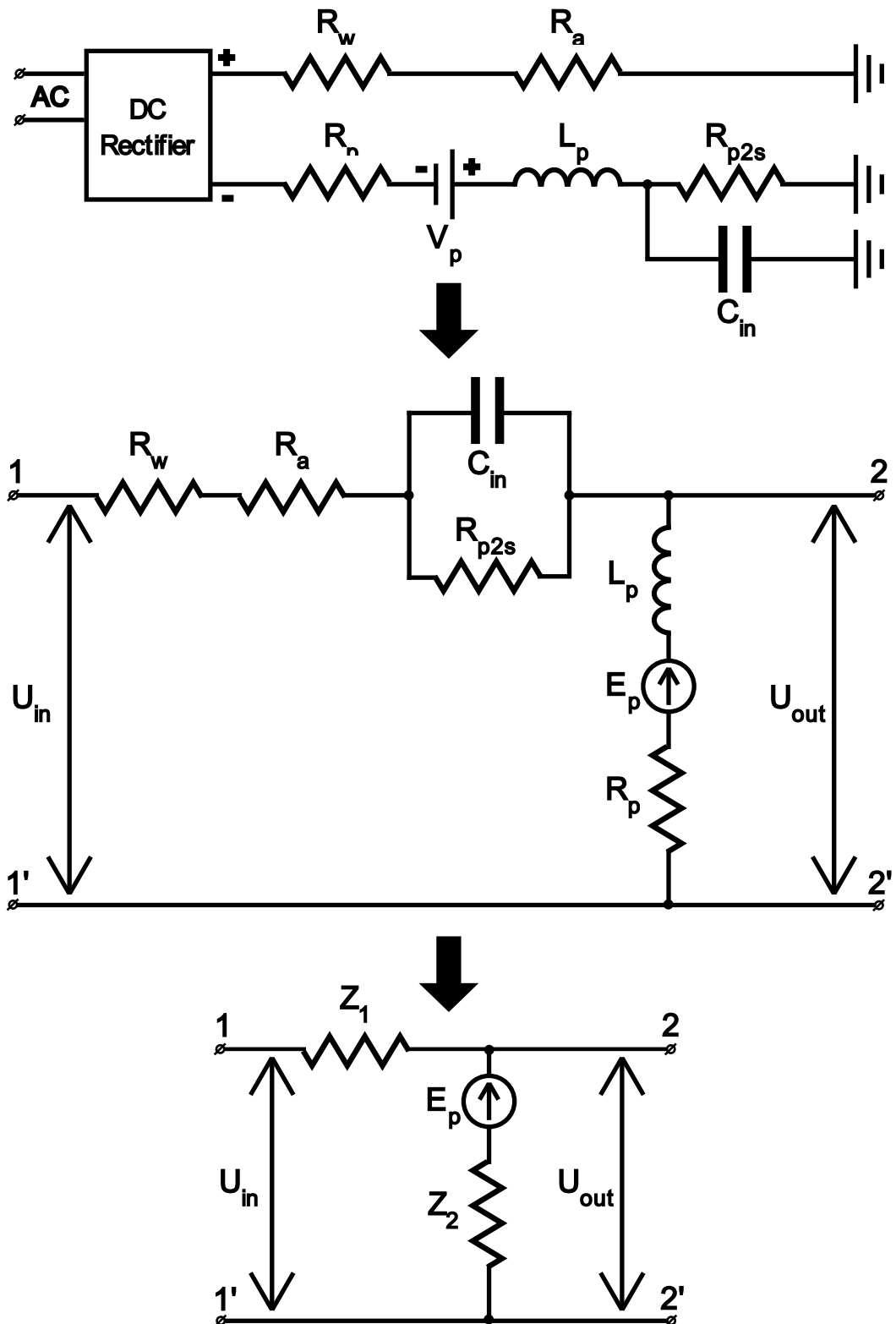


Рис. 21. Перетворення схеми заміщення трубопроводу до чотирьохполосника

Передатна функція чотирьохполюсника буде дорівнювати:

$$W(s) = \frac{U_{out}}{U_{in}}$$

При перетворенні $\dot{Z}_1$ і $\dot{Z}_2$ стали дорівнювати:

$$\dot{Z}_1 = R_w + R_a + \left(\frac{\frac{R_{p2s}}{sC_{in}}}{R_{p2s} + \frac{1}{sC_{in}}} \right) = R_w + R_a + \left(\frac{R_{p2s}}{sR_{p2s}C_{in} + 1} \right)$$

$$\dot{Z}_2 = R_p + sL_p$$

Вхідна напруга дорівнює:

$$U_{in} = \dot{Z}_1 \dot{I} + \dot{Z}_2 \dot{I} + E_p$$

$$U_{out} = \dot{Z}_2 \dot{I} + E_p$$

Передаточна функція:

$$W(s) = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$$

Як наслідок передатна функція дорівнює:

$$W(s) = \frac{sL_p + R_p}{sL_p + R_p + R_w + R_a + \left(\frac{R_{p2s}}{sR_{p2s}C_{in} + 1} \right)}$$

Перетворюємо отриманий вираз:

$$W(s) = \frac{sL_p + R_p}{\frac{(sL_p + R_p + R_w + R_a)(sR_{p2s}C_{in} + 1) + R_{p2s}}{sR_{p2s}C_{in} + 1}}$$

$$W(s) = \frac{(sL_p + R_p)(sR_{p2s}C_{in} + 1)}{(sL_p + R_p + R_w + R_a)(sR_{p2s}C_{in} + 1) + R_{p2s}}$$

$$W(s) = \frac{s^2 L_p R_{p2s} C_{in} + s(L_p + R_{p2s} R_p C_{in}) + R_p}{s^2 L_p R_{p2s} C_{in} + s(L_p + R_{p2s} R_p C_{in} + R_{p2s} R_w C_{in} + R_{p2s} R_a C_{in}) + R_p + R_w + R_a + R_{p2s}}$$

В результаті отримано передатну функцію, якою можливо описати систему «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід», шляхом її перетворення до складного чотириполюсника.

2.6 Види випрямлячів у складі СКЗ

Силові перетворювачі енергії існують вже багато десятиліть і змінили багато форм і технологій для виконання свого основного призначення: перетворення параметрів електричної енергії відповідно до вимог споживача. Вони пройшли довгий шлях від електромеханічних перетворювачів (кінець дев'ятнадцятого століття), випрямлячів на ртутних та газонаповнених вентилях, таких як тиратрони, ігнітрони та вакуумні діоди (перша половина двадцятого століття), та першими напівпровідниковими приладами у вигляді селенових та мідно-оксидних випрямлячів (друга половина двадцятого століття) [133]. Усі вони характеризувалися малою ефективністю, високими втратами, значним падінням напруги та незадовільними масо-габаритними показниками.

Сучасні напівпровідникові прилади представлені випрямлячами і інверторами на базі тиристорних і транзисторних вентилів [134]. У порівнянні з попередниками вони мають ряд переваг, таких як: підвищений ККД, значна швидкодія та можливість керування напругою та частотою. До їх недоліків відносяться: не ідеальність форми вихідної напруги та струму, наявність вищих гармонік та генерація електромагнітних завад.

Основним завданням випрямляча є перетворення змінної напруги у постійну. Типовий випрямляч складається з силових перемикачів з односторонньою провідністю, трансформатора та згладжуючого фільтру [135]. Зазвичай при створенні випрямляча намагаються досягти раціонального споживання енергії, збільшення ККД та зменшення масо-габаритних показників і, як результат, було розроблено чималу кількість технологічних рішень, кожне з яких має як свої переваги так і недоліки. Серед всього різноманіття розглянемо ряд базових і найбільш широко використовуваних схем однофазних випрямлячів, оскільки однофазне живлення завжди є доступним на громадських і промислових об'єктах в населених пунктах.

Однофазний однонапівперіодний випрямляч складається з одного напівпровідникового діода, який пропускає струм лише протягом додатного

напівперіоду змінної напруги. Через надзвичайну простоту виконання такий випрямляч використовується якщо вихідна потужність не перевищує 10 Вт і допускається високий коефіцієнт пульсації. Недоліками цього рішення є низька частота пульсації випрямленої вихідної напруги (дорівнює частоті вхідної змінної напруги, низький ККД і нерациональне використання трансформатора, який значно впливає на масо-габаритні показники випрямляча.

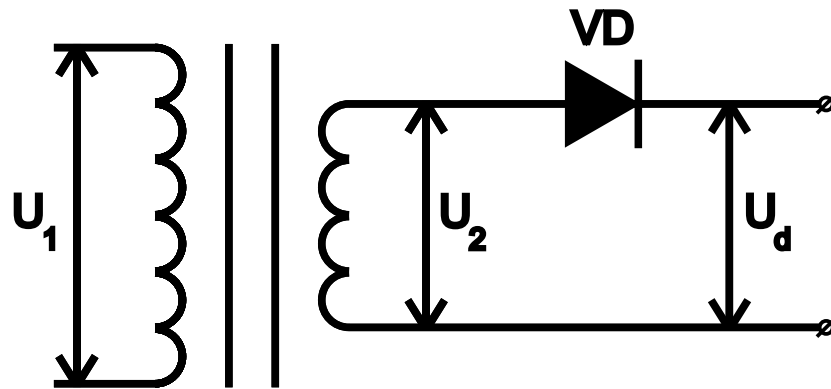


Рис. 22. Схема однонапівперіодного випрямляча

Вхідна напруга визначається формулою:

$$u_2(t) = U_2 \sin(\omega t)$$

Вихідна напруга описується формулою:

$$u_d(t) = \begin{cases} U_2 \sin(\omega t), & 0 \leq \omega t < \pi \\ 0, & \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

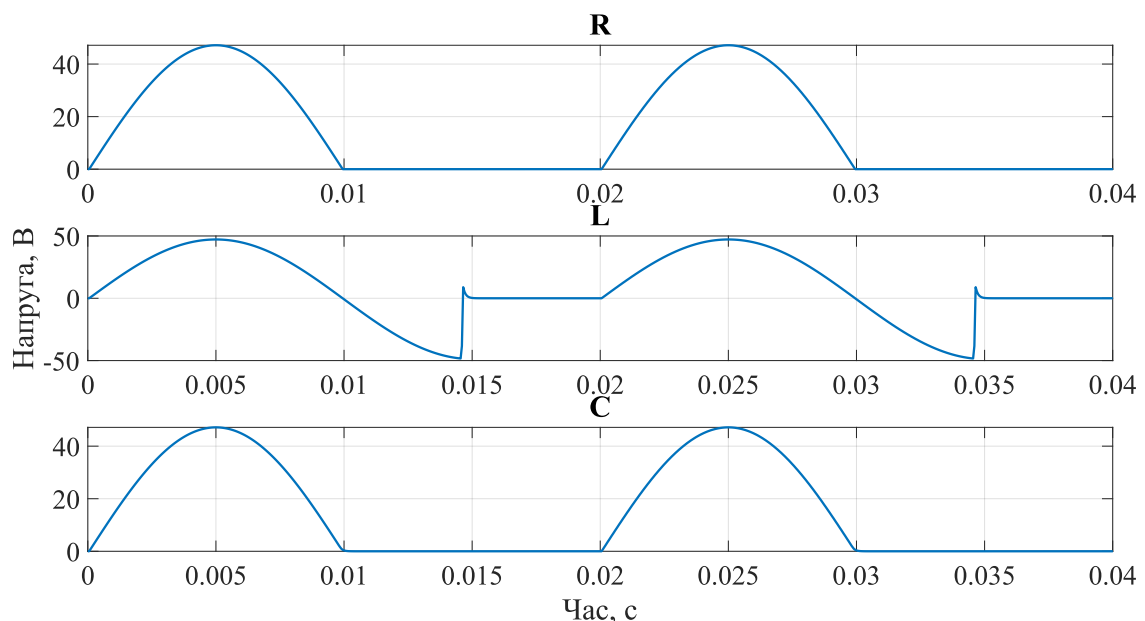


Рис. 23. Вихідна напруга напівперіодного випрямляча

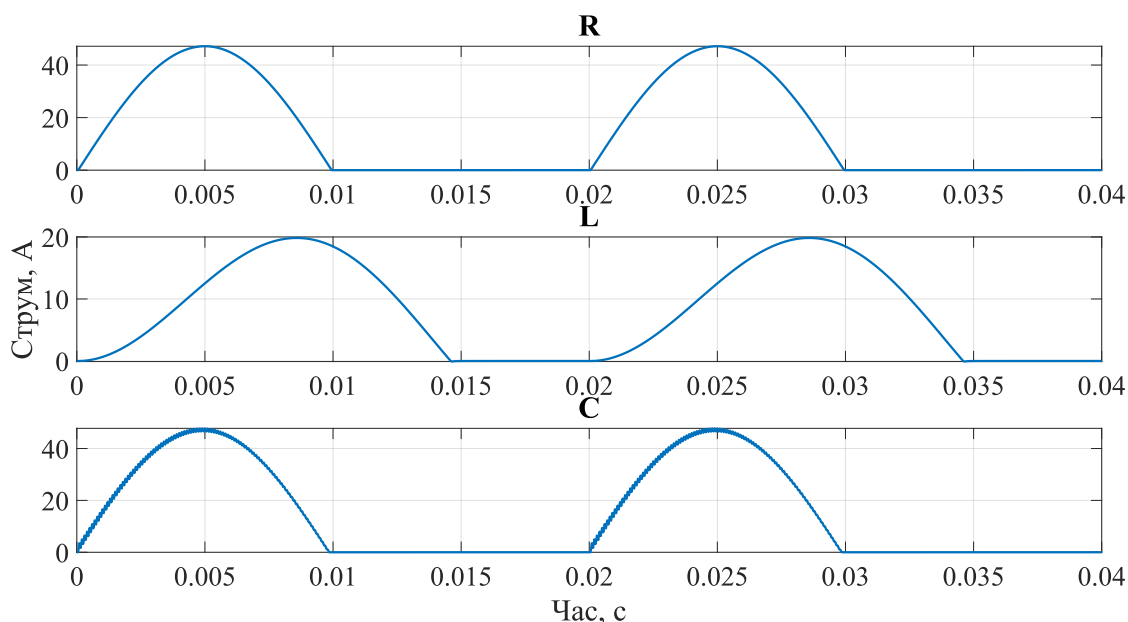


Рис. 24. Вихідний струм напівперіодного випрямляча

Робота такого випрямляча на різне навантаження показує наступну картину. При роботі на індуктивне навантаження спостерігаємо затримку наростання струму і зсув точки його переходу через нуль, що викликано процесом зарядки і розрядки індуктивності. Це в свою чергу впливає і на напругу, що проявляється у вигляді пропускання частини від'ємного напівперіоду синусоїди. З іншого боку, робота на ємнісне навантаження показує деяку деформацію форми напруги у порівнянні із роботою на резистивне навантаження та наявність збурень на графіку струму.

Двонапівперіодна схема з нульовим виводом (середньою точкою) представляє собою дві об'єднанні однонапівперіодні схеми, що живляться від двох послідовно з'єднаних вторинних обмоток з виведенням загальної (нульової) точки цих обмоток. Дана схема задіється зазвичай при вихідній потужності до 500 Вт, і дає можливість використовувати готові діодні збірки та загальний радіатор діодів. У цій схемі для випрямлення напруги використовуються обидва напівперіоди змінної напруги, що сприятливо впливає на ККД у порівнянні з попередньою схемою. Частота пульсації вихідної напруги дорівнює подвоєній частоті живлення. Недоліком є складна структура трансформатора, що ускладнює реалізацію цього рішення, а також висока обернена напруга на ключах.

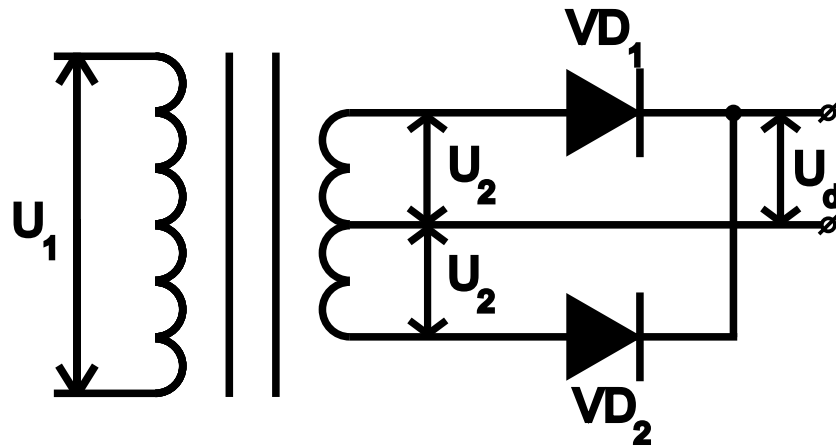


Рис. 25. Схема двохнапівперіодного випрямляча з нульовим виводом
Вихідна напруга випрямляча описується:

$$u_d(t) = |U_2 \sin(\omega t)|$$

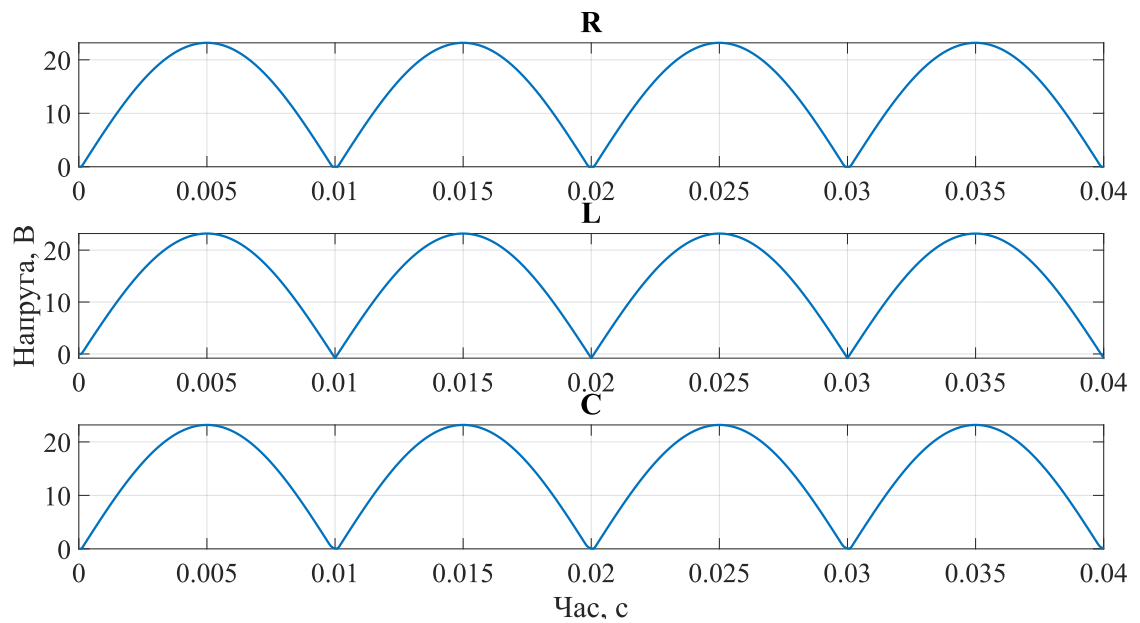


Рис. 26. Вихідна напруга двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом

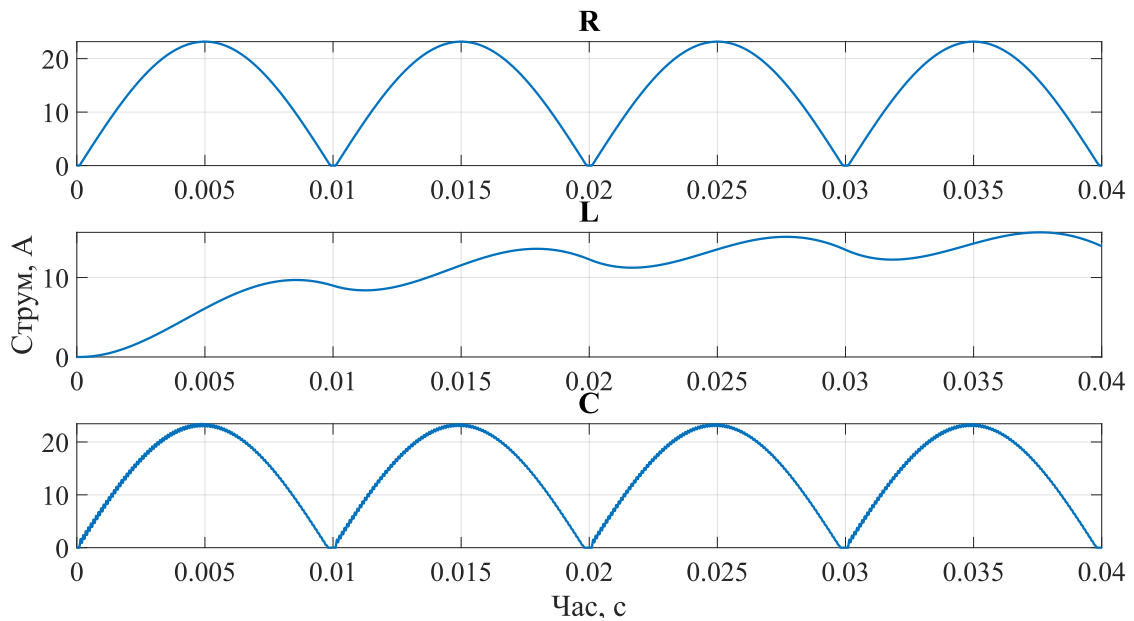


Рис. 27. Вихідний струм двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом

У випадку двонапівперіодної схеми відсутність значних пауз показує значний вплив на роботу випрямляча на різних навантаженнях. У випадку індуктивності спостерігаємо поступове наростання струму до досягнення сталого значення, навколо якого і коливається миттєве значення струму. Напруга у цей час показує коротко-строковий перехід через нуль між напівперіодами. На ємнісному навантаженні помітно незначне зміщення напруги і наявність збурень на графіку струму.

Однофазна мостова схема використовує одну обмотку трансформатора для випрямлення обох напівперіодів змінної напруги. Це досягається за допомоги попереминого включення двох пар напівпровідникових ключів (VD1 – VD3 та VD2 – VD4). У порівнянні з схемою двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом, мостова схема має більш просту конструкцію трансформатора за аналогічною формою вихідної напруги та частотою пульсації, а також вдвічі нижчу обернену напругу на ключах. Така схема широко використовується у значному діапазоні потужностей, оскільки має більший ККД, раціональне використання трансформатора дозволяє знизити його розрахункову потужність і розміри, має можливість роботи без трансформатора. Недоліком мостового виконання є більша кількість ключів.

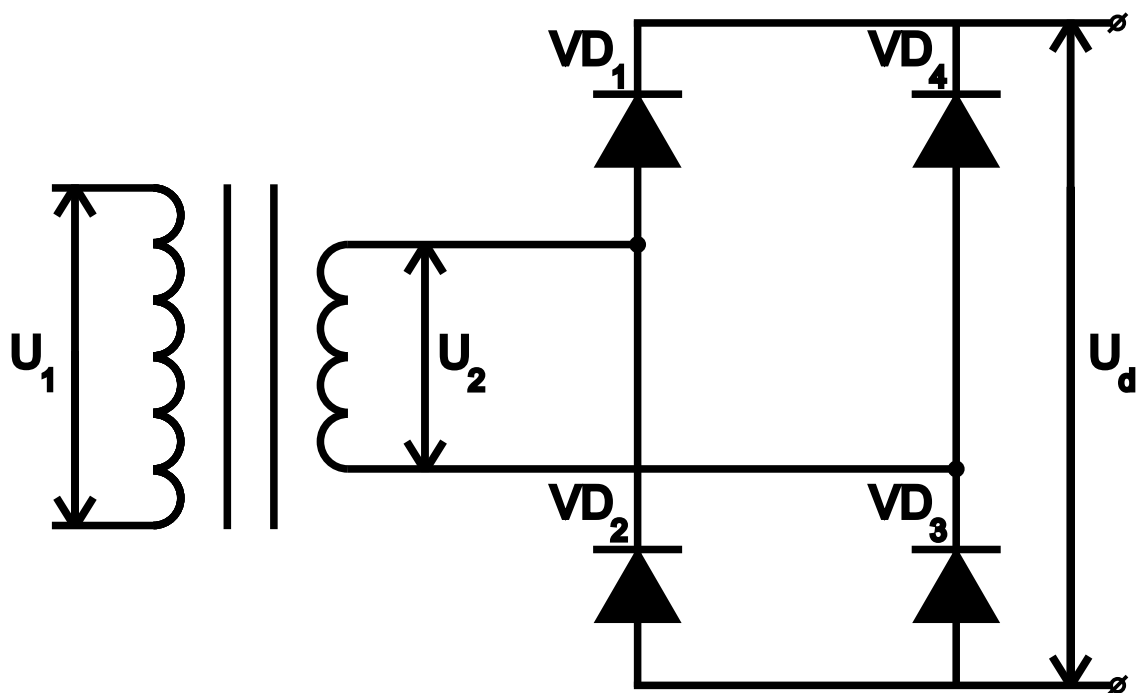


Рис. 28. Схема мостового випрямляча

Вихідна напруга випрямляча:

$$u_d(t) = |U_2 \sin(\omega t)|$$

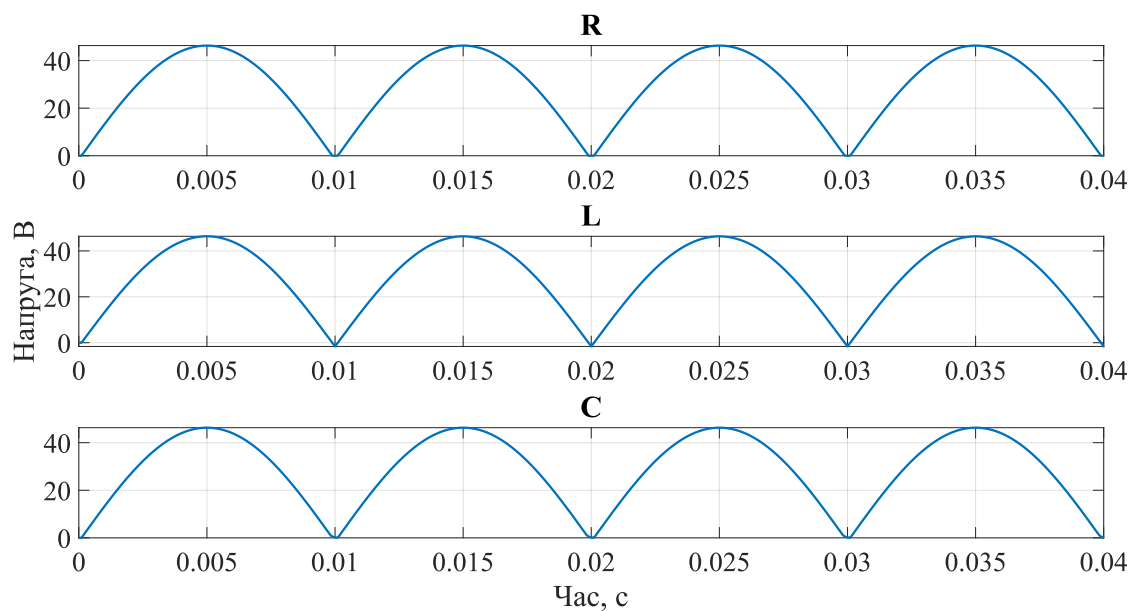


Рис. 29. Вихідна напруга мостового випрямляча

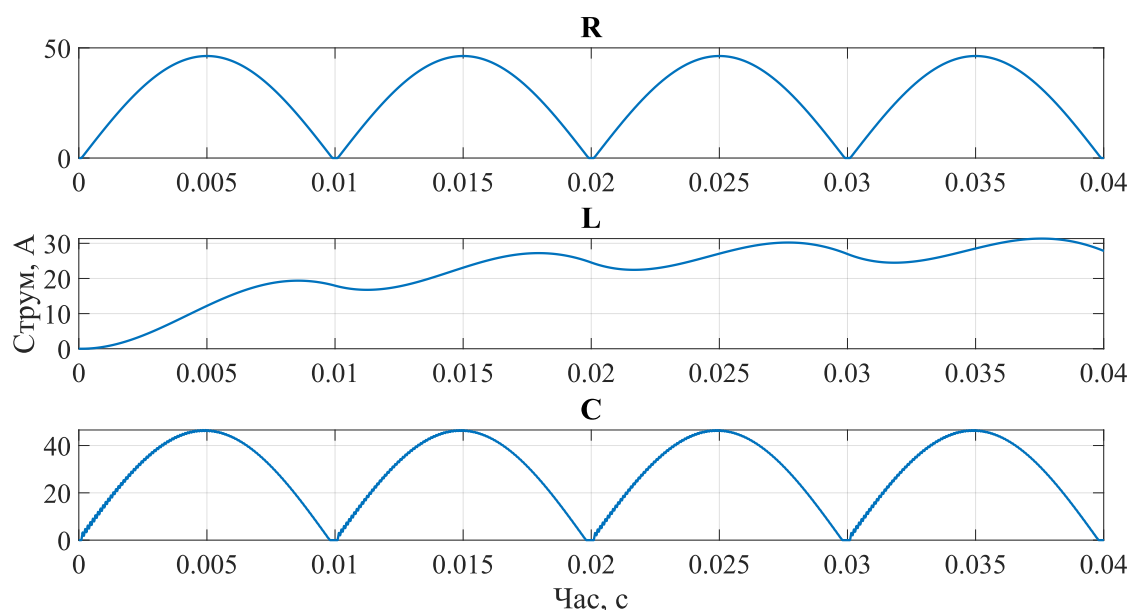


Рис. 30. Вихідний струм мостового випрямляча

Графіки роботи на різне навантаження для мостового випрямляча за формою не відрізняються від таких для випрямляча з нульовою точкою, однак за рахунок раціонального використання трансформатора має більші абсолютні значення.

Усі вище наведені схеми відносяться до некерованих випрямлячів, оскільки були виконані на базі напівпровідникових діодів. Однак, керовані випрямлячі окрім випрямлення також виконують регулювання (стабілізацію) середньо-випрямленої напруги на навантаженні. Найпростіші схеми керованих випрямлячів виконуються на базі некерованих, шляхом повної чи часткової заміни випрямляючих діодів на керовані ключі: тиристори, симистори, диністори, транзистори. У таких випрямлячах регулювання середнього значення випрямленої напруги досягається за допомогою використанням схеми керування, яка створює регульовану затримку вмикання ключів відносно переходу через нуль змінної синусоїдної напруги. Ця затримка виконується шляхом зсуву фази імпульсів керування ключами відносно фази змінної напруги і називається кутом керування або запалювання α . Регулюючи кут керування в діапазоні від 0 до 180, можливо зменшувати середньо-випрямлену напругу від номінального значення до 0.

Серед таких випрямлячів велику популярність здобув мостовий двонапівперіодний випрямляч. Постійна складова напруги на навантаженні визначається як:

$$U_0(\alpha) = \int_{\alpha}^{\pi} U_{m2} \sin \omega t \, d\omega t = \frac{2U_{m2}}{\pi} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

Графічне представлення залежності $U_0(\alpha)$ називається регулювальною характеристикою випрямляча і має наступний вигляд:

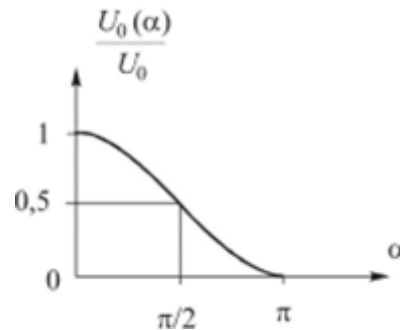


Рис. 31. Залежність випрямленої напруги від кута запалювання

При роботі такого випрямляча на індуктивне навантаження і куті керування більшим за 0 відбувається затягування струму ключа через ЕРС самоіндукції індуктивності. При цьому основна гармоніка струму мережі буде зсунута щодо напруги на деякий кут $\varphi = \alpha$.

Вхідна напруга визначається формулою:

$$u_2(t) = U_2 \sin(\omega t)$$

Вихідна напруга випрямляча:

$$u_d(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega t < \alpha \\ |U_2 \sin(\omega t)|, & \alpha \leq \omega t \leq \pi \end{cases}$$

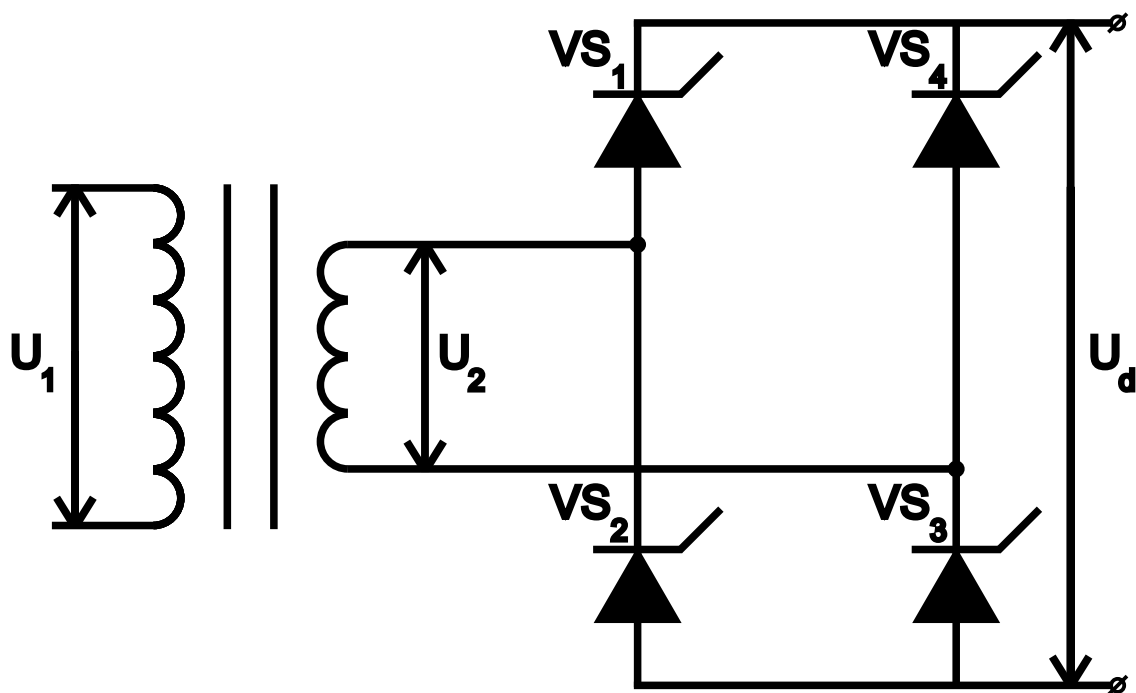


Рис. 32. Схема керованого мостового випрямляча

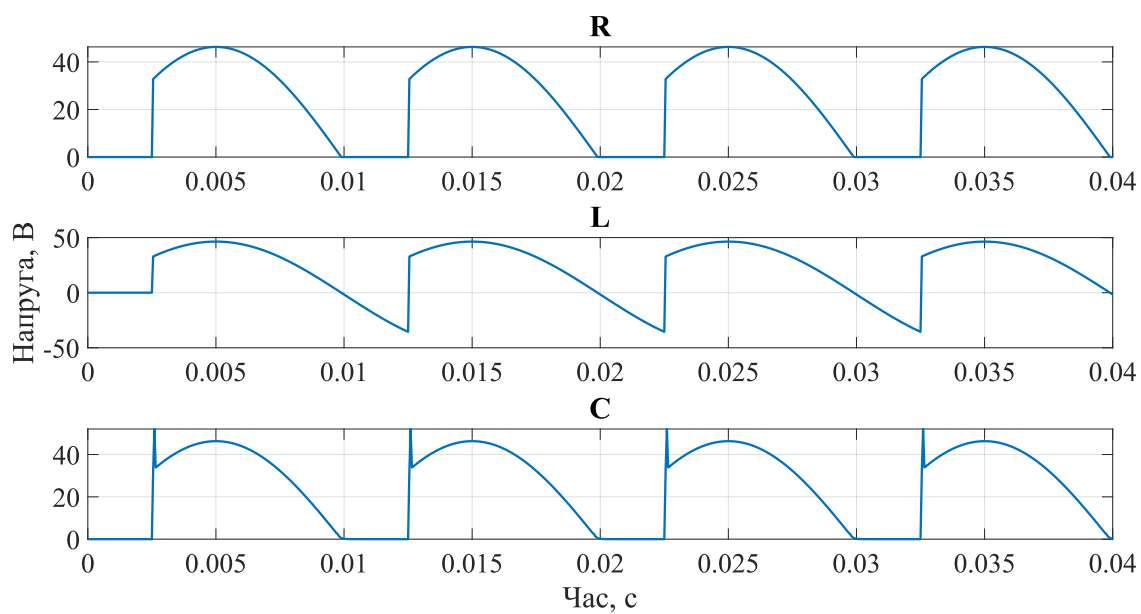


Рис. 33. Вихідна напруга мостового тиристорного випрямляча з кутом керування 45 градусів

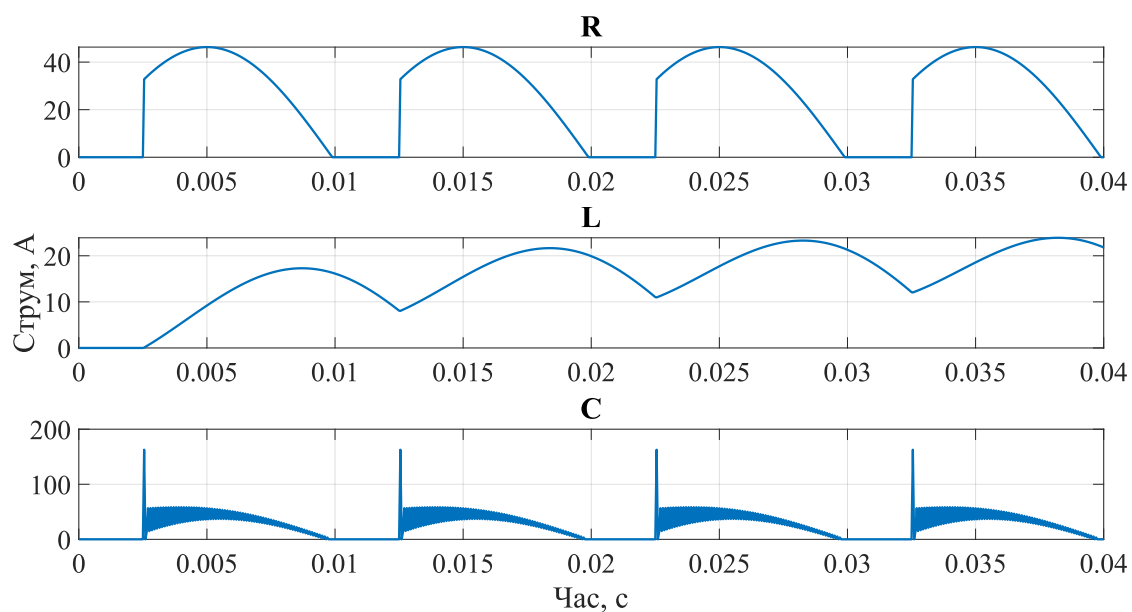


Рис. 34. Вихідний струм мостового тиристорного випрямляча з кутом керування 45 градусів

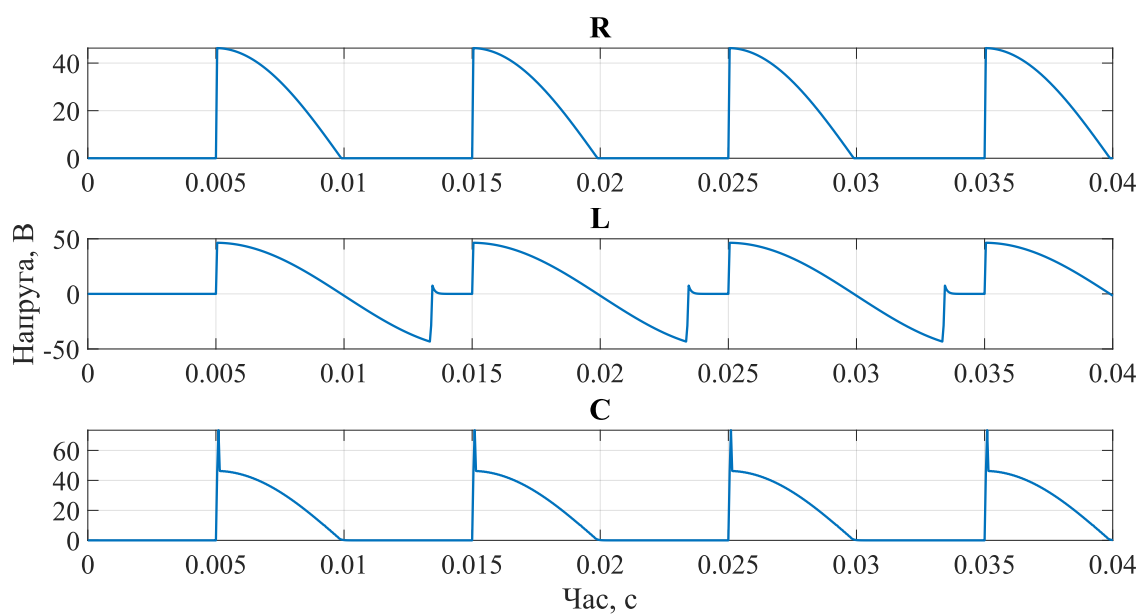


Рис. 35. Вихідна напруга мостового тиристорного випрямляча з кутом керування 90 градусів

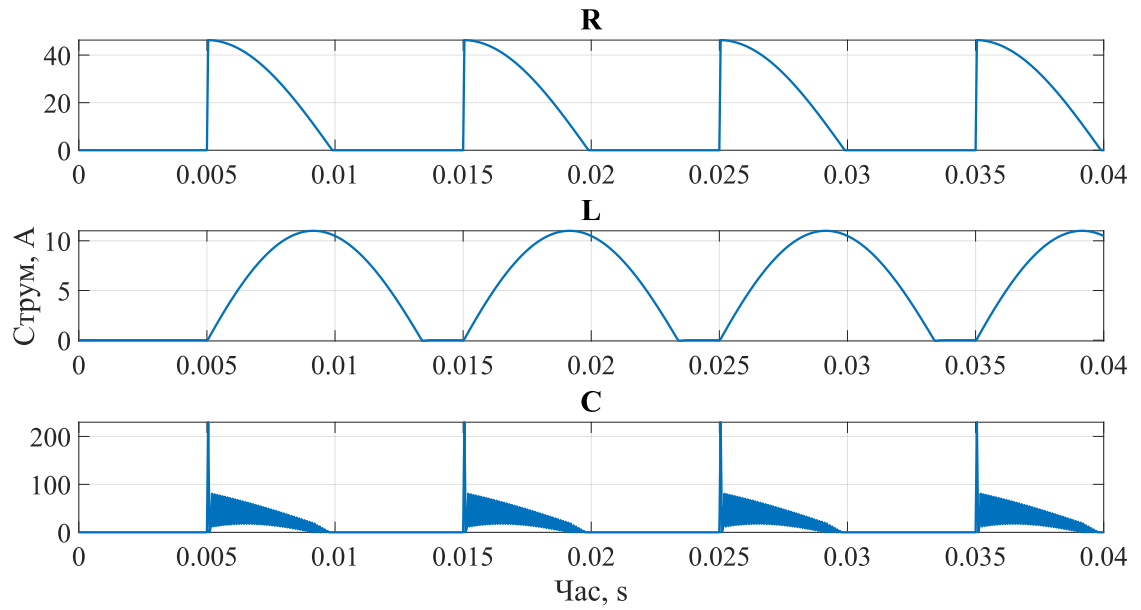


Рис. 36. Вихідний струм мостового тиристорного випрямляча з кутом керування 90 градусів

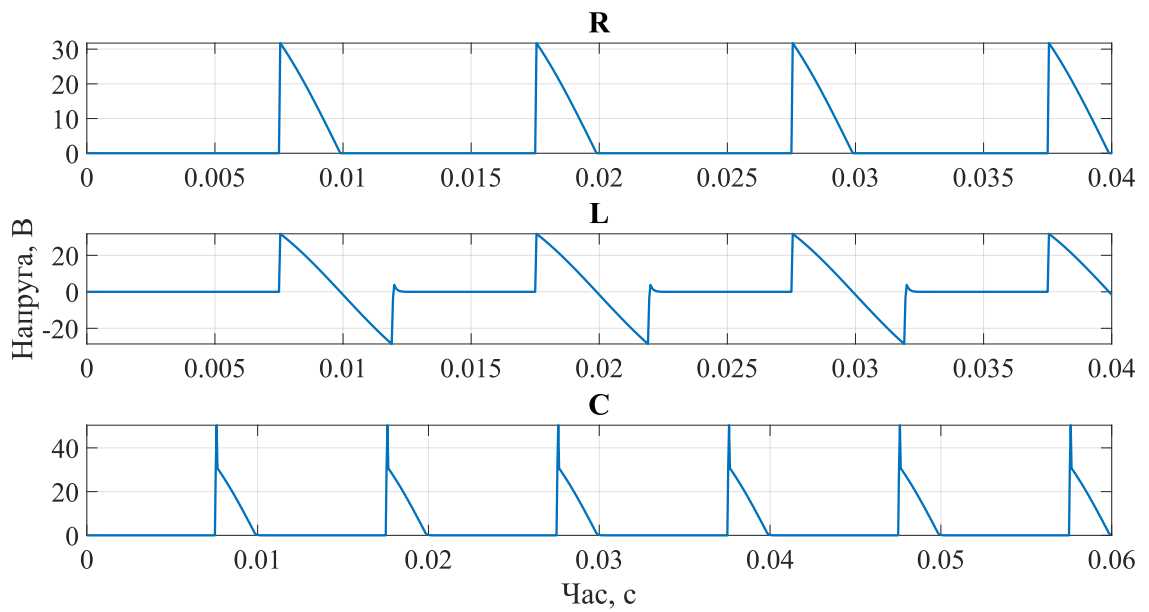


Рис. 37. Вихідна напруга мостового тиристорного випрямляча з кутом керування 135 градусів

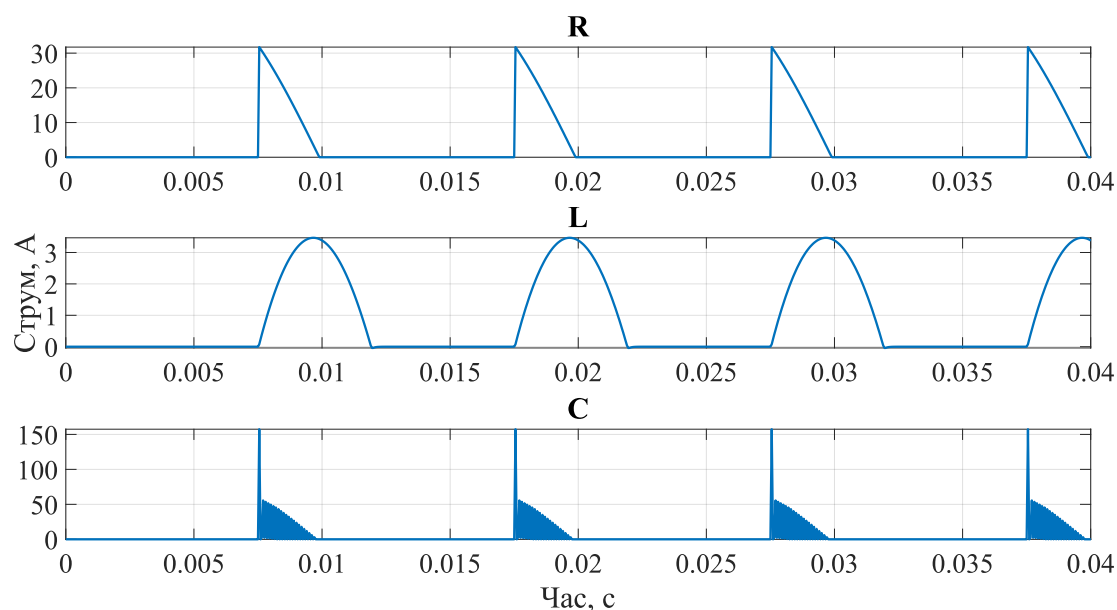


Рис. 38. Вихідний струм мостового тиристорного випрямляча з кутом керування 135 градусів

При куті керування 45 градусів спостерігаємо видозмінену картину у порівнянні із звичайним мостовим випрямлячем. Збільшується коливання струму при роботі на індуктивність, під час процесу її зарядки і розрядки, що дає можливість чітко помітити зсув фаз струму. Крім того помітне значне затягування процесу закриття тиристорів на графіку напруги. На ємкісному навантаженні спостерігається пік у початковий момент після відкриття тиристорів і помітне збурення по струму весь час роботи. Для наступних збільшень куту керування картина зберігається подібною, із поступовим збільшенням безструмових пауз.

Для виключення затягування закриття тиристорів у схему вводять нульовий вентиль VD0, який дає змогу струму замикатись, що зменшує його фазовий зсув до $\varphi = \alpha/2$. Як наслідок, схема має більший коефіцієнт потужності та велику кількість напівпровідникових ключів, що не завжди бажано.

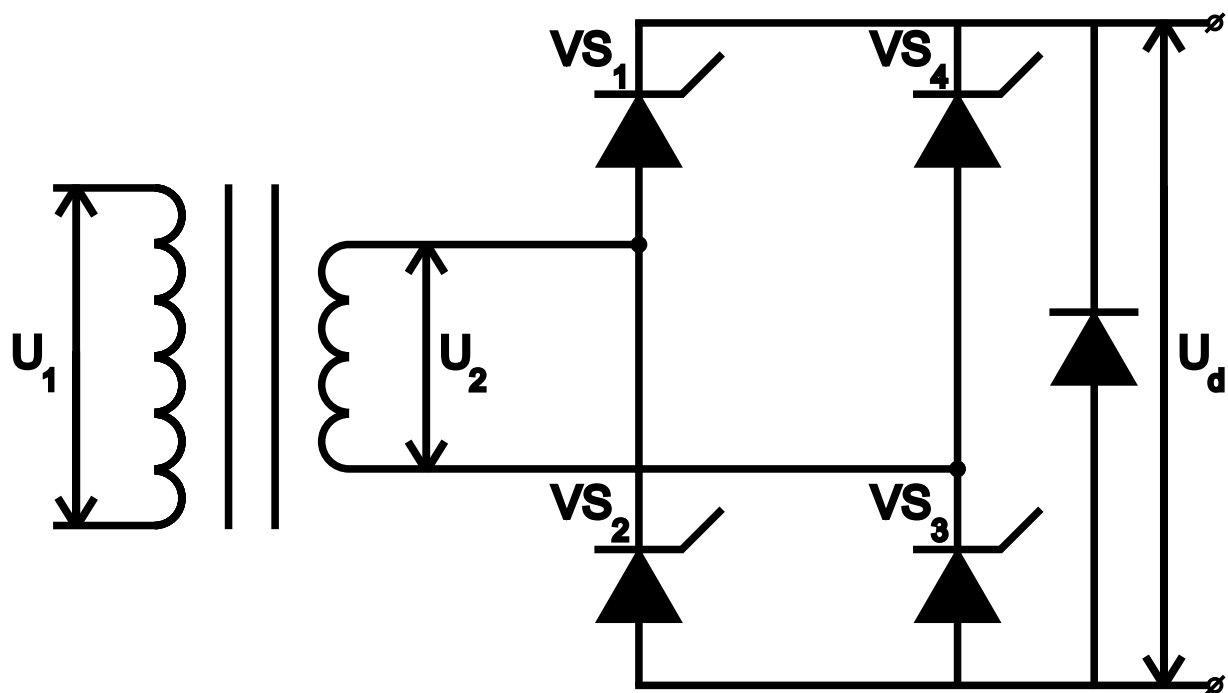


Рис. 39. Схема керованого мостового випрямляча з нульовим вентилем

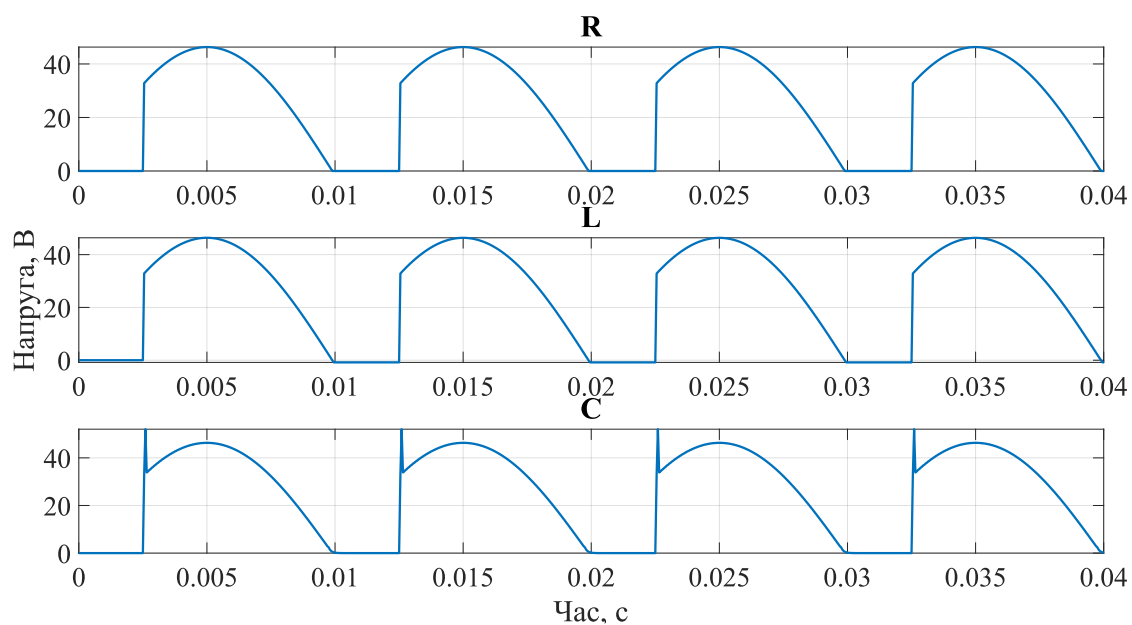


Рис. 40. Вихідна напруга мостового тиристорного випрямляча з нульовим вентилем з кутом керування 45 градусів

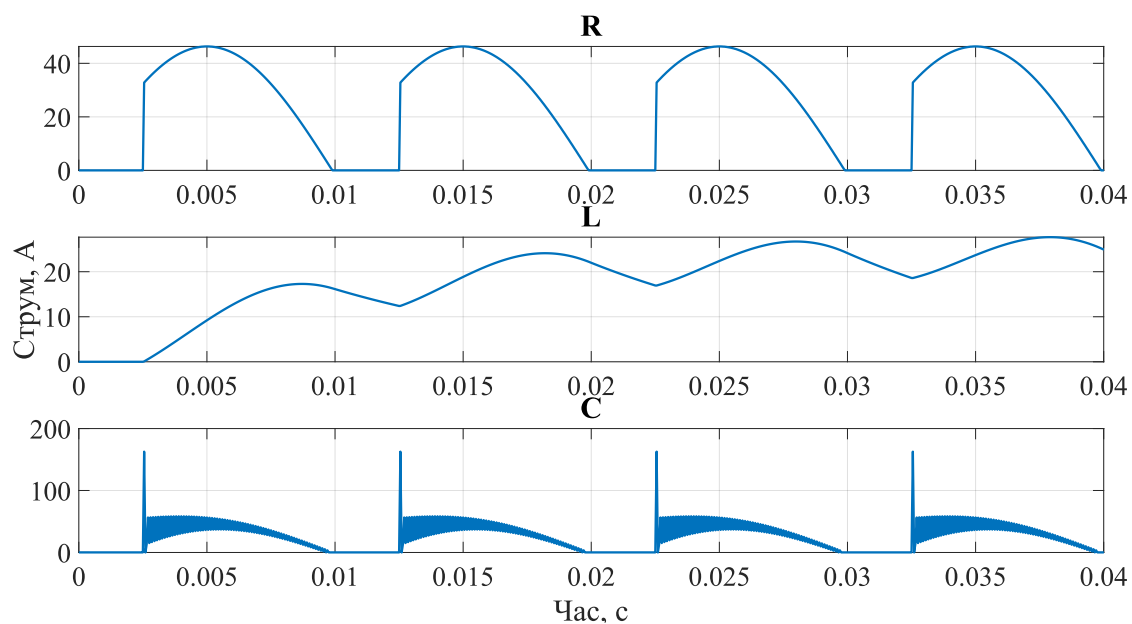


Рис. 41. Вихідний струм мостового тиристорного випрямляча з нульовим вентилем з кутом керування 45 градусів

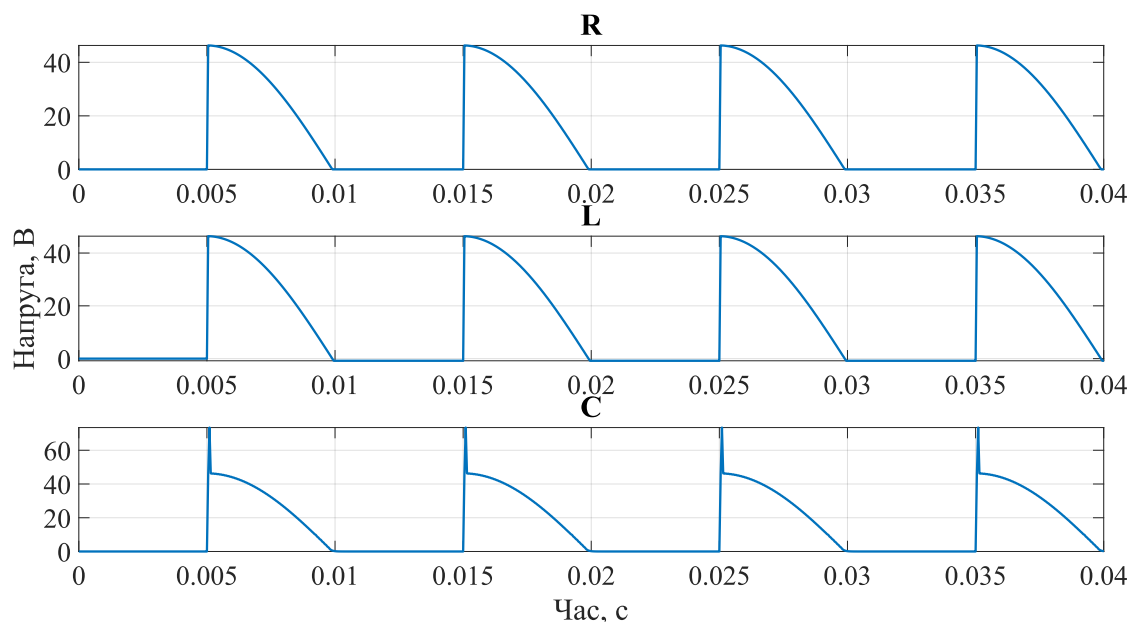


Рис. 42. Вихідна напруга мостового тиристорного випрямляча з нульовим вентилем з кутом керування 90 градусів

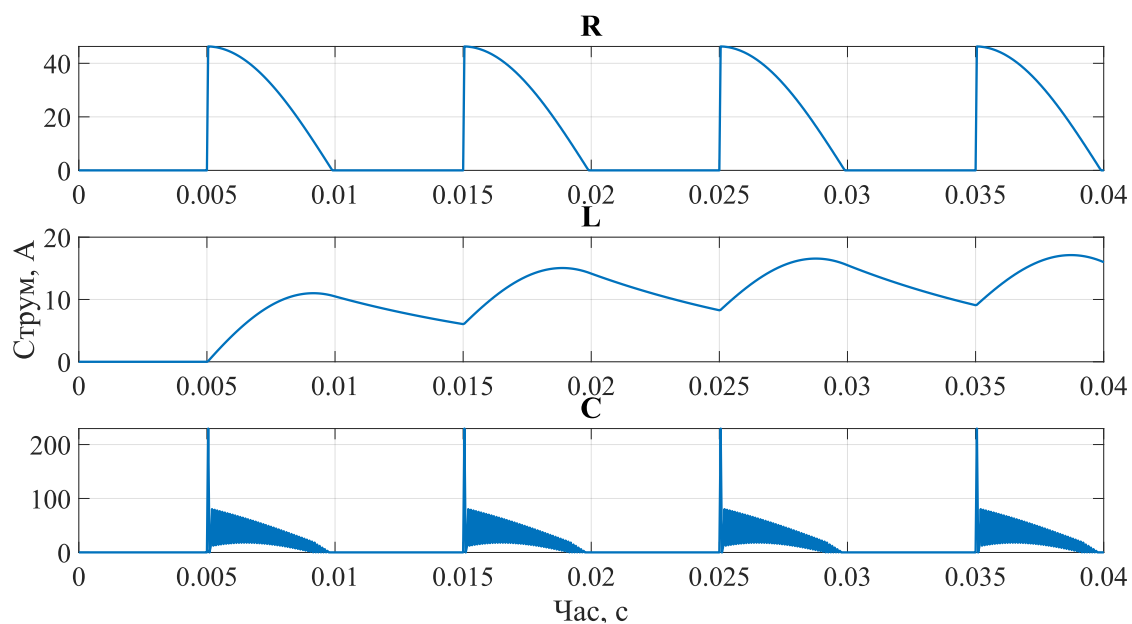


Рис. 43. Вихідний струм мостового тиристорного випрямляча з нульовим вентилем з кутом керування 90 градусів

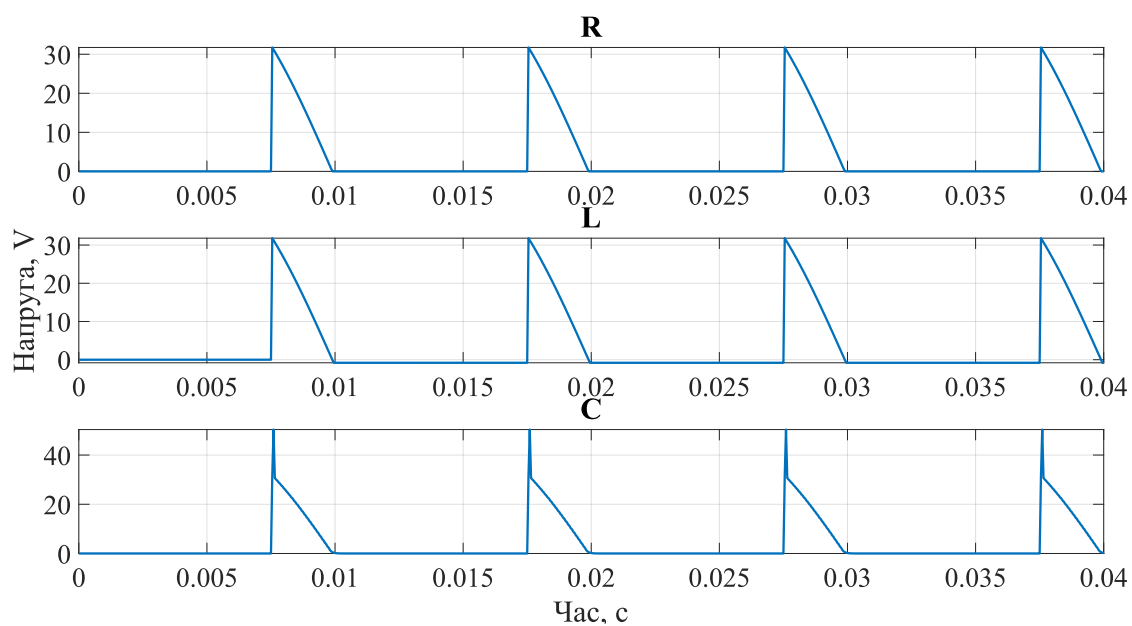


Рис. 44. Вихідна напруга мостового тиристорного випрямляча з нульовим вентилем з кутом керування 135 градусів

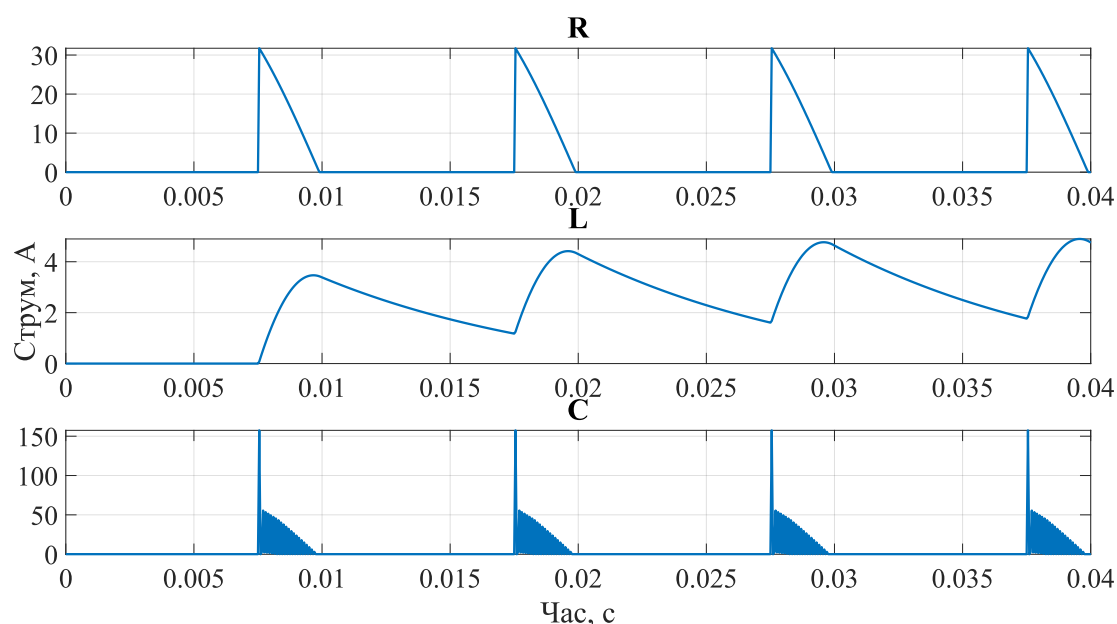


Рис. 45. Вихідний струм мостового тиристорного випрямляча з нульовим вентилем з кутом керування 135 градусів

Графіки роботи на різні навантаження показують, що наявність нульового діоду компенсує затягування закриття тиристорів, а також відсутність без струмових пауз, у випадку індуктивного навантаження. Зсув фаз струму чітко спостерігається. Для ємнісного навантаження картина принципово не змінюється. Для зменшення кількості ключів використовуються несиметричний керований випрямляч, де діоди (в даному випадку VD1 і VD2) також виконують роль нульового вентиля.

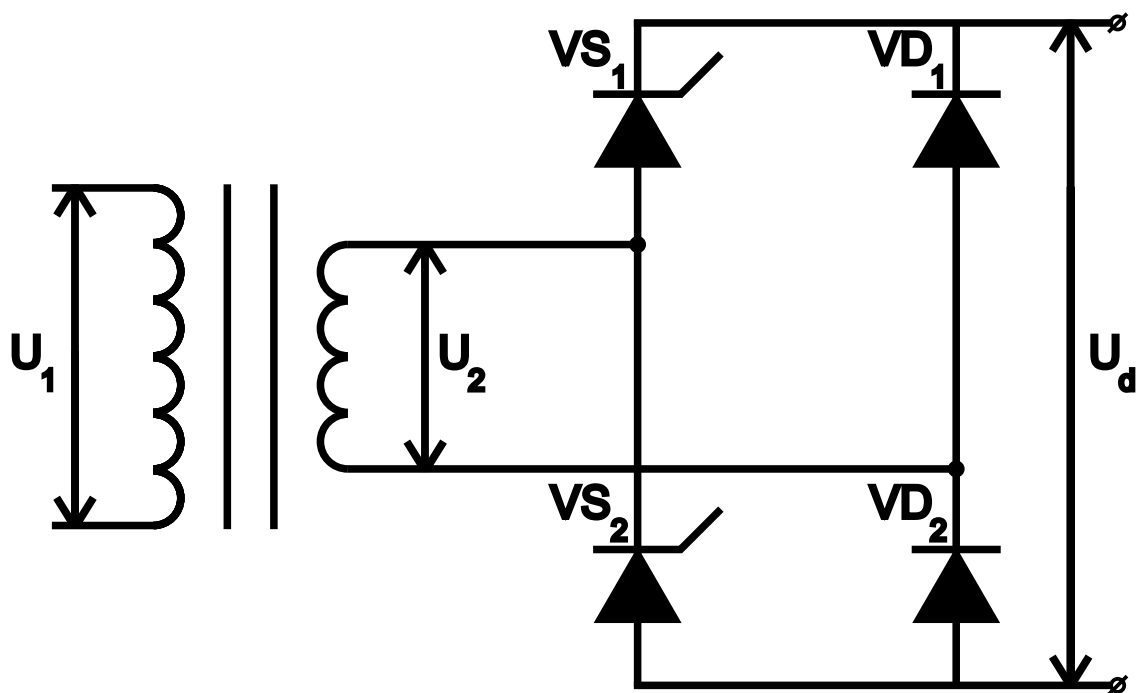


Рис. 46. Схема керованого несиметричного випрямляча

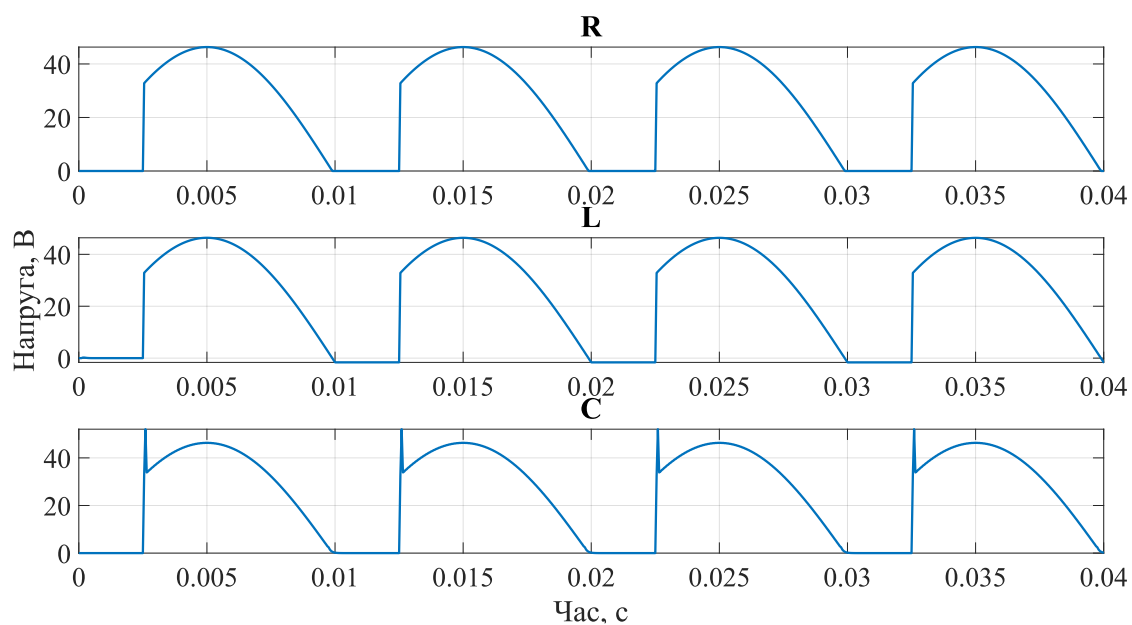


Рис. 47. Вихідна напруга мостового несиметричного випрямляча з кутом керування 45 градусів

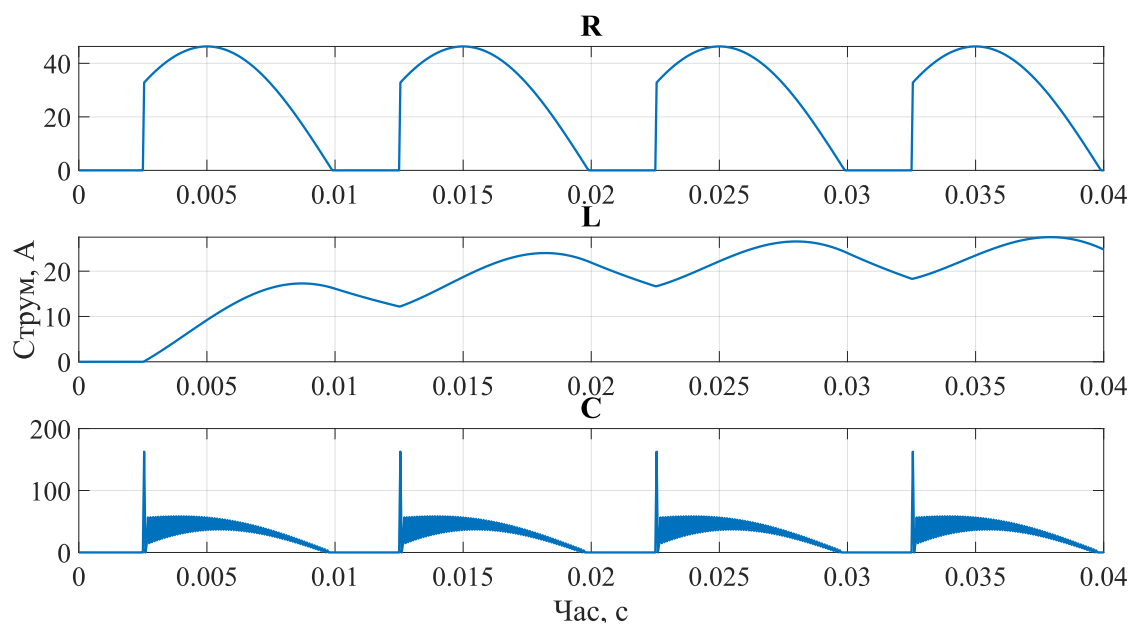


Рис. 48. Вихідний струм мостового несиметричного випрямляча з кутом керування 45 градусів

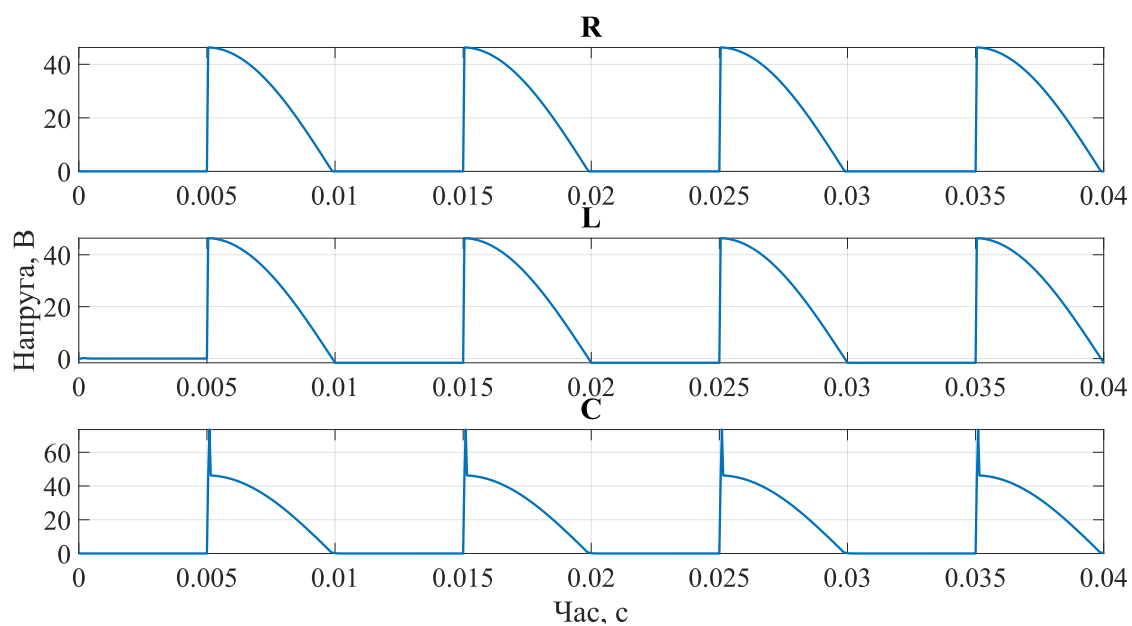
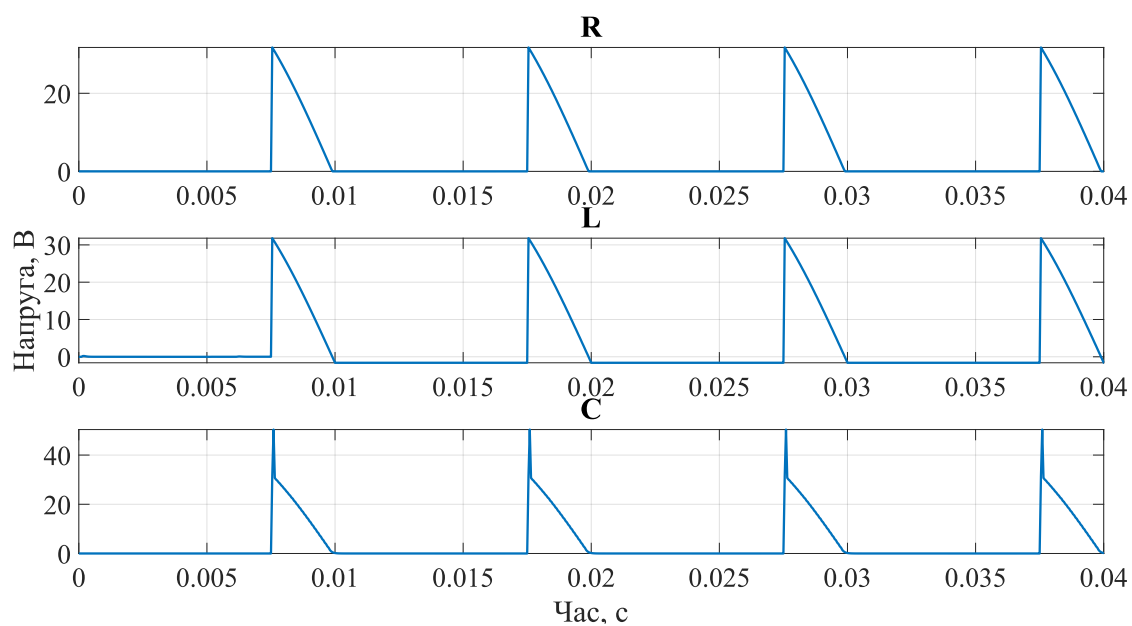
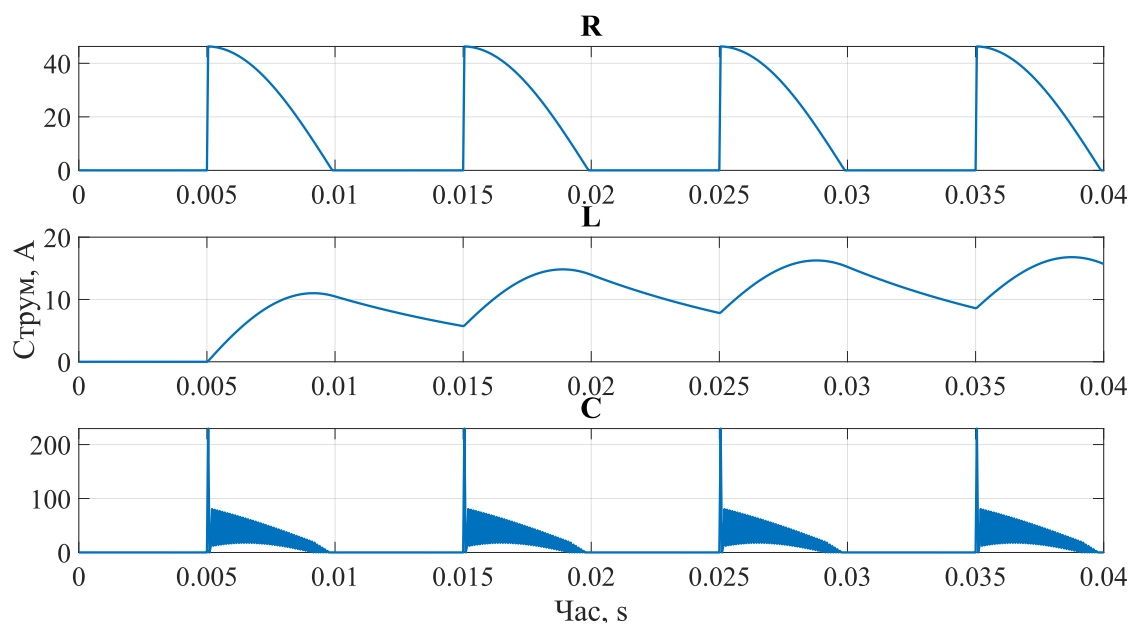


Рис. 49. Вихідна напруга мостового несиметричного випрямляча з кутом керування 90 градусів



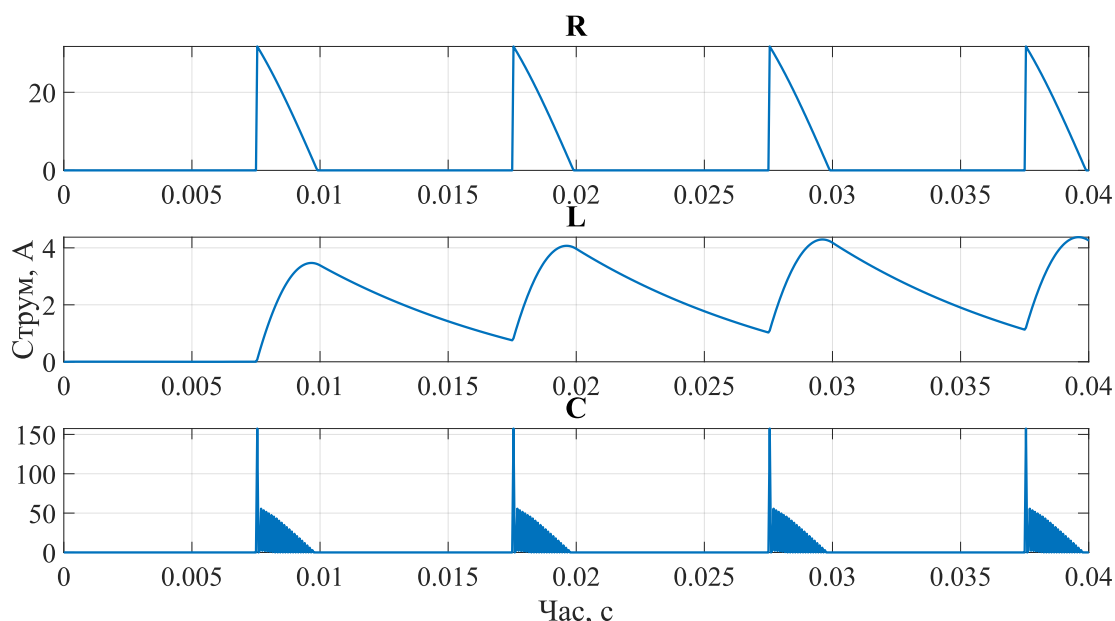


Рис. 52. Вихідний струм мостового несиметричного випрямляча з кутом керування 135 градусів

Робота несиметричного випрямляча на різних навантаженнях майже повністю ідентична роботі випрямляча із нульовим діодом, із незначними відмінностями в по струму при індуктивному навантаженні, що виражається в менших його максимальних значеннях.

Схеми з вольтодобавкою використовують дещо змінений принцип. У данному випадку мінімальна напруга на виході забезпечується некерованим випрямлячем VD1 та VD2, а її підвищення досягається вмиканням тиристорів VS1 та VS2. Така схема потребує додаткової обмотки трансформатора.

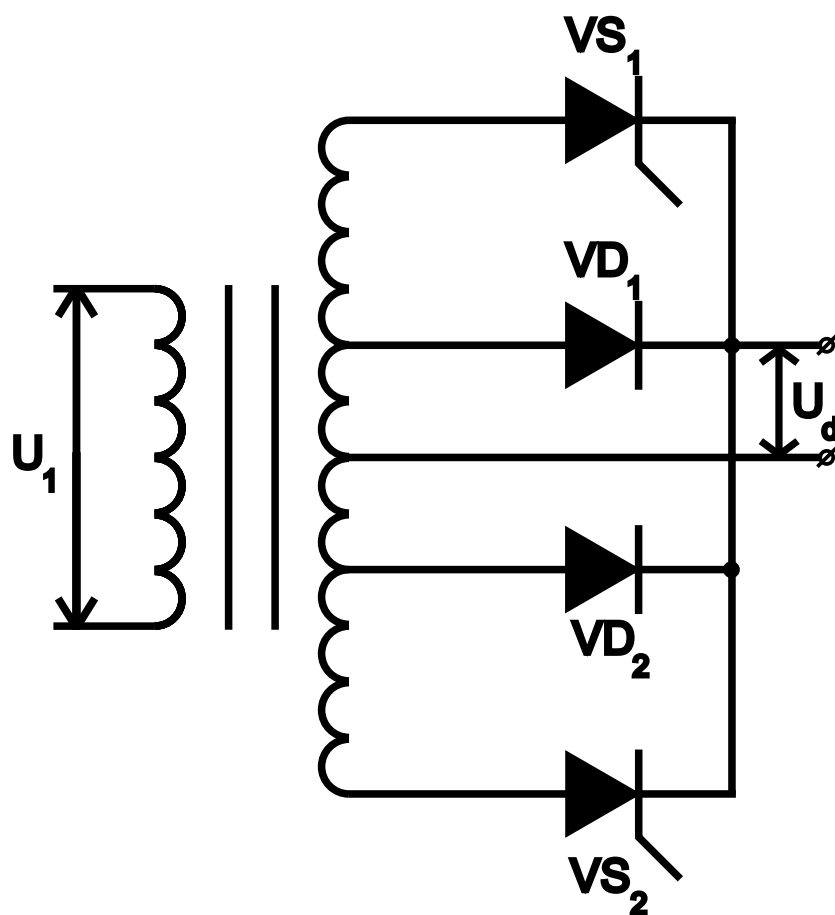


Рис. 53. Схема керованого випрямляча з вольтодобавкою

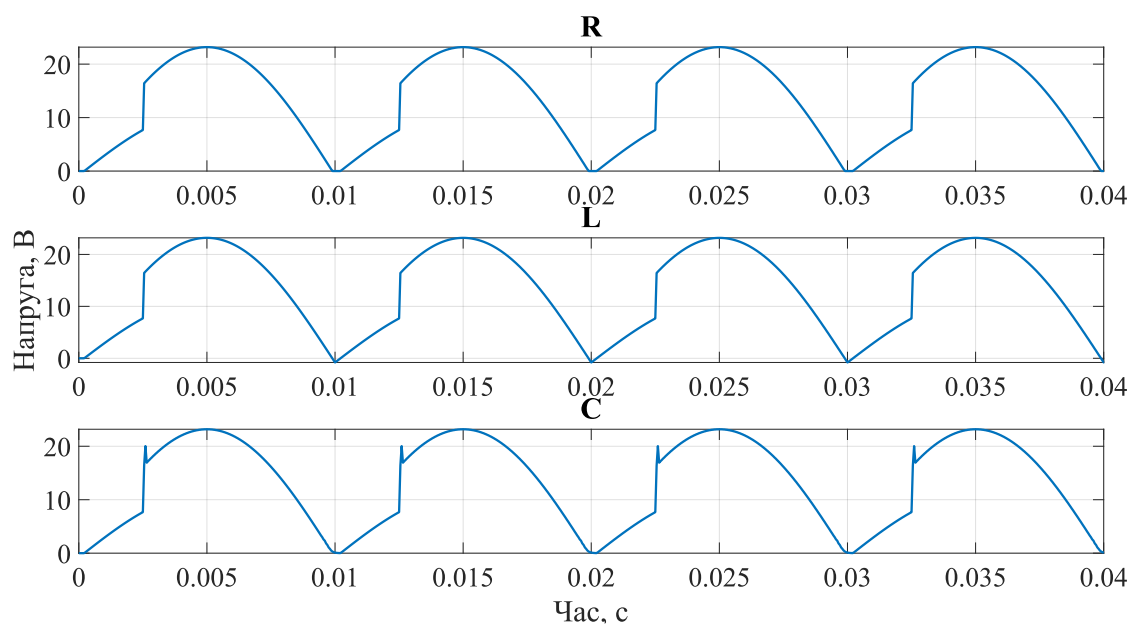


Рис. 54. Вихідна напруга випрямляча з вольт добавкою з кутом керування 45 градусів

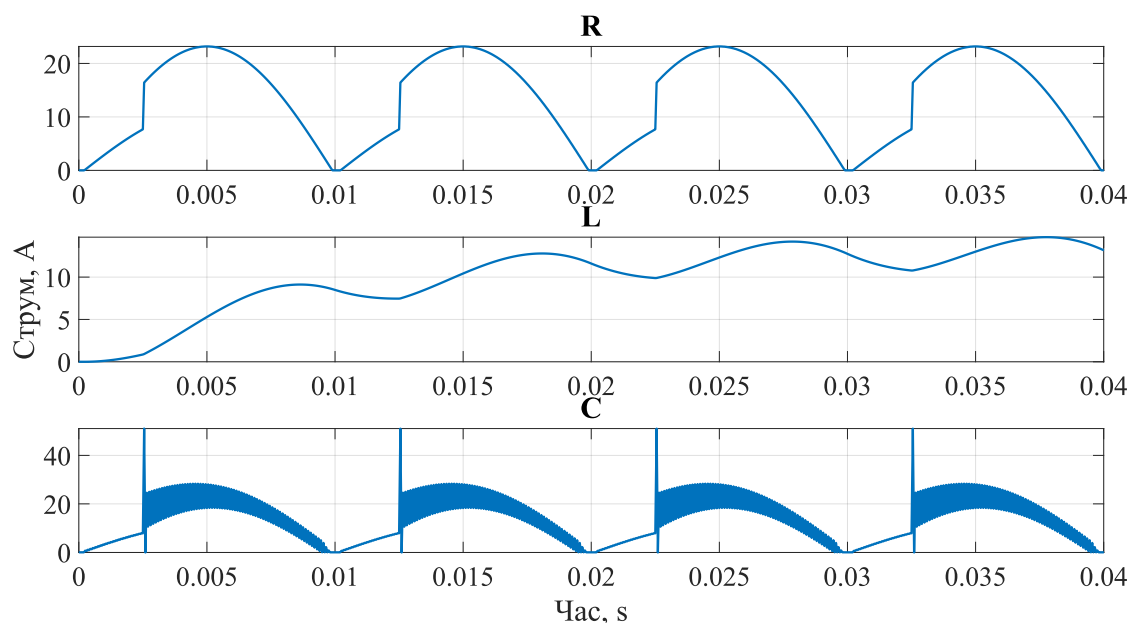


Рис. 55. Вихідний струм випрямляча з вольт добавкою з кутом керування 45 градусів

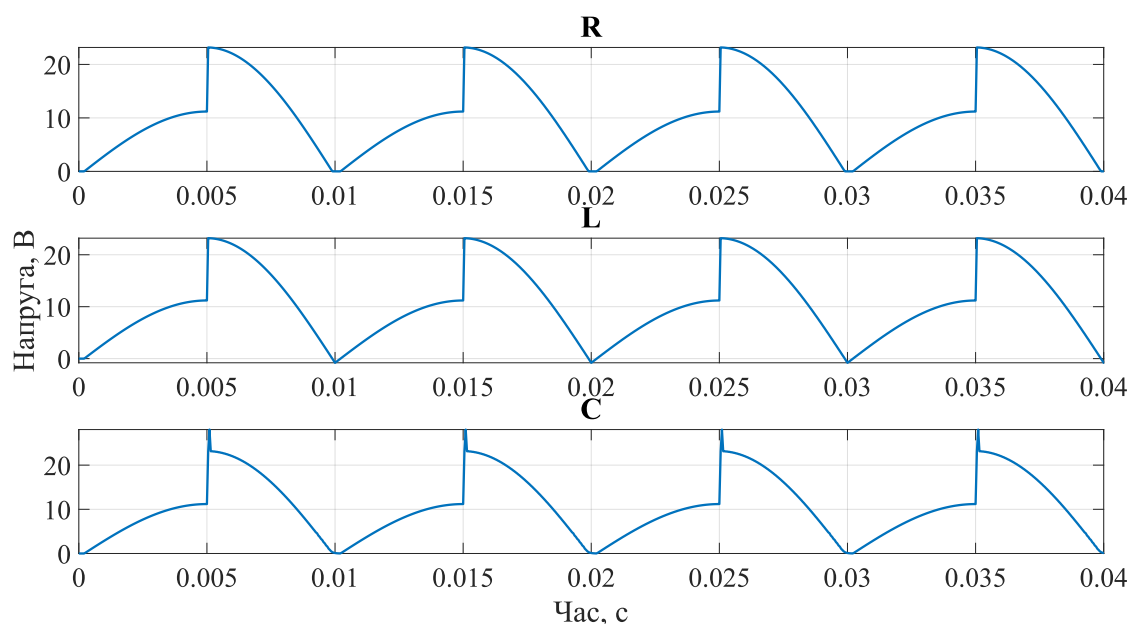


Рис. 56. Вихідна напруга випрямляча з вольт добавкою з кутом керування 90 градусів

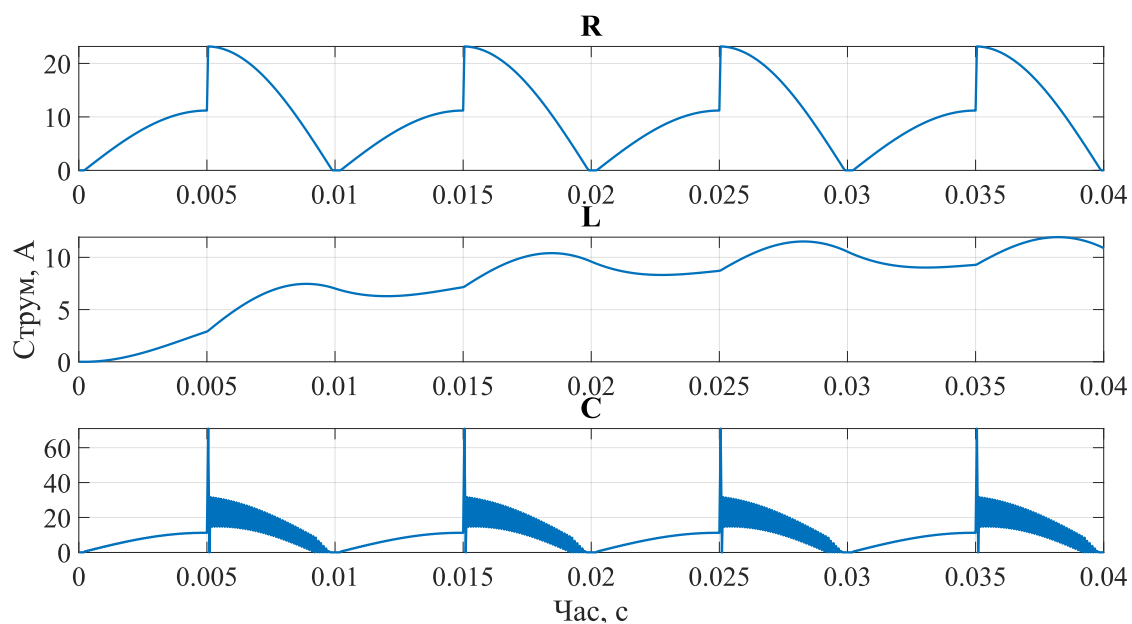


Рис. 57. Вихідний струм випрямляча з вольт добавкою з кутом керування 90 градусів

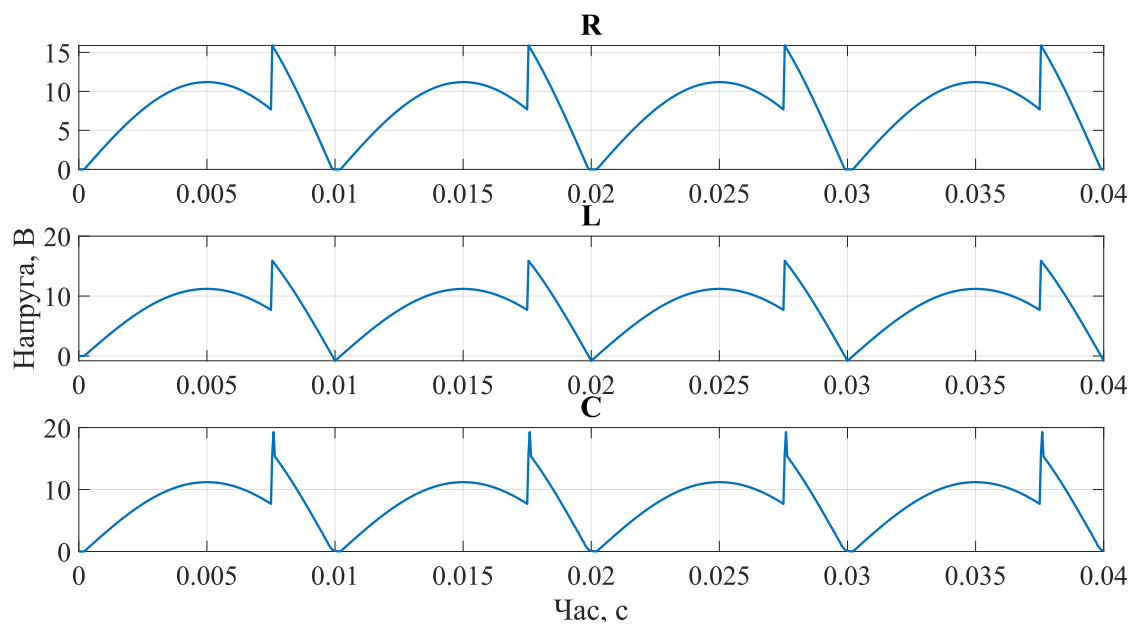


Рис. 58. Вихідна напруга випрямляча з вольт добавкою з кутом керування 135 градусів

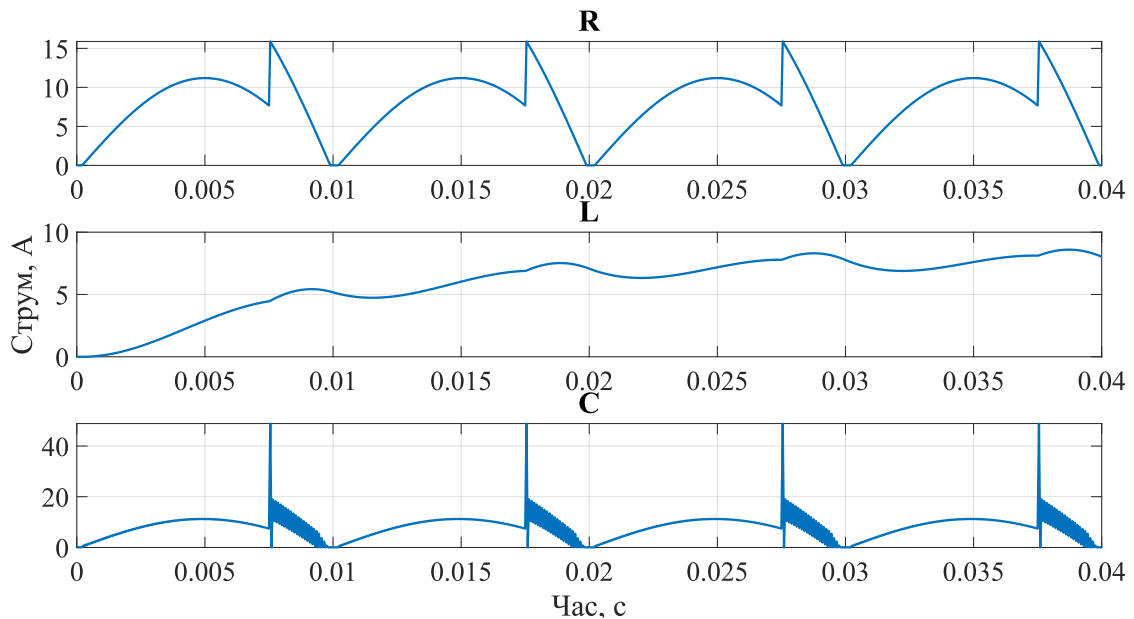


Рис. 59. Вихідний струм випрямляча з вольт добавкою з кутом керування 135 градусів

Випрямляч показує аналогічну із попередніми випадками картину напруг на різних навантаженнях. Для індуктивності маємо коротко-строковий перехід через нуль між напівперіодами, а для ємності миттєвий пік в момент вмикання тиристорів. Струм при індуктивному навантаженні поступово наростає до сталого значення, навколо якого коливається із кожним напівперіодом із деяким зсувом по фазі. При цьому із збільшенням кута керування коливання струму все більше згладжуються. Для роботи на ємність графік струму показує значні збурення після вмикання тиристорів.

Схема з використанням транзистору забезпечує керування вихідною напругою за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Що дає змогу більш гнучко керувати випрямленою напругою.

Вхідна напруга визначається формулою:

$$u_2(t) = U_2 \sin(\omega t)$$

Вихідна напруга випрямляча:

$$u_d(t) = \begin{cases} |U_2 \sin(\omega t)|, & nT \leq t \leq nT + D \cdot T \\ 0, & nT + D \cdot T \leq t < (n+1)T \end{cases}$$

Де $n \in 0, 1 \dots \infty$ - номер імпульсу;

T – період ШІМ;

D – прогальність.

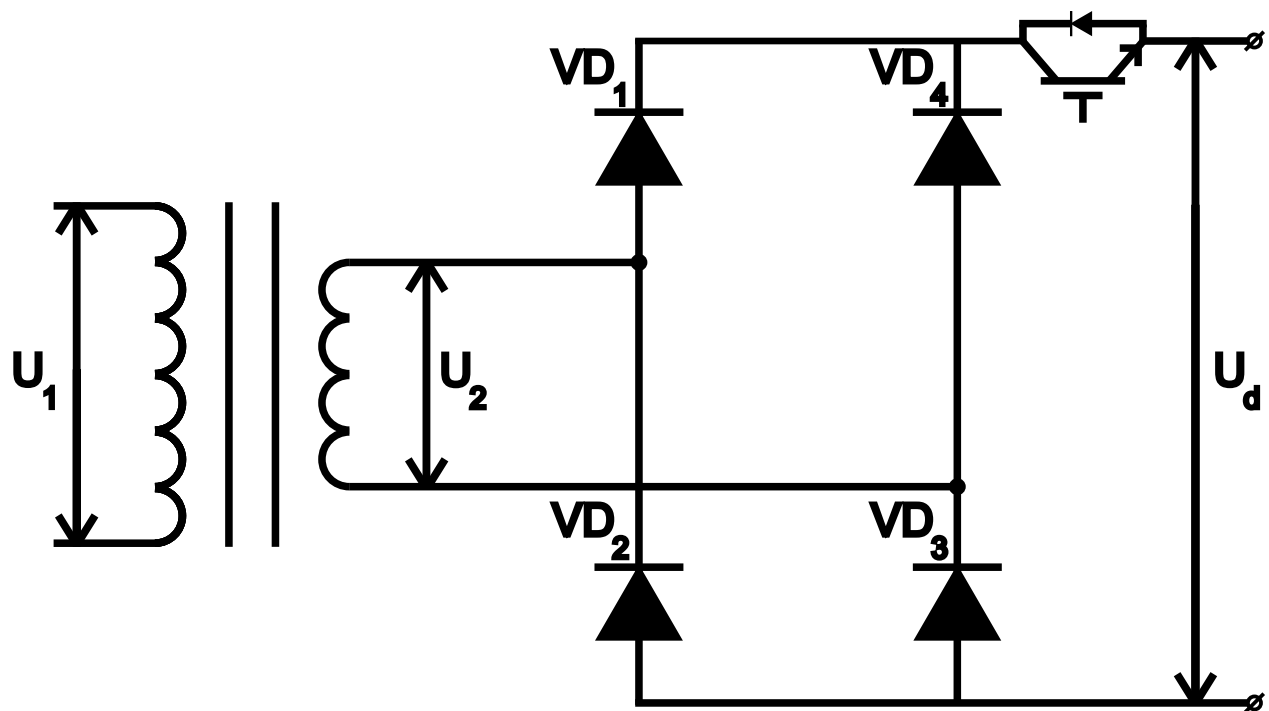


Рис. 60. Схема керованого випрямляча з ШІМ

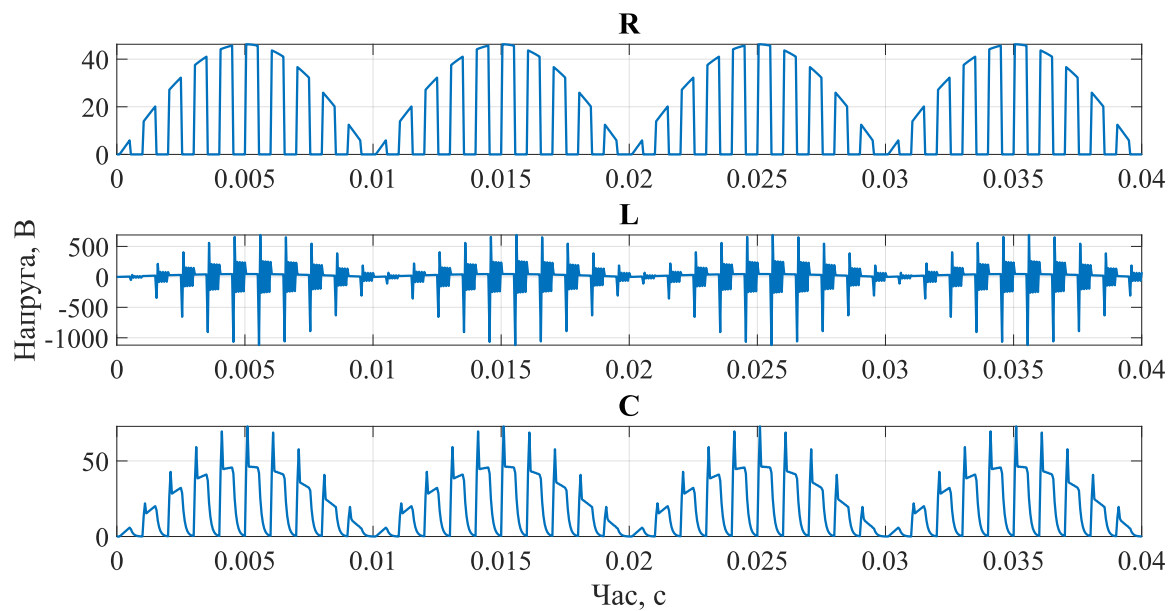


Рис. 61. Вихідна напруга випрямляча з ШІМ

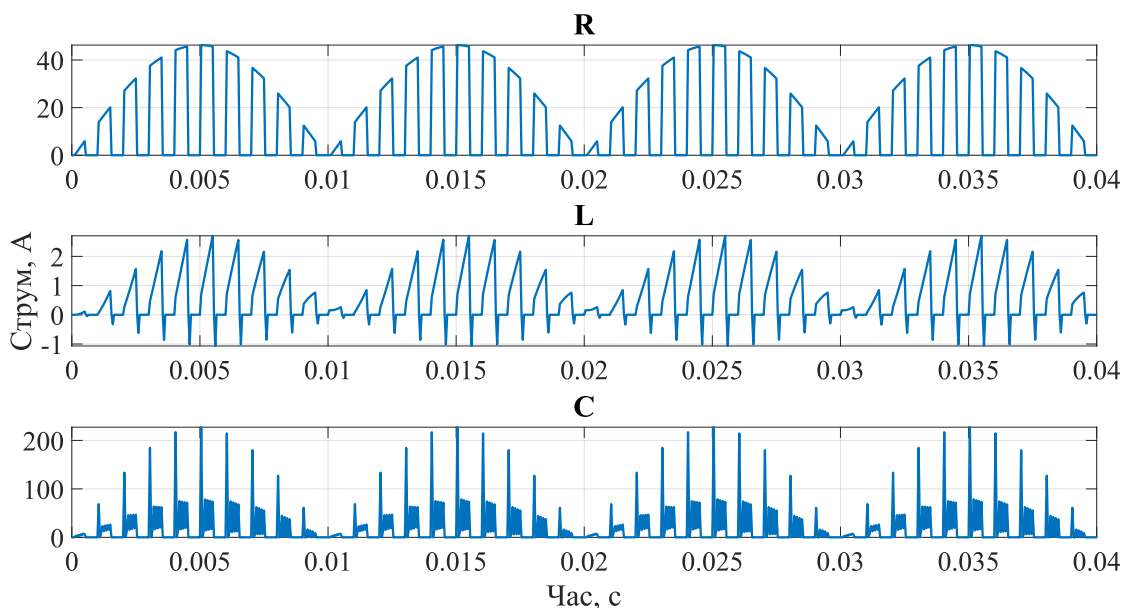


Рис. 62. Вихідний струм випрямляча з ШІМ

Принцип роботи ШІМ випрямляча полягає в значній кількості перемикань за один період вхідної напруги. Як наслідок, на індуктивному навантаженні отримуємо значні коливання струму і значні падіння значень напругу у від'ємну зону. Для ємнісного навантаження на кожне перемикання спостерігається пікові значення по напрузі і струму, і послідовні збурення по струму.

Висновки

Дослідження можливих видів неоднорідностей виявило, що наявність ремонтних вставок, виготовлених із поліетилену або просто нового трубопроводу із непошкодженими стінками і новою ізоляцією, призводить до підвищення корозійної небезпеки в суміжних ділянках. Проведено аналіз існуючих моделей системи «станція катодного захисту – ґрунт – підземний сталевий трубопровід», які використовуються в інженерній і науковій літературах, для вивчення різних параметрів системи. В результаті виявлено, що хоча моделі можуть сильно відрізнятися одна від одної за ступенем деталізації і кількістю елементів системи, що приймаються до уваги, однак жодна з наведених не моделей не приймає до уваги неоднорідності із помітно \ принципово відмінними електротехнічними параметрами. Наведено схему заміщення, яку можливо використати для

моделювання трубопроводу із наявністю неоднорідності із стрибкоподібною зміною електротехнічних параметрів. Розглянуто типові схеми модулів перетворювачів в складі станцій катодного захисту і досліджено їх роботу на навантаження різних типів.

Для вирішення задачі мінімізації негативних впливів неоднорідностей необхідно виконати наступні кроки:

- Виявлено підвищення корозійної небезпеки при наявності різноманітних неоднорідностей, в тому числі ремонтних вставок із поліетилену або нової труби. Необхідно формалізувати і визначити ступінь цього впливу;
- Розроблено математичну модель системи «станція катодного захисту – ґрунт – підземний сталевий трубопровід», яку заплановано використовувати для визначення впливів неоднорідностей на корозійну ситуацію. Необхідно розглянути роботу цієї моделі у різних конфігураціях
- Проведено аналіз випрямлячів у складі станцій катодного захисту, та їх вихідних сигналів. Необхідно оцінити ступінь впливу цих сигналів та їх параметрів на розподіл потенціалу за довжиною трубопроводу, через наявність ємності і індуктивності у складі схеми заміщення трубопроводу;
- Визначити шляхи мінімізації різниці потенціалу на границі неоднорідностей для зменшення їх негативного впливу, із врахуванням характеру аномалії (ремонтна вставка з високим опором або навпаки із помітно меншим опором);
- Представити алгоритмічне та апаратне рішення керування силовими ключами.

3. РОЗДІЛ

АНАЛІЗ ВПЛИВІВ ЕЛЕМЕНТІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ НА РОЗПОДІЛ ЗАХИСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

3.1 Параметри моделі

Для адекватного аналізу впливу випрямлячів на підземний сталевий трубопровід виконаємо моделювання їх роботи на запропоновану вище схему заміщення:

Таблиця 3.1. Вхідні дані для схеми заміщення системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід»

№	Параметри трубопроводу	Значення	Позначення	Одиниці виміру
1	Довжина модельованого трубопроводу	10000	l	м
2	Зовнішній діаметр трубопроводу	159	D	мм
3	Товщина стінки трубопроводу	5	t	мм
4	Питомий опір сталі трубопроводу	0.18	ρ	$\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
5	Частота мережі	100	f	Гц
6	Магнітна проникність матеріалу труби	$1.26 \cdot 10^{-4}$	μ	$\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$
7	Магнітна постійна	$1.25 \cdot 10^{-6}$	μ_0	$\frac{\text{Гн}}{\text{м}}$

8	Електрична постійна	$8.85 \cdot 10^{-12}$	ε_0	$\frac{\Phi}{\text{м}}$
9	Діелектрична проникність матеріалу ізоляції	2.5	ε	—
10	Ефективність ізоляції	0.95	CE	—
11	Необхідна густина струму захисту	0.01	j	$\frac{\text{А}}{\text{м}^2}$
12	Питомий опір ізоляції трубопроводу	$5 \cdot 10^4$	R_c	$\text{Ом} \cdot \text{м}^2$
13	Питомий опір алюмінію проводу	0.03	$\rho_{\text{пр}}$	$\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
14	Довжина дренажного кабелю	100	$L_{\text{пр}}$	м
15	Площа перерізу дренажного кабелю	48	$S_{\text{пр}}$	мм^2
16	Електрохімічний еквівалент анодного матеріалу	1.2	q	$\frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{рік}}$
17	Струм станції катодного захисту	10	I	А
18	Термін експлуатації	15	T	рік
19	Маса одного анодного стрижня	23.9	G	кг
20	Коефіцієнт корисної дії	0.5	η	—
21	Питомий опір ґрунту	40	$\rho_{\text{Г}}$	$\text{Ом} \cdot \text{м}$
22	Довжина стрижня	2.9	l_a	м
23	Діаметр стрижня	0.114	d	м

24	Глибина залягання аноду (від поверхні землі до верхньої точки аноду)	0.8	h	м
25	Коефіцієнт екранування.	1.4	F	—

Питомий повздовжній опір трубопроводу визначається за формулою:

$$R_{\text{пов}} = \frac{\rho}{\pi t(D - t)} = \frac{0.18}{3.14 \cdot 5 \cdot (159 - 5)} = 7.441 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$$

Загальний опір відрізка, що моделюється:

$$R_P = R_{\text{пов}} \cdot l = 7.441 \cdot 10^{-5} \cdot 10000 = 0.744 \text{ Ом}$$

Індуктивність трубопроводу визначається:

$$L_p = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right) + L_i$$

Де, r – зовнішній радіус труби дорівнює:

$$r = \frac{D}{2} = \frac{159}{2} = 79.5 \text{ мм} = 0.08 \text{ м}$$

L_i – внутрішня індуктивність, яка визначається формулою:

$$L_i = \frac{\mu l}{2\pi m r} \frac{\sinh m t - \sin m t}{\cosh m t - \cos m t}$$

$$m = \sqrt{2\omega\mu\gamma}$$

Де, $\omega = 2\pi f$ – кутова частота:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 100 = 628.32 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

γ – електропровідність матеріалу:

$$\gamma = \frac{1}{\rho \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{0.18 \cdot 10^{-6}} = 5.56 \cdot 10^6, \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$$

Тоді:

$$m = \sqrt{2 \cdot 628.32 \cdot 1.26 \cdot 10^{-4} \cdot 5.56 \cdot 10^6} = 937.89$$

Внутрішня індуктивність дорівнює:

$$L_i = \frac{1.26 \cdot 10^{-4} \cdot 10000}{2 \cdot 3.14 \cdot 937.89 \cdot 0.08} \frac{\sinh(937.89 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) - \sin(937.89 \cdot 5 \cdot 10^{-3})}{\cosh(937.89 \cdot 5 \cdot 10^{-3}) - \cos(937.89 \cdot 5 \cdot 10^{-3})}$$

$$= 2.74 \cdot 10^{-3}, \text{ Гн}$$

Індуктивність відрізка трубопроводу дорівнює:

$$L_p = \frac{1.25 \cdot 10^{-6} \cdot 10000}{2 \cdot 3.14} \left(\ln \frac{2 \cdot 10000}{0.08} - 1 \right) + 2.74 \cdot 10^{-3} = 0.026, \text{ Гн}$$

Ємність трубопроводу розраховується за формулою:

$$C_{in} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{R}{r}}$$

R – радіус трубопроводу в ізоляції, дорівнює:

$$R = r + 9 \cdot 10^{-3} = 0.08 + 9 \cdot 10^{-3} = 0.089 \text{ м}$$

Ємність дорівнює:

$$C_{in} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.5 \cdot 10000}{\ln \frac{0.089}{0.08}} = 1.296 \cdot 10^{-5}$$

Площа поверхні труби дорівнює :

$$A = \pi D l = 3.14 \cdot 159 \cdot 10^{-3} \cdot 10000 = 4995.13$$

Загальний захисний струм:

$$I_3 = jA(1 - CE) = 0.01 \cdot 4995.13(1 - 0.95) = 2.5 \text{ А}$$

Опір трубопровід - ґрунт визначається за формулою:

$$R_{p2s} = \frac{R_c}{A(2 - CE)} = \frac{5 \cdot 10^4}{4995.13(2 - 0.95)} = 9.53 \text{ Ом}$$

Опір кабелю визначається:

$$R_w = \rho_{\text{пр}} \frac{L_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}} = 0.03 \frac{100}{48} = 0.06 \text{ Ом}$$

Кількість анодів дорівнює:

$$n = \frac{qIT}{G\eta} = \frac{1.2 \cdot 10 \cdot 15}{23.9 \cdot 0.5} = 15$$

Опір розтікання одного стрижня дорівнює:

$$R_{a1} = \frac{\rho_r}{2\pi l} \ln \left(\frac{2l_a}{d} \sqrt{\frac{4h + 3l_a}{4h + l_a}} \right)$$

$$= \frac{40}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,9} \ln \left(\frac{2 \cdot 2,9}{0,114} \sqrt{\frac{4 \cdot 0,8 + 3 \cdot 2,9}{4 \cdot 0,8 + 2,9}} \right) = 9,36 \text{ Ом}$$

Опір групи анодів дорівнює:

$$R_a = \frac{FR_{a1}}{n} = \frac{1,4 \cdot 9,36}{15} = 0,874$$

Загальний опір дорівнює:

$$R_{total} = R_{p2s} + R_a + R_w + R_p = 9,53 + 0,874 + 0,06 + 0,744 = 11,21 \text{ Ом}$$

Напруга випрямляча дорівнює:

$$U_{rec} = I_3 \cdot R_{total} \cdot 1,5 = 2,5 \cdot 11,21 \cdot 1,5 = 42,01 \text{ В}$$

Беремо найближче типове значення $U_{rec} = 48 \text{ В}$.

Власний потенціал труби беремо із літератури $E_p = 0,3 \text{ В}$.

В результаті отримуємо наступний набір електротехнічних параметрів трубопроводу:

Таблиця 3.2. Електротехнічні параметри моделі системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід»

№	Параметри трубопроводу	Значення	Позначення	Одиниці виміру
1	Опір аноду	0.874	R_a	Ом
2	Опір дренажного кабелю	0.06	R_w	Ом
3	Опір трубопровід - ґрунт	9.53	R_{p2s}	Ом
4	Опір трубопроводу	0.744	R_p	Ом
5	Ємність ізоляції трубопроводу	$1,296 \cdot 10^{-5}$	C_{in}	Ф
6	Індуктивність трубопроводу	0.026	L_p	Гн

7	Власний потенціал трубопроводу	0.3	E_p	В
8	Напруга випрямляча	U_{rec}	48	В

Отримані величини підставляються до моделі підземного сталевого трубопроводу.

3.2 Методи дослідження сигналів

Будь-який сигнал є матеріальним носієм інформації, який представлений зміною деякої фізичної величини (наприклад напруги чи струму) із часом [136]. На практиці сигнали спостерігаються емпірично, за допомогою відповідних вимірювальних приладів (наприклад осцилографів). Для аналізу таких сигналів, їх описують через математичні моделі. Отже сигнал може бути представленим в у вигляді деякої функції від часу $S(t)$. Сигнали можуть бути аналоговими, тобто непереривними у часі, та дискретними [137]. Залежно від характеру їхньої поведінки вони поділяються на:

- Періодичні сигнали - повторюються через певний інтервал часу (наприклад, синусоїдальні хвилі).
- Неперіодичні сигнали - не мають повторюваного патерну.

Періодичні сигнали часто зустрічаються в природі та різних галузях науки від електротехніки і фізики до біології та економіки. Якісне їх розуміння та використання, передбачає розбиття на фундаментальні складові, виявлення закономірностей та інтерпретацію основних властивостей. Для вилучення потрібної корисної інформації із сигналу потрібно проводити його аналіз. Однак найчастіше із самої залежності фізичної величини від часу сигналу і аналізу його форми потрібного об'єму інформації отримати неможливо через недостатню наочність або чутливість до змін [138]. Сучасну радіо електроніку неможливо було

б уявити без спектрального аналізу сигналів в якому оригінальна функція у часовій області $S(t)$ перетворюється в функцію частоти $F(\omega)$ – так званий спектр.

Ось кілька ключових методів аналізу періодичних сигналів [139]:

Аналіз у часовій області. Фокусується на вивченні сигналу як функції часу. Цей підхід виявляє амплітуду, період і загальну форму сигналу. Інструменти для дослідження сигналу в часовій області представлені різноманітними осцилографами і та аналізаторами, що візуалізують форму сигналів та можуть мати різноманітні вбудовані функції та методи. Одночасно періодичний сигнал можливо описати у вигляді функції часу, наприклад, синусоїдальної функції [140]. На основі математичного опису виявляють значення максимумів, мінімумів і точок перетину нуля, для вимірювання амплітуди і періоду. Перевагою наведених засобів є можливість прямої інтерпретації поведінки сигналу в часі, що особливо стосується простих періодичних сигналів із очевидними закономірностями, аналіз яких зазвичай досить інтуїтивно зрозумілий. Обмеженням такого підходу є менша ефективність для складних сигналів або сигналів з частотними компонентами, що перекриваються.

Частотний аналіз перетворює сигнал з часової області в частотну для вивчення його частотних складових [139]. Трансформація відбувається за допомогою таких методів як перетворення Фур'є (ПФ), швидке перетворення Фур'є (ШПФ), чи відповідних інструментів аналізаторів спектру та інших, що можуть формувати спектрограми. Їх перевагою є можливість визначати домінуючі частоти та гармоніки в сигналі, що актуально для сигналів зі складним частотним складом. Однак можлива втрата інформації про те, в який час в сигналі, що аналізується виникають певні частоти.

Часово-частотний аналіз. Даний тип аналізу представляє інформацію про те, як частотний склад сигналу змінюється з часом [141]. Найпоширеніші методи включають:

Віконне перетворення Фур'є (STFT): Поділяє сигнал на короткі сегменти і виконує перетворення Фур'є для кожного сегмента, створюючи спектрограму.

Вейвлет-перетворення: Розкладає сигнал на вейвлети, пропонуючи змінну роздільну здатність у часовій та частотній областях.

Перевагою є захоплення частотного вмісту, що змінюється в часі, що корисно для нестационарних сигналів, властивості яких змінюються з часом. Однак, обмеженням є необхідність знаходження компромісів між часовою та частотною роздільною здатністю. Також для вейвлет-аналізу, через велику кількість перетворень необхідна значна обчислювальна потужність [142], особливо для великих наборів даних або сигналів з високою роздільною здатністю.

Статистичні методи характеризують сигнали з точки зору їхніх статистичних властивостей, особливо для стохастичних або зашумлених періодичних сигналів. Невизначеності таких сигналів зазвичай виникають в процесі поширення або через шум у вимірах. Оскільки сигнали вважаються випадковими, потрібні статистичні інструменти, що походять від принципів математичної статистики, а саме, перевірки гіпотез та оцінювання. Такі методи є корисними для виявлення прихованих періодичностей сигналу, та мають високу стійкість до шумів. Однак може бути потрібно попередньо обробляти сигнал.

Серед наведених методів частотний аналіз за допомогою перетворення Фур'є є найбільш поширеним і перевіреним методом аналізу частотного спектру електротехнічних систем який є ефективним інструментом.

Будь-який періодичний сигнал можна подати у вигляді комбінації гармонійних коливань. Сукупність амплітуд і частот гармонік у розкладанні Фур'є називають спектром сигналу.

Хай $S(t)$ є дійсною періодичною функцією з періодом T , то сукупність гармонік на які вона розкладається, має вигляд ряду Фур'є, який в тригонометричному виді має наступний вигляд:

$$s(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos \omega n t + B_n \sin \omega n t]$$

Де $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – частота першої гармоніки.

В комплексній формі:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{-j\omega n t}$$

Де коефіцієнти ряду визначаються:

$$A_0 = C_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) dt$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cos(\omega n t) dt$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \sin(\omega n t) dt$$

$$C_n = C_{nc} - jC_{ns} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) e^{-j\omega n t} dt$$

$$C_{nc} = \frac{A_n}{2}$$

$$C_{ns} = \frac{B_n}{2}$$

A_0 і C_0 характеризують постійну складову сигналу; A_n і B_n – амплітуди косинусоїдної і синусоїдної гармонік з частотою ωn ; C_n – комплексна амплітуда гармоніки, який можливо представити у вигляді:

$$C_n = |C_n| e^{-j\varphi_n}$$

Де $|C_n|$ – модуль спектральної функції, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$$|C_n| = \sqrt{C_{nc}^2 + C_{ns}^2}$$

Аргумент спектральної функції

$$\varphi_n = \arctg \frac{C_{ns}}{C_{nc}}$$

Сукупність гармонік, на які розкладаються періодична функція $s(t)$ називаються спектром сигналу. Залежність A_n , B_n та $|C_n|$ від частоти складають амплітудний спектр сигналу, а аргументу φ_n від частот – фазовий спектр. Для

тригонометричної форми амплітудний та фазовий спектри виконуються для позитивних значень частоти, а фазовий спектр визначається залежністю φ_n від частоти, де φ_n дорінює:

$$\varphi_n = \arctg \frac{B_n}{A_n}, n = 1, 2, \dots$$

Зазвичай саме амплітудний спектр сигналу представляє набагато більший інтерес, а тому фазову частину спектру часто пропускають. Однак, з точки зору практичного використання спектрального аналізу, як у випадку аналізу вихідного сигналу випрямляча, що працює на навантаження у вигляді моделі сталевих підземного трубопроводу із зосередженими параметрами, більш зручно оперувати не амплітудою сигналу, а його потужністю.

Повна середня потужність сигналу, що виділяється на опорі в 1 Ом буде дорівнювати:

$$\overline{s(t)^2} = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (C_{nc}^2 + C_{ns}^2) = A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (A_n^2 + B_n^2)$$

Використання перетворення Фур'є для визначення параметрів електричних сигналів і досі залишається типовим методом, який надає достатньо інформації для наведення і перевірки гіпотез.

3.3 Спектр випрямлячів

Проведемо аналіз роботи різних схемотехнічних рішень випрямлячів, що були розглянуті в розділі 2.6 на модель системи СКЗ – ґрунт – трубопровід довжиною 10 км. Моделювання здійснюється засобами програмного пакету MATLAB. Параметри моделі розраховані у попередньому розділі 3.1. Аналіз виконується за допомогою розкладання вихідного сигналу випрямляча, що живить систему електрохімічного захисту за спектром потужності по частоті за допомогою перетворення Фур'є. Оскільки для винесення маси металу достатнього для утворення наскрізного отвору площею в 1мм² в трубі завтовшки 5 мм протягом

періоду в 1 рік, достатньо утворити незначний струм локалізований струм стікання в декілька мікроампер.

Розглядаючи трубу, як електрод, можливо приблизно визначити струм корозії для розчинення маси металу в циліндричному отворі площею 1 мм^2 висотою 5 мм. Відповідно до закону Фарадея, кількість струму, що стікає з електрода, пропорційно втраті маси цього електрода:

$$G = qIT$$

$$q = 3600M/(nF)$$

Де G - маса металу, що розчинився, г; q – електрохімічний еквівалент металу $\text{гА}^{-1}\text{год}^{-1}$; M - атомна маса г/моль; $F = 96500$ – число Фарадея Кл/гЭкв; n - валентність металу; I - величина електродного струму, А; T - час, год.

Так, якщо при анодній реакції утворюється двовалентне залізо ($n = 2$), то електрохімічний еквівалент при $M = 56$ г/моль буде дорівнювати $q = 1.0424 \text{ гА}^{-1}\text{год}^{-1}$ або $q = 9,12 \text{ кг/(А рік)}$.

Відповідно для $T = 1$ рік струм буде дорівнювати:

$$I = \frac{G}{qT}$$

Маса розчиненого металу дорівнює:

$$G = V\rho = Sh\rho = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 = 39.25 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$$

Струм корозії:

$$I = \frac{G}{qT} = \frac{39.25 \cdot 10^{-6}}{9,12} = 4.3 \text{ мкА}$$

Як наслідок, дуже малих корозійних струмів (4,3 мкА), які можуть завдавати помітної шкоди цілісності трубопроводу, в спектральному аналізі потужності розглядаються потужності аж до 1мВт.

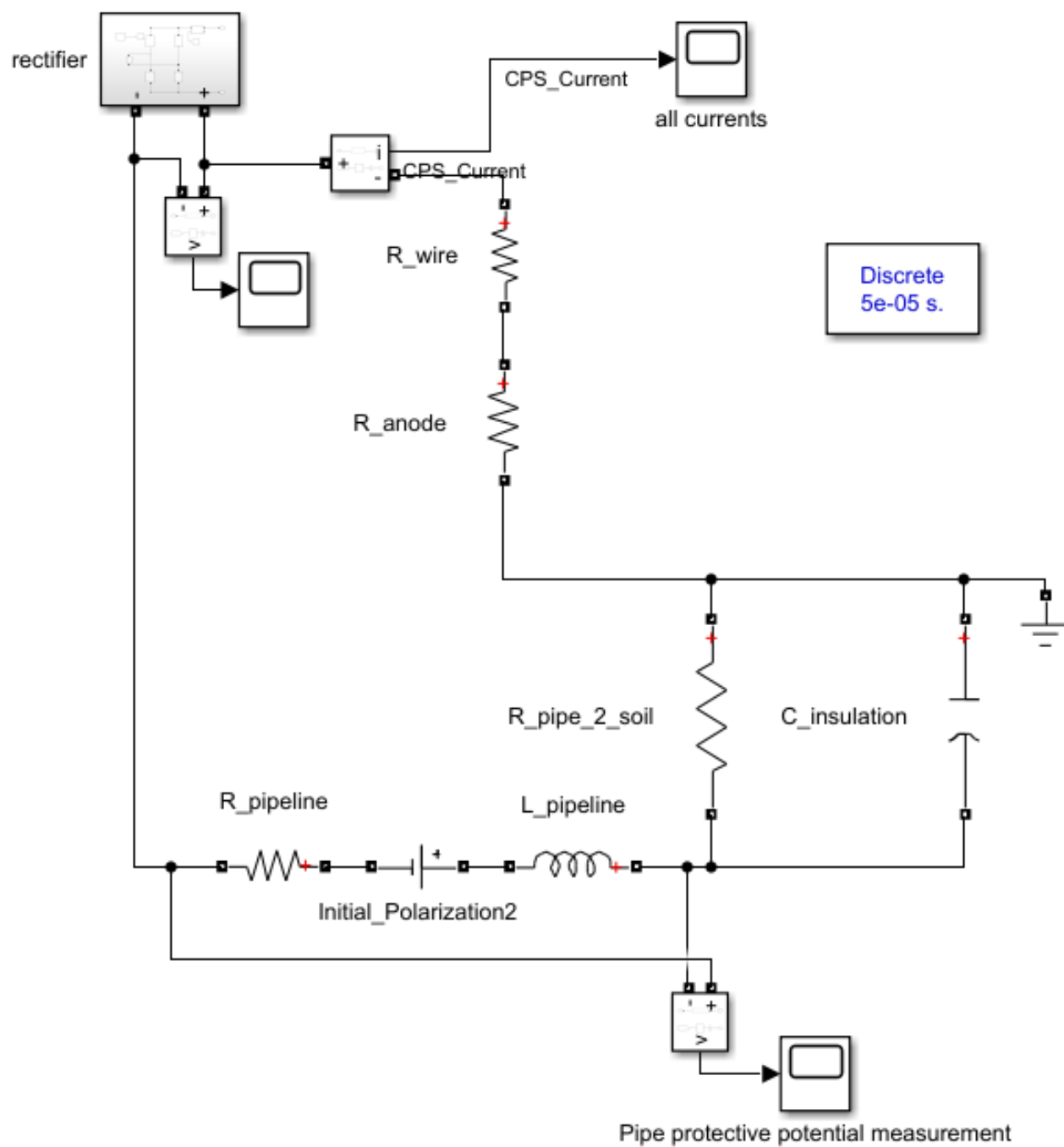


Рис. 63. Модель в Matlab (Simulink)

Однонапівперіодний випрямляч

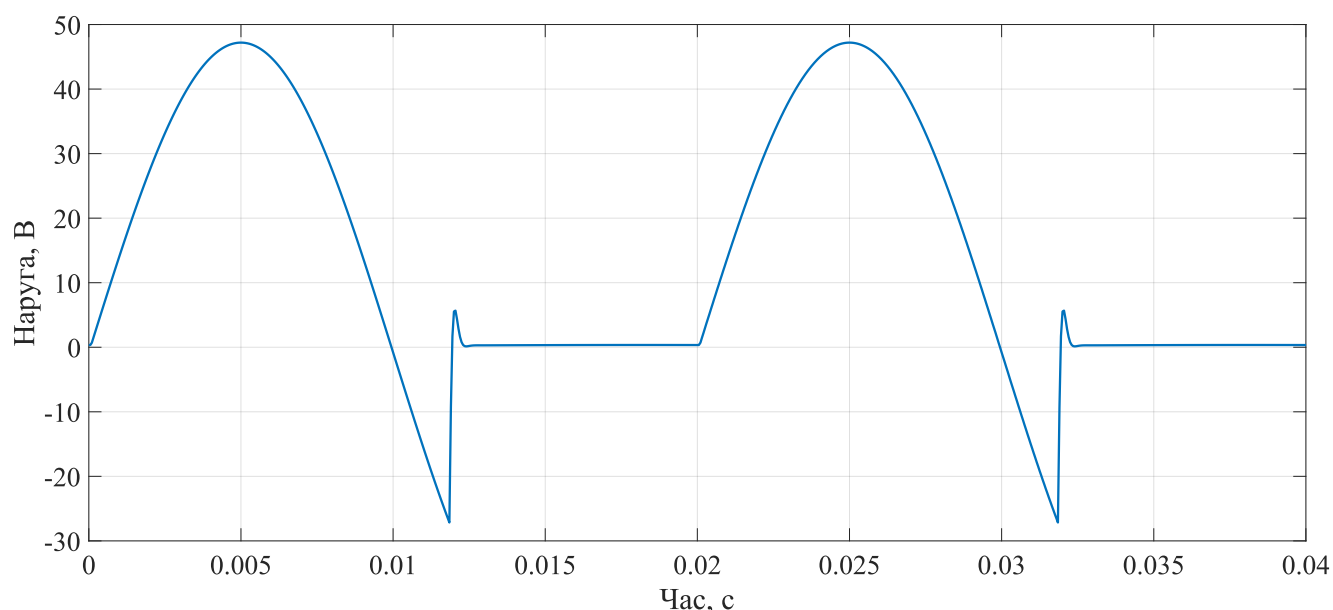


Рис. 64. Вихідний сигнал однонапівперіодного випрямляча

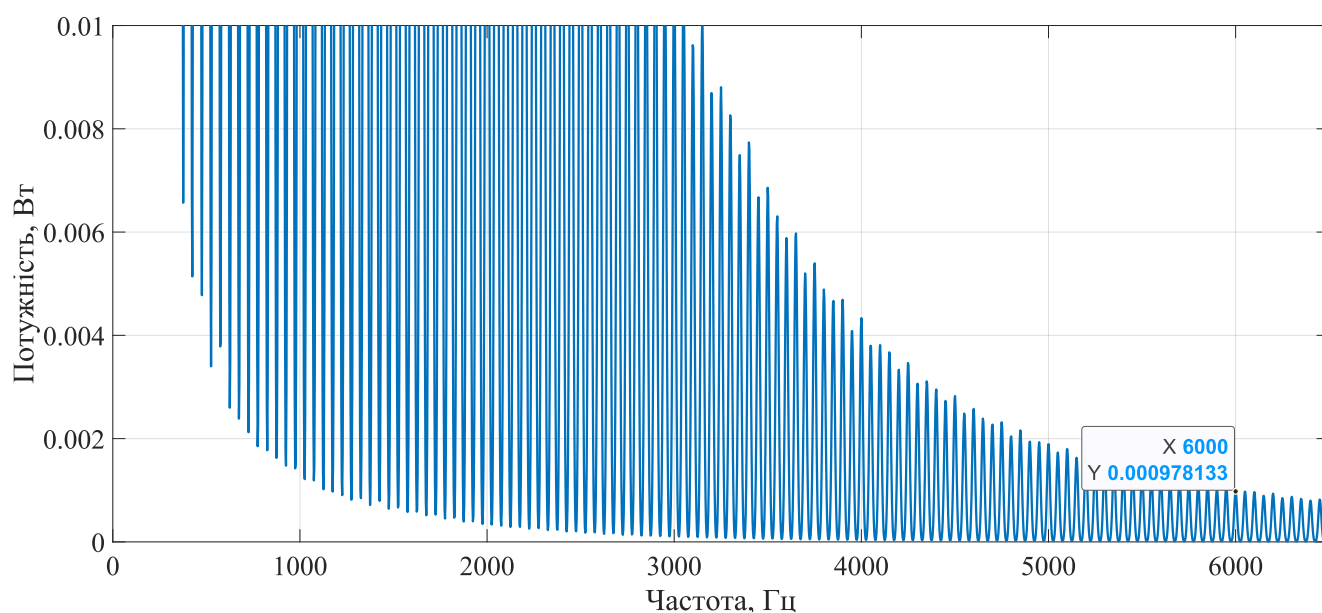


Рис. 65. Спектр потужності однонапівперіодного випрямляча

Форма вихідного сигналу однофазного однонапівперіодного випрямляча чітко демонструє наявність значного впливу індуктивної складової моделі на формування захисного потенціалу. Розподіл потужності за частотою показує, що потужність до 1 мВт визначається аж до частоти 6 кГц. Основною причиною досить високої частоти є сильно пульсуючий характер сигналу.

Двохнапівперіодний випрямляч з нульовим виводом

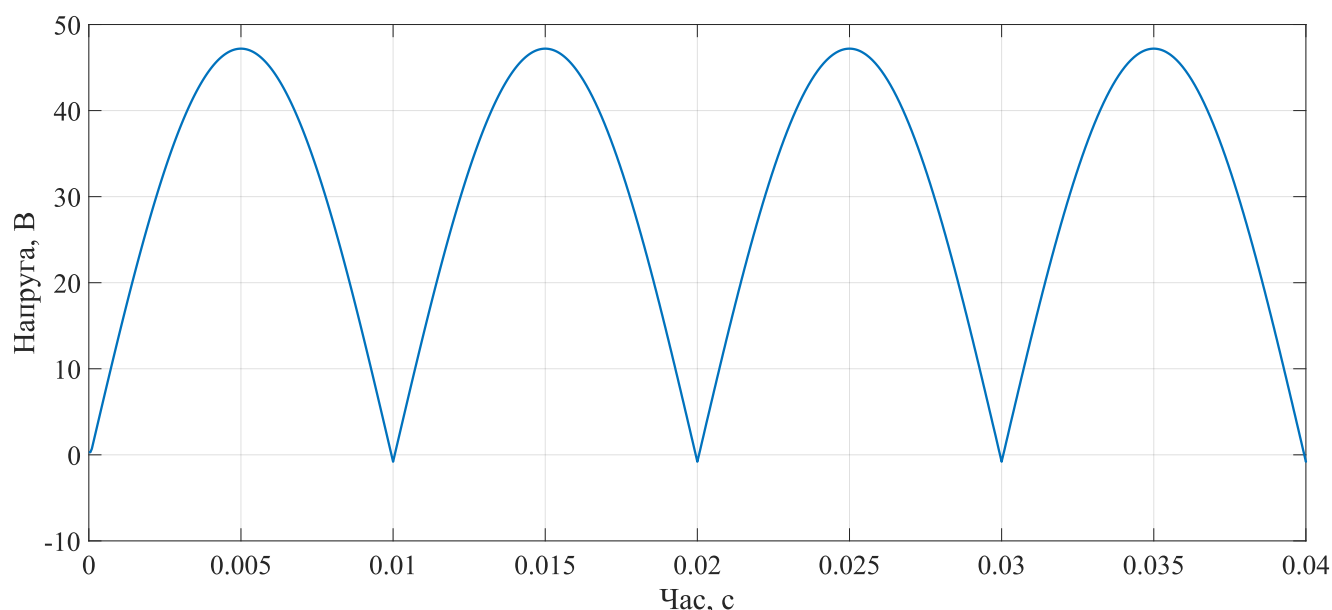


Рис. 66. Вихідний сигнал випрямляча з нульовим виводом

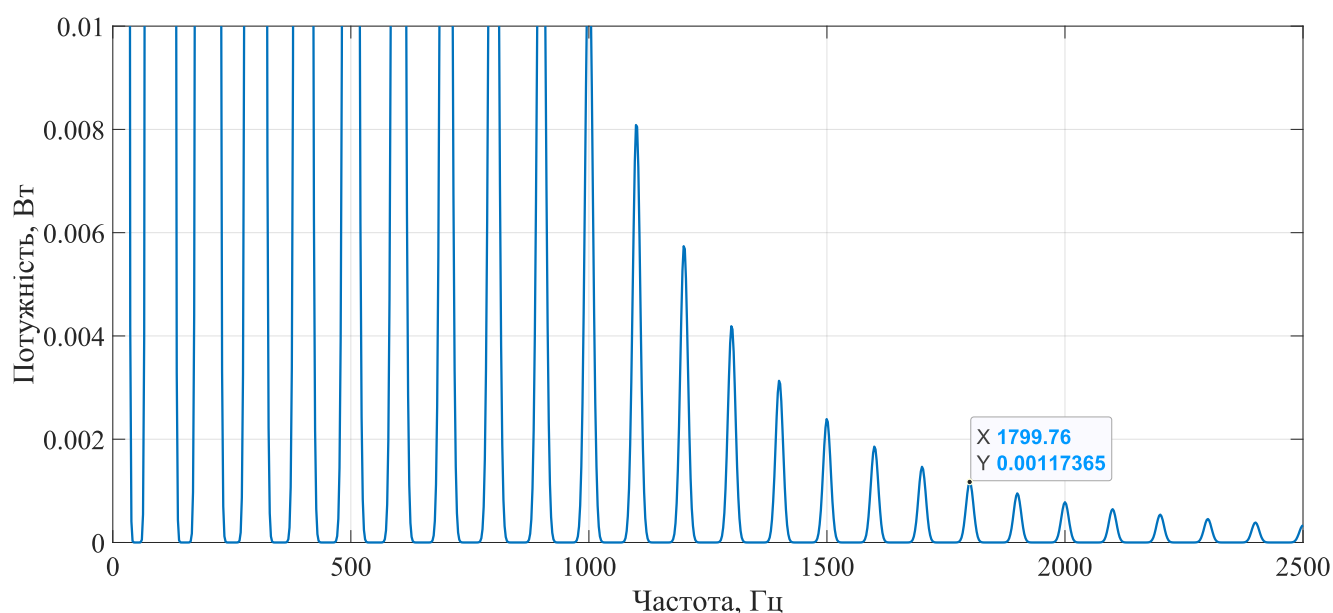


Рис. 67. Спектр потужності випрямляча з нульовим виводом

Двохнапівперіодна схема з нульовим виводом представляє значно менші пульсації, що в свою чергу дає менше розповсюдження потужності по частотам. Мінімальна відслідковувана потужність в 1 мВт виявляється на частоті 1,8 кГц. При цьому помітне деяке затягування напруги у від'ємну зону біля точок переходу через нуль, що також спостерігалось у випадку індуктивного навантаження в розділі 2.6.

Мостовий випрямляч

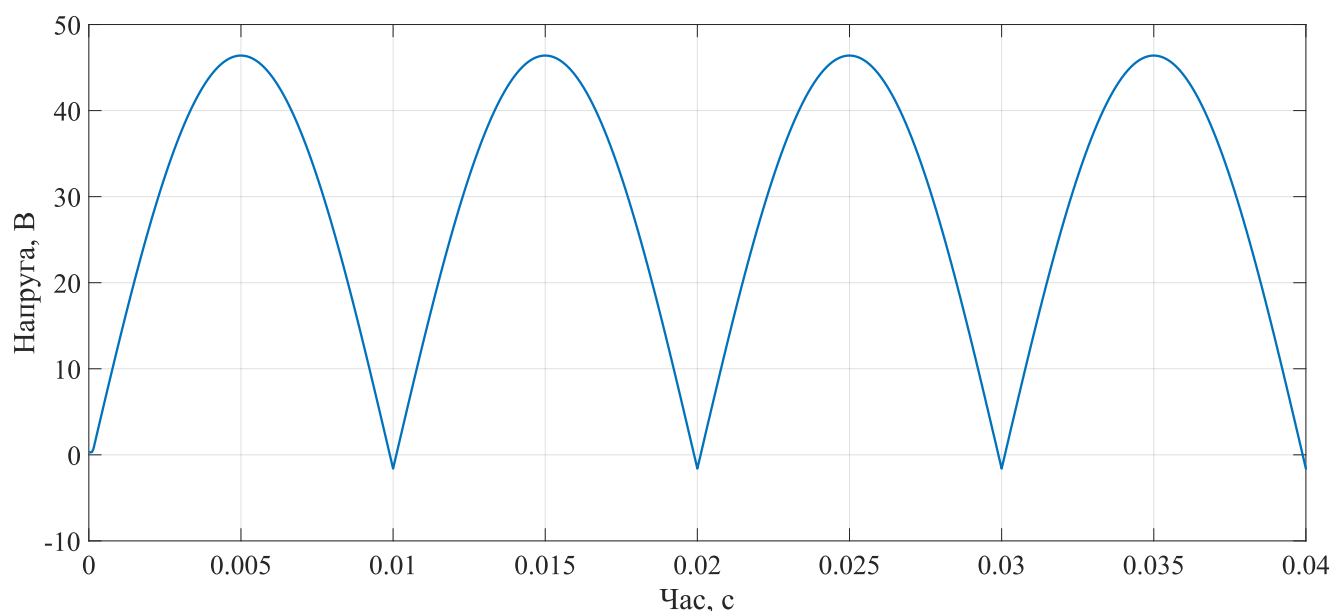


Рис. 68. Вихідний сигнал мостового випрямляча

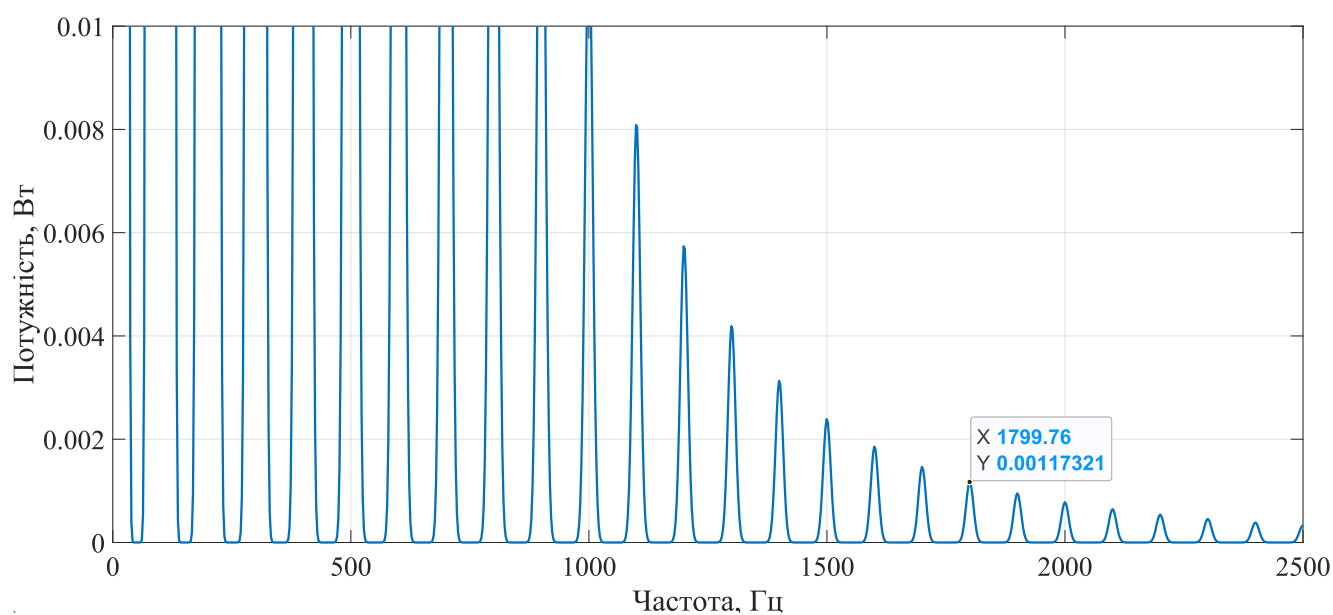


Рис. 69. Спектр потужності мостового випрямляча

Однофазна мостова схема представляє виключно схемотехнічні переваги у порівнянні із схемою з нульовим виводом, через раціональне використання трансформатора за рахунок подвоєння напівпровідникових ключів. Вихідний сигнал і його спектр помітних змін не має.

Керований мостовий випрямляч

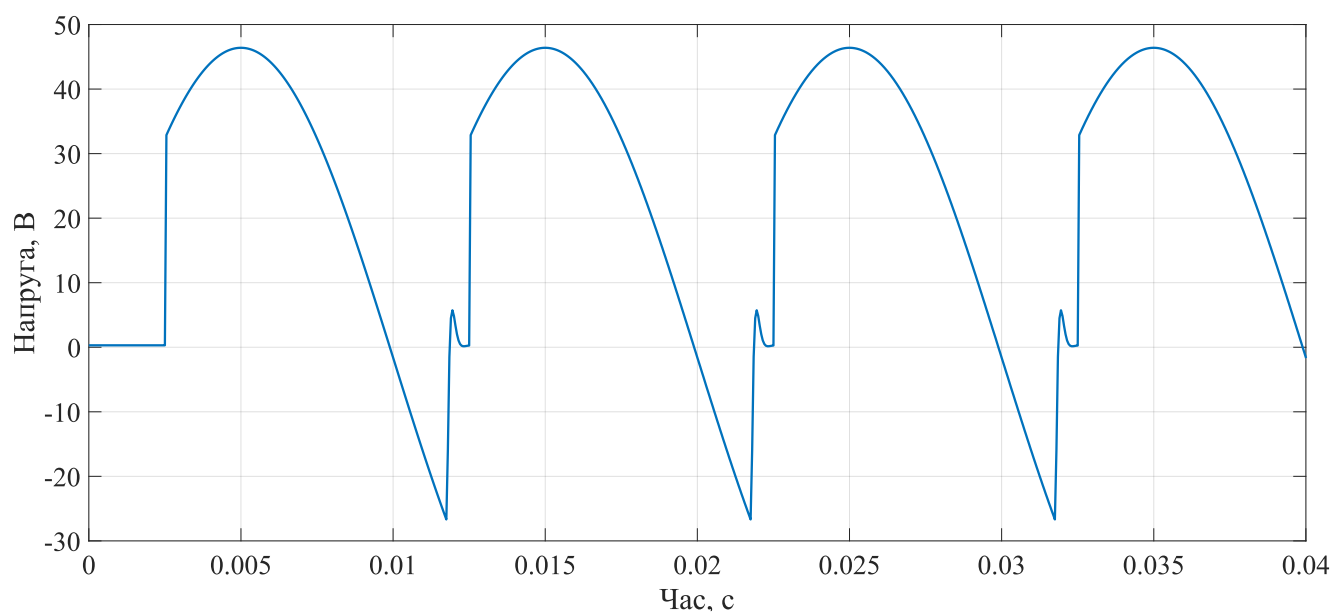


Рис. 70. Вихідний сигнал керованого мостового випрямляча з кутом керування 45

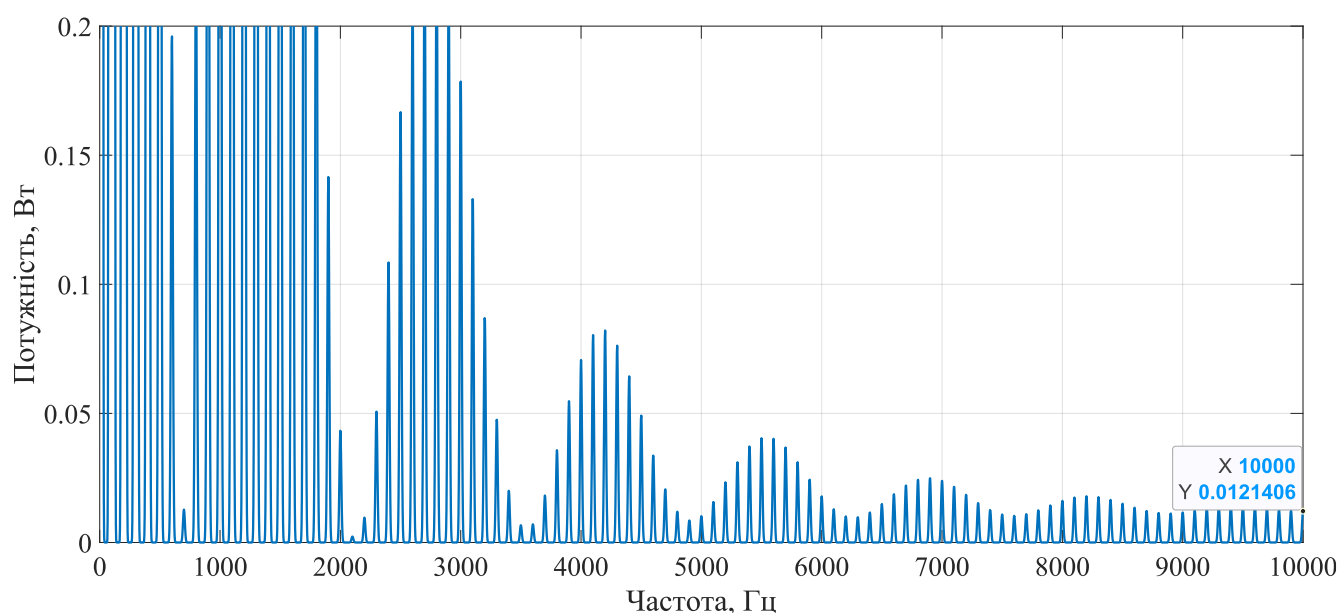


Рис. 71. Спектр потужності керованого мостового випрямляча з кутом керування

45

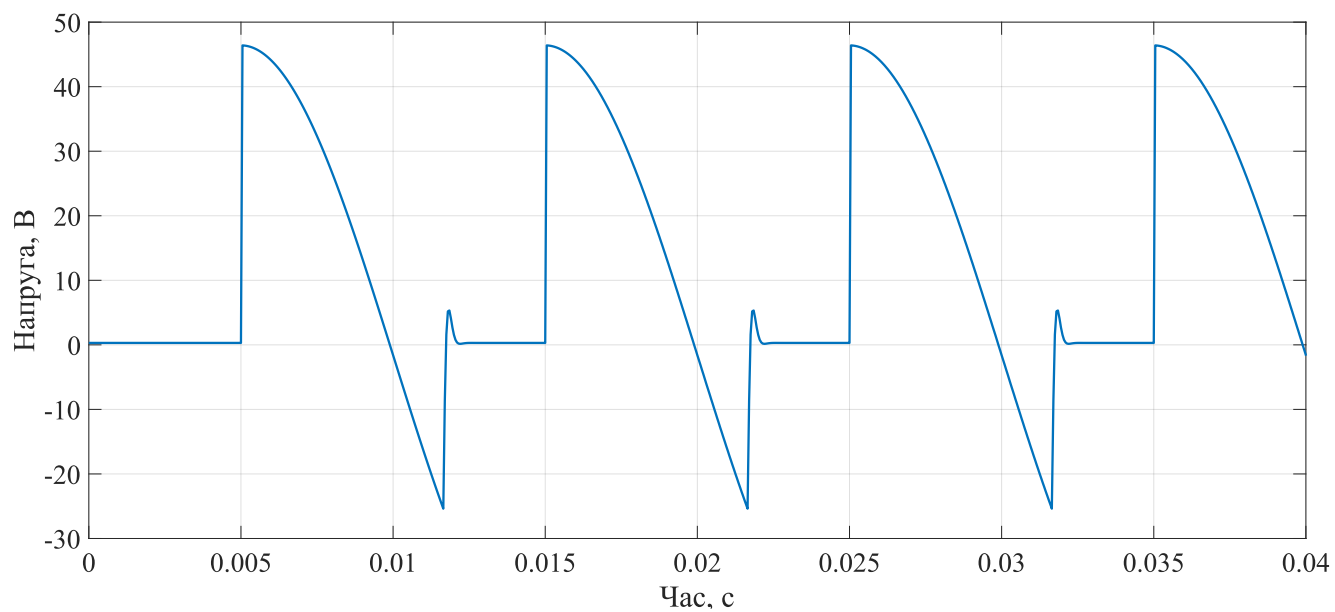


Рис. 72. Вихідний сигнал керованого мостового випрямляча з кутом керування 90

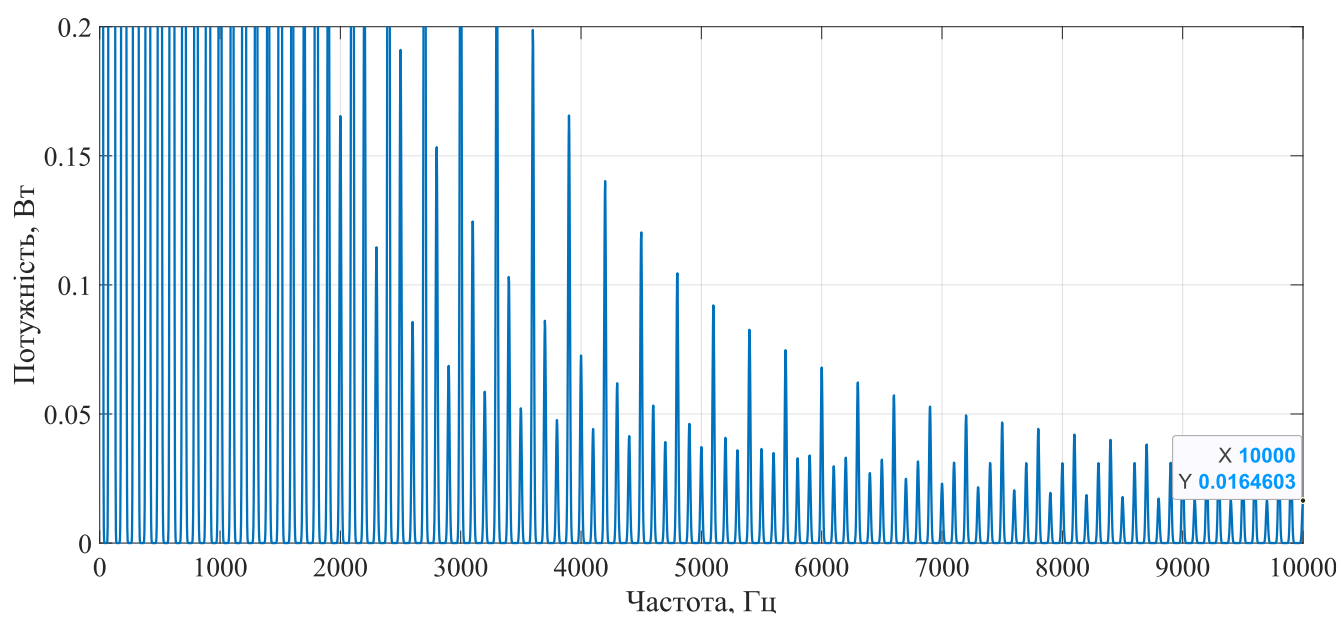


Рис. 73. Спектр потужності керованого мостового випрямляча з кутом керування 90

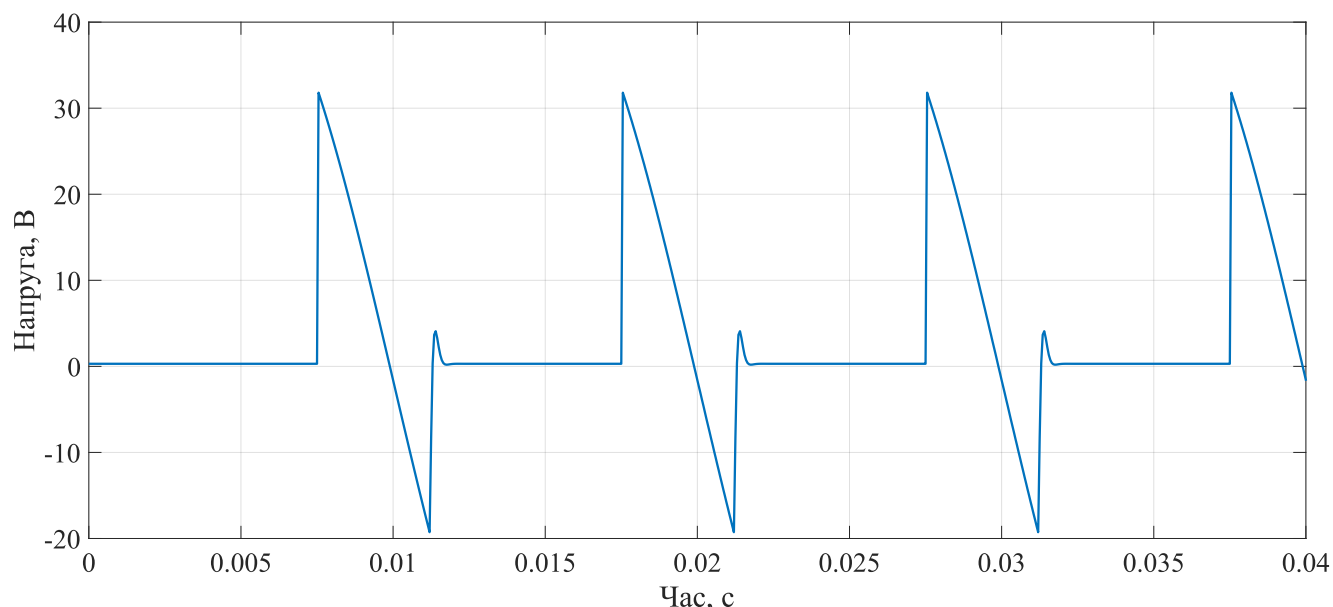


Рис. 74. Вихідний сигнал і спектр потужності керованого мостового випрямляча з кутом керування 135

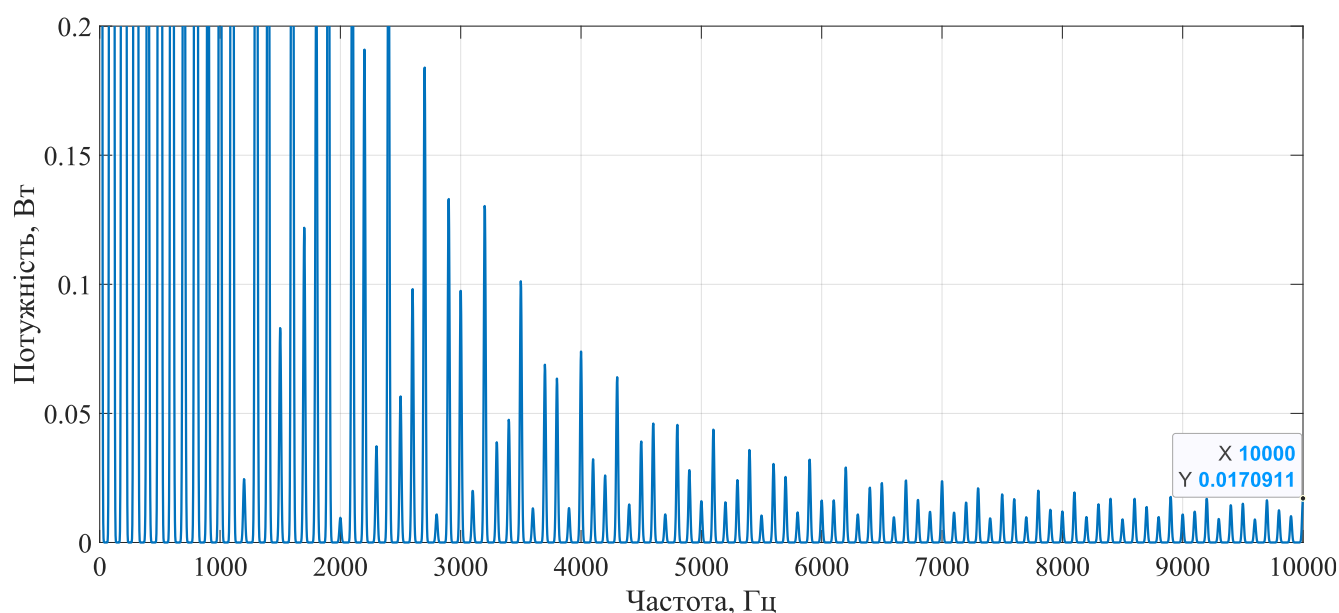


Рис. 75. Вихідний сигнал і спектр потужності керованого мостового випрямляча з кутом керування 135

Для усіх кутів керування спостерігається затягування струму і помітні піки напруги у від'ємному напрямку. При цьому спектри потужностей показують значне розподілення по частотам, а обране граничне значення в 1 мВт не досягається аж до максимальної частоти в 10 кГц, яка обумовлена частотою дискретизації моделі. Крім того розподіл потужності є дуже неоднорідним і

помітна деяка періодичність розподілу потужності, так для 45 градусів – спостерігається падіння потужності приблизно кожні 1,4 кГц; для 90 градусів – значні піки, кожні 0.3 кГц.

Керований мостовий випрямляч з нульовим вентилям

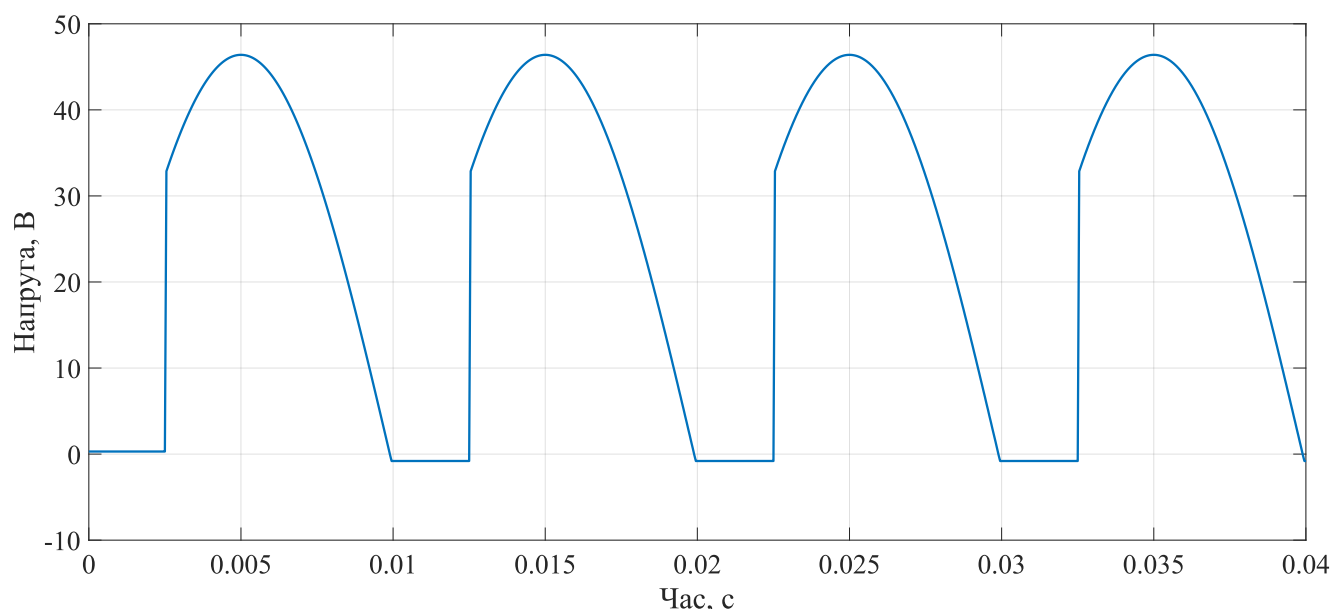


Рис. 76. Вихідний сигнал керованого мостового випрямляча з нульовим вентилям і кутом керування 45

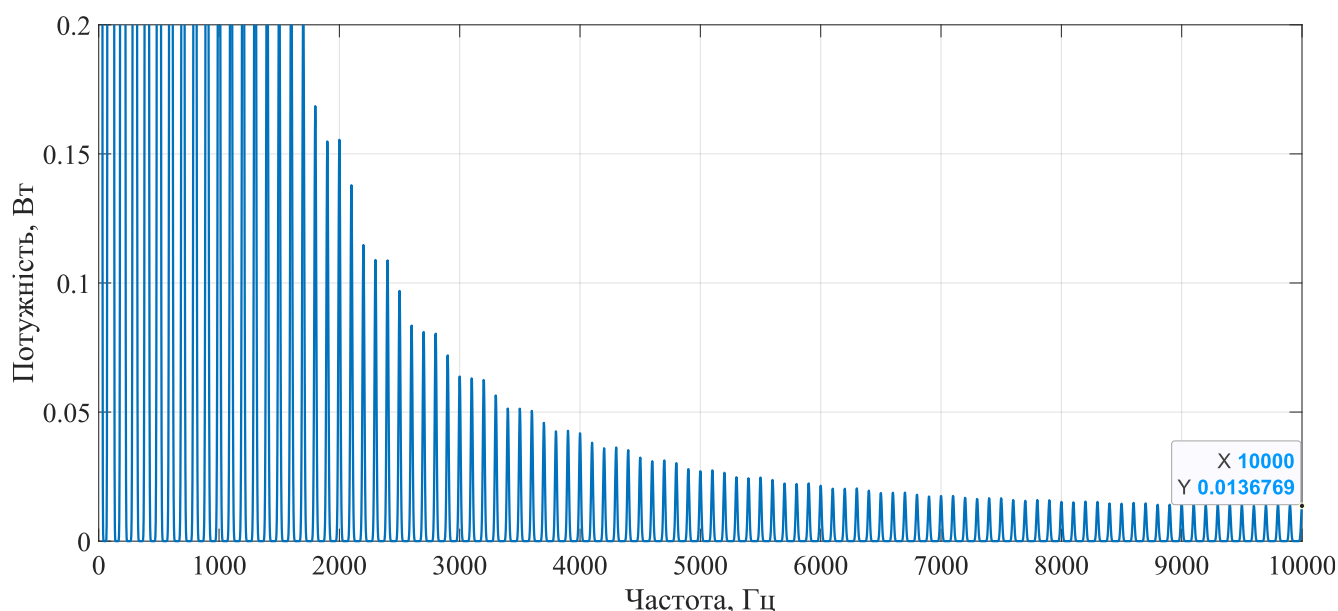


Рис. 77. Спектр потужності керованого мостового випрямляча з нульовим вентилям і кутом керування 45

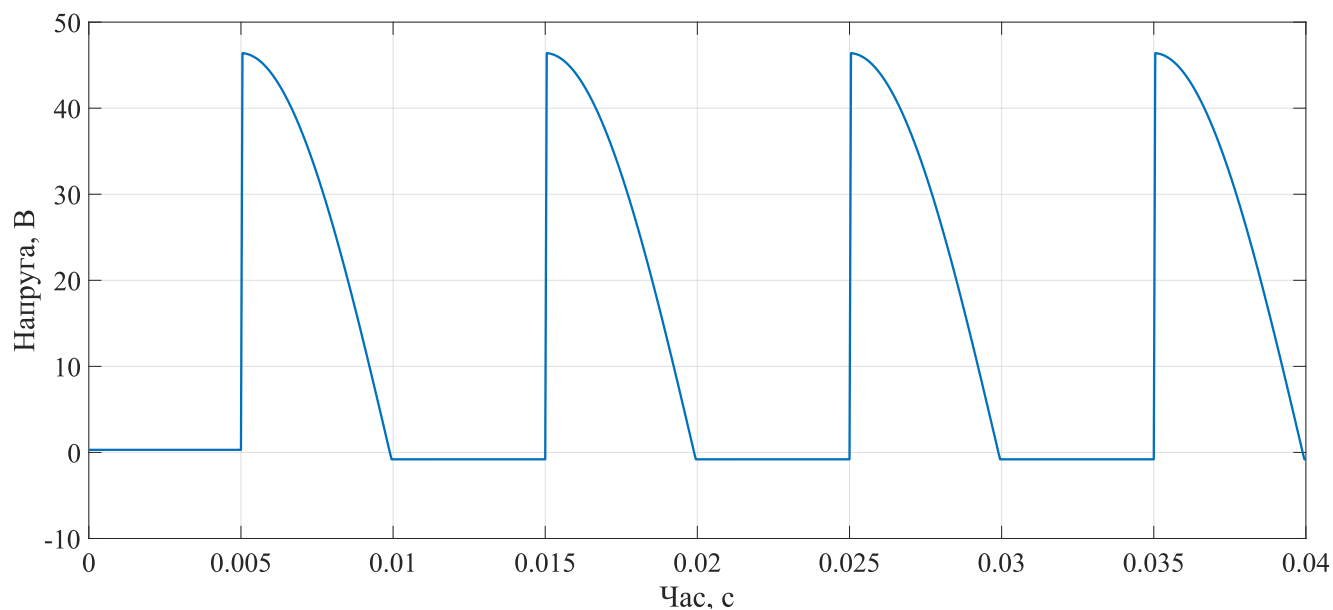


Рис. 78. Вихідний сигнал керованого мостового випрямляча з нульовим вентилем і кутом керування 90

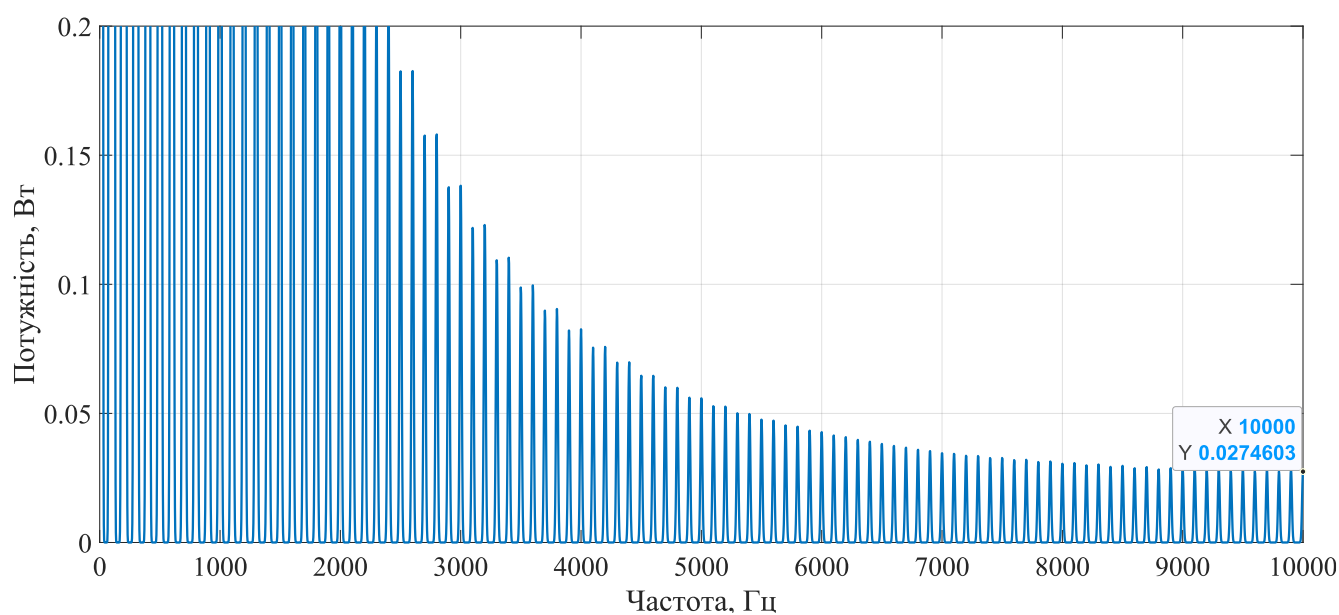


Рис. 79. Спектр потужності керованого мостового випрямляча з нульовим вентилем і кутом керування 90

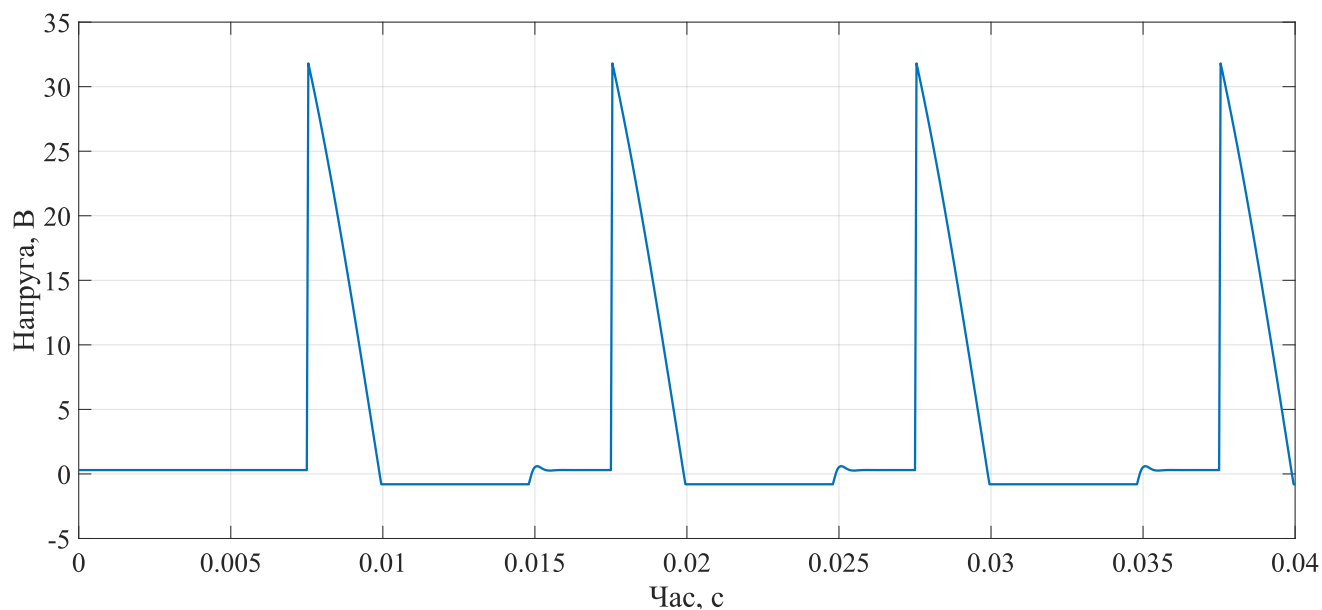


Рис. 80. Вихідний сигнал керованого мостового випрямляча з нульовим вентилям і кутом керування 135

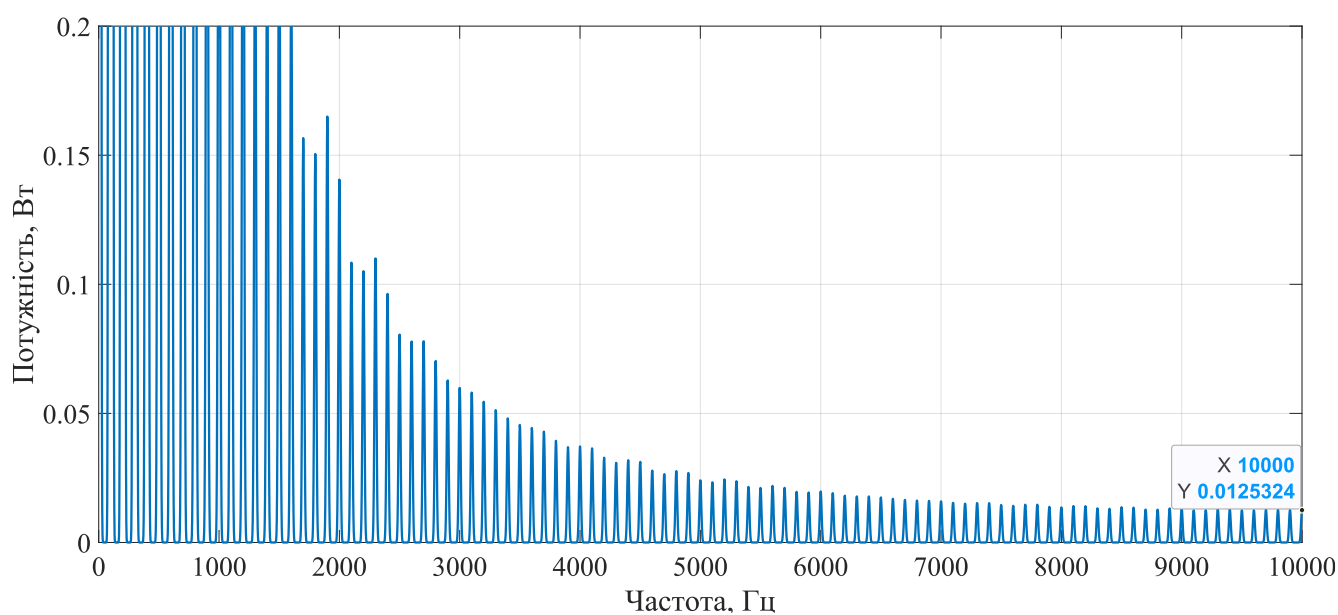


Рис. 81. Спектр потужності керованого мостового випрямляча з нульовим вентилям і кутом керування 135

Впровадження нульового вентиля ефективно компенсує вплив індуктивної складової моделі трубопроводу, та згладжує розподіл потужності по частоті, показуючи значно більш однорідну картину ніж у класичної схеми мостового випрямляча. Наявність значної потужності (більше 1 мВт) зберігається.

Несиметричний керований випрямляч

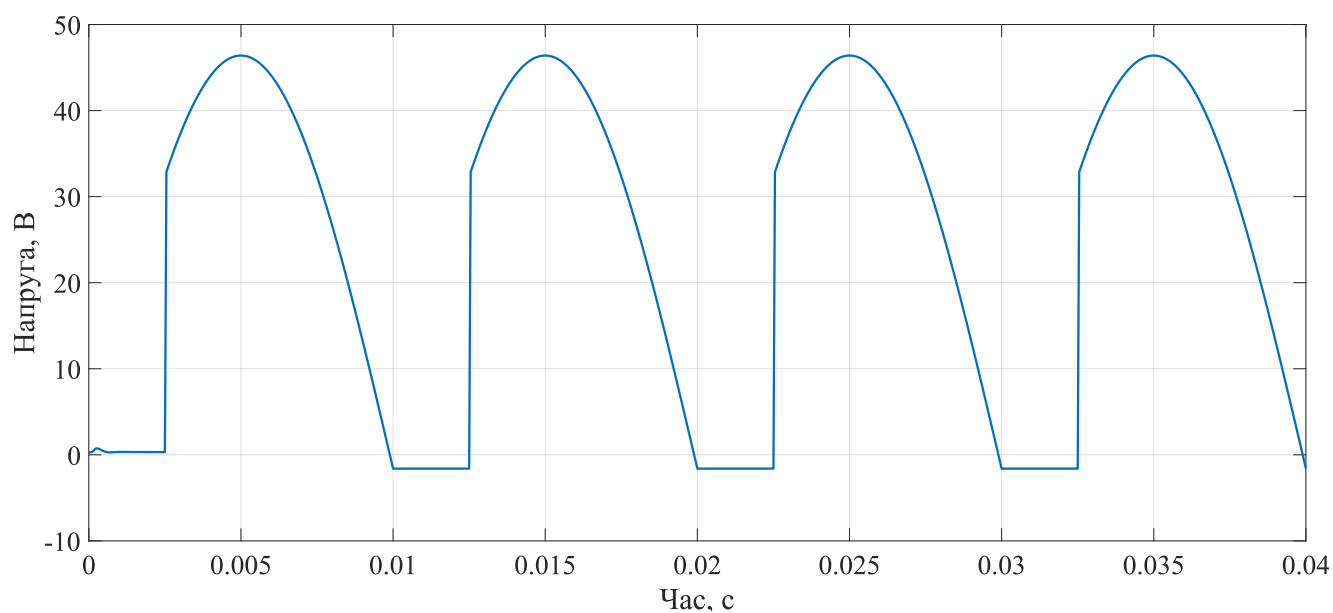


Рис. 82. Вихідний сигнал керованого несиметричного випрямляча з кутом керування 45

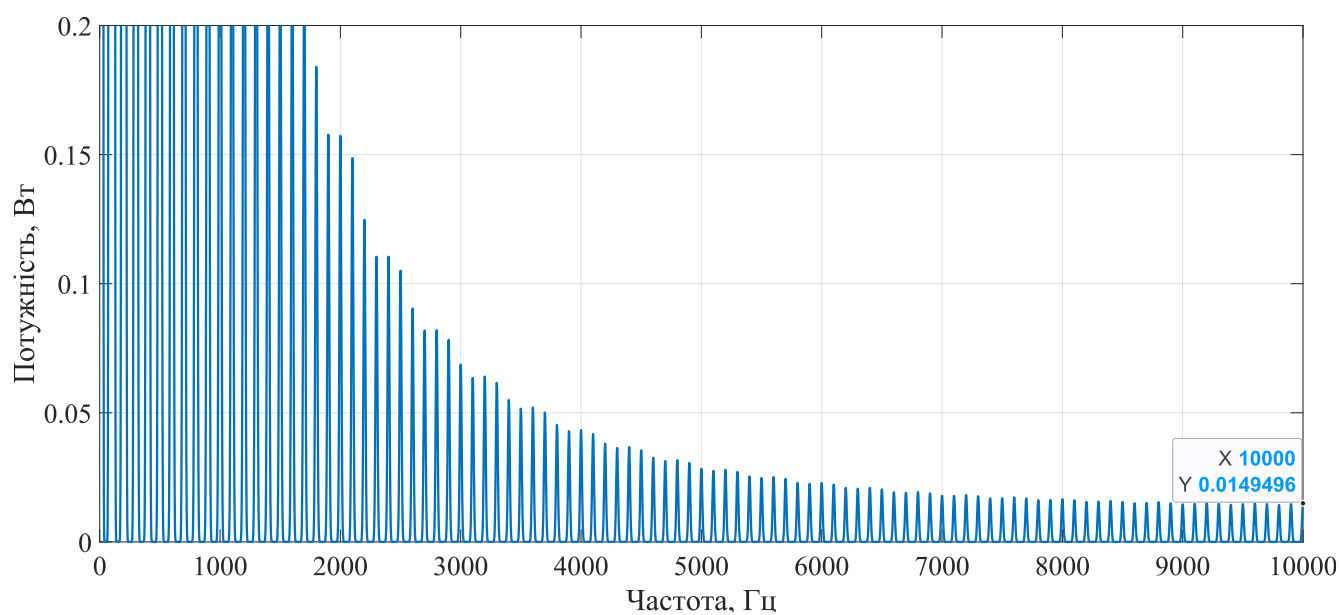


Рис. 83. Спектр потужності керованого несиметричного випрямляча з кутом керування 45

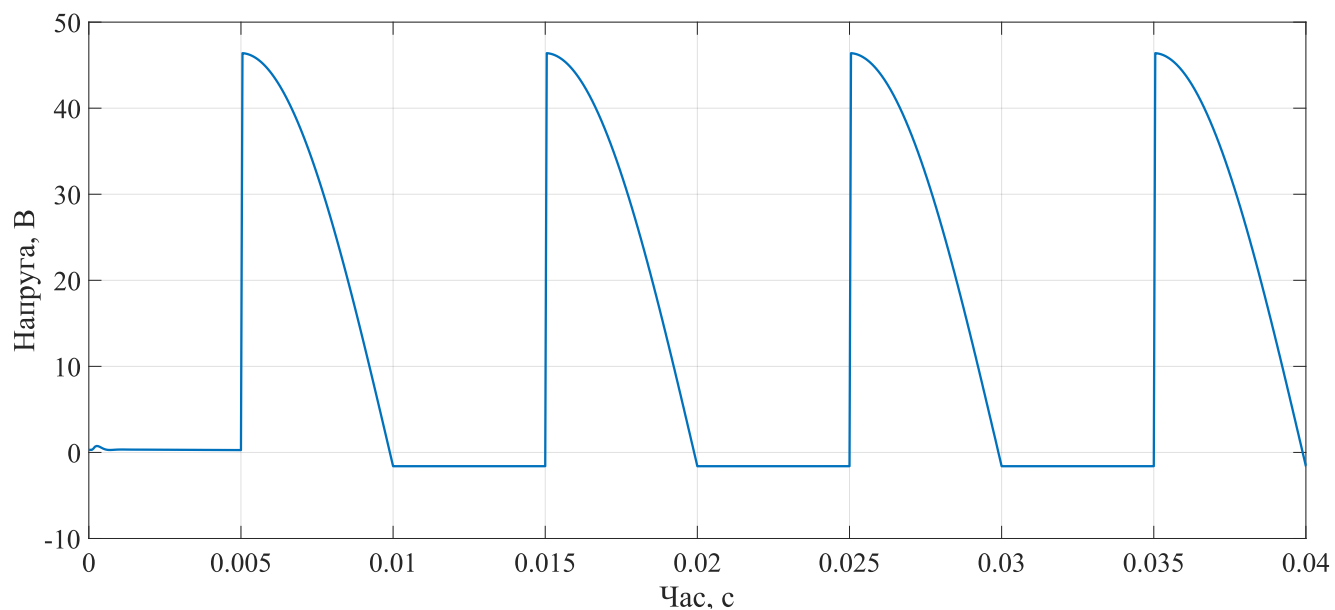


Рис. 84. Вихідний сигнал керованого несиметричного випрямляча з кутом керування 90

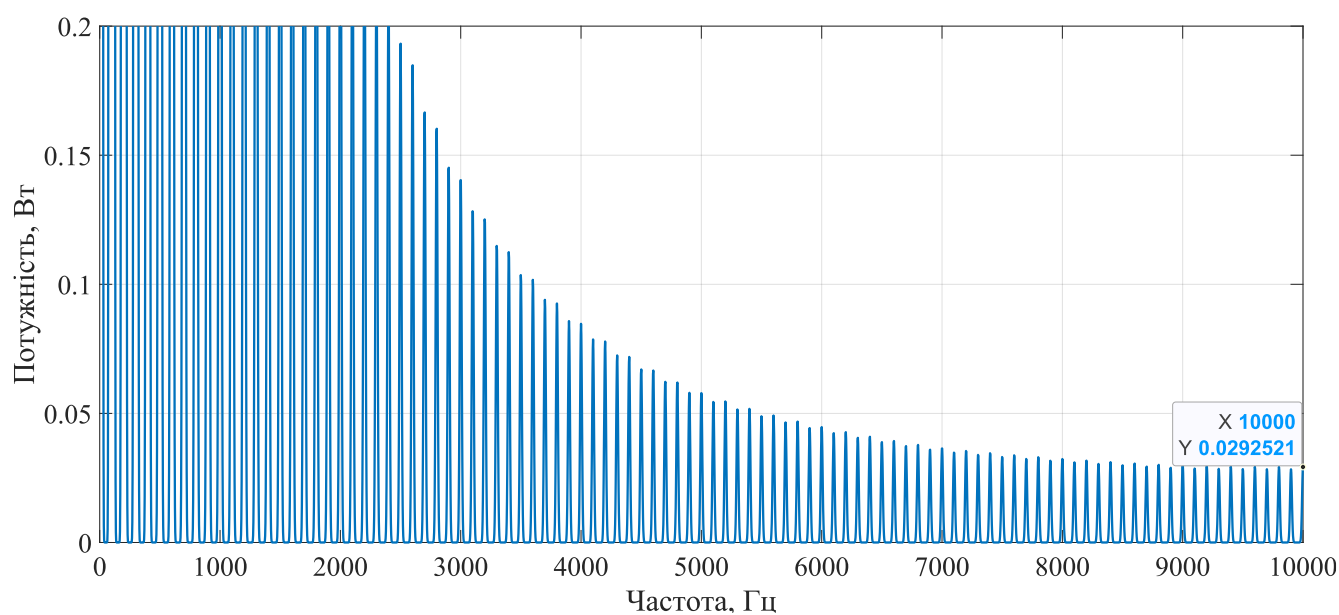


Рис. 85. Спектр потужності керованого несиметричного випрямляча з кутом керування 90

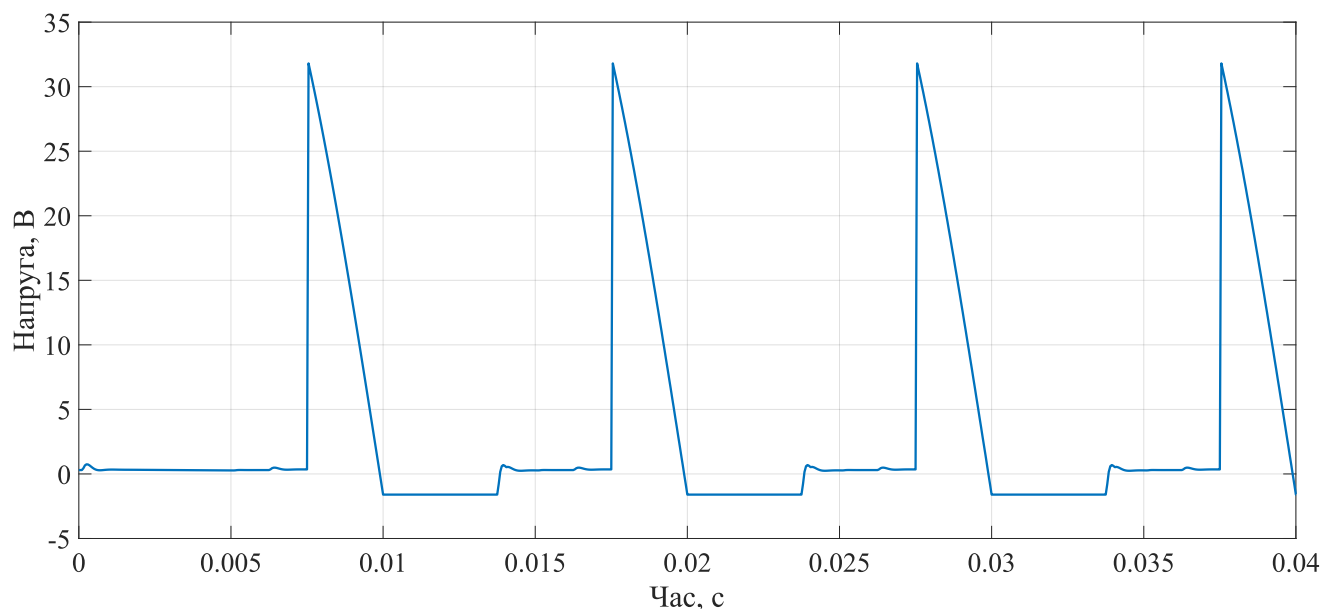


Рис. 86. Вихідний сигнал керованого несиметричного випрямляча з кутом керування 135

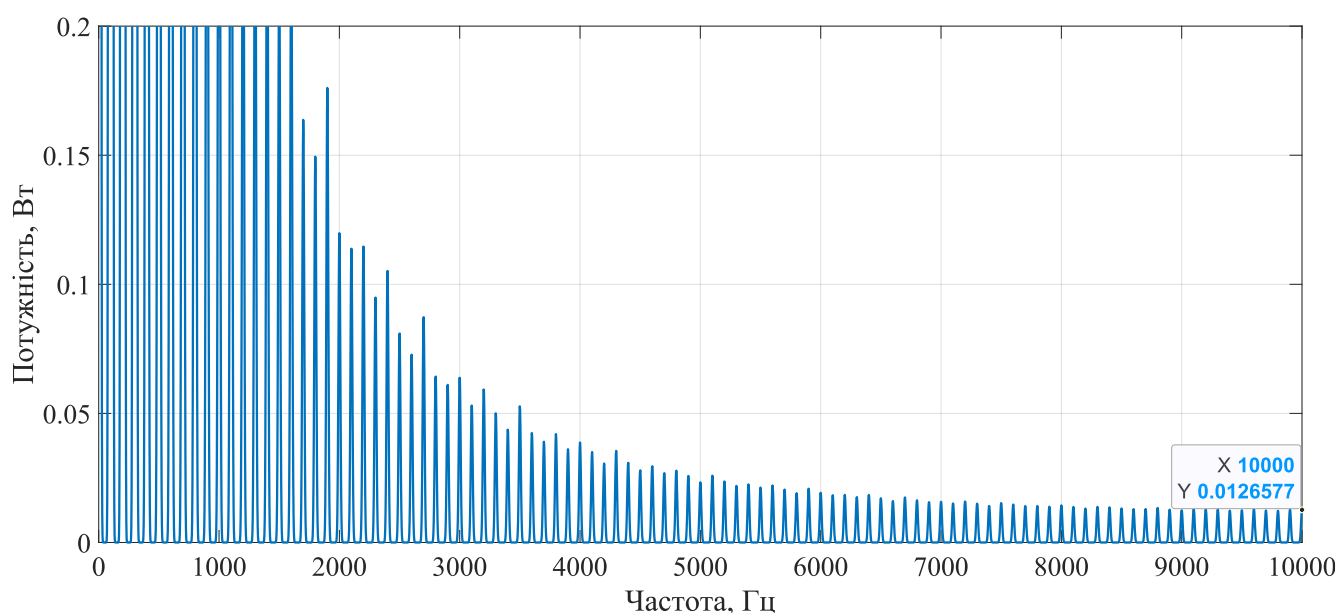


Рис. 87. Спектр потужності керованого несиметричного випрямляча з кутом керування 135

Несиметричний керований випрямляч показує картини вихідного сигналу і спектрального розподілу подібні до тих, що спостерігаються для схеми з нульовим виводом. Різниця полягає в дещо більших значеннях потужності на однакових частотах.

Випрямляч з вольтодобавкою

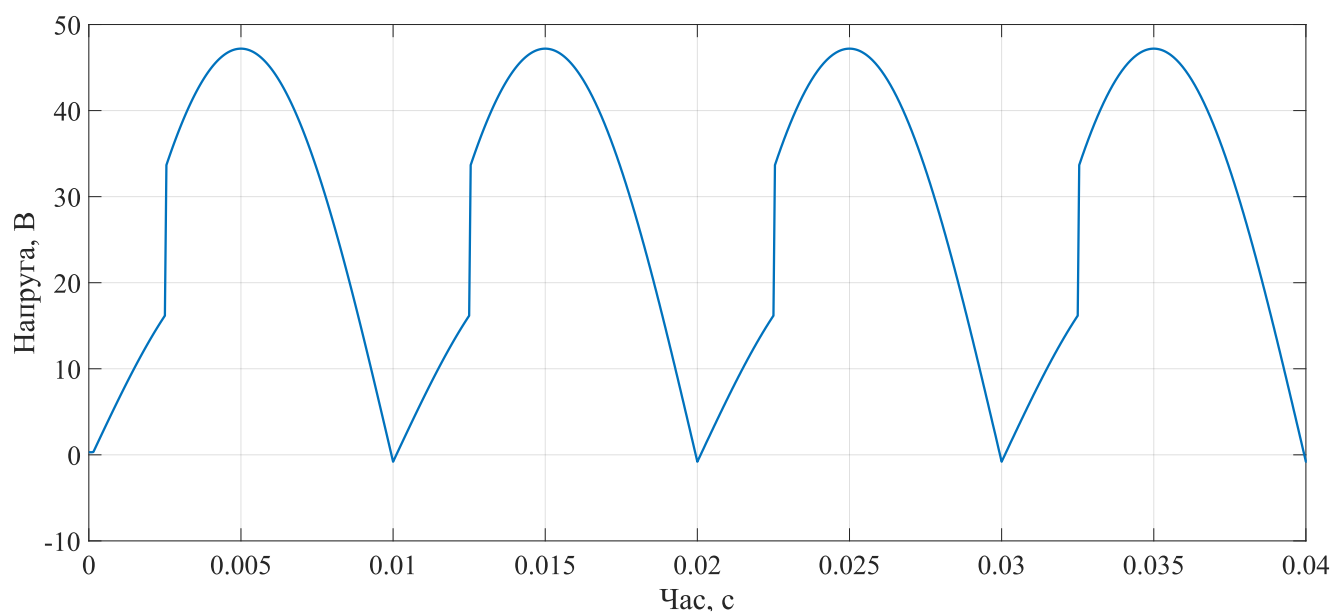


Рис. 88. Вихідний сигнал керованого випрямляча з вольтодобавкою і кутом керування 45

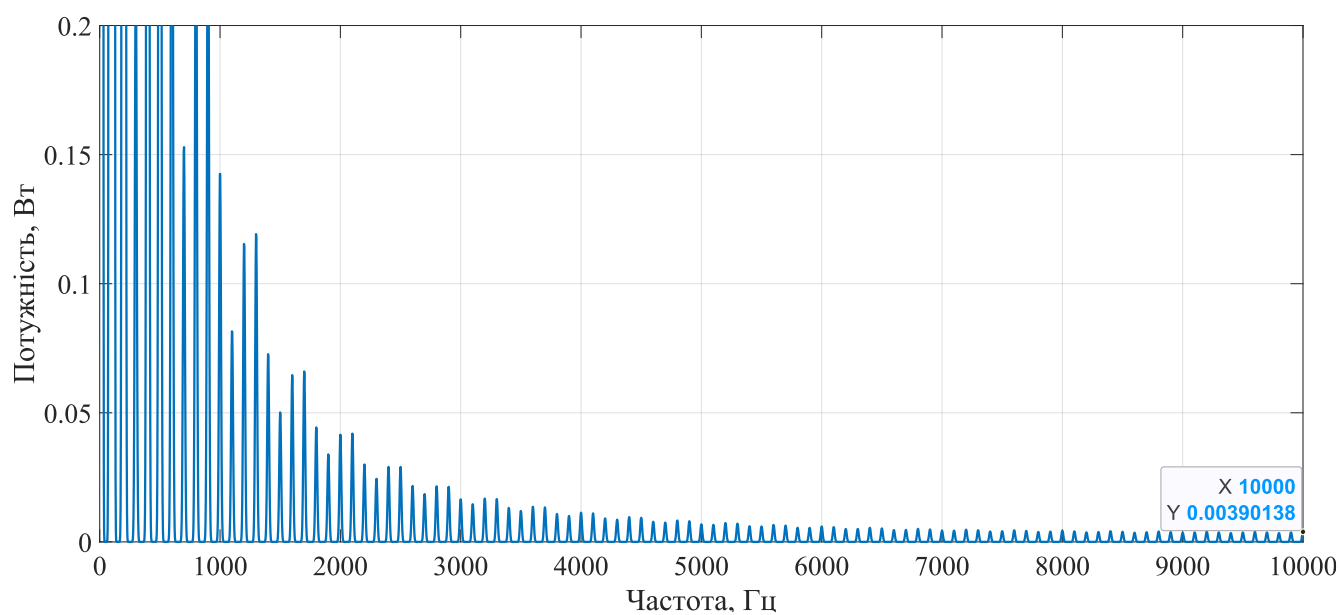


Рис. 89. Спектр потужності керованого випрямляча з вольтодобавкою і кутом керування 45

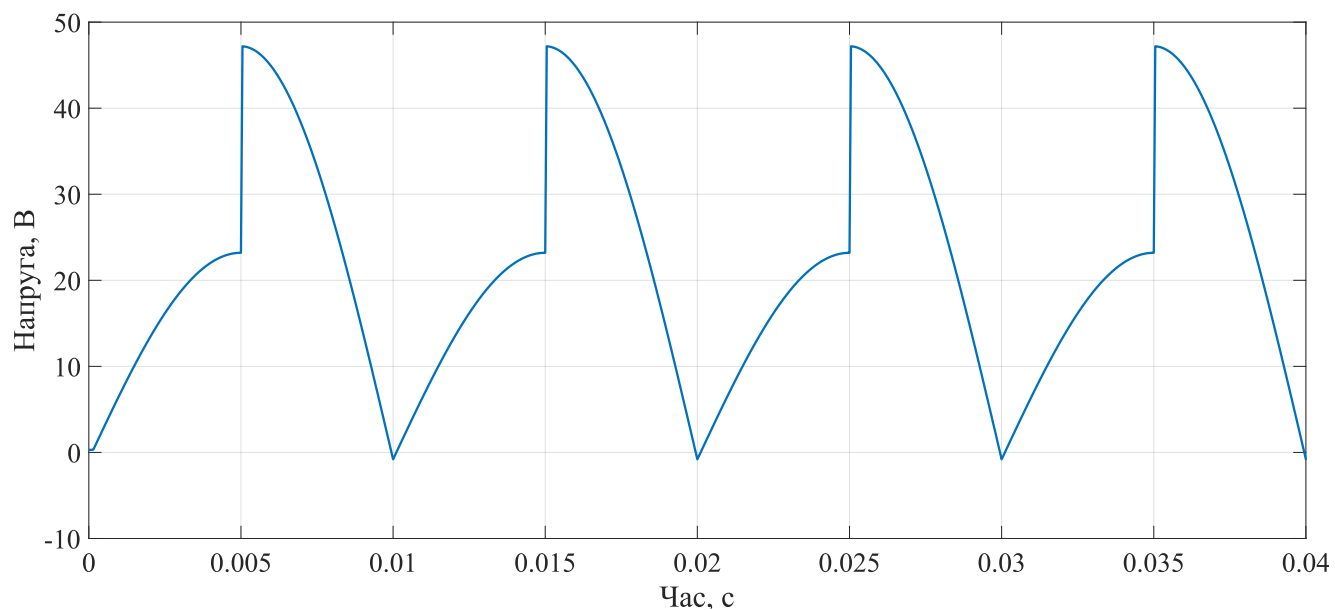


Рис. 90. Вихідний сигнал керованого випрямляча з вольтодобавкою і кутом керування 90

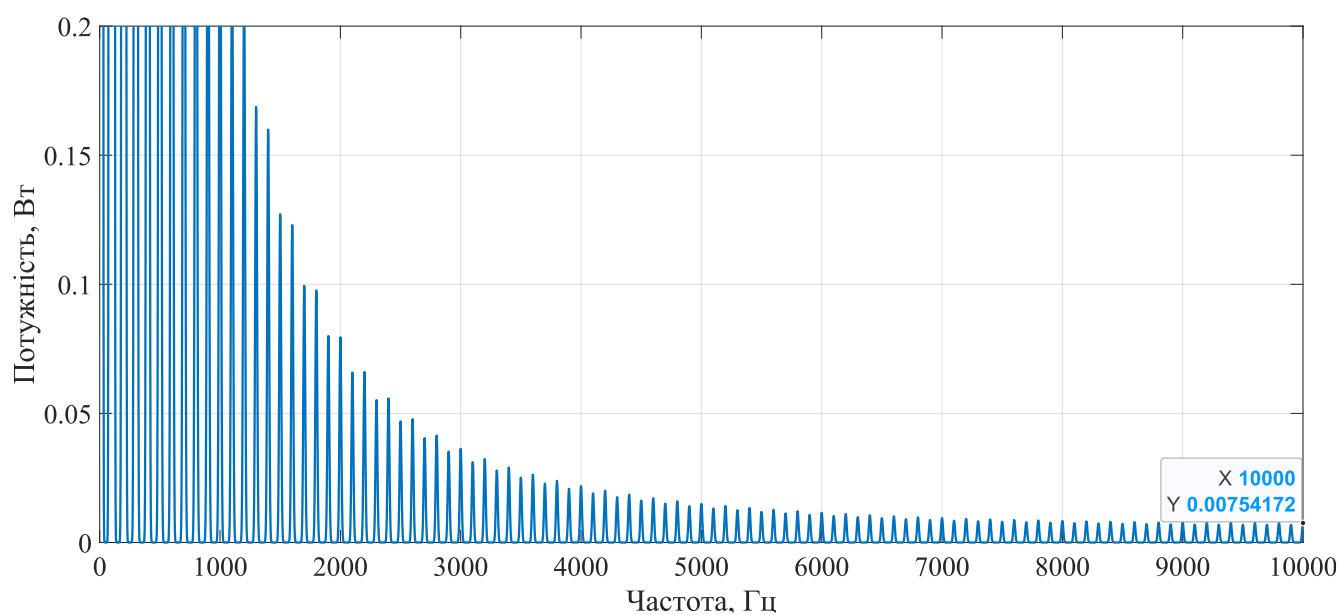


Рис. 91. Спектр потужності керованого випрямляча з вольтодобавкою і кутом керування 90

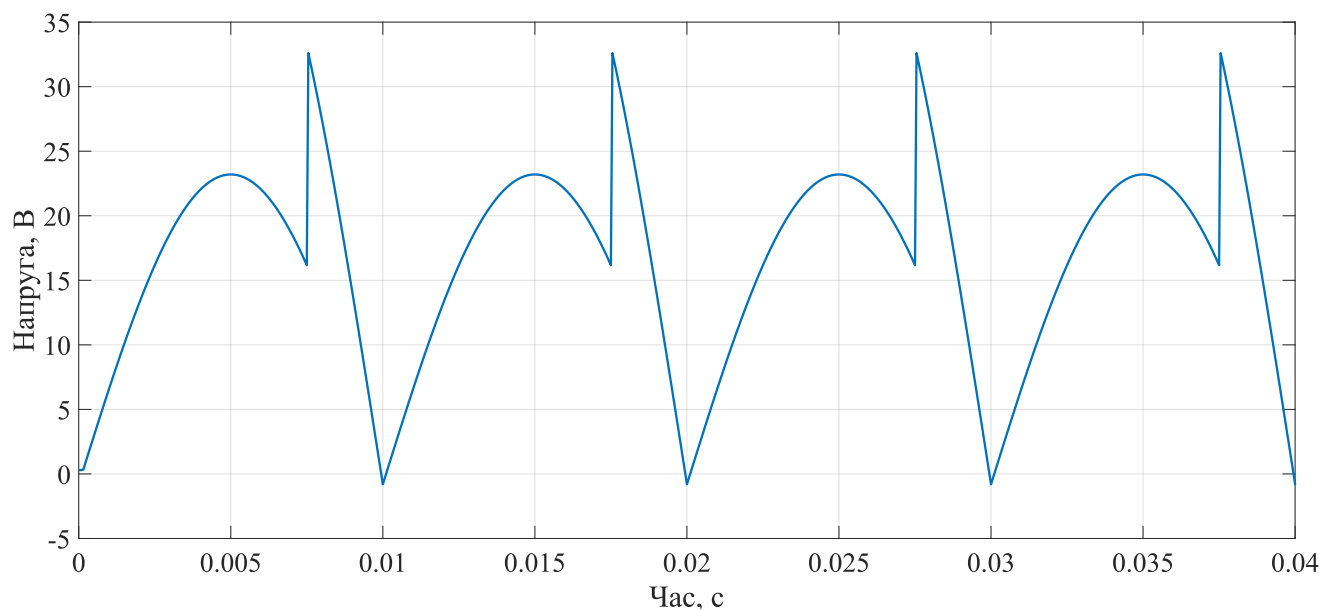


Рис. 92. Вихідний сигнал керованого випрямляча з вольтодобавкою і кутом керування 135

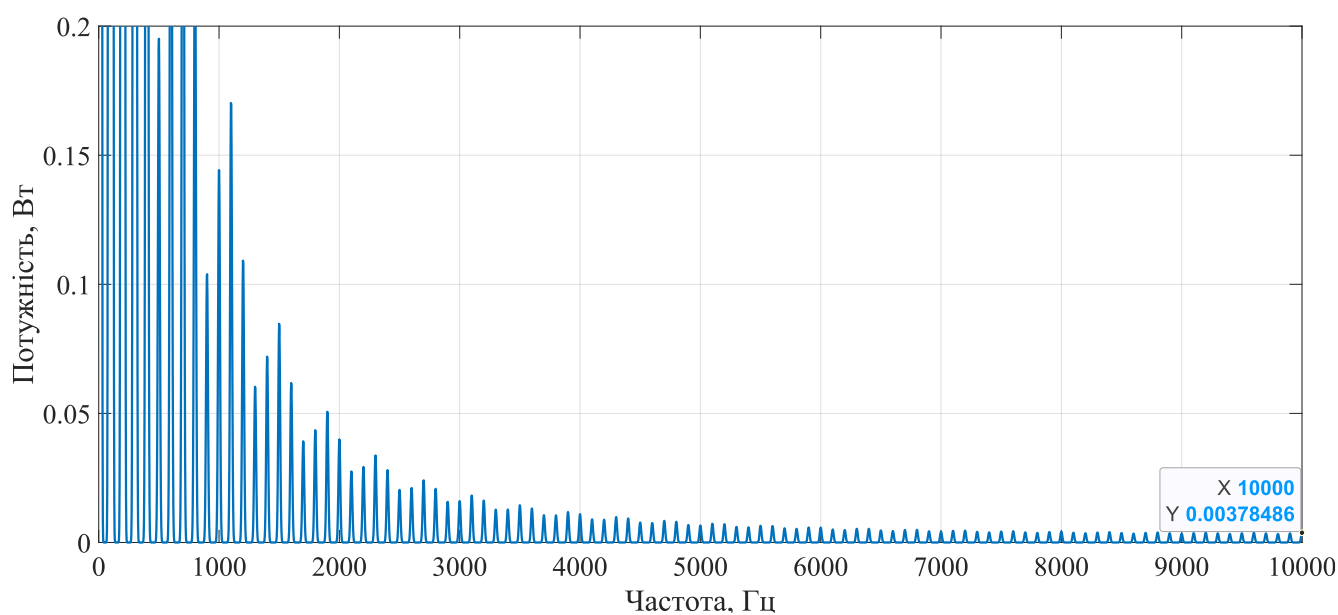


Рис. 93. Спектр потужності керованого випрямляча з вольтодобавкою і кутом керування 135

Унікальна форма вихідного сигналу забезпечує значний розподіл потужностей по частотам, однак основна частина концентрується до частот в 2-3 кГц, після чого стрімко спадає до малих значень із поступовим падінням.

Керований випрямляч з ШІМ

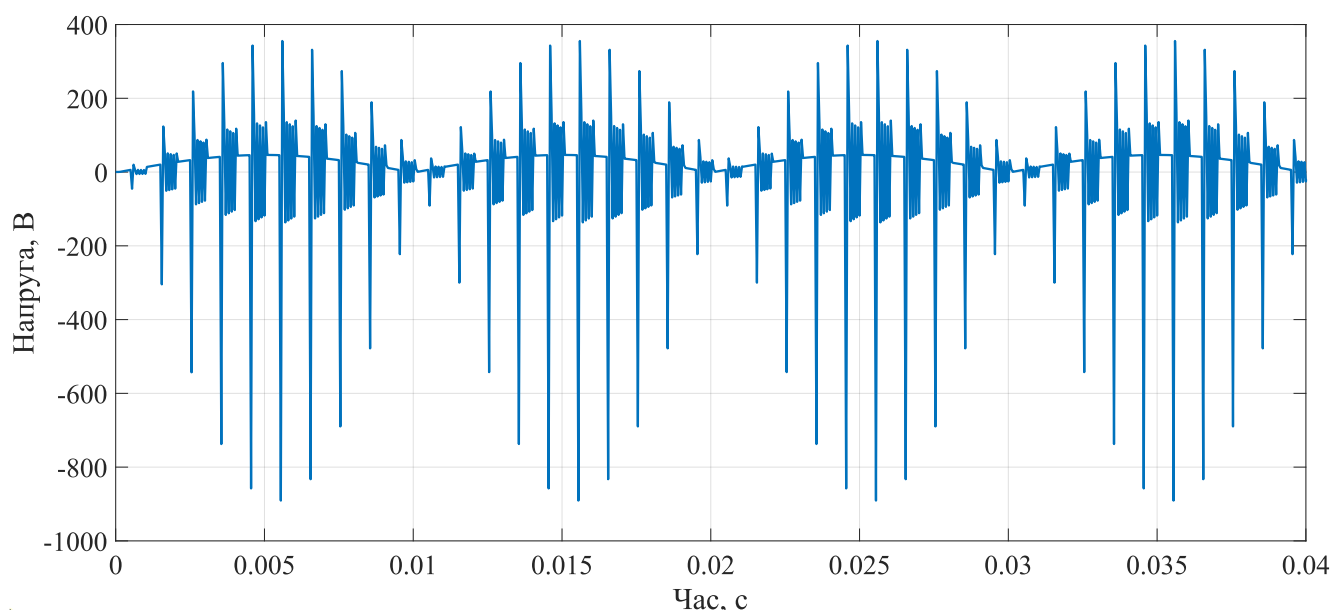


Рис. 94. Вихідний сигнал керованого випрямляча з ШІМ

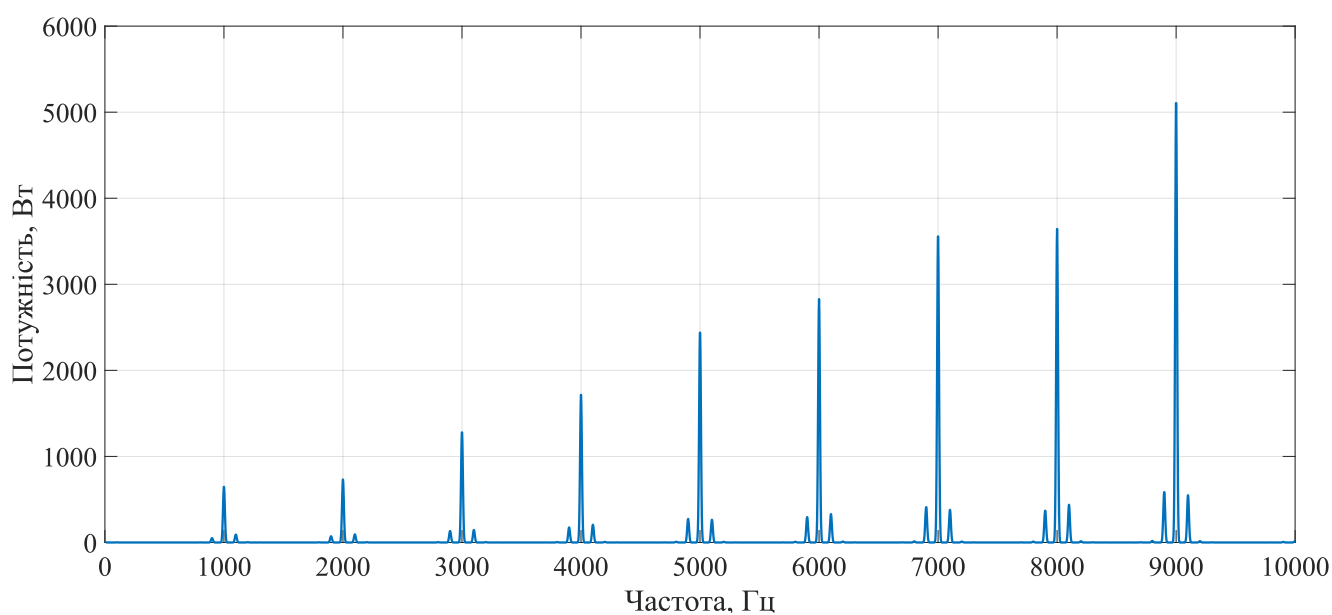


Рис. 95. Вихідний сигнал і спектр потужності керованого випрямляча з ШІМ

Значні пульсації вихідного сигналу формують постійно зростаючий спектр потужностей, що сконцентровано навколо кілогерцових частот. Така картина показує, що ШІМ випрямляч має значну частину своєї потужності концентровану в високочастотному діапазоні.

Спираючись на отримані результати, можливо зробити висновки, щодо значної наявності високих гармонік у спектру сигналу СКЗ, що повинні впливати на роботу системи «станція катодного захисту – ґрунт – трубопровід».

3.4 Вплив індуктивних і ємнісних елементів моделі на роботу системи «СКЗ – ґрунт – трубопровід»

Якщо розглядати окремий відрізок трубопроводу, що захищений окремою станцією катодного захисту (Рис. 96), то схема його заміщення має наступний вигляд.

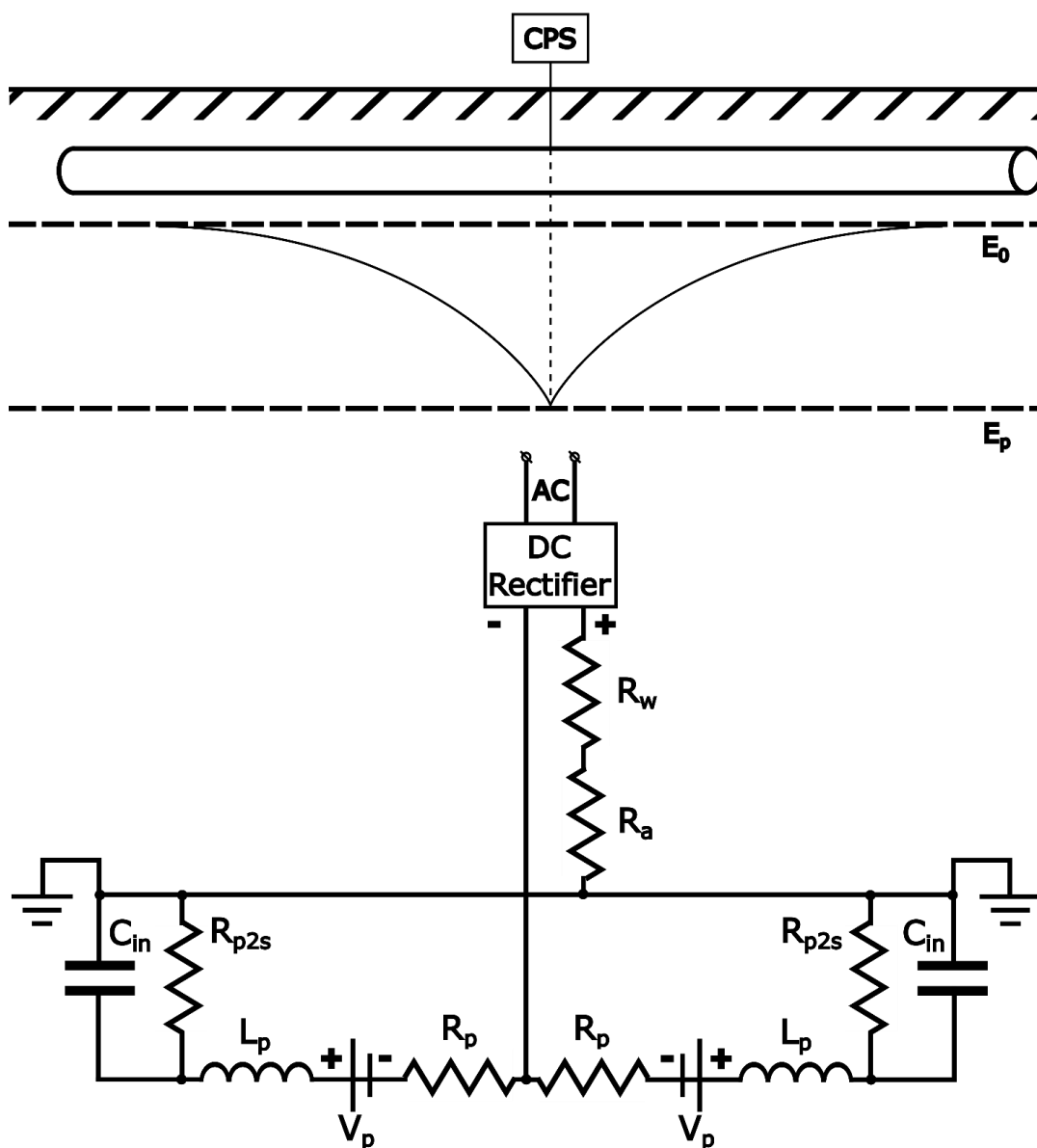


Рис. 96. Підземний сталевий трубопровід і схема його заміщення

Наведена схема дає можливість дослідити вплив різноманітних її елементів на формування потенціалу на трубопроводі. Для визначення впливу реактивних складових на рівень потенціалу моделюється схема заміщення трубопроводу із поступовим додаванням L_p та C_{in} параметрів.

За наявності виключно резистивних складових схема заміщення приймає наступний вигляд.

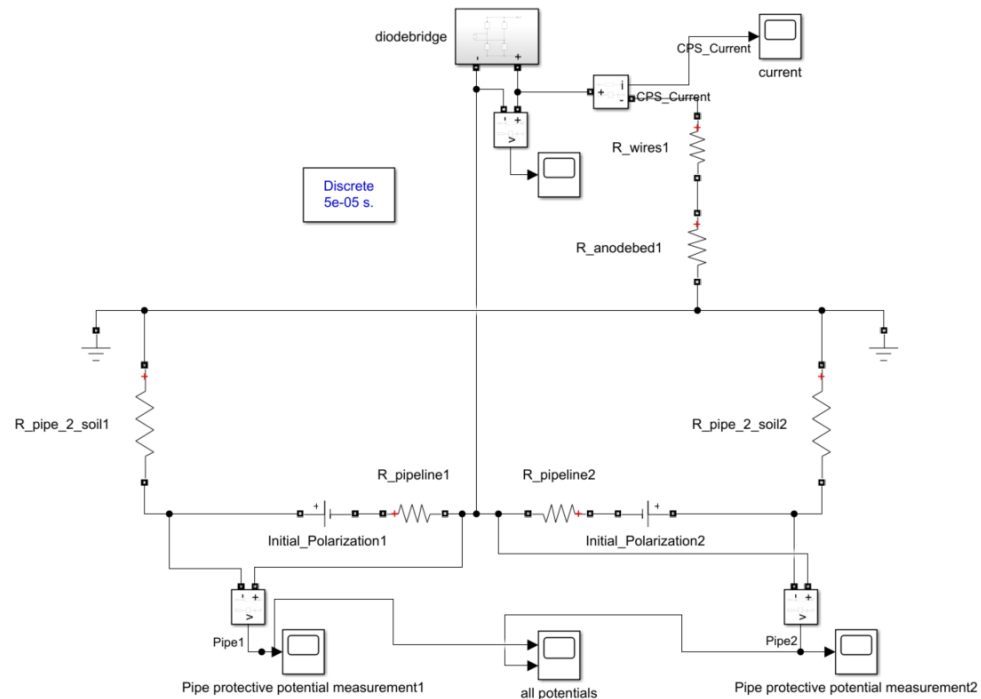


Рис. 97. Модель системи без індуктивних і ємнісних складових

Струм, що споживається станцією катодного захисту:

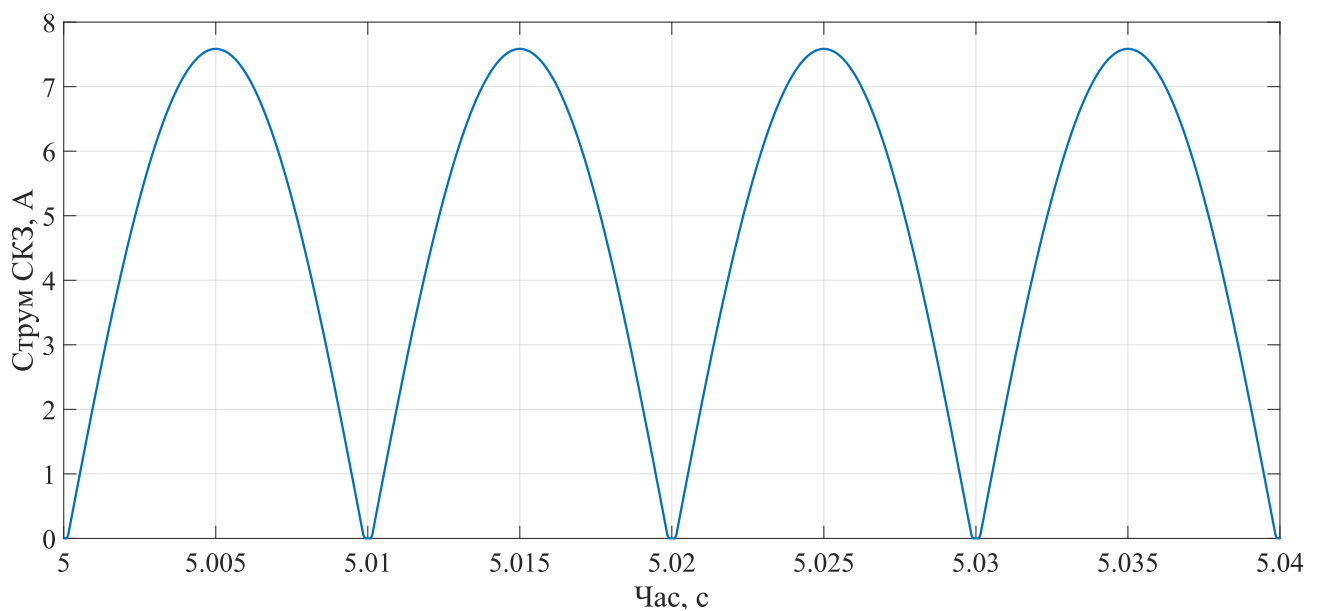


Рис. 98. Струм, що споживається з СКЗ для резистивної моделі

Споживаний струм показує чітку періодичну залежність, із піковим значенням близько 7.58 А і відсутністю будь-якого зсуву за фазою що цілком відповідає очікуванням.

Зміна потенціалу на кожному плечі має наступну форму:

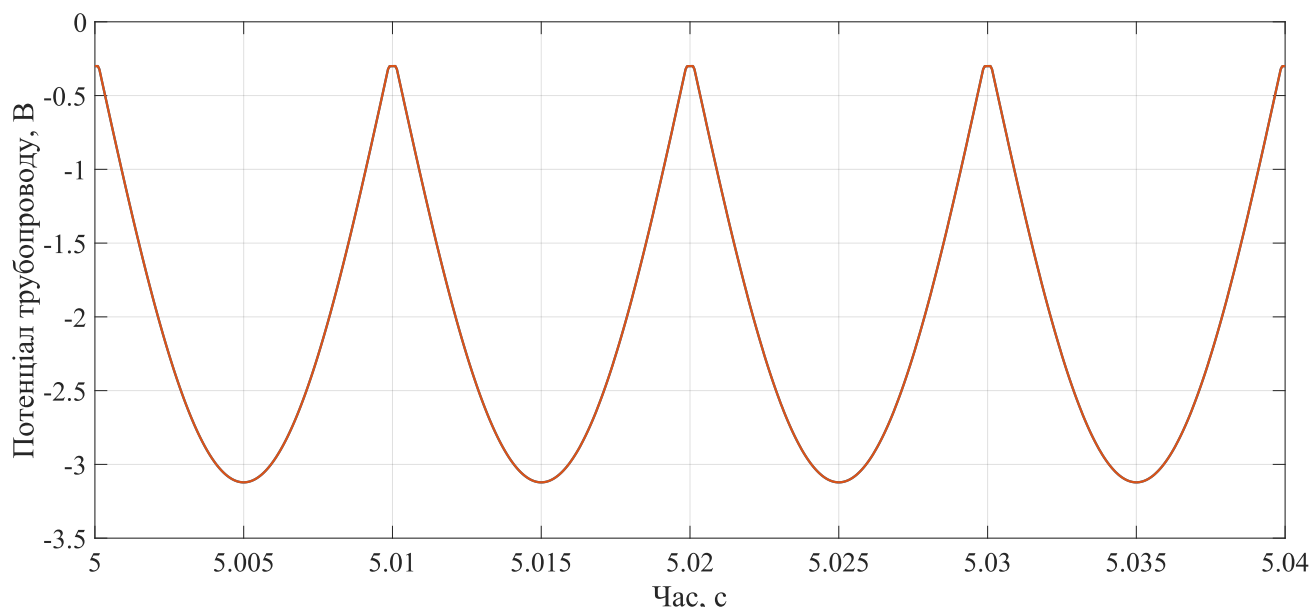


Рис. 99. Потенціал на плечі трубопроводу для резистивної моделі

Графік потенціалу правого і лівого плеча повністю співпадають. Чітко видно періодичність сигналу із мінімальним значенням -3,12 і максимальним -0,3, що відповідає природному потенціалу трубопроводу. Аналогічно до графіка струму немає фазного зсуву.

Якщо приймати до уваги ємкісну складову від ізоляції трубопроводу, схема заміщення модифікується наступним чином.

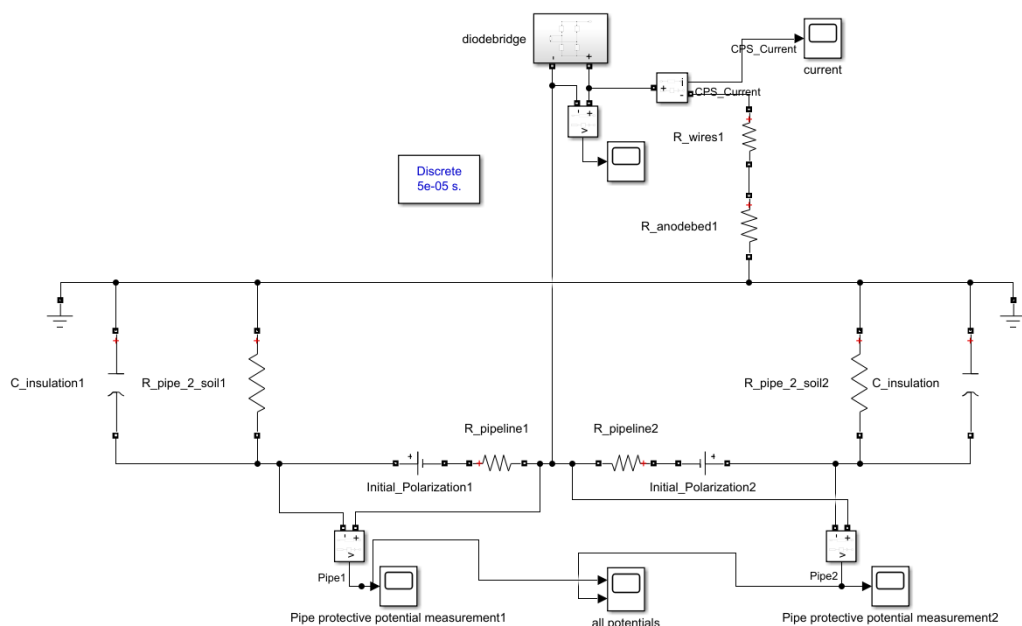


Рис. 100. Модель із ємнісною складовою

Струм, що споживається, максимальне значення в 7,59 А, і має наступний вигляд:

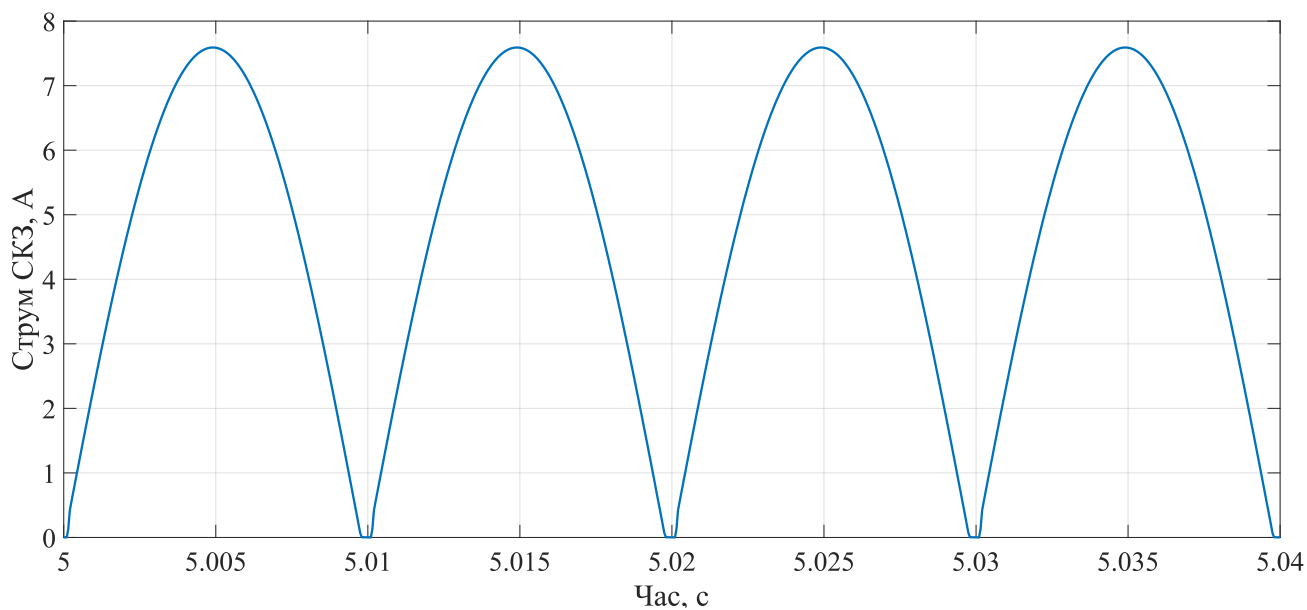


Рис. 101. Струм, що споживається з СКЗ для моделі із ємнісною складовою

Потенціал на плечах трубопроводу коливається в межах від 3,12 і -0,3 В, і демонструє наступну залежність від часу:

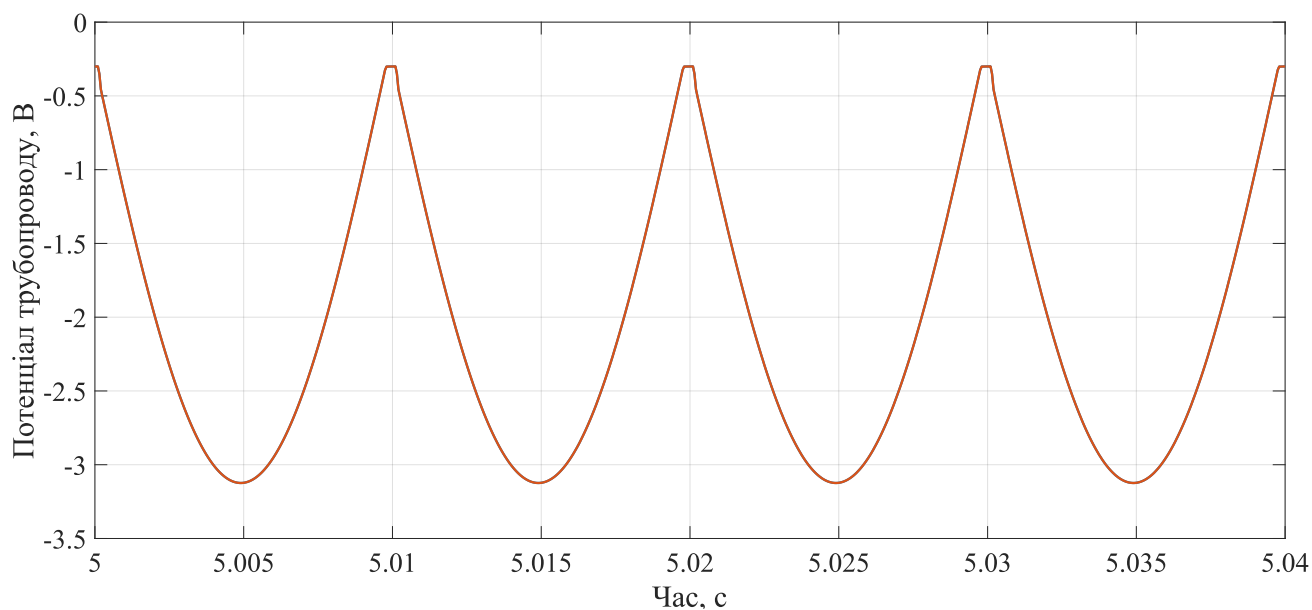


Рис. 102. Потенціал на плечі трубопроводу для моделі із ємнісною складовою

Обидва графіки демонструють незначну відмінність від попереднього випадку. Майже непомітний ріст амплітуди споживаного струму, а також не значне зміщення за фазою потенціалів.

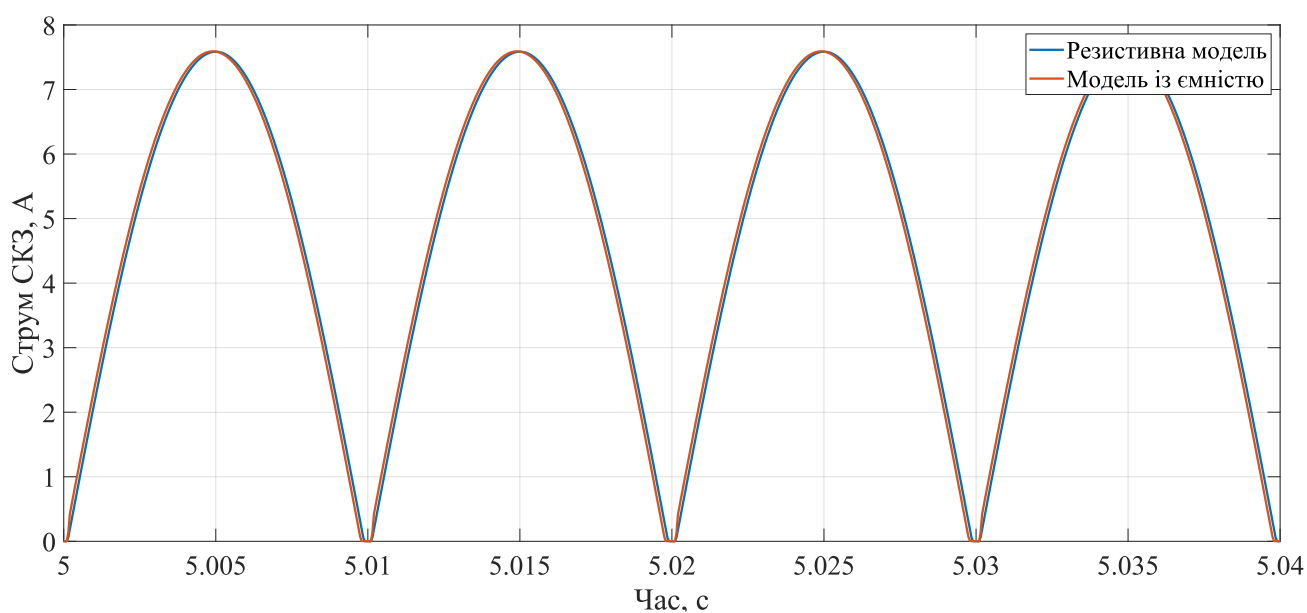


Рис. 103. Порівняння струмів резистивної моделі і моделі із ємнісною складовою

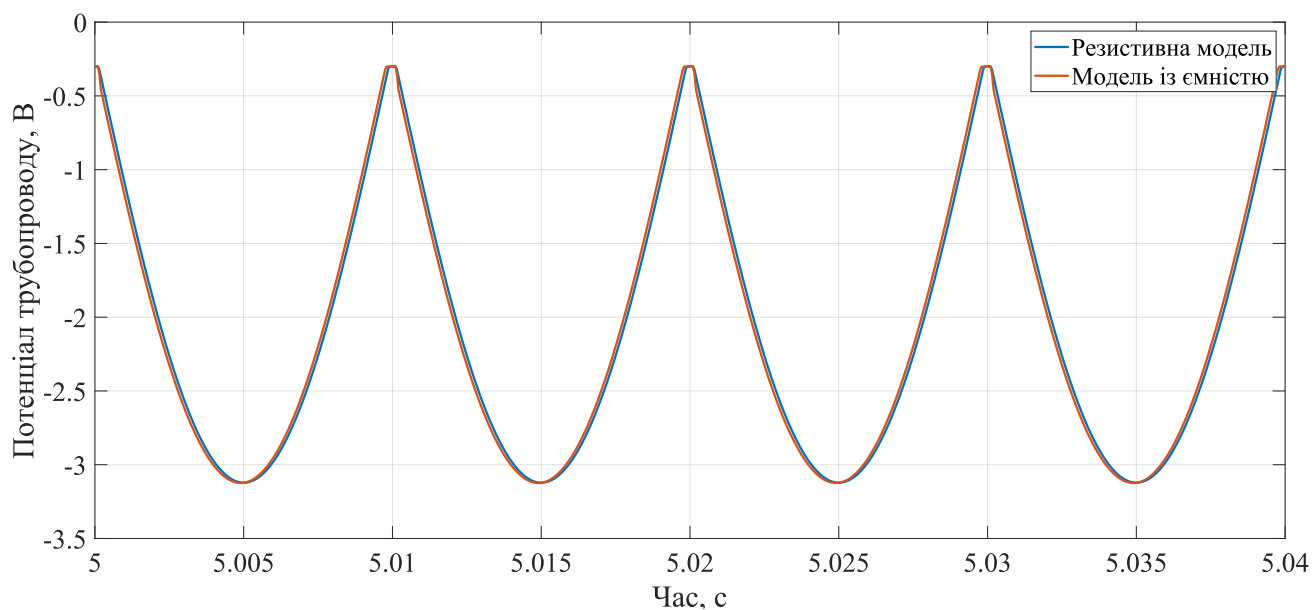


Рис. 104. Порівняння потенціалів резистивної моделі і моделі із ємнісною складовою

За наявності індуктивної і ємнісної складових, схема заміщення приймає свій остаточний вид.

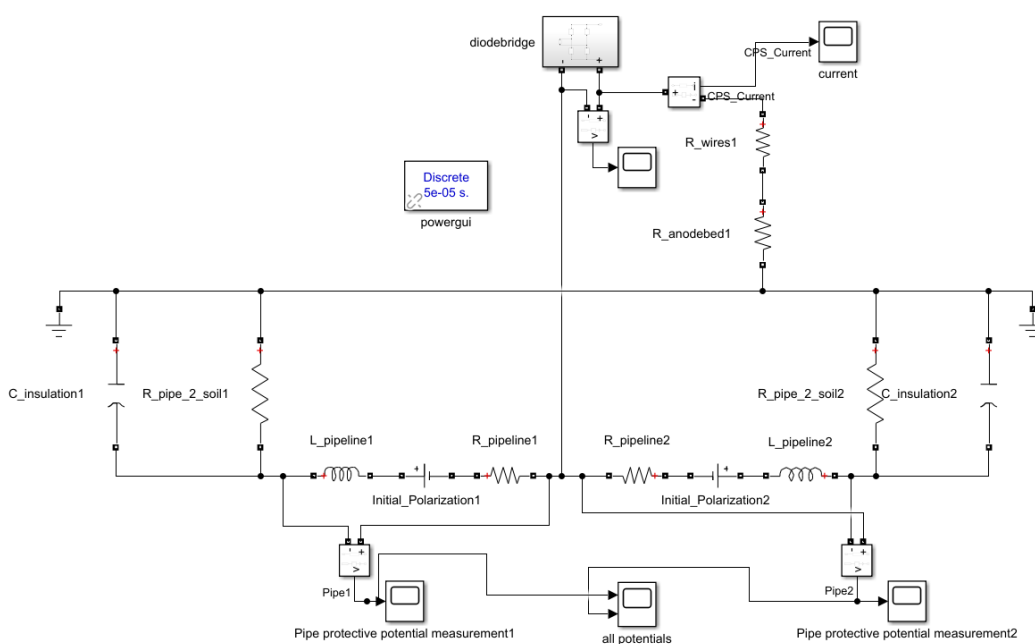


Рис. 105. Повна модель трубопроводу

Саме в такій конфігурації спостерігається найбільша відмінність від виключно резистивної схеми заміщення.

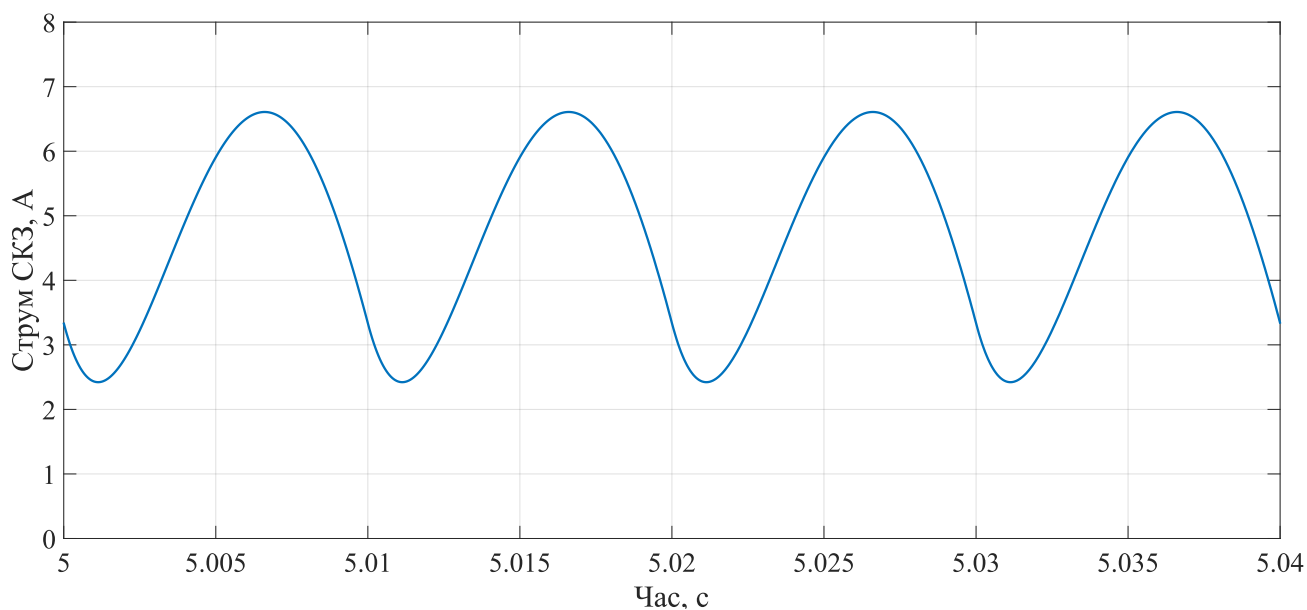


Рис. 106. Струм, що споживається з СКЗ для повної моделі

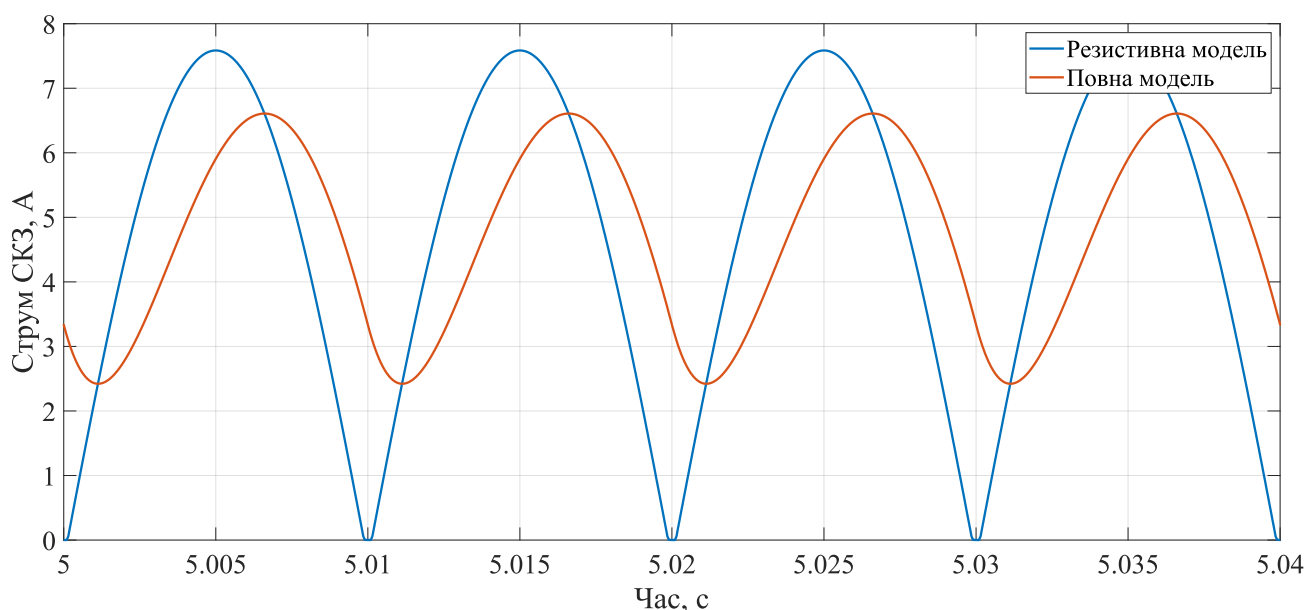


Рис. 107. Порівняння струмів резистивної і повної моделі

У даному випадку поява індуктивності в схемі заміщення демонструє значний вплив на струм, що споживається із станції катодного захисту. Індуктивна складова під час відкритого стану силових ключів починає накопичувати енергію. Коли струм починає зменшуватись, наводиться ЕРС самоіндукції, що спрямована згідно із струмом. Таким чином індуктивність відіграє роль фільтру, і сповільнює наростання і спадання струму, а також призводить до зміщення амплітудного значення струму. В результаті чого напруга змінюється швидше ніж струм. Це

явище називається ефектом затягування струму [134]. Як наслідок миттєві значення струму перестають сягати нульового значення, як це відбувалося при суто активному навантаженні, а отже струм стає безперервним. Крім того чітко спостерігається фазовий зсув, та падіння максимального амплітудного значення до 6,61 А, і ріст мінімального значення до 2,42 А. В результаті затягування струму відбувається затримка закриття силових ключів, і як наслідок зменшується значення середньо випрямленої напруги, що і призводить до появи позитивних зон на виході випрямляча.

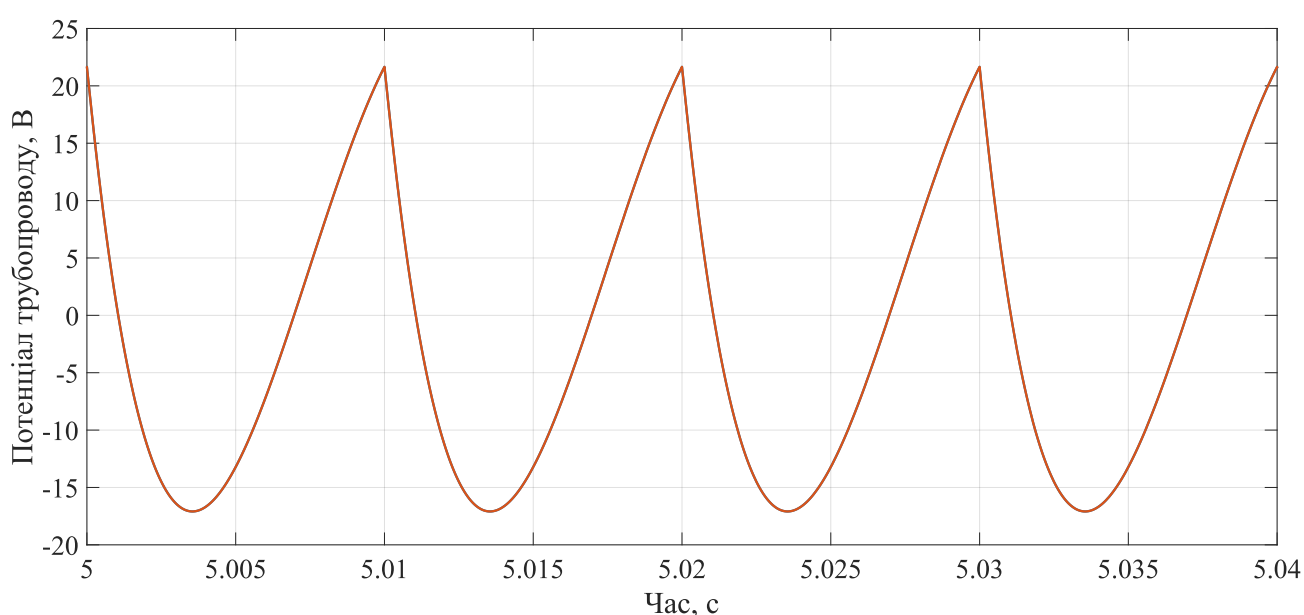


Рис. 108. Потенціал на плечі для повної моделі

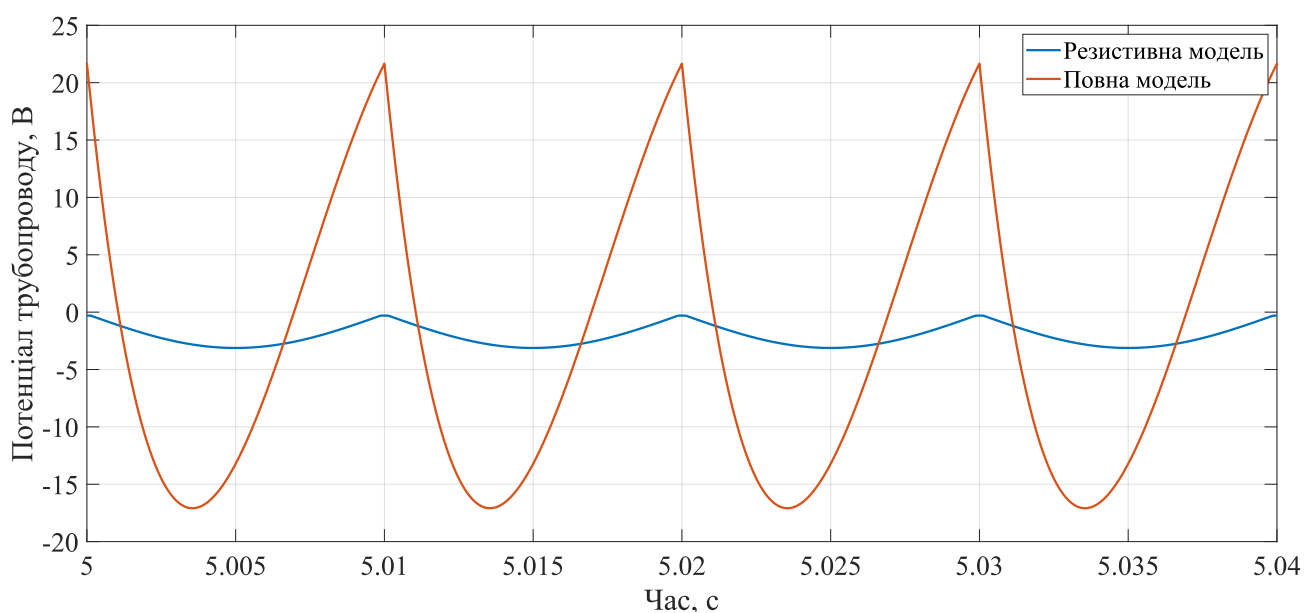


Рис. 109. Порівняння потенціалів резистивної і повної моделі

На графіку зміни потенціалу з'являються ділянки із позитивним потенціалом, спричинені затримкою закриття ключів, а його мінімальне і максимальне значення збільшилися в рази до рівнів -17,1 В і 21,66 В. Це чітко показує, що приймання до уваги впливу індуктивної складової може суттєво змінювати картину, що спостерігається при дослідженні схеми заміщення підземного сталевих трубопроводу. При цьому середній потенціал дорівнює -2,05 В, що відповідає достатньому рівню захищеності трубопроводу, оскільки знаходиться в межах від -0,85 до -2,5 В, відповідно до вимог нормативної документації. Саме це середнє значення і вимірюється переважною більшістю контрольних приладів під час відповідних вимірювань, спрямованих на перевірку стану і якості катодного захисту підземних сталевих трубопроводів. В результаті подібний випадок сприймається як штатний і трубопровід під впливом подібного потенціалу вважається захищеним.

Зони позитивного потенціалу складають 41% від загального часу, що в довгостроковій перспективі перетворюється на 12,3 дні на місяць і 149,7 днів на рік позитивного потенціалу на трубопроводі, який сприяє руйнуванню трубопроводу. Заміна стандартного мостового випрямляча на керований на основі тиристорних ключів здається вдалою ідеєю з точки зору забезпечення раціонального споживання електричної енергії за рахунок регулювання вихідної напруги станції катодного захисту. У випадку кута керування тиристорами 45 градусів струм, що споживається станцією має наступний вигляд:

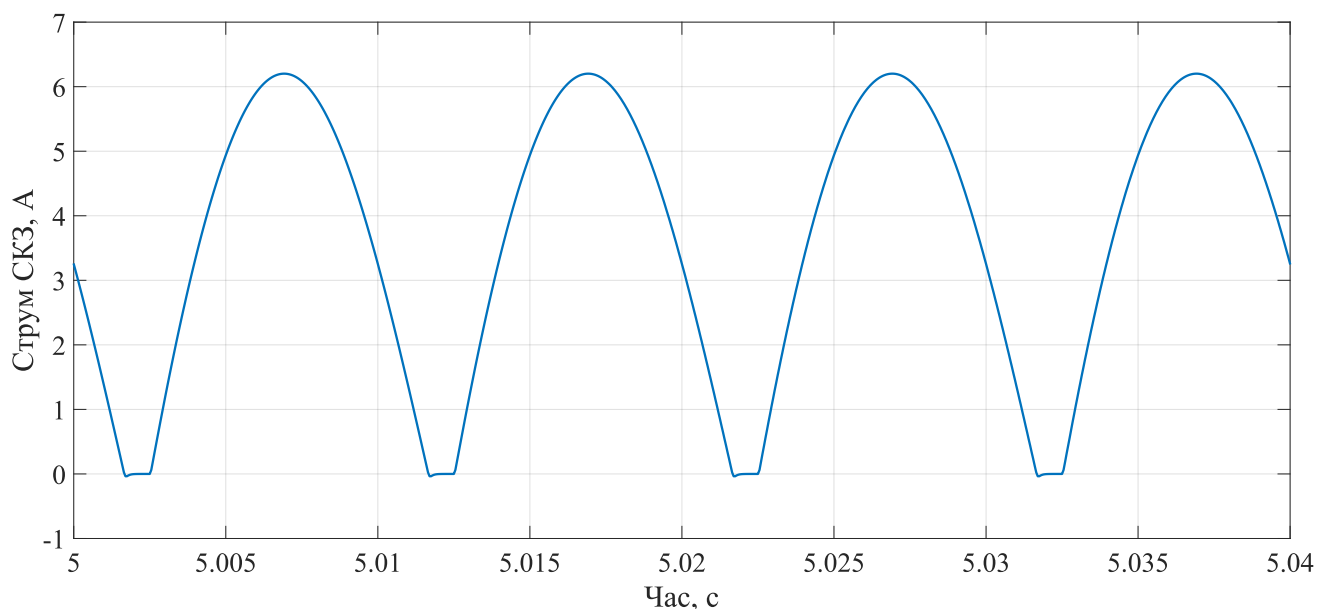


Рис. 110. Струм, що споживається з СКЗ для тиристорного випрямляча з кутом керування 45

Чітко видно зміщення струму по фазі, а також викривлення залежності близько нульових значень. Таким чином максимальне значення струму становить 6,2 А, а мінімальне -0,03 А, що показує появу малого коротко строкового зворотного струму в системі.

Потенціал на кожній гілці трубопроводу:

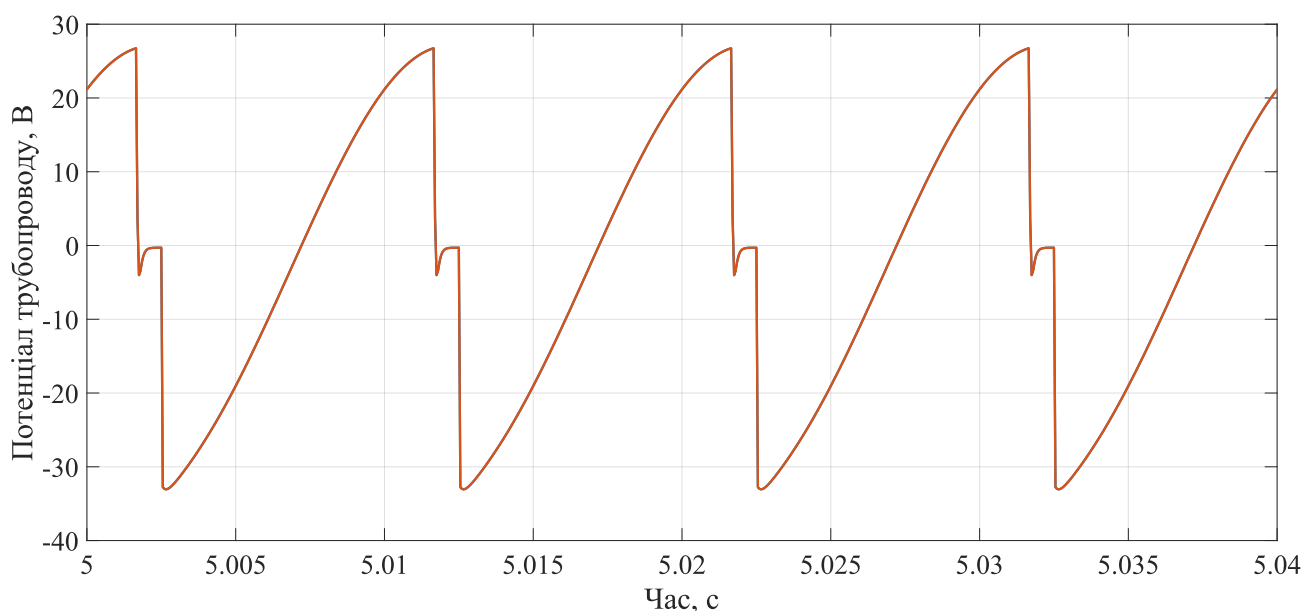


Рис. 111. Потенціал на плечі для тиристорного випрямляча з кутом керування 45

Графік потенціалу показує, що картина, яку ми бачили у випадку мостового випрямляча у попередньому випадку, стає більш чітко вираженою, що проявляється в значній наявності зон позитивного потенціалу. Середнє значення потенціалу дорівнює приблизно $-1,66$ В, що підпадає під необхідні умови діапазону захищеності (від $-0,85$ до $-2,5$ В).

Однак на графіку чітко видно, що майже 45% усього часу роботи припадає саме на зони позитивного потенціалу. Це означає, що 13,5 днів на місяць, або 164,3 дні на рік, на трубопровід приходить позитивний потенціал, чого зазвичай більш ніж достатньо для спричинення значної шкоди цілісності трубопроводу і як наслідок скорочення його експлуатаційного терміну. Крім того майже 2 % часу (0,6 дня в місяць і 7 днів на рік) потенціал представляє собою виключно природний потенціал сталі, тобто трубопровід залишається незахищеним.

Для кута керування 90 градусів:

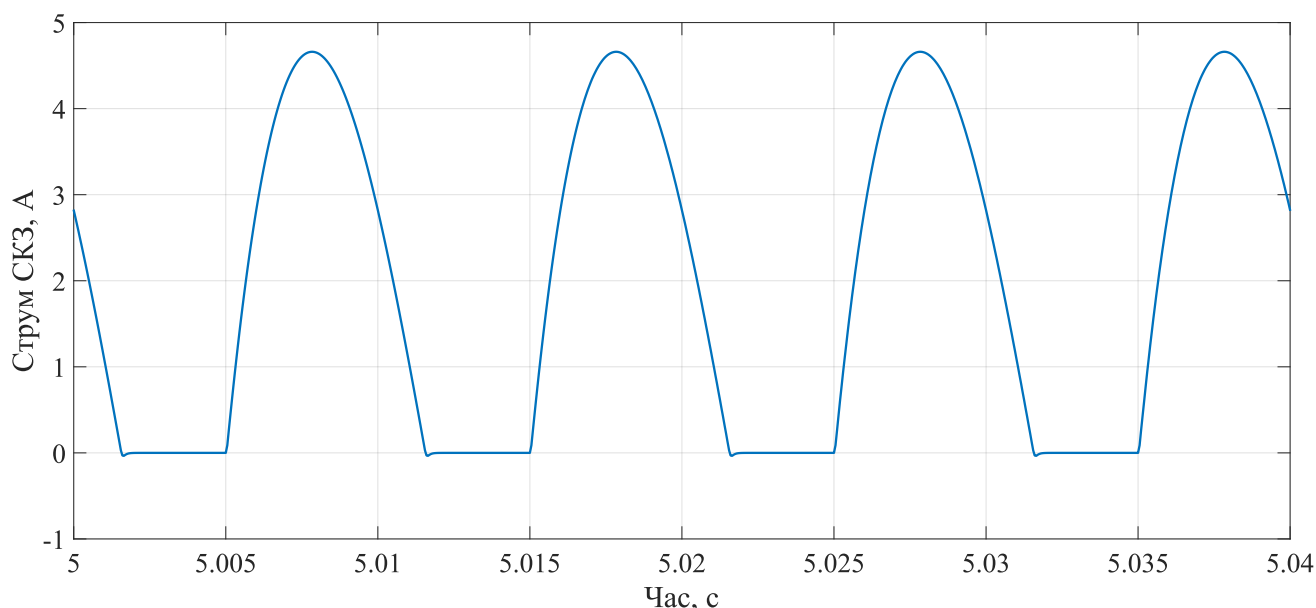


Рис. 112. Струм, що споживається з СКЗ для тиристорного випрямляча з кутом керування 90

Максимальне значення струму зменшилось до $4,66$ А, збільшився безструмовий діапазон, а мінімальне значення залишилось майже незмінним – $0,03$ А.

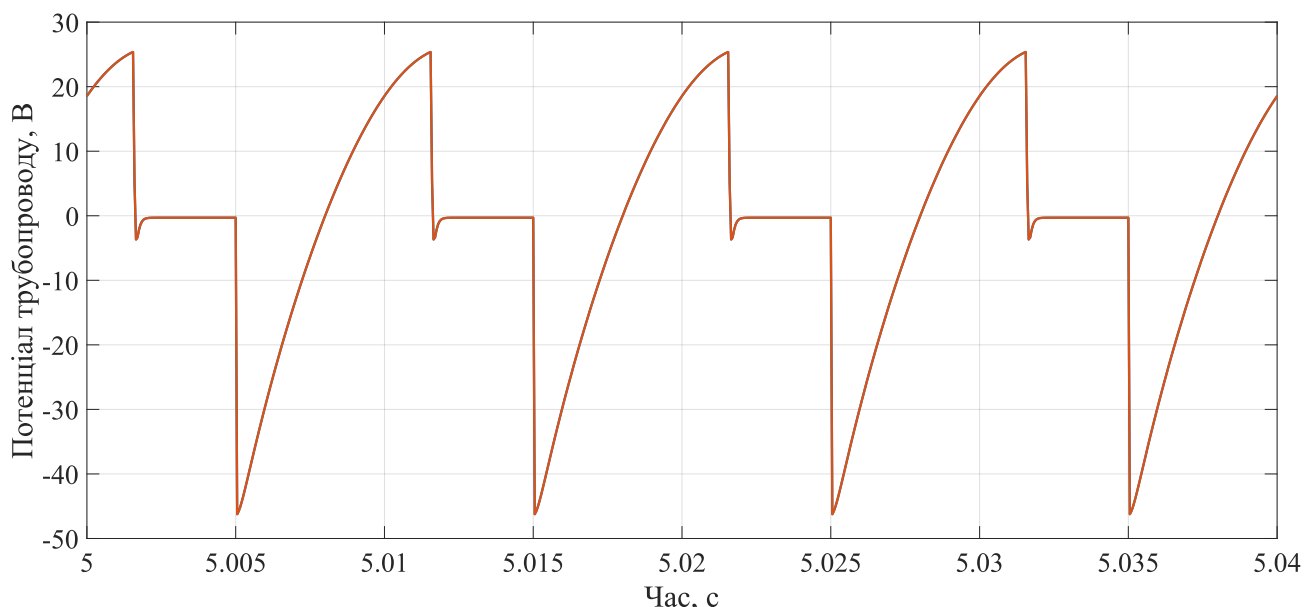


Рис. 113. Потенціал на плечі для тиристорного випрямляча з кутом керування 90

Середнє значення потенціалу дорівнює -1.04 В, що відповідає критерію захищеності від -0,85 до -2,5. При цьому позитивні зони складають 36% робочого часу (10,8 днів в місяць і 131,4 днів на рік). А 28% усього часу (8,4 днів в місяць і 102,2 днів на рік) відповідає відсутності захисного потенціалу на трубопроводі (виключно природній потенціал).

Для кута керування 135 градусів:

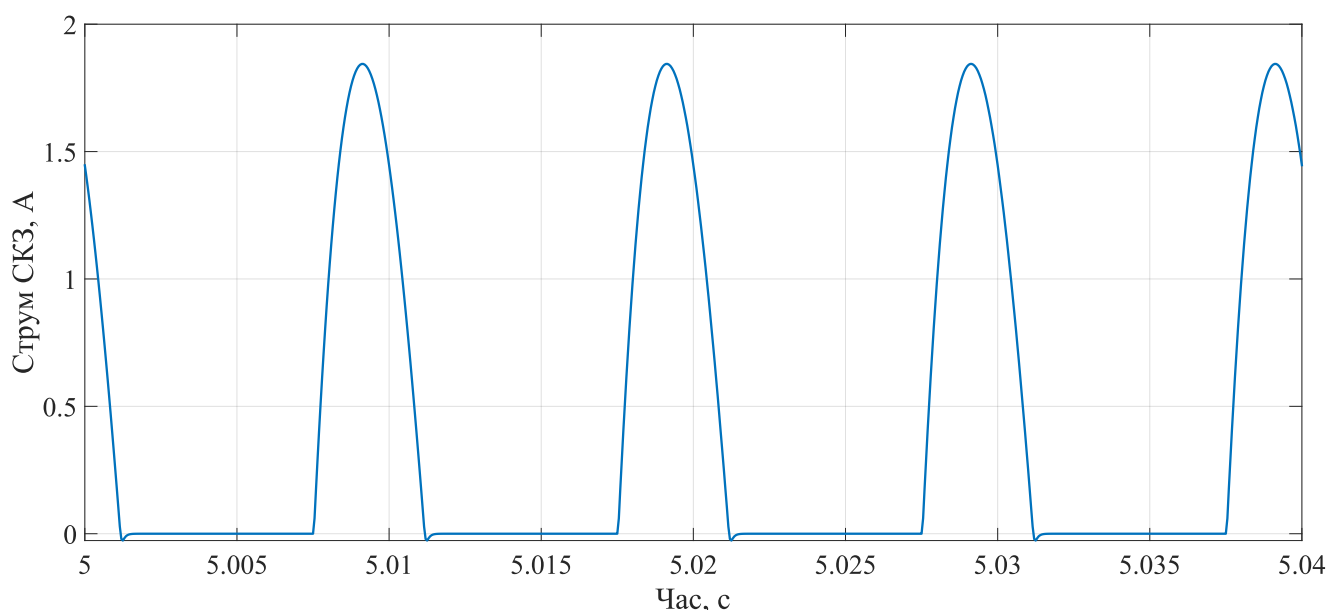


Рис. 114. Струм, що споживається з СКЗ для тиристорного випрямляча з кутом керування 135

Максимальне значення струму зазнало значного падіння і становить 1,84 А, а мінімальне трохи зросло до -0,028.

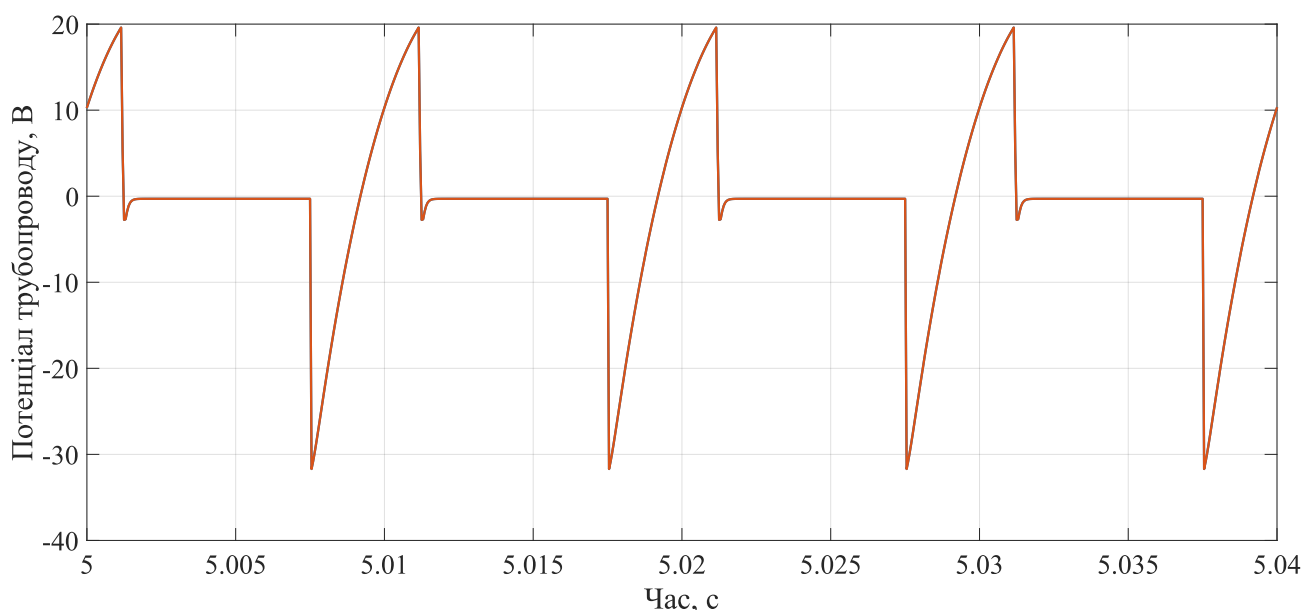


Рис. 115. Потенціал на плечі для тиристорного випрямляча з кутом керування 135

Середнє значення потенціалу дорівнює -0,46 В, що не задовольняє жодним вимогам з електрохімічного захисту. При цьому позитивні зони складають 20% робочого часу (6 днів в місяць і 73 днів на рік). А 57% усього часу (17,1 днів в місяць і 208 днів на рік) трубопровід є незахищеним.

У випадку керованого випрямляча з ШІМ, що розглядався в розділі 2 модель дає наступні залежності:

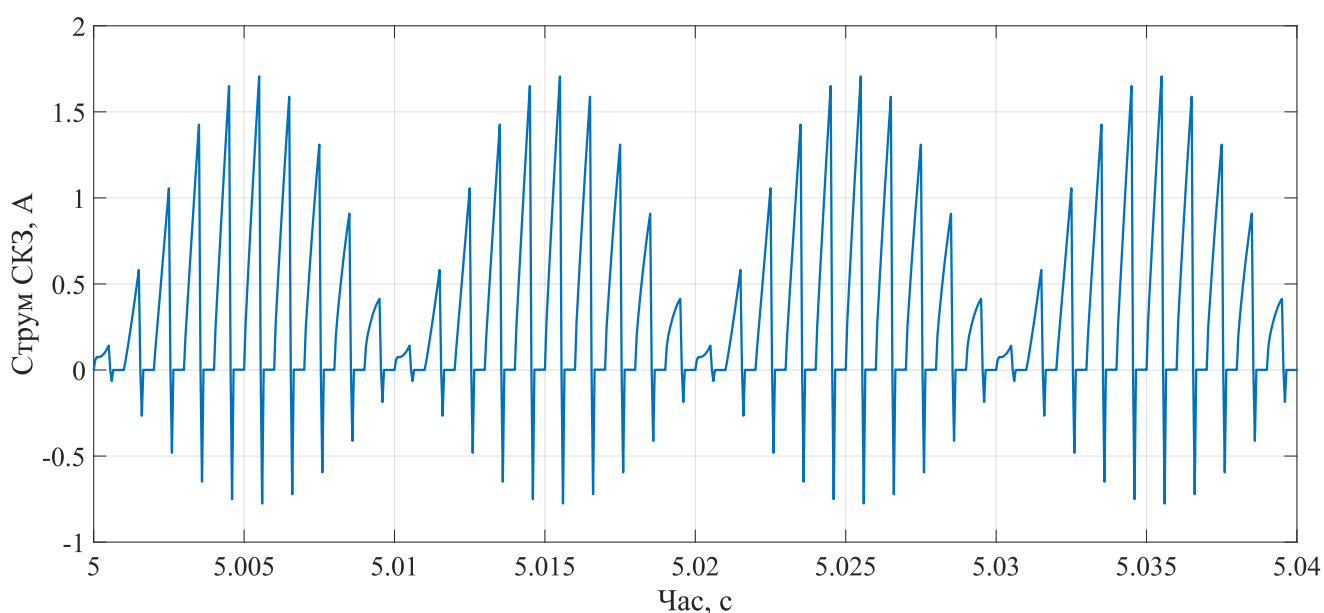


Рис. 116. Струм, що споживається з СКЗ для транзисторного випрямляча

Струм показує коливання між значеннями в 1,7 А і -0,77 А в максимумі в мінімумі відповідно.

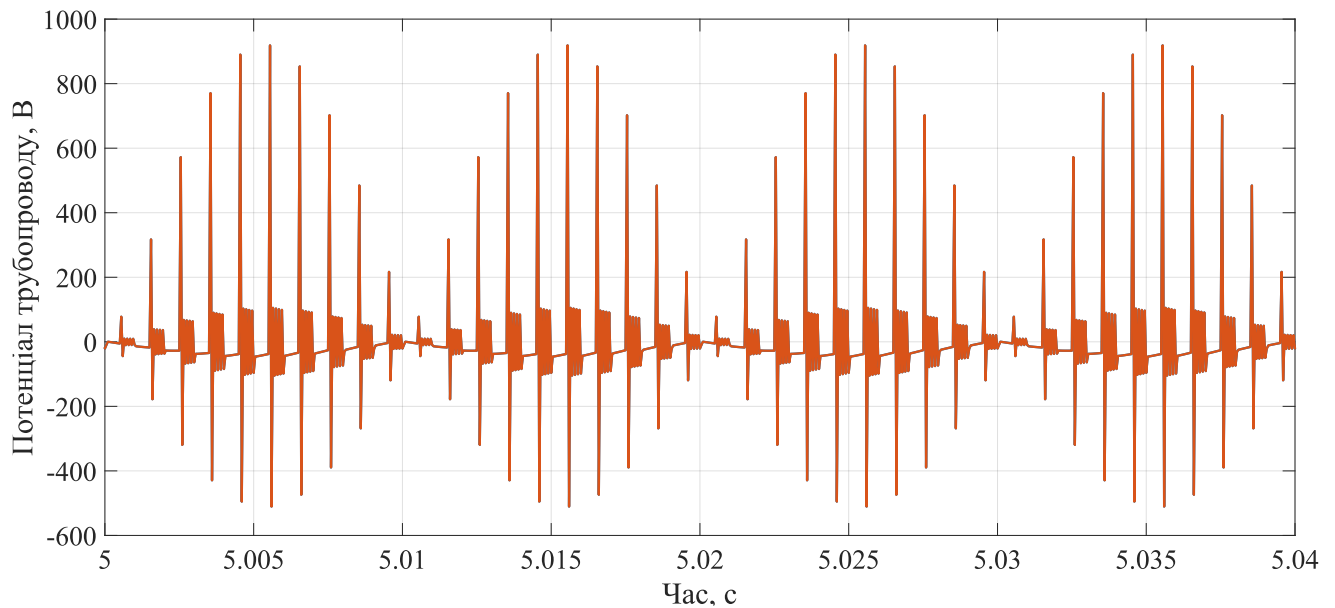


Рис. 117. Потенціал на плечі для транзисторного випрямляча

Розподіл потенціалу показує значні стрибки, які можуть сягати 918,6 В в максимумі і -510,6 В в мінімумі. При цьому середнє значення становить -0,41 В, що не задовольняє умов мінімального захисту. Хоча, загальний відсоток позитивних значень складає 25%, що еквівалентне 7,5 днів в місяць і 91,3 днів на рік.

В результаті порівняння роботи різних схемотехнічних виконань випрямлячів представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Порівняння роботи різних схем випрямлячів

	Діодний випрямляч	Тиристорний випрямляч			Транзисторний випрямляч
		45°	90°	135°	
Мін. струм СКЗ, А	2,42	-0,03	-0,03	-0,03	-0,77
Макс. струм СКЗ, А	6,61	6,2	4,66	1,84	1,7
Мін. миттєве значення потенціалу, В	-17,1	-33,05	-46,24	-31,7	-510,62
Макс. миттєве значення потенціалу, В	21,66	26,74	25,38	19,6	918,65
Середнє значення потенціалу, В	-2,05	-1,66	-1,04	-0,46	-0,41

3.5 Робота транзисторного випрямляча із ШІМ за різного стану ізоляції відрізка газопроводу

Розглянемо роботу випрямляча з ШІМ, який має найскладнішу форму вихідного сигналу серед схем випрямлячів, що були наведені в розділі 3.3, на різні варіанти схеми заміщення, яка описує різних стан ізоляції досліджуваного відрізка. Одночасно, зацентруємо увагу на визначені величин струмів, що протікають між анодом станції катодного захисту і підземним сталевим трубопроводом, через навколишнє середовище та ізоляцію. У випадку пошкодженої ізоляції:

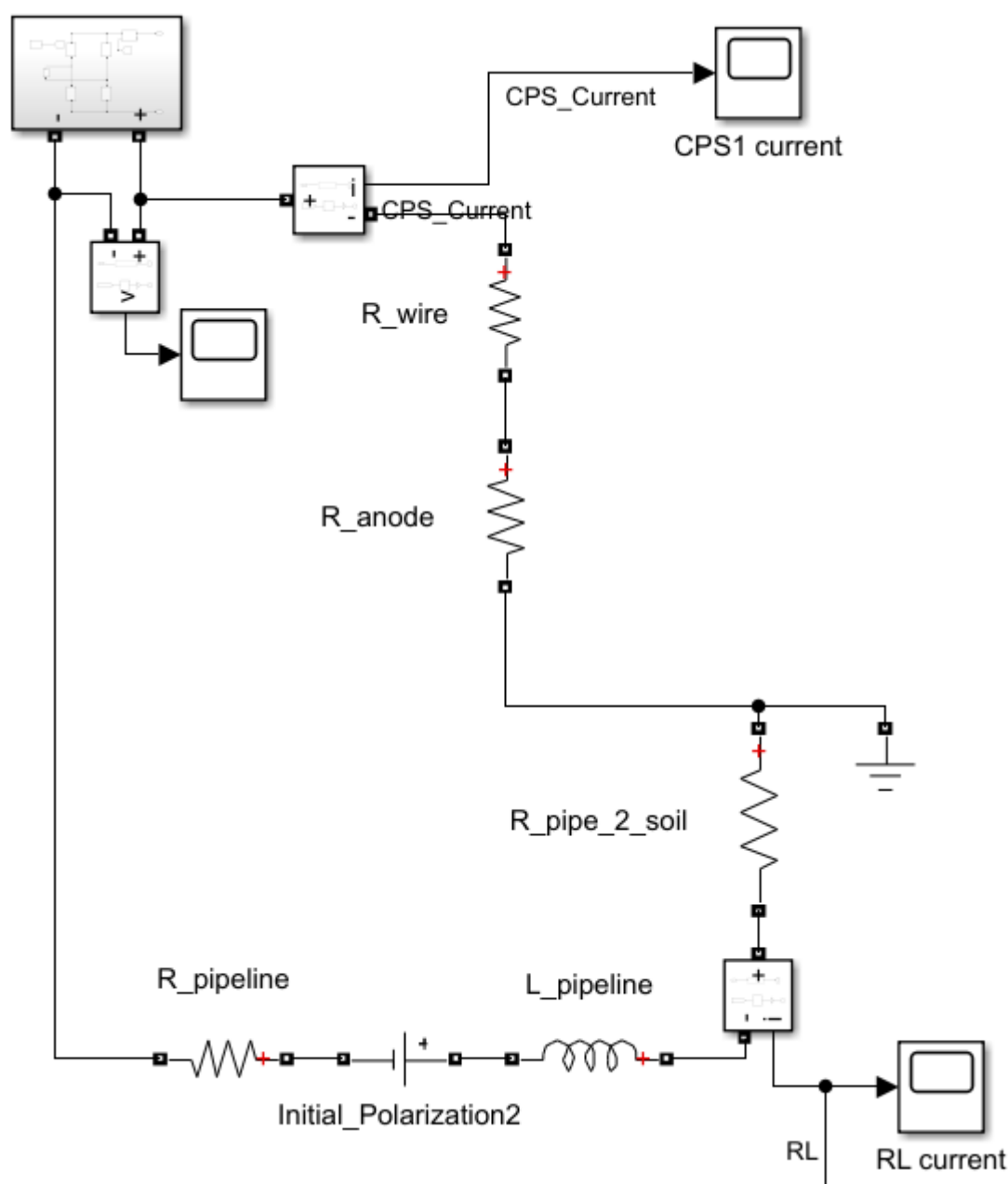


Рис. 118. Модель системи без врахування ємності ізоляції

Наведена схема не враховує ємність ізоляції, відповідно весь струм від СКЗ проходить по послідовно підключеним опорам кабелю, аноду, перехідному опору трубопровід – земля, індуктивності трубопроводу та його опору.

Відповідно, для випрямляча із ШІМ, що підключений в якості джерела постійної напруги вихідний сигнал має наступну форму:

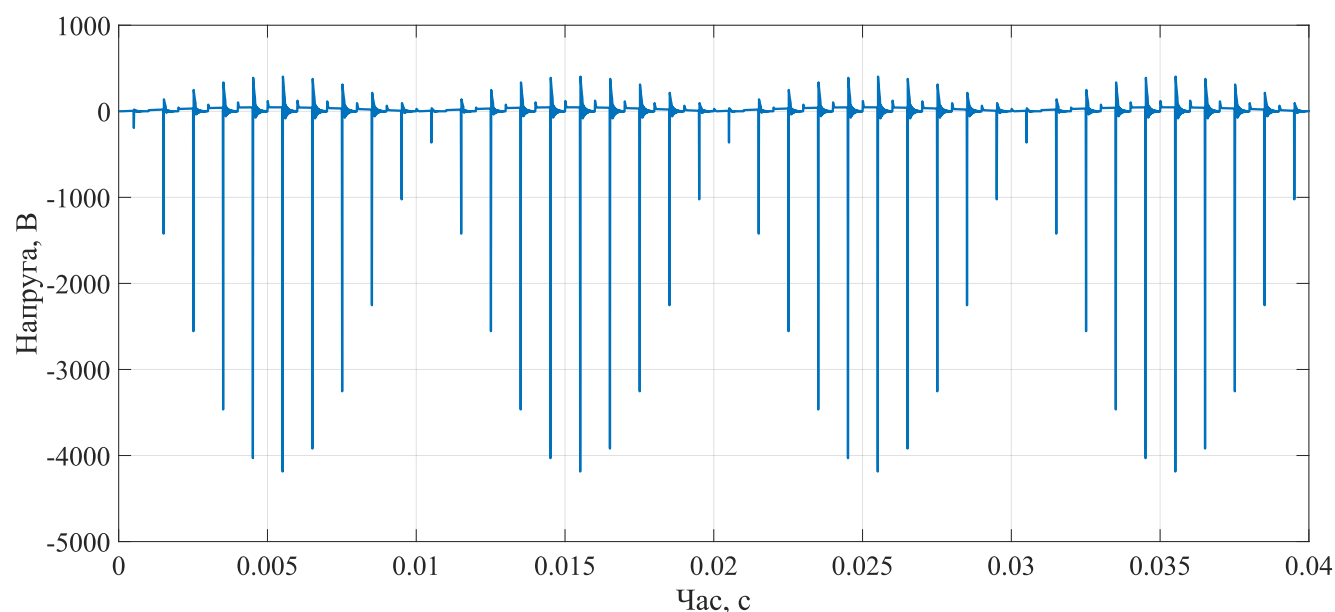


Рис. 119. Вихідний сигнал СКЗ із транзисторним випрямлячем, що працює на схему заміщення без ємності

Спектр розподілу потужності за частотою наведеного сигналу:

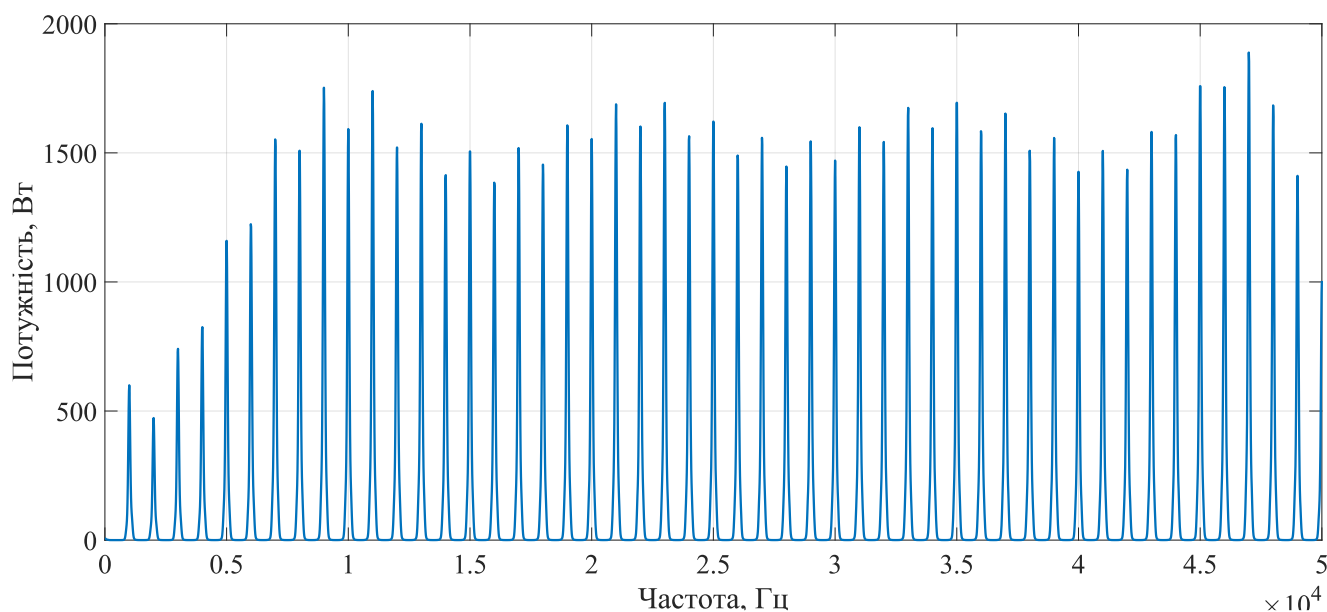


Рис. 120. Спектр вихідного сигналу СКЗ із транзисторним випрямлячем, що працює на схему заміщення без ємності

Отримаємо значно розподілену за частотою потужність, більша частина якої знаходиться в високо частотному діапазоні.

З іншого боку розглянемо схему заміщення, що приймає до уваги не тільки перехідний опір трубопровід – земля, а і власну ємність ізоляції.

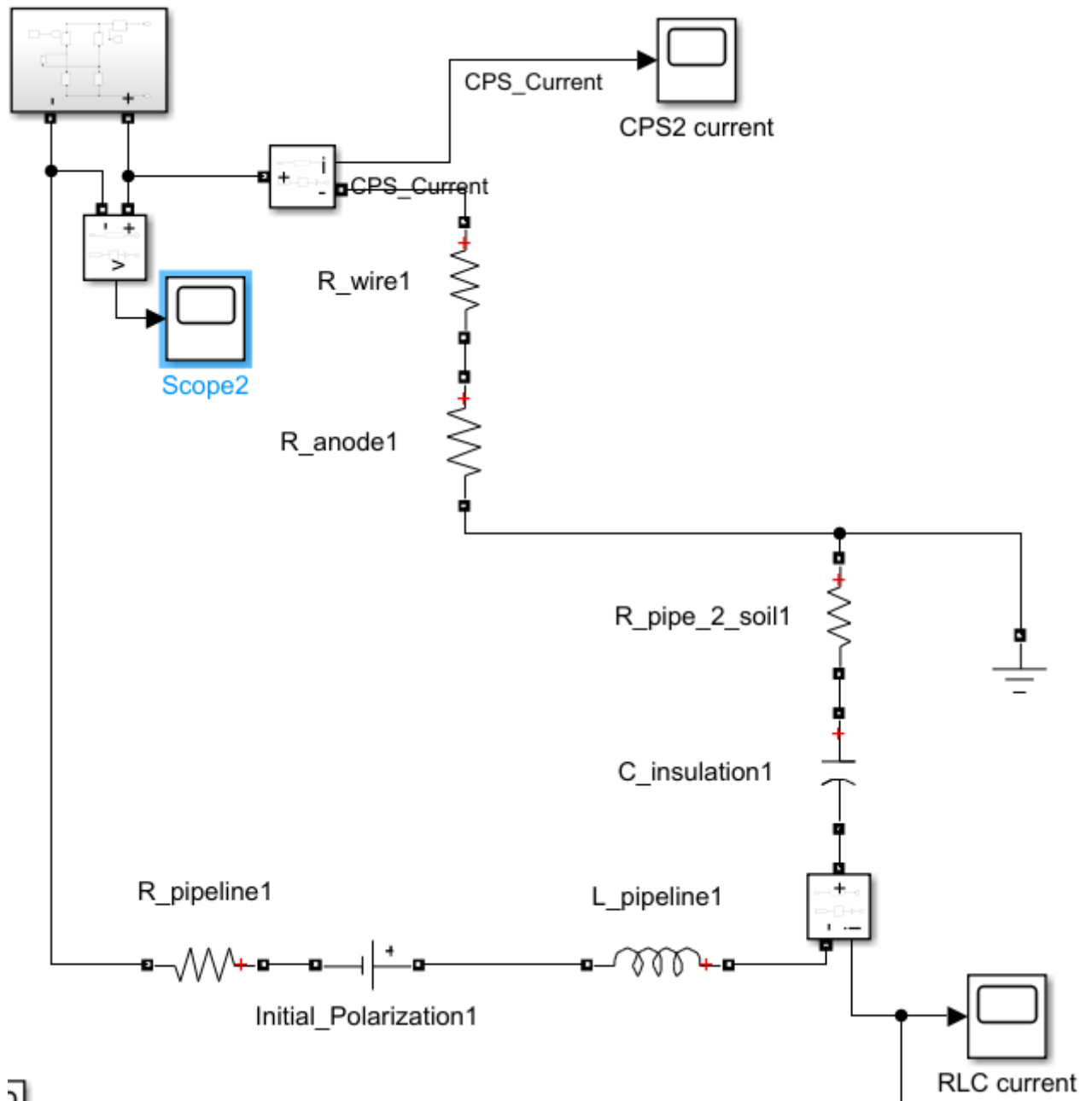


Рис. 121. Модель системи із врахуванням ємності ізоляції

Випрямляч з ШІМ, що працює на таке навантаження має наступний вихідний сигнал:

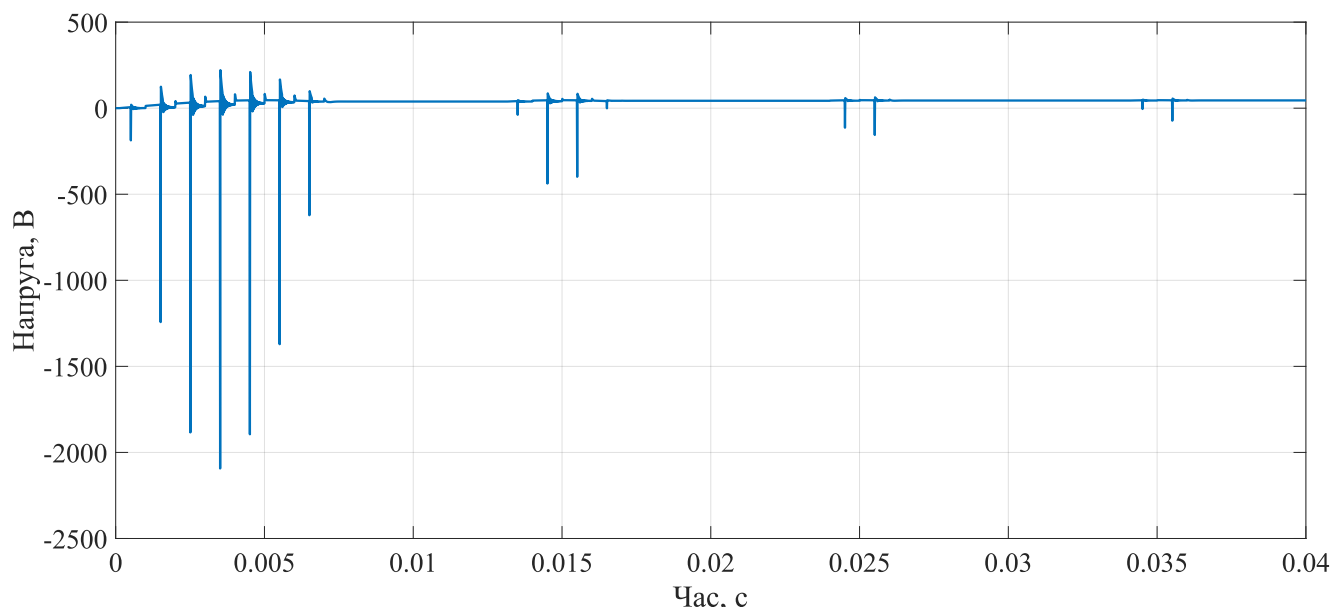


Рис. 122. Вихідний сигнал СКЗ із транзисторним випрямлячем, що працює на схему заміщення із ємністю

Спектральний розподіл наведеного сигналу у порівнянні із попереднім випадком є більш однорідним, але залишається сильно розподіленим.

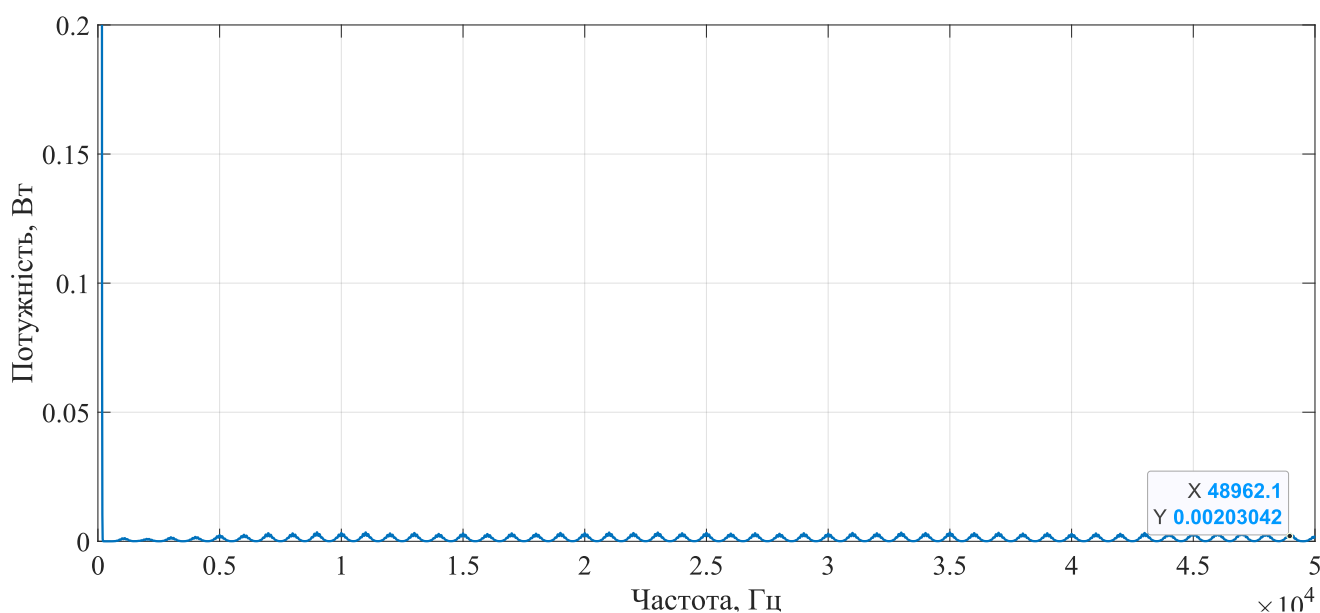


Рис. 123. Спектр вихідного сигналу СКЗ на схему заміщення із ємністю

Так величина потужності після значного піку в низькочастотному діапазоні, продовжує коливатися навколо 2 – 3 мВт в зоні високих частот. Що може здаватися не значною потужністю, але як було доведено в пунктів 3.2 для формування наскрізного отвору в трубі завтовшки 5 мм, цього може бути достатньо.

Розглянемо струми, що протікають через навколишнє середовище та ізоляцію в у випадку наведених моделей.

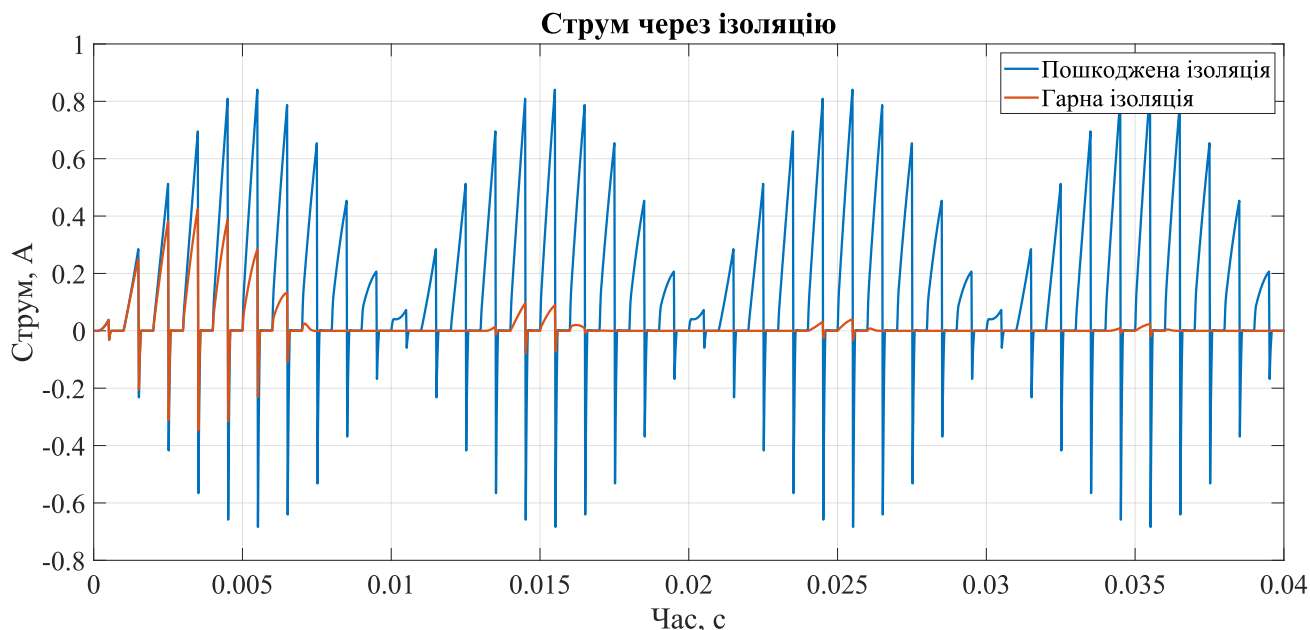


Рис. 124. Струми через навколишнє середовище та ізоляцію

У першому випадку весь струм проходить по послідовно підключеним елементам схеми заміщення і відповідно не зазнає істотних змін у порівнянні із струмом, що споживається із СКЗ. Більша амплітуда обумовлюється гіршими показниками ізоляції, що звичайно потребує більшого струму захисту.

З іншого боку, струм, що проходить через ємність є лише частиною усього споживаного з СКЗ струму, зменшення струму стікання на землю обумовлене кращими електротехнічними показниками ізоляції. Що у ідеальному випадку призводить до нульового струму.

3.6 Модифікація моделі системи «СКЗ – ґрунт – трубопровід»

Для розглянутої схеми заміщення можливо переглянути наступну модифікацію моделі середовища, через яке проходить струм від аноду до підземного сталевого трубопроводу.

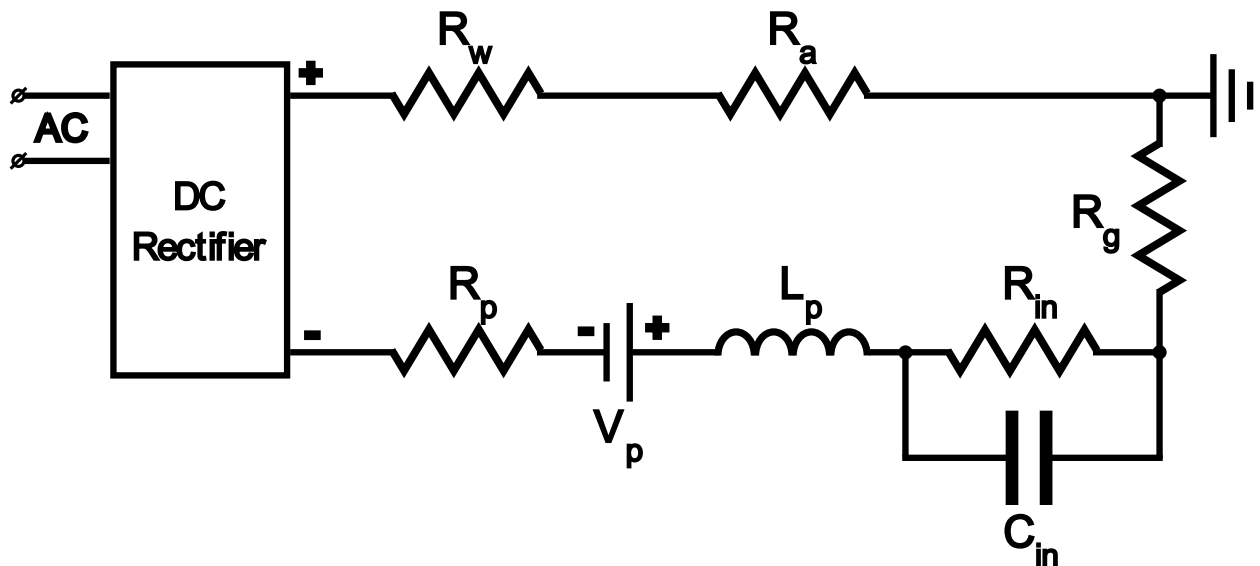


Рис. 125. Модифікована схема заміщення

У даному вигляді схема замінює паралельне (як показано у розділі 2) або послідовне підключення (як у випадку в 3.5) ємності ізоляції C_{in} та перехідного опору трубопровід – ґрунт на паралельні опір і ємність ізоляції R_{in} , C_{in} та послідовний до них опір ґрунту R_g .

R_{in} визначається аналогічно перехідному опору, що представляє собою інтегральну оцінку захисної здатності системи «труба-покриття-ґрунт» та обумовлюється питомим опором ізоляції R_c , $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$, площею трубопроводу A , та ефективністю ізоляції CE .

$$R_{in} = \frac{R_c}{A(2 - CE)}$$

Як описувалось в розділі 1 ізоляція є невід’ємною частиною протикорозійного захисту, що забезпечує зменшення доступу агресивного навколишнього середовища до матеріалу трубопроводу. Однак жодна ізоляція не може повністю виключити контакт із металу і ґрунту, оскільки має пористу структуру і механічні пошкодження, які впливають на її електричні параметри, особливо із плином часу. Знання закономірностей впливу часу і комплексу основних факторів на термін служби ізоляційних покриттів дозволяє здійснювати оптимальний вибір ізоляційних покриттів, їх товщину і кількість шарів в період проектування трубопроводу. Зниження значення перехідного опору в період

експлуатації трубопроводу викликає необхідність збільшувати струм катодних станцій і їх кількість або ремонтувати ізоляцію на даній ділянці.

До найважливіших експлуатаційних властивостей ізоляційних покриттів трубопроводів відносяться товщина, вологопроникність, водопоглинання, суцільність, перехідний електроопір, стійкість до відшарування під дією катодного струму, адгезія, термостійкість і довговічність. Швидкість корозії сталі під покриттям залежить від багатьох факторів: наявності електроліту і кисню під покриттям, рівня пасивації і гетерогенності поверхні, швидкості відведення продуктів реакції, присутності інгібіторів, рН і хімічного складу середовища, температури, тиску, наявності блукаючих струмів тощо.

Питомий опір ізоляції — це характеристика, що визначає здатність покриття протидіяти проходженню електричного струму між металом труби та ґрунтом. Цей параметр безпосередньо впливає на ефективність катодного захисту: чим вищий опір, тим менші струми потрібні для досягнення захисного потенціалу.

Різні покриття мають різну електроізоляційну здатність. Їх термін служби повинен бути не меншим за термін служби металеві труби, що захищається. Значною популярністю як ізоляція для підземних сталевих трубопроводів набули бітумні емалі або мастики, що виготовляються із суміші нафтових бітумів і різного роду наповнювачів. При застосуванні бітумно-мастикової ізоляції розрахункова довговічність повинна становити не менше 40–50 років, щоб забезпечити визначений термін служби металу трубопроводу. Вони наносяться у розплавленому вигляді при температурі 160-170 °С на очищену і підготовлену поверхню. Після чого ще в гарячому стані поверх мастики накладають шар скловолокна. Крім того використовуються покриття на основі екструдованих поліолефінів, покриття із термореактивних або термоусадкових матеріалів, липких полімерних стрічок, тощо [40].

У випадку сильно агресивних ґрунтів наноситься посилене або дуже посилене покриття, які представляють собою ще один або два шари мастики та скловолокна відповідно. Як наслідок, збільшення товщини ізоляції приводить до зростання опору.

Вологопроникність характеризується коефіцієнтом вологопроникності, який описує залежність кількості вологи, що проникає через покриття, від площі і товщини покриття, часу і перепаду тисків водяної пари над і під покриттям. Водопоглинання покриттів характеризує їх здатність вбирати вологу і тим самим знижувати свої діелектричні властивості.

Суцільність нанесеного покриття визначається відсутністю в ньому наскрізних мікро- або макродефектів. Механічні пошкодження, тріщини, пори, відшарування через погану адгезію та внутрішні дефекти надають навколишньому електроліту доступ до матеріалу трубопроводу, що призводить до локального падіння опору ізоляції.

Погіршення ізоляційних властивостей відбувається під впливом різних факторів: атмосферного старіння, розм'якшення під впливом ґрунтових вод, впливу газу, накопичення мікродефектів під впливом статичного тиску, температурних циклів, викликаних погодними та сезонними змінами, ударними навантаженнями або пластичними деформаціями, під час монтажних робіт або через рух ґрунтів. Усі ці впливи мають накопичувальний характер і призводять до розтріскування, тріщинуватості та пористості, що зменшують опір ізоляції. Вже за перші роки експлуатації опір ізоляції падає на 1-2 порядки, а за весь час експлуатації істотно зменшується. Економічна ефективність використання ізоляції зберігається до досягнення значення перехідного електричного опору близько $1000-500 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

Зміна перехідного опору труба – ґрунт із часом описується виразом:

$$R_{\pi}(t) = R_{\pi\kappa} \left(\frac{R_{\pi\pi}}{R_{\pi\kappa}} \right)^{\frac{T_c}{T_c+t}}$$

Де, $R_{\pi\kappa}$ – кінцевий перехідний опір труба – ґрунт $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$ (в кінці розрахункового періоду, наприклад експлуатації); $R_{\pi\pi}$ – початковий перехідний опір труба – ґрунт $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$ (наприклад на початку експлуатації); t – час за який визначається зміна перехідного опору, в роках; T_c – стала часу старіння ізоляції, в роках.

Кінцевий перехідний опір можливо приблизно визначити через опір розтіканню неізовольовано трубопроводу, який визначається виразом:

$$R_{\text{роз}} = \frac{\rho_{\text{г}} D}{2} \ln \frac{0,4 R_{\text{пк}}}{D^2 H R_{\text{пов}}}$$

$\rho_{\text{г}}$ – питомий опір ґрунту, Ом · м; D – діаметр трубопроводу, м; H – глибина залягання трубопроводу, м; $R_{\text{пов}}$ – повздовжній опір трубопроводу, $\frac{\text{Ом}}{\text{м}}$; $R_{\text{пк}}$ – визначається за номограмою в залежності питомого опору ґрунту та діаметру трубопроводу.

Отже, величина питомого опору ґрунту безпосередньо впливає на зміну електричного опору ізоляції. Крім того, опір ґрунту $R_{\text{г}}$ залежить від питомого опору ґрунту $\rho_{\text{г}}$ Ом · м, який визначає умови поширення струму через землю, що також безпосередньо впливає на ефективність катодного захисту та швидкість корозії трубопроводів. На його значення впливають як фізико-хімічні, так і кліматичні фактори.

$$R_{\text{г}} = \frac{\rho_{\text{г}}}{l}$$

Ґрунтам притаманна значна неоднорідність, як за структурою так за хімічним складом, а також впливом кліматичних зон, в яких вони знаходяться, внаслідок чого дуже варіюються їх розрахункові параметри питомого опору.

Основним фактором є вологість ґрунту, оскільки саме наявність води в навколишньому електроліті є необхідною умовою протікання процесів електрохімічної корозії. При збільшенні вологості ґрунт насичується електролітом (водою з розчиненими солями), тому його провідність зростає, а питомий опір зменшується. Так трубопровід, що знаходиться в сухому піщаному ґрунті, зазнає значно менших корозійних ризиків, ніж в піску вологому чи, наприклад, в глині. Значення можуть коливатися від тисяч до десятків Ом · м.

При цьому істотний вплив має і склад рідини, такий як: кількість аніонів та катіонів, ступінь дисоціації солей, тощо. Як наслідок, погодні та сезонні зміни, які впливають на кількість опадів, завдають значного впливу на опір ґрунту і його зміни в часі. Солоні або засолені ґрунти можуть мати опір 10–30 Ом · м, тоді як прісні — у десятки разів більший.

Неоднорідна структура ґрунту має вплив на його здатність утримувати вологу та іони. Гранулометричний склад – розмір і пропорції частинок впливають

на взаємозв'язок між ними та щільність ґрунту; агрегатний стан – структура ґрунту може бути більш або менш ущільненою, що впливає на його твердість. Чим більше глинистих і колоїдних частинок — тим нижчий опір. На різних глибинах можуть бути різні типи ґрунтів: піщані, глинисті або торф'яні прошарки. Такі неоднорідності створюють електричні потенціальні різниці, що можуть спричиняти блукаючі струми і локальні осередки корозії.

Температура також впливає на провідність електроліту, її підвищення приводить до росту провідності, а зниження, особливо нижче 0 °С, до збільшення опору, бо вода в порах замерзає. Температурні зміни протягом доби та сезонів значно впливають на параметри питомого опору ґрунту.

Біологічна активність також впливає на параметри ґрунту. Органічні речовини (торф, перегній) можуть як зменшувати опір (через іонну провідність), так і збільшувати його, якщо утворюють ізоляційні плівки. Біохімічні процеси (наприклад, діяльність сульфатвідновних бактерій) змінюють хімічний склад і електропровідність електроліту.

З іншого боку, наведена вище залежність опору розтікання неізольовано трубопроводу, також залежить від величини повздовжнього опору трубопроводу $R_{\text{пов}}$. Даний параметр системи електрохімічного захисту визначається металом трубопроводу, тобто характеризує опір поширенню струму по самій сталі. Крім впливу на параметри і стан ізоляції, цей параметр відіграє істотну роль в формуванні захисного потенціалу вздовж трубопроводу, впливу джерел блукаючих струмів на систему, на струмів перетікання вздовж трубопроводу від суміжних станцій катодного захисту.

Визначальними параметрами, що впливають на значення цієї величини є розміри та властивості матеріалу трубопроводу. Питомий опір сталі з якої виготовляються трубопроводи може коливатися в значних межах в залежності від марки сталі від 0,1 до $0,28 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$. Крім того на повздовжній опір здійснює помітний вплив температура та її добові та сезонні коливання. Із підвищенням температури електропровідність сталі зменшується через посилення коливань атомів у

кристалічній ґратці. А термічні цикли, можуть призвести до деформації, зниження міцності, появи тріщин та втомних руйнувань, що в свою чергу впливає на електричний опір матеріалу.

Також на збільшення опору трубопроводу впливає, якість з'єднань сегментів трубопроводу, дефекти зварних швів та наявність корозійних пошкоджень.

Якщо ж між ділянками встановлені ізолюючі фланці, муфти або вставки із поліетиленових труб, вони практично розривають електричну неперервність трубопроводу. Такі компоненти трубопроводу, представляють собою елементи із значним опором, які електрично ізолюють металеві ділянки одна від одної.

Із часом корозійні та інші пошкодження поступово зменшують площу поперечного перерізу металу, деградація зварних швів та температурні цикли підвищують локальний опір. В результаті повздовжній опір зростає поступово і нерівномірно, утворюючи ділянки з різною електропровідністю, що впливає на розподіл потенціалу катодного захисту, що може призводити до недо захищених ділянок.

Питомий опір ізоляції також нелінійно залежить від щільності катодного струму, оскільки залежить від питомого поляризаційний опору R сталі, що є функцією, по-перше, густини струму в порах ізоляції $j_{\text{пор}}$, А/м², оскільки R залежить від активності катодного процесу в подвійному електричному шарі метал-електроліт i , по-друге, визначається тривалістю поляризації t , оскільки R збільшується в міру накопичення катодних сольових відкладень, що виникають на поверхні, яка захищається. Таким чином, R є складною функцією струму і часу $R = R(j, t)$. j – лінійна щільність струму на одиницю довжини трубопроводу, А/м, яка описується такою залежністю:

$$j_{\text{пор}} = \frac{j}{\pi D s_{\text{пор}}}$$

$s_{\text{пор}}$ – коефіцієнт пористості ізоляції.

Щільність струму катодної поляризації повинне забезпечувати повне пригнічення струмів корозії, та можливих блукаючих струмів. Мінімальну

допустиму щільність струму прийнято брати в 3 – 5 разів більшою за щільність струму корозії.

Висновки

У даному розділі виконано моделювання та дослідження процесів формування захисного потенціалу на підземному сталевому трубопроводі в складі системи катодного захисту з урахуванням схемотехнічних особливостей випрямлячів, електротехнічних параметрів трубопроводу, ізоляційного покриття та навколишнього ґрунту.

Для забезпечення прийняттого і наочного моделювання для схеми зміщення, що наведена в розділі 2, надається числові значення, що описують імовірні параметри газопроводу довжиною 10000 м. Після чого отримані параметри моделі системи «станція катодного захисту – ґрунт – підземний трубопровід», використовуються для здобуття даних щодо взаємодії різних конфігурацій станцій катодного захисту.

Проведено спектральний аналіз вихідних сигналів різних типів випрямлячів, що повсякчасно використовуються в складі СКЗ (зокрема однонапівперіодних, мостових, керованих тиристорних, схем та транзисторних випрямлячів із широтно-імпульсною модуляцією, тощо). За допомогою перетворення Фур'є отримано розподіли потужності за частотою, що дало змогу оцінити наявність і рівень високочастотних складових, потенційно небезпечних з точки зору локалізованої корозії. Показано, що навіть малі значення потужності у високочастотному діапазоні (порядку міліват) можуть відповідати корозійним струмам, достатнім для поступового руйнування металу трубопроводу в довготривалій перспективі.

Встановлено, що класичні некеровані випрямлячі формують відносно обмежений спектр частот, тоді як керовані схеми та особливо випрямлячі з ШІМ характеризуються значним розширенням спектра в область кілогерцових і вище частот. Показано, що впровадження нульового вентиля у керовані мостові схеми дозволяє частково компенсувати вплив індуктивної складової та зробити

спектральний розподіл потужності більш однорідним, однак не усуває проблему повністю.

Розглянуто різні конфігурації схеми заміщення і їх взаємодія із випрямлячами СКЗ. Досліджено вплив окремих складових схеми заміщення на формування миттєвих і середніх значень захисного потенціалу. Це показує, що застосування спрощених суто резистивних моделей не дозволяє адекватно описати реальні режими роботи СКЗ, оскільки ігнорує ефекти затягування струму, фазові зсуви та появу значних миттєвих відхилень потенціалу. Встановлено, що індуктивність трубопроводу є одним із визначальних факторів, який суттєво впливає на форму струму, середньо-випрямлену напругу та наявність ділянок позитивного потенціалу на поверхні труби. Що дає змогу стверджувати, що за формально допустимих середніх значень потенціалу трубопровід може перебувати в умовах, сприятливих для корозії, протягом десятків або навіть сотень днів на рік.

Проаналізовано роботу керованих тиристорних випрямлячів за різних кутів керування та показано, що зі збільшенням кута керування зменшується середній захисний потенціал, зростає тривалість періодів відсутності захисту або появи позитивного потенціалу, а при великих кутах керування система взагалі перестає відповідати нормативним вимогам електрохімічного захисту. Найбільш несприятливі результати отримано для випрямлячів із ШІМ, для яких характерні різкі імпульсні перенапруги та надширокий спектр високочастотних складових. Також досліджено роботу ШІМ випрямляча за різних станів ізоляційного покриття відрізка трубопроводу, що показують значну наявність високочастотних сигналів при пошкодженій ізоляції.

Також розглянуто шляхи модифікації схеми заміщення, як може більш коректно описувати електричні властивості взаємодії ізоляційного покриття та ґрунту. Показано, що деградація ізоляції з часом, зміна питомого опору ґрунту, а також зростання повздовжнього опору трубопроводу істотно впливають на параметри схеми заміщення. Обґрунтовано необхідність урахування зміни параметрів ізоляції та ґрунту із часом, під час моделювання та проектування систем СКЗ.

Таким чином досягнуті у розділі 3 результати дають можливість поставити наступні задачі для розробки алгоритмів керування:

- Визначити вимоги до величин струмів перетікання вздовж трубопроводу
- Оцінити роботу більш ускладнених конфігурацій системи катодного захисту та умов їх підключення
- Надати рекомендації щодо шляхів модифікації законів керування станціями катодного захисту

4. РОЗДІЛ

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СУМІЖНИХ СТАНЦІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

4.1 Робота двох суміжних станцій катодного захисту на один трубопровід

Загальна потужність, що споживається СКЗ і передається на трубопровід є сумою двох складових. Потужності, що витрачається на утворення зовнішніх струмів, що натікають з аноду, через ґрунт, і відіграють ключову роль в електрохімічному захисті трубопроводу. І потужності що витрачається на струми що перетікають по самому трубопроводу, так звані зрівняльні струми. Їх поява є наслідком неузгодженої роботи суміжних станцій катодного захисту (Рис. 126).

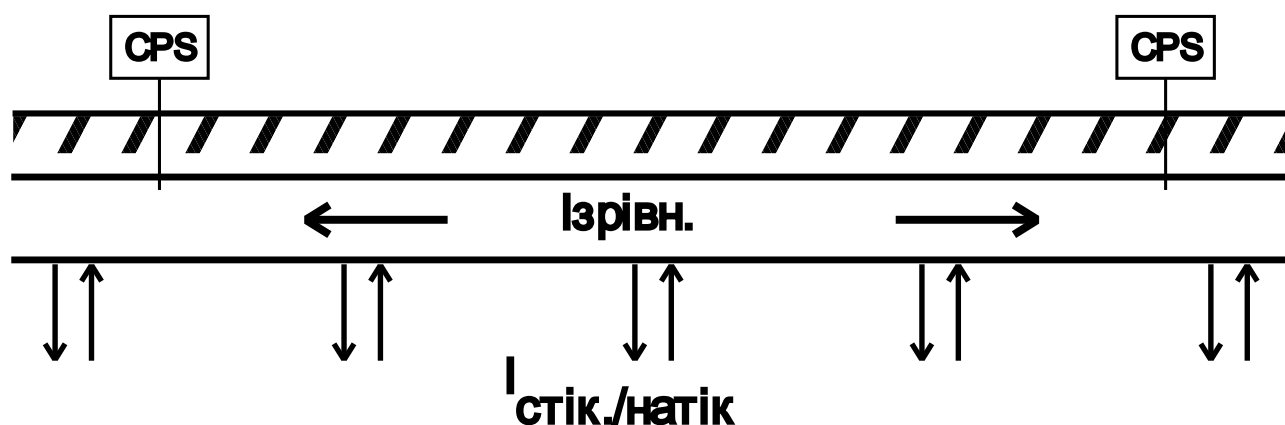


Рис. 126. Розподіл струмів по трубопроводу

У випадку відсутності корозійних процесів, тобто при відсутності струму, обидві потужності дорівнювали б 0. Оскільки, завжди існує не ідеальність ізоляційного покриття та узгодженої роботи суміжних станцій, такого стану досягти неможливо. Однак, важливим є співвідношення цих складових в загальній потужності СКЗ. Оскільки джерелом струмів, що вирівнюють є безпосередньо суміжні станції катодного захисту, негативний вплив можливо мінімізувати за рахунок синхронізації режимів роботи. Справжню небезпеку для підземного трубопроводу представляють струми, що стікають та натікають на трубопровід, а

отже мінімізація пов'язаної з ними потужності є ключовим елементом успішного електрохімічного захисту.

Взявши за основну ідеалізовану ситуацію роботи двох станцій катодного захисту, що електрично пов'язані підземним сталевим трубопроводом, можливо розглянути їх сумісну роботу за допомогою наведеної моделі (Рис. 127).

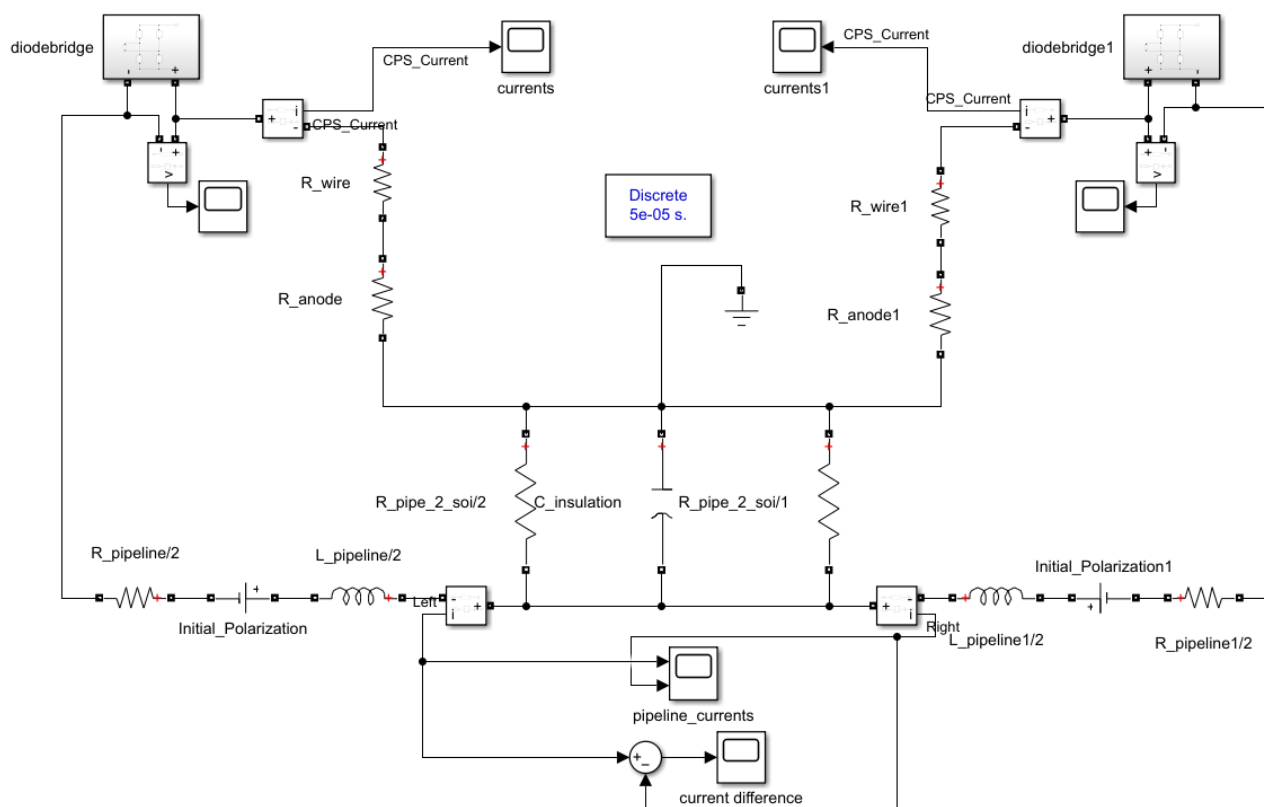


Рис. 127. Модель двох сумісних СКЗ, що пов'язані підземним сталевим трубопроводом

Для моделі прийнято наступні припущення:

- Однакові електричні параметри моделі і схема СКЗ (діодний міст);
- Модифікована схема заміщення із розділу 2, для симетричного підключення двох СКЗ;
- Відсутність блукаючих струмів.

Визначним критерієм (за названих припущень), який може впливати на роботу двох сумісних, електрично пов'язаних СКЗ, є фаза джерела змінної напруги, до якої підключено випрямляч у складі СКЗ.

У випадку синфазного підключення обох СКЗ, струми, що протікають по кожній гілці трубопроводу показують наступну картину:

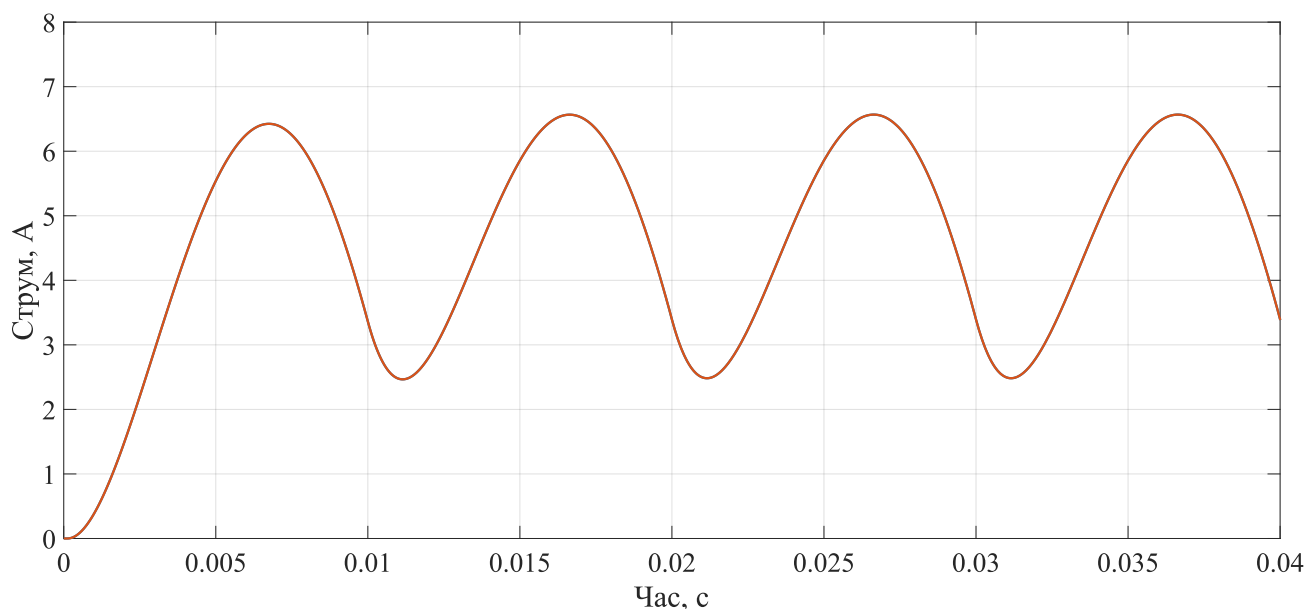


Рис. 128. Струми у гілках трубопроводу (СКЗ підключені на одну фазу)

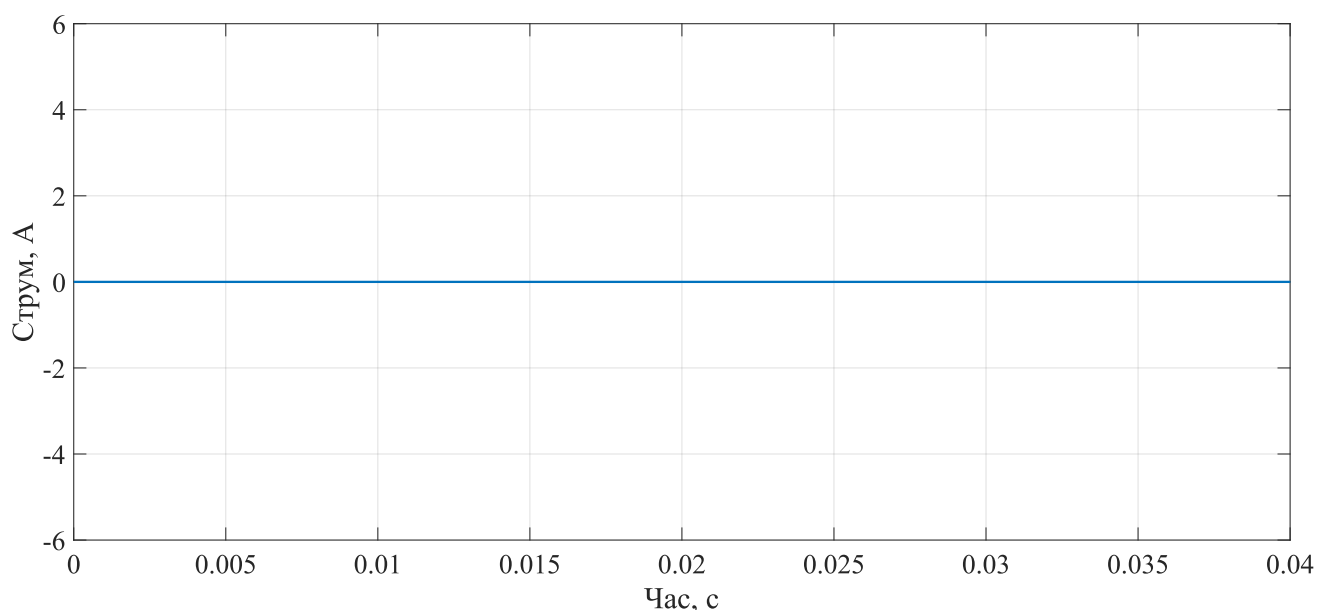


Рис. 129. Різниця струмів у гілках трубопроводу (СКЗ підключені на одну фазу)

Як було підкреслено вище, за ідеалізованих умов, синфазне підключення сумісних СКЗ забезпечує нульові струми вирівнювання вздовж нитки трубопроводу, а отже уся споживана СКЗ потужність витрачається на забезпечення електрохімічного захисту об'єкту.

З іншого боку, випадок підключення СКЗ до різних фаз, демонструє наступну картину:

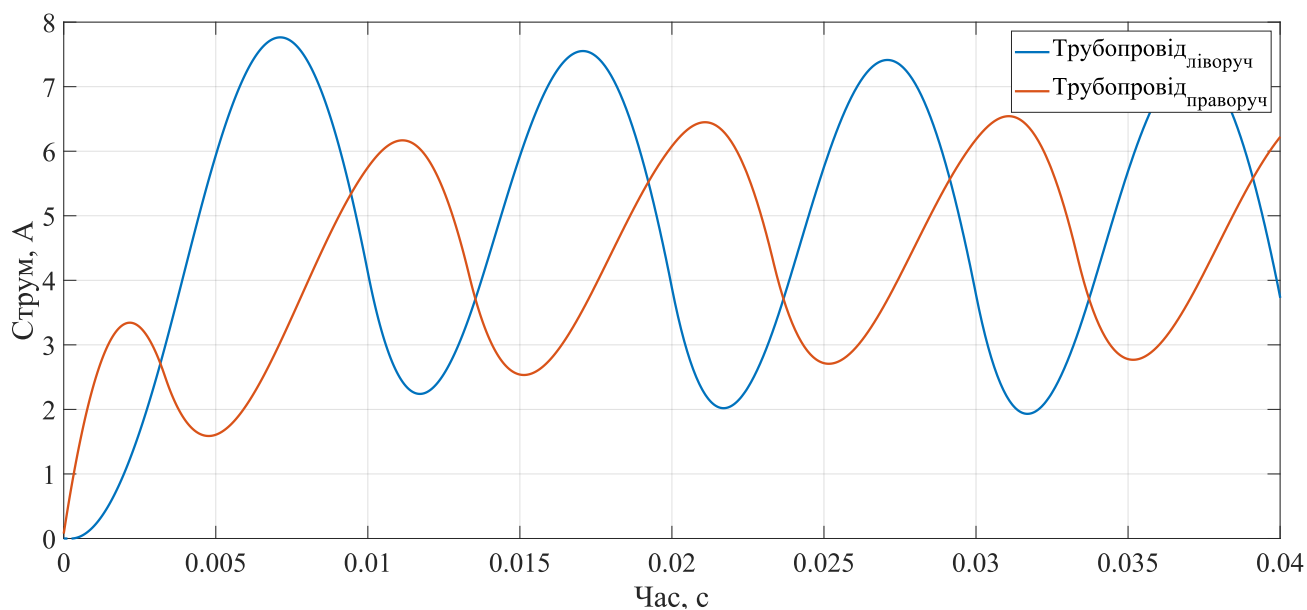


Рис. 130. Струми у гілках трубопроводу (СКЗ підключені на різні фази)

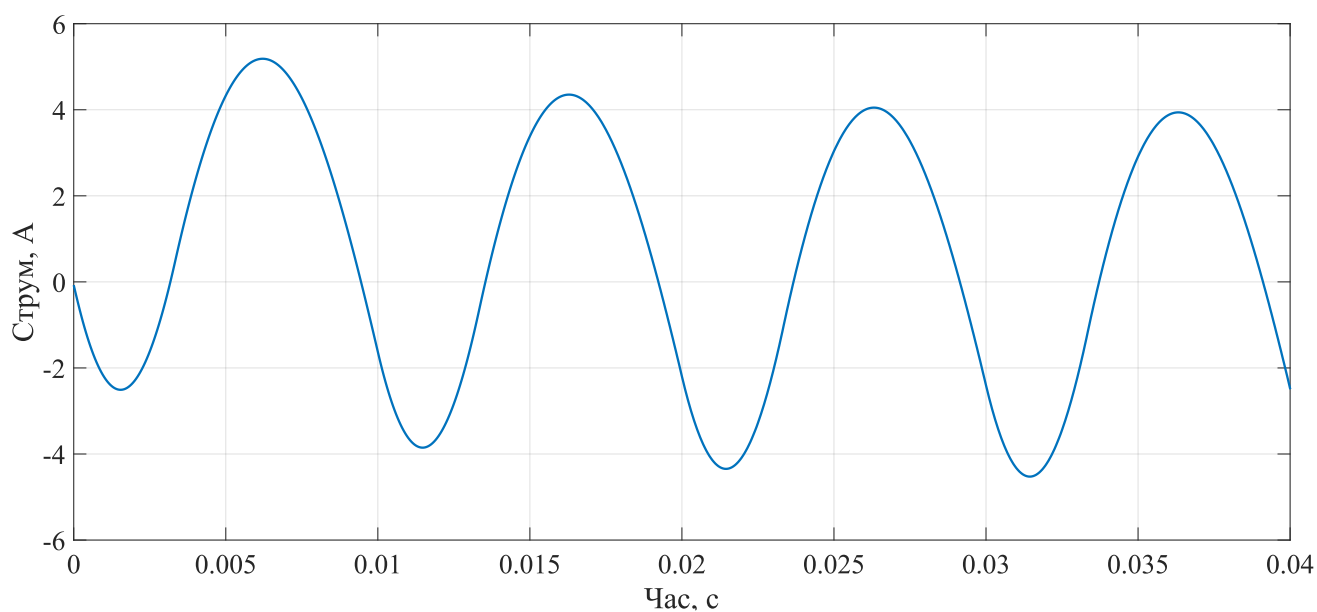


Рис. 131. Різниця струмів у гілках трубопроводу (СКЗ підключені на різні фази)

Чітко спостерігається не тільки зміщення фаз струмів відносно один одного, а і різниця їх амплітудних значень. При цьому, з'являються струми вирівнювання, миттєве значення, яких може перевищувати 4 А, і мають яскраву знакозмінну природу. Це в свою чергу демонструє, що не синфазність сумісних СКЗ, має значний негативний вплив на ефективність електрохімічного захисту. Що виражається в необхідності споживання більшої потужності, для компенсації

витраченої на струми вирівнянні, які в протикорозійному захисті безпосередньо участі не приймають.

З іншого боку, здоровий глузд натякає, що у міських умовах неможливо підключити всі станції катодного захисту підземних сталевих трубопроводів до однієї фази через низку технічних та енергетичних причин, пов'язаних із балансом навантаження електромережі. Попри те, що кожна станція катодного захисту споживає відносно невелику потужність, у масштабах міської газорозподільної системи їх кількість може сягати десятків або навіть сотень.

Згідно з вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) [109], у трифазних системах споживачів слід розподіляти рівномірно між фазами, особливо якщо вони підключені однофазно. Це правило стосується і станцій катодного захисту. Якщо всі ці станції підключити до однієї фази, у системі утворюється дисбаланс фаз. У випадку перевантаження однієї фази через підключення великої кількості СКЗ, а інші фази залишаться менш навантаженими, виникає асиметрія струмів і напруг. Це призводить до перекосу фазних напруг, перевищення струму перевантаженої фази, підвищеного нагріву нульового провідника, збільшення теплових втрат в проводах трансформаторів, зниження ефективності роботи обладнання та погіршення якості електроенергії для інших споживачів.

4.2 Робота двох суміжних СКЗ за різного стану ізоляції трубопроводу

Розділ 4.1 показує, що збереження однієї фази джерела в ідеальному випадку майже повністю нівелює струми перетікання, а не синфазне підключення сумісних СКЗ, навпаки, має помітний негативний вплив на збільшення величини струмів вирівняння. Розглянемо таке не синфазне підключення для різних конфігурацій схеми заміщення на основі двох випадків: а саме, відсутності або наявності ємності, що демонструє стан ізоляції, її якість, пошкодження або відсутність та схеми випрямляча, що використовується. В якості випрямляча, розглянемо два крайні випадки: у вигляді класичного мостового випрямляча та випрямляча на основі транзистору.

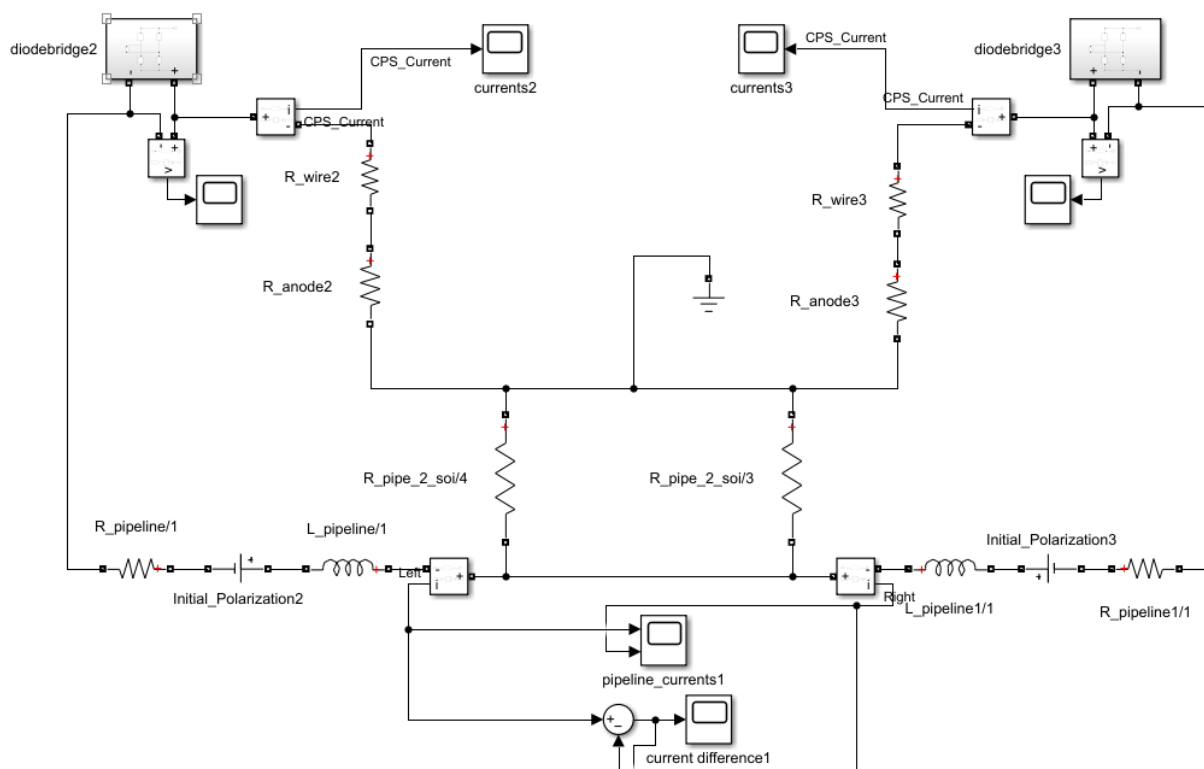


Рис. 132. Модель відрізка трубопроводу із поганою/пошкодженою ізоляцією, що захищено двома СКЗ

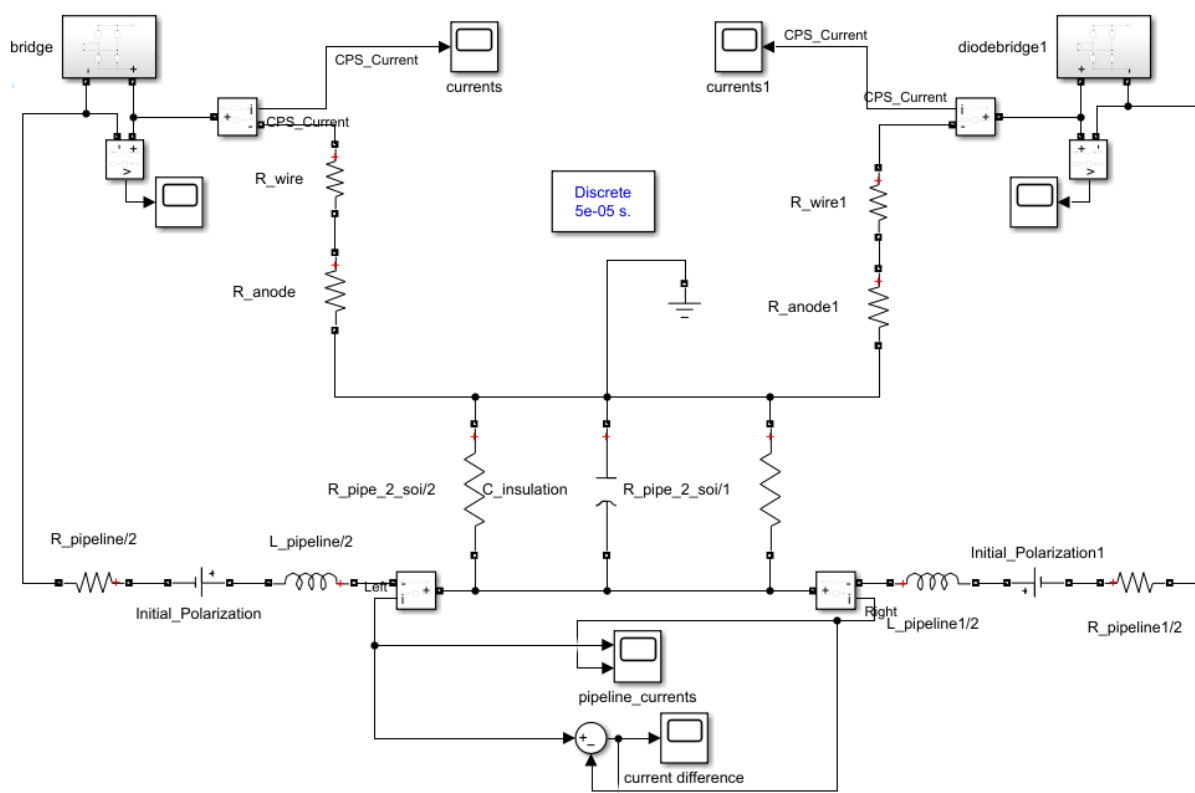


Рис. 133. Модель відрізка трубопроводу із якісною ізоляцією, захищена двома СКЗ

Розглядаючи, струми перетікання, що утворюються в моделі відрізка трубопроводу, що захищається СКЗ із мостовим випрямлячем, вони показують близькі за моментальними значеннями величини, які відрізняються один від одного на міліампери (Рис. 134). І хоча різниця в декілька мА може здаватися не значною, але якщо розглядати їх вплив на значному проміжку часу в рік та більше, навіть такого струму достатньо для винесення металу і утворення отвору в стінці трубопроводу.

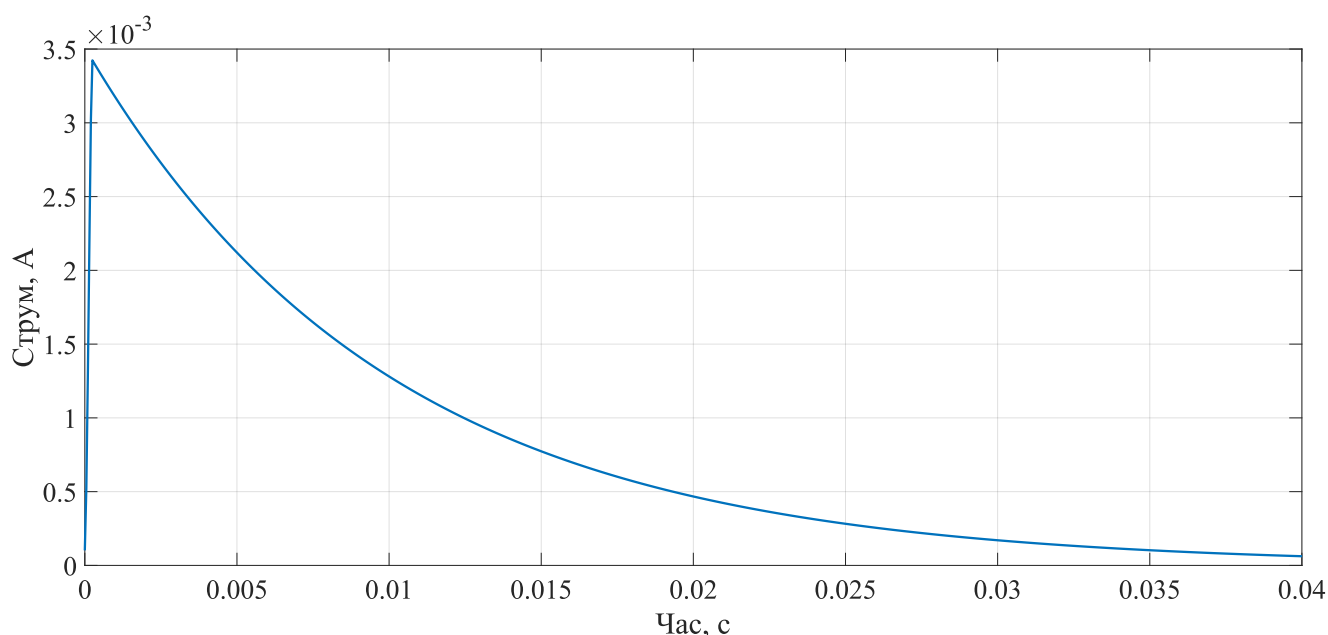


Рис. 134. Різниця між струмами перетікання між моделлю без ємності і із ємністю, що живляться від СКЗ із діодним мостовим випрямлячем

Графік показує, що у випадку діодного мостового випрямляча, різниця в струмах перетікання при наявності / відсутності ізоляції швидко нівелюється після протікання перехідних процесів.

З іншого боку у випадку транзисторного випрямляча, картина відрізняється (Рис. 135)

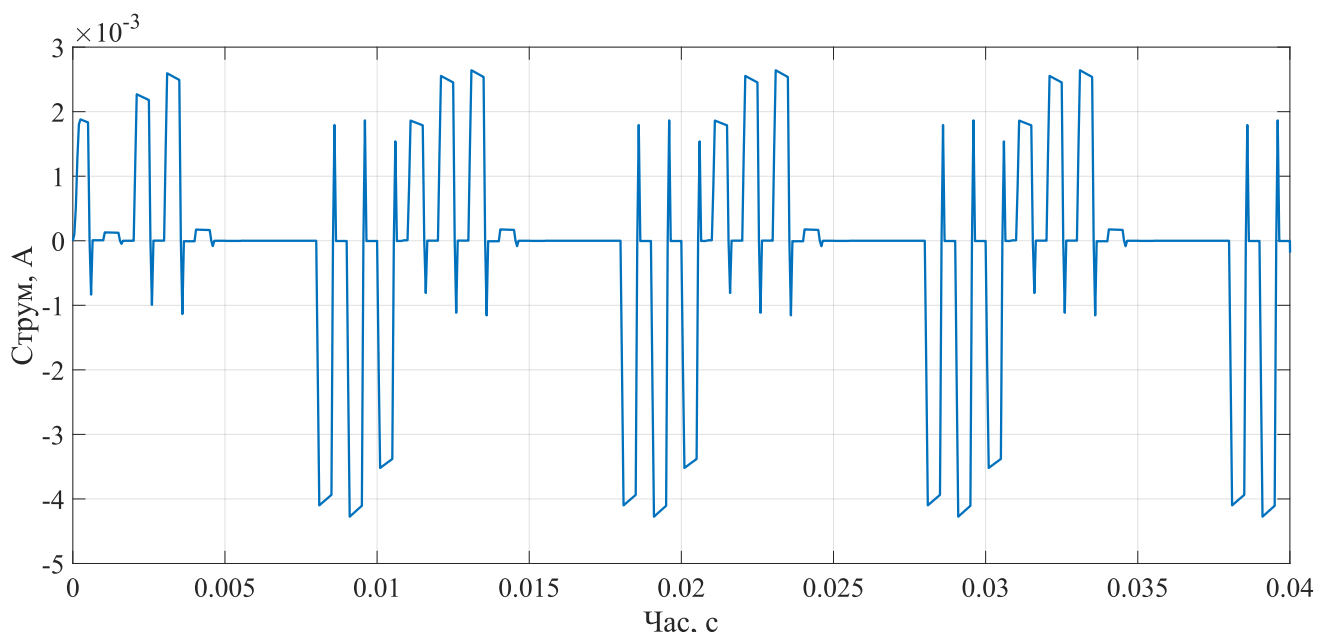


Рис. 135. Різниця між струмами перетікання між моделлю без ємності і із ємністю, що живляться від СКЗ із транзисторним випрямлячем

Графік демонструє постійну присутність різниці між струмами перетікання між моделлю із поганою ізоляцією і моделлю із нормальною ізоляцією.

Отже, можливо зробити висновок, що високочастотна складова, яка в значній мірі присутня у випадку більш складного транзисторного випрямляча, в значній мірі пов'язана із станом ізоляції трубопроводу. Також, необхідно розуміти, що на практиці майже неможливо ідеально синхронізувати роботу всіх силових ключів, що призводить до додаткових спотворень, биття частот та зростання потужності на більш високих частотах. Відповідно для послаблення таких впливів рекомендовано притримуватись класичних схем випрямлення, які мають менший гармонічний склад.

4.3 Вплив частоти на L та C складові

Розглядаючи вплив частоти на систему катодного захисту в роботі [143] можливо звернути увагу на наступні особливості схеми заміщення, а саме той факт, що і індуктивна і ємнісна складова залежать від значення частоти. Індуктивна складова, що визначається на основі виразів, що описані в третьому розділі, а саме:

$$L_p = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right) + L_i$$

Де, r – зовнішній радіус труби; L_i – внутрішня індуктивність, яка визначається формулою:

$$L_i = \frac{\mu l}{2\pi m r} \frac{\sinh m t - \sin m t}{\cosh m t - \cos m t}$$

$$m = \sqrt{2\omega\mu\gamma}$$

Де, $\omega = 2\pi f$ – кутова частота:

Для незмінних параметрів трубопроводу із ростом частоти значення індуктивності зменшується. Так для наведених в розділі 3 параметрів модельованого трубопроводу залежність індуктивності від зміни частоти має наступний вигляд:

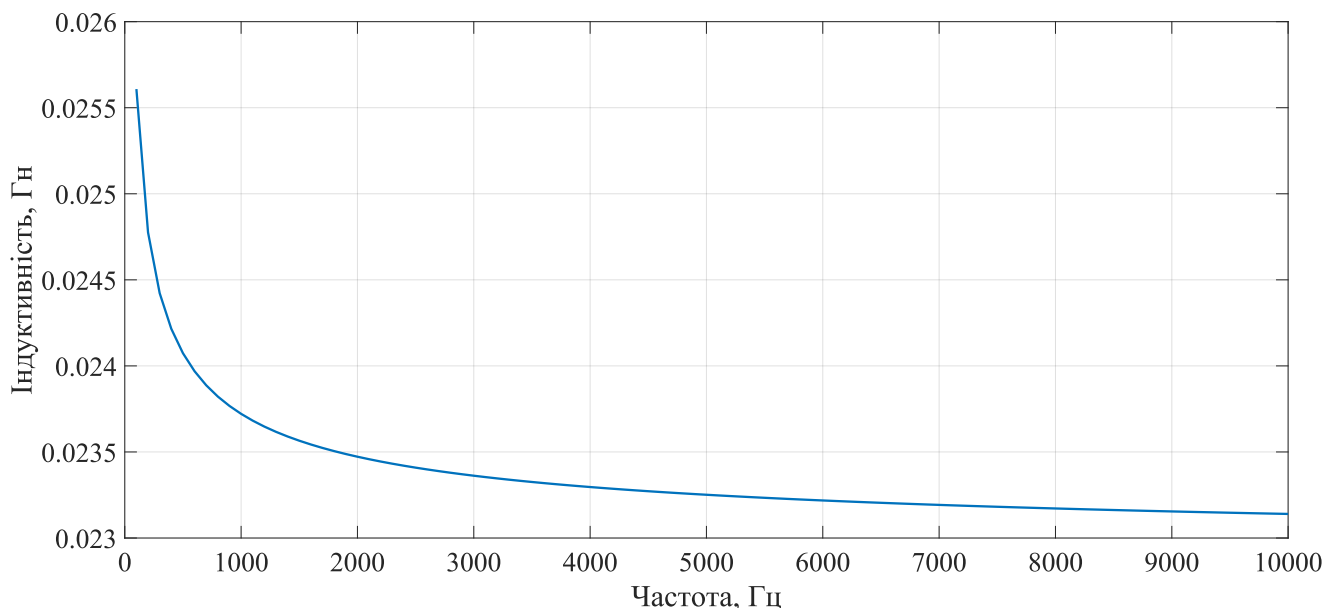


Рис. 136. Зміна значення індуктивності трубопроводу від частоти.

Ємність, же в свою чергу, в схемі заміщення представлена наступною формулою:

$$C_{in} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{R}{r}}$$

Де, R – радіус трубопроводу в ізоляції; ϵ – діелектрична проникність матеріалу ізоляції.

При цьому, як відомо із матеріалознавства, ϵ із ростом частоти зменшується, а отже зменшується ємність ізоляції.

Отже можливо зробити висновок, що із ростом частоти значення індуктивної і ємнісної складової підземного сталевого трубопроводу зменшуються, що в свою чергу приводить до зростання відповідних струмів. Як наслідок, можливо розглядати вихідний сигнал станції катодного захисту, в якості каналу керування процесом формування захисного потенціалу за рахунок регулювання частини потужності, що знаходиться в високочастотному діапазоні спектру. Для досягнення оптимальної ефективності такий канал керування повинен враховувати стан ізоляції та геометричні параметри трубопроводу, які безпосередньо впливають на параметри схеми заміщення.

4.4 Припустима густина струму корозії

Протікання процесів електрохімічної корозії обумовлюється утворенням струмів корозії, які викликаються наявністю різноманітних неоднорідностей, що спричиняють утворення зон із різними потенціалами.

У випадку коли, наприклад, утворення гальванічної пари спричинено різним доступом кисню до поверхні, що кородує, шлях струму між анодом і катодом значно подовжується. Як наслідок, в зоні надлишку кисню протікають катодні (відновлювальні) процеси, що не призводить до втрати маси металу, а в іншій частині, із нестачею кисню – відбуваються анодні (окислювальні) процеси, що супроводжуються виносом металу. При цьому відстань між анодом і катодом може бути як надзвичайно малою, так і сягати десятків метрів для неоднорідних трубопроводів в неоднорідних ґрунтах. Отже, анодні і катодні зони виникають із-за яких-небудь неоднорідностей корозійного середовища та металевої поверхні.

Як наслідок, між анодом і катодом утворюється струм, напрямком якого протилежний руху електронів, що рухаються від катоду до аноду. Але оскільки струм може протікати лише по замкнутому ланцюгу, тому далі струм буде стікати з аноду в розчин, а потім натікати на катод із електроліту. Струм, що стікає з металу

в середовище називається анодним, а струм, що натікає із середовища на метал – катодним.

Потік іон заліза несе позитивні заряди, що утворюють струм I_a спрямований із аноду в навколишнє середовище. I_k рівний за значенням, утворюється електронами, що прямують від аноду до катода, і залишають метал в катодній зоні. Цей струм $I = I_a = I_k$ можливо представити як:

$$I = \frac{\varphi_{ок} - \varphi_{оа}}{R}$$

$\varphi_{ок}$, $\varphi_{оа}$ – електрохімічні потенціали відповідно катода і анода, визначені за умови $I = 0$; R – опір ланцюга анод-середовище-катод, що є нелінійною функцією електродного струму, який можливо описати наступним законом:

$$I = Ae^{\eta/B}$$

η – зсув потенціалу відносно свого рівноважного стану, що зазвичай називається перенапруженням процесу; A , B – константи, що залежать від параметрів середовища і металу.

Тоді опір між одним електродом і середовищем можливо розрахувати за формулою:

$$R_{пол} = \eta/I$$

$R_{пол}$ – опір подвійного електричного шару метал-електроліт, оскільки η - падіння напруги на цьому шарі, називають поляризаційним, так як його величина залежить від величини і напрямку струму поляризації.

Таким чином, е.д.с. гальванічної пари витрачається на подолання омичного опору корозійного середовища в ланцюзі між анодом і катодом і двох поляризаційних опорів:

$$\varphi_{ок} - \varphi_{оа} = \eta_k + \eta_a + \Delta U_c$$

$$I = \frac{\eta_k + \eta_a + \Delta U_c}{\frac{P_k}{S_k} + \frac{P_a}{S_a} + R_c}$$

η_k , η_a – величина напруги на поляризаційному опорі катода і анода відповідно; ΔU_c – падіння напруги в корозійному середовищі; P_k , P_a - питомі поляризаційні опори

катода і анода, $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$; S_k, S_a - площі катода та анода, м^2 ; R_c - опір середовища між електродами, Ом .

Чим більший струм поляризації (I), тим сильніше поляризуються - змінюють свій потенціал - електроди. При цьому анод поляризується позитивно ($\eta_a > 0$), тобто його потенціал стає більш позитивним, а катод - негативно, оскільки $\eta_k < 0$. В кінцевому рахунку електроди пари набувають деякий середній потенціал $\varphi_{\text{кор}}$, який називається потенціалом корозії. Струм корозії $I_{\text{кор}}$ залежить від різниці електродних потенціалів ($\varphi_{\text{оа}}, \varphi_{\text{ок}}$), які, на жаль, далеко не завжди відомі, а не від потенціалу корозії $\varphi_{\text{кор}}$. Незважаючи на свою назву, потенціал корозії не визначає струм корозії, а скоріше навпаки: при струмі корозії $I_{\text{кор}}$ встановлюється певний компромісний потенціал $\varphi_{\text{кор}}$. Струм корозії тим вищий, чим менший поляризаційний опір. Очевидно, що струм корозії тим вищий, чим менший опір середовища.

Відповідно до закону Фарадея, кількість струму, що стікає з електрода, пропорційно втраті маси цього електрода:

$$G = qIT$$

$$q = 3600M/(nF)$$

Де G - маса металу, що розчинився, г; q - електрохімічний еквівалент металу $\text{гА}^{-1}\text{год}^{-1}$; M - атомна маса г/моль ; $F = 96500$ - число Фарадея Кл/гЭкв ; n - валентність металу; I - величина електродного струму, А; T - час, год.

Розділивши праву і ліву частини на площу поверхні електрода, що розчиняється, S , отримаємо формулу, що пов'язує щільність струму корозії з втратою маси

$$j = \frac{I}{S} = \frac{G}{SqT}$$

j - густина анодного струму корозії, А/м^2 . На основі цього виразу можливо отримати вирази для розрахунку швидкості корозії:

$$j = \begin{cases} 0.95v_1 \\ 0.85v_2 \end{cases}$$

v_1 – швидкість вагової корозії, г/(м²год); v_2 - швидкість проникаючої корозії, мм/рік. Таким чином, величина щільності анодного струму є мірою швидкості корозії. Тобто із її зменшенням, зменшуються і втрати металу.

Згідно з розглянутими в пункті 1 документами, значення поляризаційних потенціалів вздовж нитки підземного сталевого трубопроводу повинно знаходитись в межах між -0,85 В та -1,15 В (при відсутності блукаючих струмів). Значення сумарних потенціалів із поляризаційною і омичною складовою необхідно підтримувати в межах від - 0,9 В до - 2,5 В (для мастикових покриттів) або - 3,5 В (для покриттів з екструдованого поліетилену) [41]. За наявності джерел блукаючих струмів, або інших факторів, що ускладнюють підтримку захисного потенціалу (наприклад, блекаутів) увага приділяється унеможливленню появи анодних та знакозмінних зон, за одночасної умови підтримання мінімальних миттєвих потенціалів не менше величини стаціонарного потенціалу, або - 0,7 В, якщо визначити його неможливо.

Якщо підтримання зазначених потенціалів технічно унеможливлено, або не є раціональним допустимо використання пом'якшеного критерію захищеності:

$$E_{\text{зах}_{\min}} = E_c - 0,1 \text{ В}$$

Де E_c – стаціонарний потенціал газопроводу.

Оскільки, як пошкодження підземних сталевих трубопроводів призводить до небажаних і небезпечних наслідків, будь-яке сповільнення корозійних процесів є кращим для їх збереження, ніж повна відсутність протикорозійного захисту. Таким чином, наявність хоча б якогось потенціалу захисту, наприклад під час блекаутів, який є близьким до мінімально припустимого рівня в -0,7 В є кращим ніж повна його відсутність (тобто виключно природній потенціал).

Для підтримки наведених значень потенціалу використовуються станції катодного захисту, споживаний струм з яких складається із двох основних частин: струмів що натікають на трубопровід через дефекти ізоляційного покриття і є безпосередньо задіяними в процесі електрохімічного захисту від корозії; та струмів, що протікають поверхнею трубопроводу, які можуть бути викликані рядом факторів.

До переліку цих факторів входять: робота суміжних станцій катодного захисту; блукаючі струми, що протікають вздовж трубопроводу від їх джерела; зміни в параметрах корозійного середовища, тощо. Найбільший вплив, звичайно, має робота сусідніх СКЗ, гальванічно з'єднаних підземним сталевим трубопроводом, що особливо помітно у випадку їх не синфазного підключення до джерела змінної напруги. Це провокує утворення значних знакозмінних струмів перетікання у зоні їх спільного впливу.

Як наслідок, зменшення цих струмів, які не є безпосередньо задіяними в забезпеченні захисного потенціалу на підземному сталевому трубопроводі, позитивно впливатиме на величину загального струму, споживаного із СКЗ, і відповідно покращуватиме енергетичні характеристики системи.

Розглядаючи дві суміжні станції катодного захисту гальванічно з'єднані підземним сталевим трубопроводом, в системі виключно омичних складових і постійного струму \ напруги можливо їх представити у наступному виді.

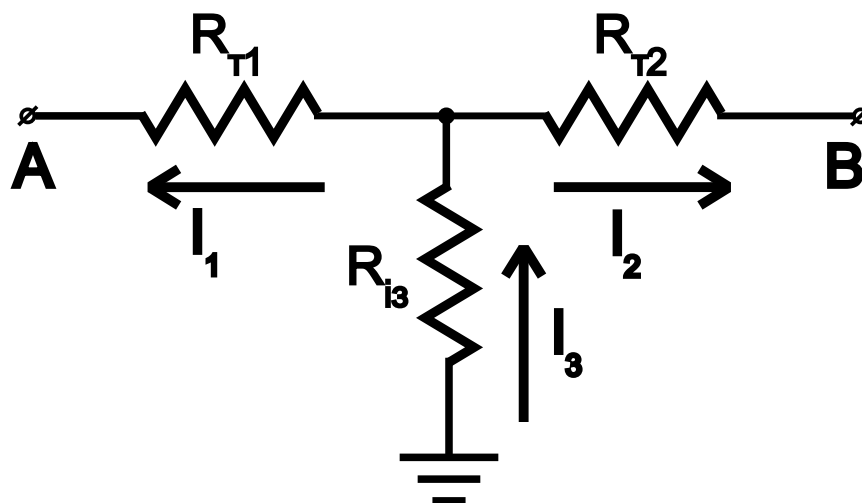


Рис. 137. Спрощений вид відрізка трубопроводу, що знаходиться між двома СКЗ
Де, R_T – опір трубопроводу; R_{i3} – опір ізоляції; А та В точки підключення суміжних станцій катодного захисту.

Відповідно за законом Кірхгофа, було б справедливо:

$$I_3 = I_1 + I_2$$

$$I_2 = I_1 - I_3$$

Однак, якщо прийняти до уваги, факт наявності нееквіпотенціальності точок А та В, до яких підключено дві суміжні СКЗ, то стає очевидним факт, що струми I_1 та I_2 складаються із декількох складових. Як із частини струму I_3 , що пройшов від аноду, через землю; так і струмів вирівнювання, що утворюються в наслідок різниці потенціалів φ_A та φ_B . При цьому ці складові струму можуть приймати знакозмінний характер, що в свою чергу провокує та прискорює корозійні процеси.

Мінімізація цієї різниці потенціалів надасть можливість не тільки зменшити корозійні ризики, які провокують станції катодного захисту при суміжній роботі, але й покращить їх енергоефективність за рахунок зменшення споживання кожної станції.

Розглядаючи корозійну небезпеку струмів перетікання необхідно визначити за якої різниці потенціалів між точками А і В, спровоковані ними корозійні процеси можливо не приймати до уваги.

Проникаюча корозія із швидкістю 0,005 мм/рік є характерною для досить стійких до корозії металів. А отже відповідні їй значення щільності струму корозії і корозійного струму можуть розглядатися прийнятними для забезпечення достатнього протикорозійного захисту. Щільність струму корозії матиме значення:

$$j_{\text{кор}} = 0,85v_2 = 0,85 \cdot 0,005 = 0,00425 \text{ A/м}^2$$

Відповідно струм корозії на розглянутому раніше відрізку труби дорівнює:

$$I_{\text{кор}} = j_{\text{кор}} \cdot A = j_{\text{кор}} \cdot \pi D l = 0,00425 \cdot 3,14 \cdot 159 \cdot 10^{-3} \cdot 10000 = 21,23 \text{ A}$$

Отже різниця потенціалів повинна дорівнювати:

$$\varphi_A - \varphi_B = I_{\text{кор}} \cdot R_p = 21,23 \cdot 0,744 = 15,8 \text{ В}$$

R_p – загальний опір відрізка трубопроводу.

4.5 Три СКЗ, що працюють суміжно на один трубопровід

Одним із наступних досліджуваних випадків різних режимів роботи є випадок підключення трьох СКЗ які забезпечують захист двох відрізків трубопроводу довжиною 10 км.

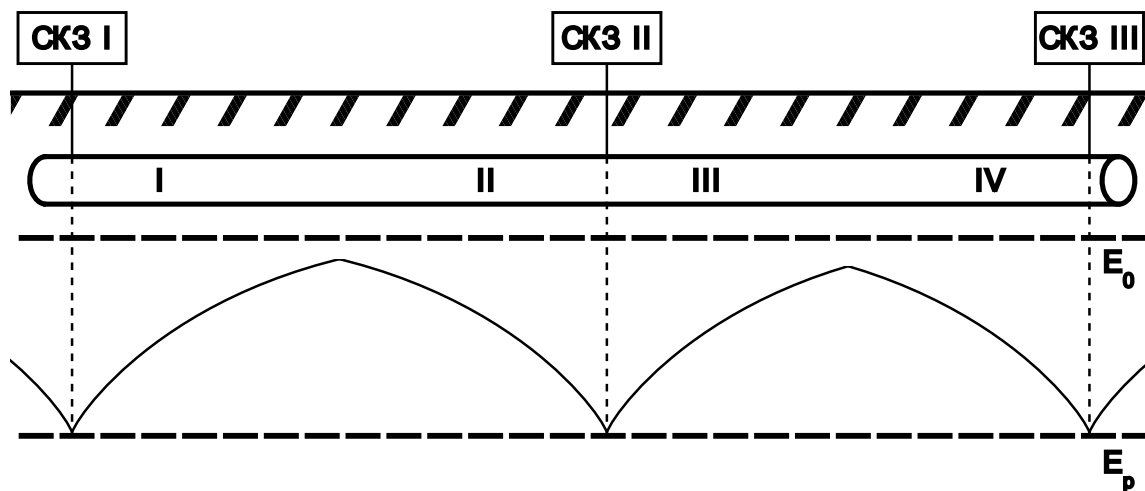


Рис. 138. Схема трубопроводу, що захищений трьома СКЗ

До можливих режимів відносять:

- симетрична робота трьох СКЗ;
- несиметрична робота трьох СКЗ;
- симетрична робота СКЗ, але перша (ліва) станція вимкнена;
- несиметрична робота СКЗ, але перша (ліва) станція вимкнена;
- симетрична робота СКЗ, але третя (права) станція вимкнена;
- несиметрична робота СКЗ, але третя (права) станція вимкнена;
- симетрична робота СКЗ, але друга (проміжна) станція вимкнена;
- несиметрична робота СКЗ, але друга (проміжна) станція вимкнена

Модель двох відрізків трубопроводу із трьома активними, синфазно підключеними станціями має наступний вигляд:

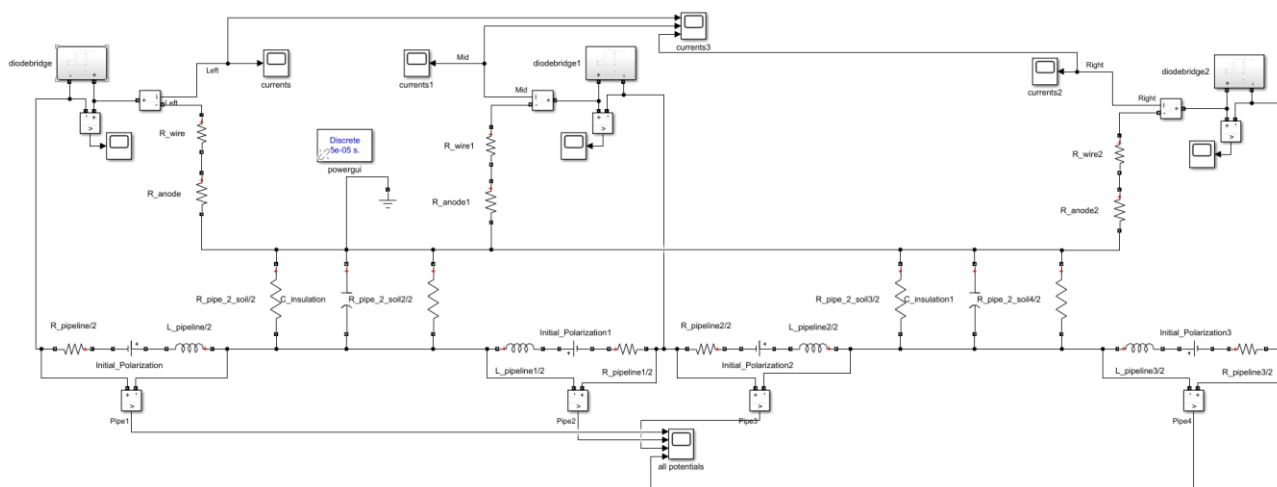


Рис. 139. Модель трубопроводу, що захищений трьома СКЗ

Кожна станція катодного захисту перша, друга та третя, представляє собою мостовий випрямляч із джерелом синусоїдної напруги, фазу якої можливо змінювати. Нитка модельованого трубопроводу розбита на 4 відрізки. За відсутності зсуву фаз джерел живлення перетворювачів кожної СКЗ, усі фази вважаються підключеними до однієї. У такому випадку споживання струму станцій має наступний вигляд:

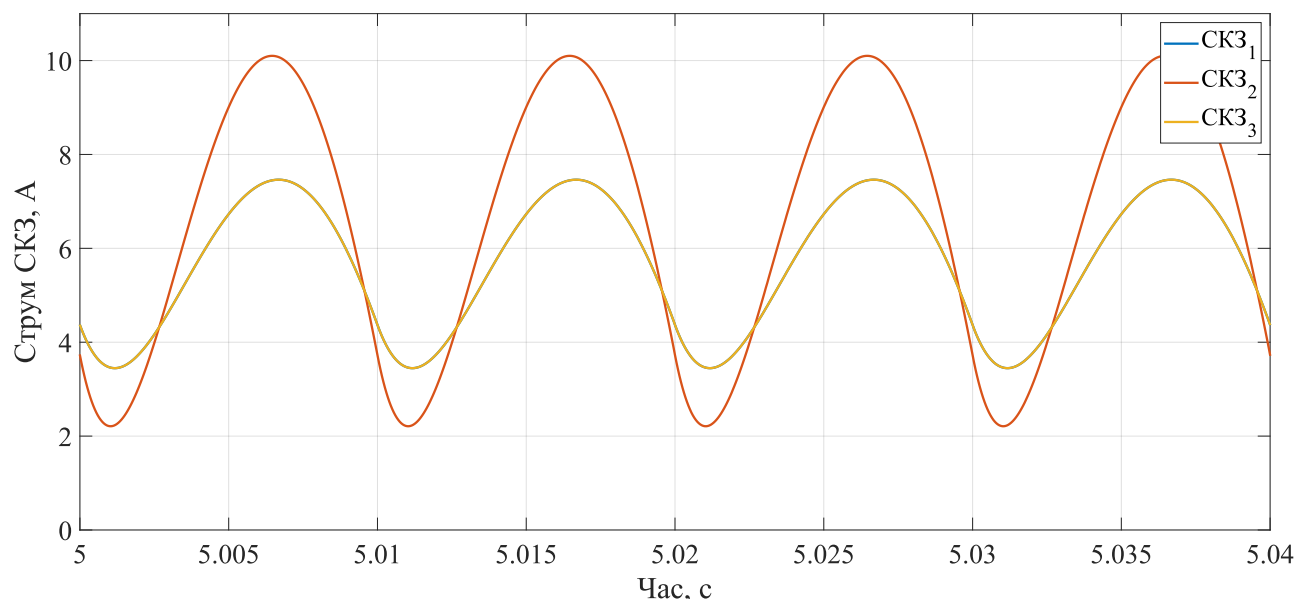


Рис. 140. Струми СКЗ, за синфазного підключення

Вихідний струм першої (лівої) СКЗ та третьої (правої) СКЗ є однаковими і після завершення перехідного процесу коливаються навколо одного значення. Одночасно струми другої (середньої) СКЗ має сильно більший струм, оскільки підключена до відрізків трубопроводу 2 та 3, тобто має вдвічі більше навантаження ніж інші дві СКЗ.

Зміна потенціалу за часом на відрізках трубопроводу має наступний вигляд:

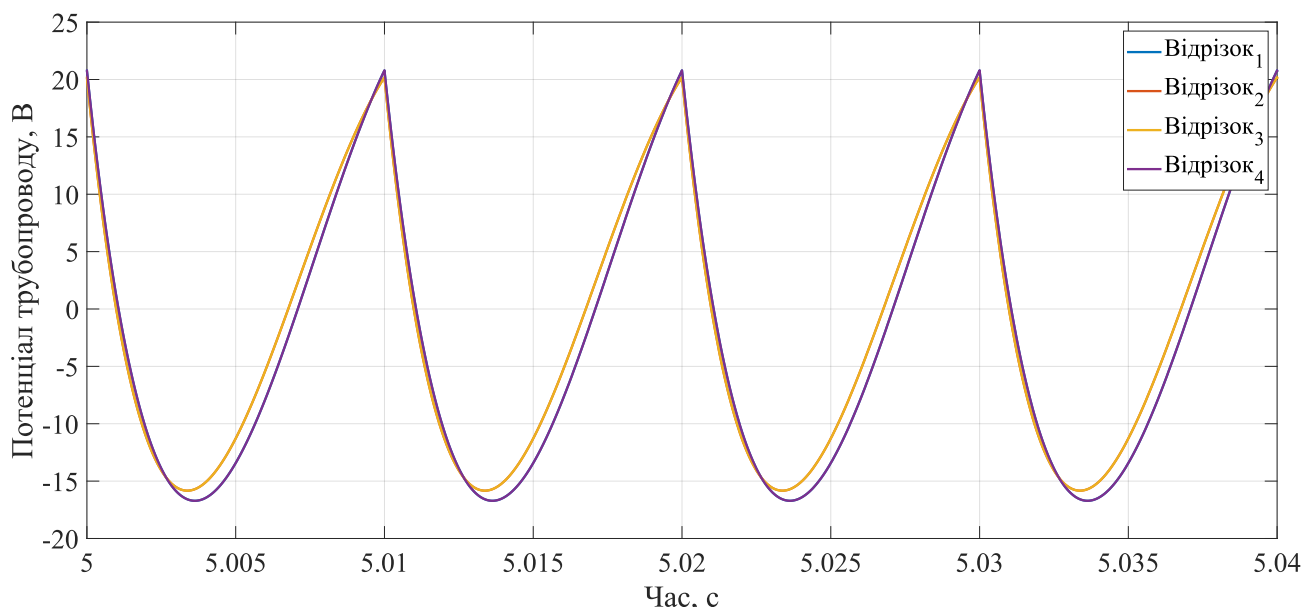


Рис. 141. Потенціали відрізків трубопроводу, за синфазного підключення

Потенціали першого (лівого) і четвертого (правого) відрізків трубопроводу є однаковими і показує чітку напівсинусоїдальну форму із затягуванням в позитивну складову, що, викликані наявністю індуктивної складової. Середній рівень потенціалу дорівнює -2.4 В. З іншого боку потенціали центральних відрізків два та три, що також співпадають, мають менш від'ємні значення і в середньому дорівнюють -1.52 В. За наявності зсувів фаз між СКЗ спостерігається наступна картина по струму:

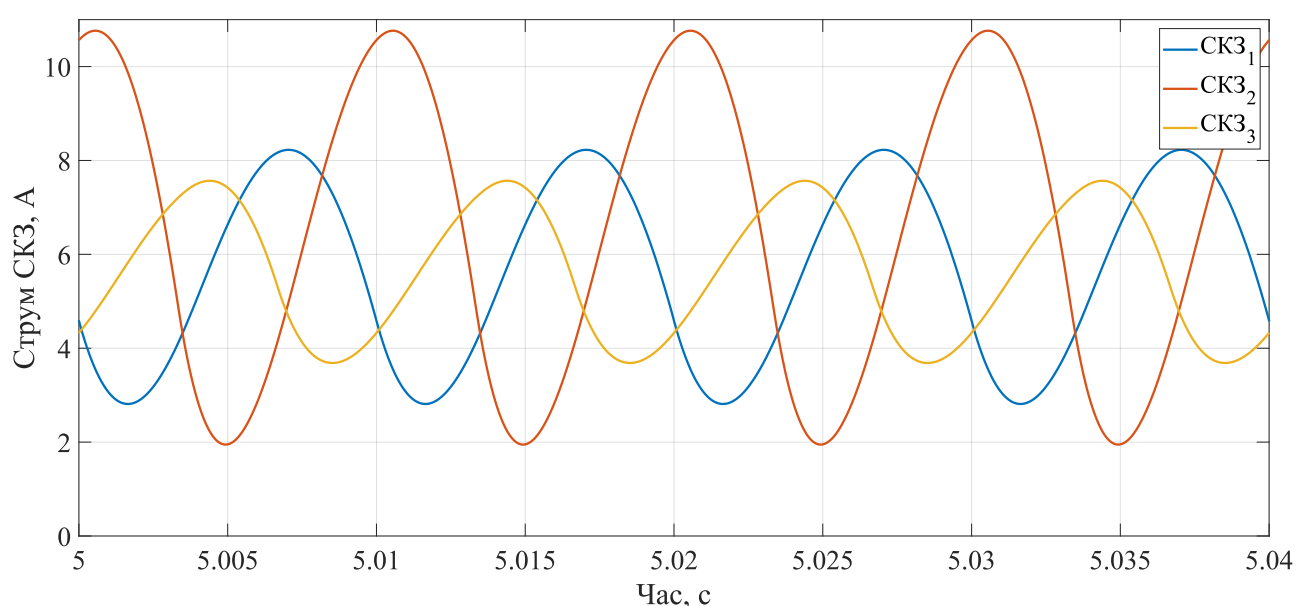


Рис. 142. Струми СКЗ, за несинфазного підключення

Збільшуються значення струмів першої та другої СКЗ, а третя залишається майже без змін. Чітко спостерігається зміщення фаз струмів. Максимальне амплітудне значення споживаного струму залишається на другій СКЗ. Потенціал відрізків трубопроводу приймає наступний вигляд:

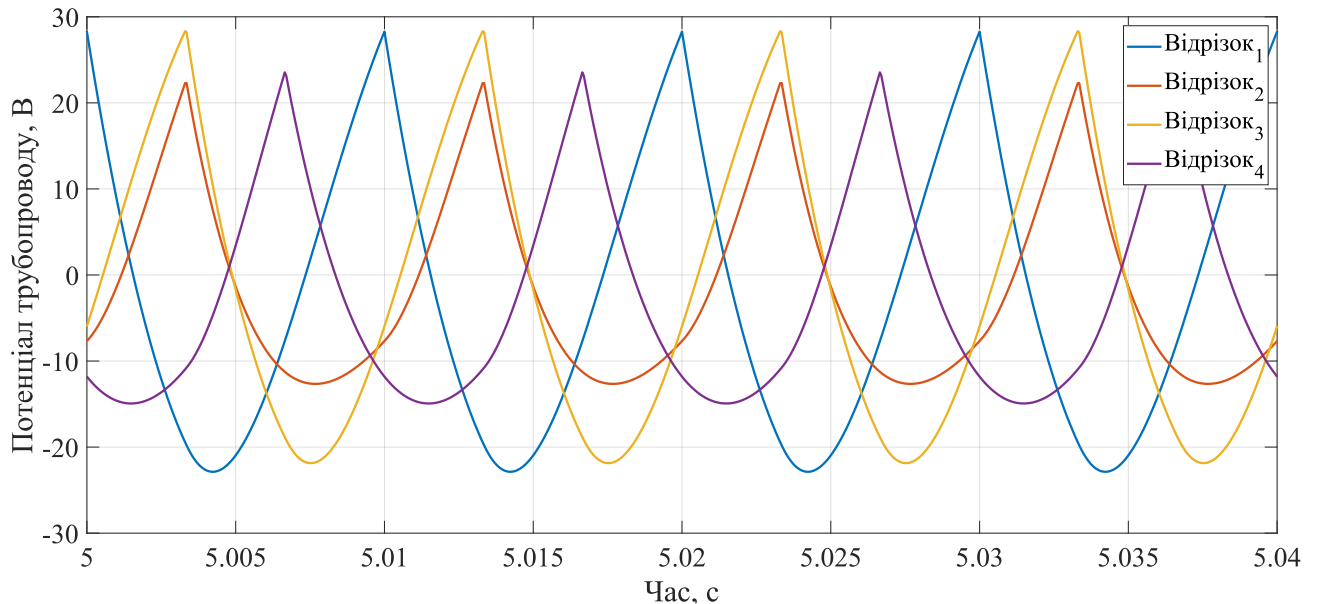


Рис. 143. Потенціали відрізків трубопроводу, за несинфазного підключення

Потенціали на відрізках перестали бути попарно рівні. Форми потенціалів залишаються подібними один до одного і до попереднього випадку. Середній потенціал першого відрізка дорівнює -2,4 В, другого - -1,52 В, третього - -1,52 В, четвертого - -2,4 В.

У випадку відключення лівої СКЗ без зсуву фаз, модель приймає наступного вигляду:

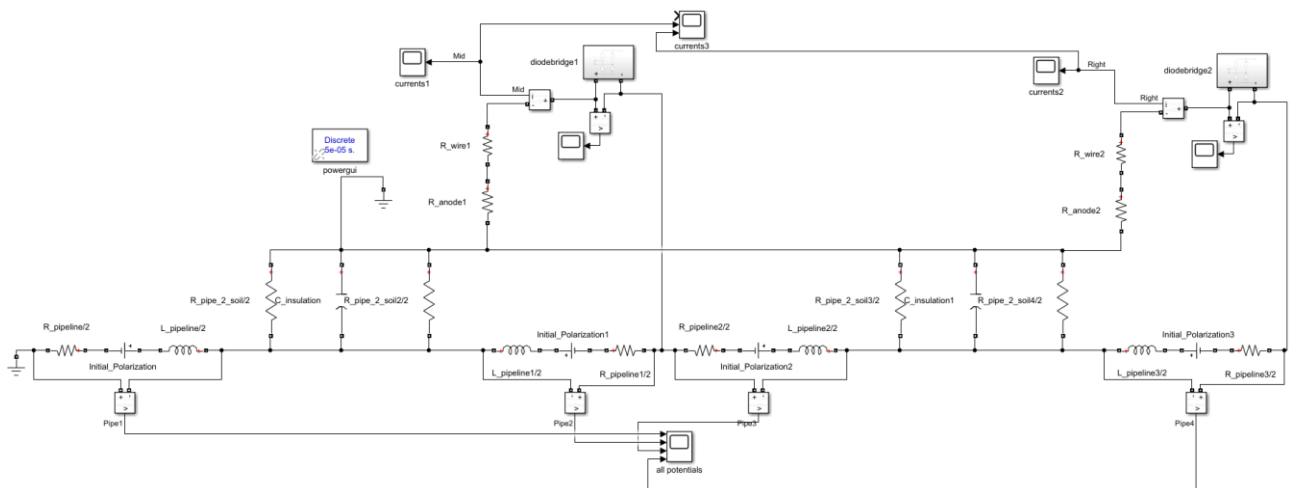


Рис. 144. Модель трубопроводу, що захищений трьома СКЗ (І СКЗ відключена)

Струм другої та третьої СКЗ показують наступну залежність від часу:

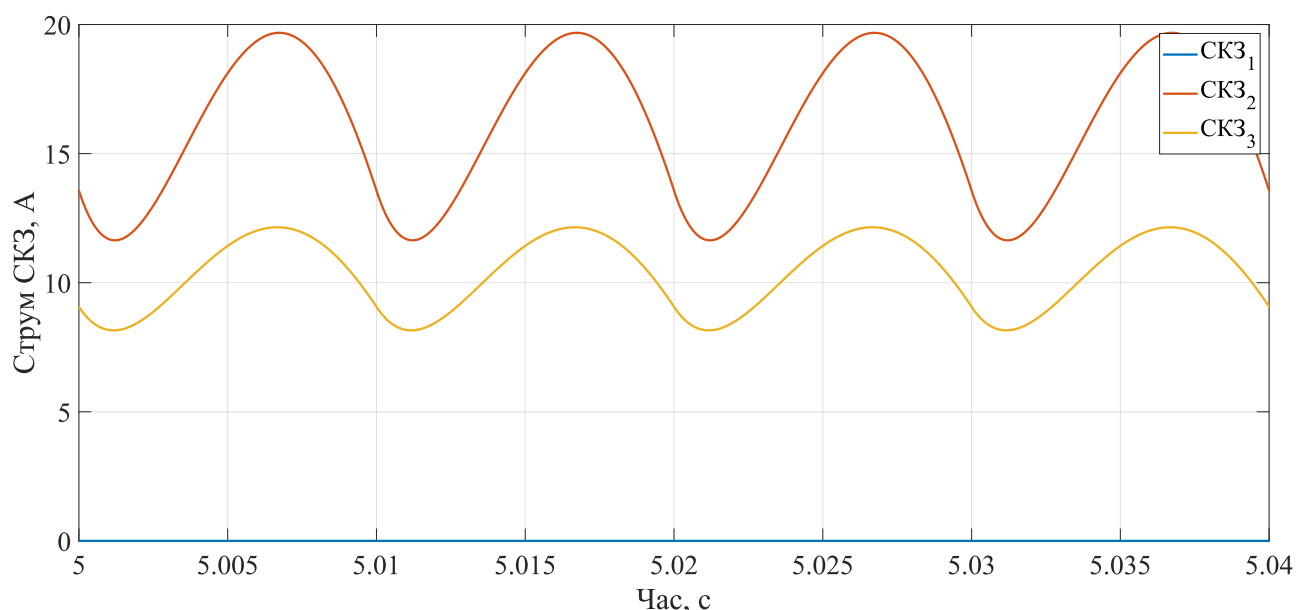


Рис. 145. Струми СКЗ, за синфазного підключення

Помітно збільшився струм споживаний обома станціями, що особливо помітно для другої СКЗ, яка і була найбільш навантаженою, струм з якої зріс майже вдвічі, у порівнянні із випадком із усіма присутніми станціями.

Зміна потенціалу в часі показує наступну картину:

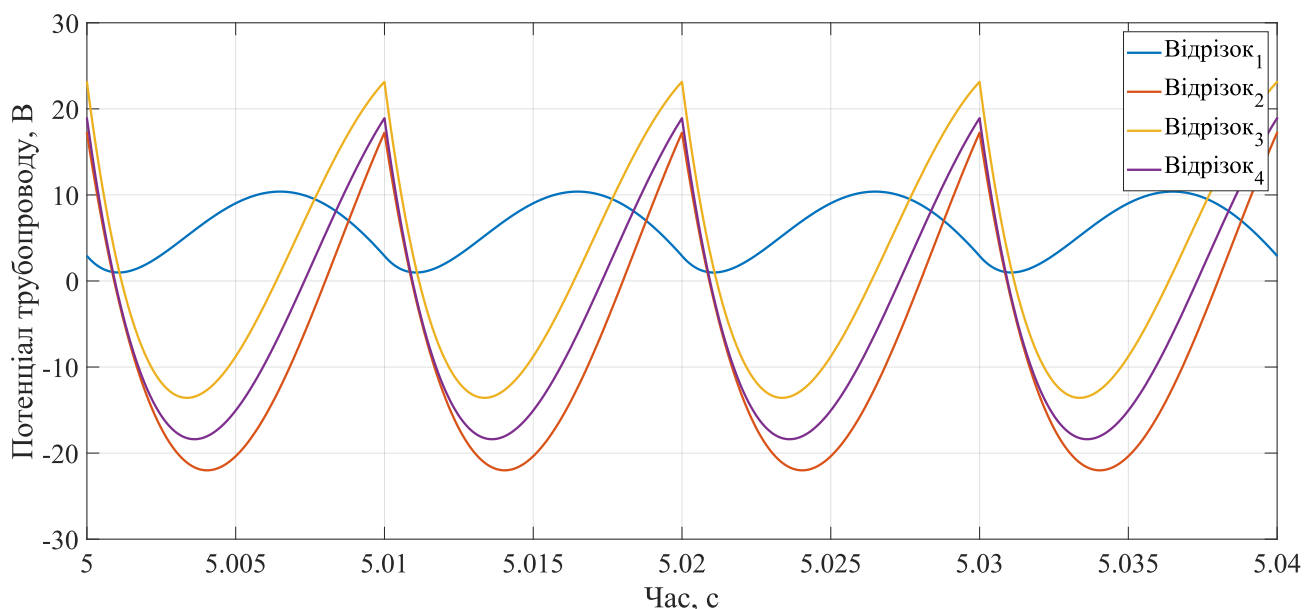


Рис. 146. Потенціали відрізків трубопроводу, за синфазного підключення

Потенціал на першому незахищеному відрізку коливається в додатному діапазоні із середнім значення 6,2 В, тобто знаходиться під значним корозійним

впливом. Середнє значення потенціалу на сусідньому відрізку 2 сягає $-7,75$ В, що значно перевищує допустимі рівні катодної поляризації. Відрізок 3, хоча і має від’ємні зони, середнє значення є додатнім і становить $1,18$ В, що означає наявність корозійних ризиків. І останній четвертий відрізок із середнім значенням в $-4,15$ В, що також є небезпечним. Тобто відключення суміжної СКЗ, завдає значного негативного впливу на суміжні ділянки.

У випадку різнофазного підключення отримано наступну залежність струму:

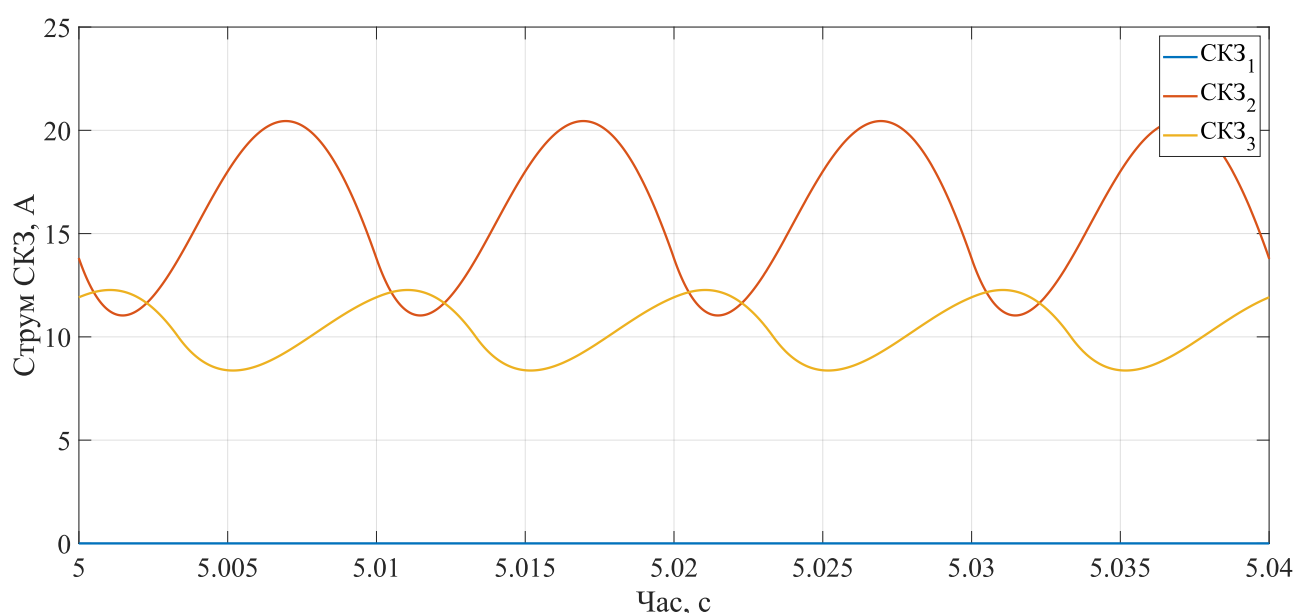


Рис. 147. Струми СКЗ, за несинфазного підключення

Наявність зсуву фаз провокує подальший ріст струму споживаного із кожної СКЗ у порівнянні із синфазним випадком.

Зміна потенціалу за часом:

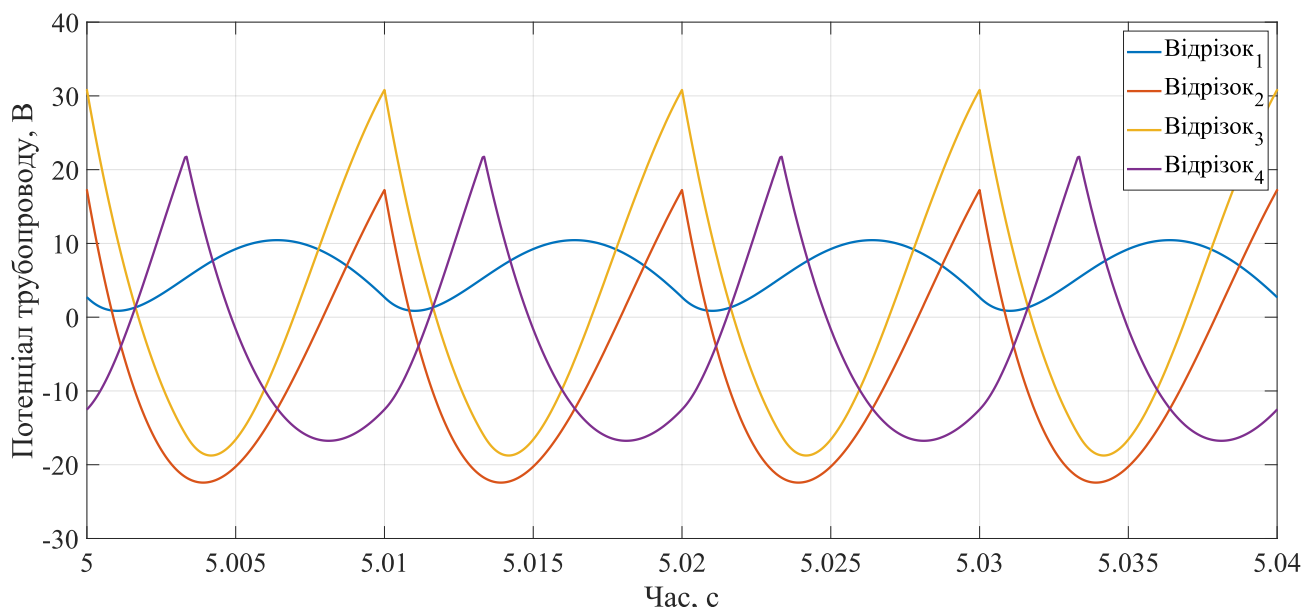


Рис. 148. Потенціали відрізків трубопроводу, за несинфазного підключення

Перший відрізок, залишається не захищеним. Другий та четвертий зазнають перекомпенсації із середніми значеннями в -7,75 В і -4,15 В відповідно. Третій відрізок знаходиться під корозійним впливом із середнім значенням захисного потенціалу в 1,18 В.

Аналогічно розглядаємо випадок із відсутністю правої СКЗ.

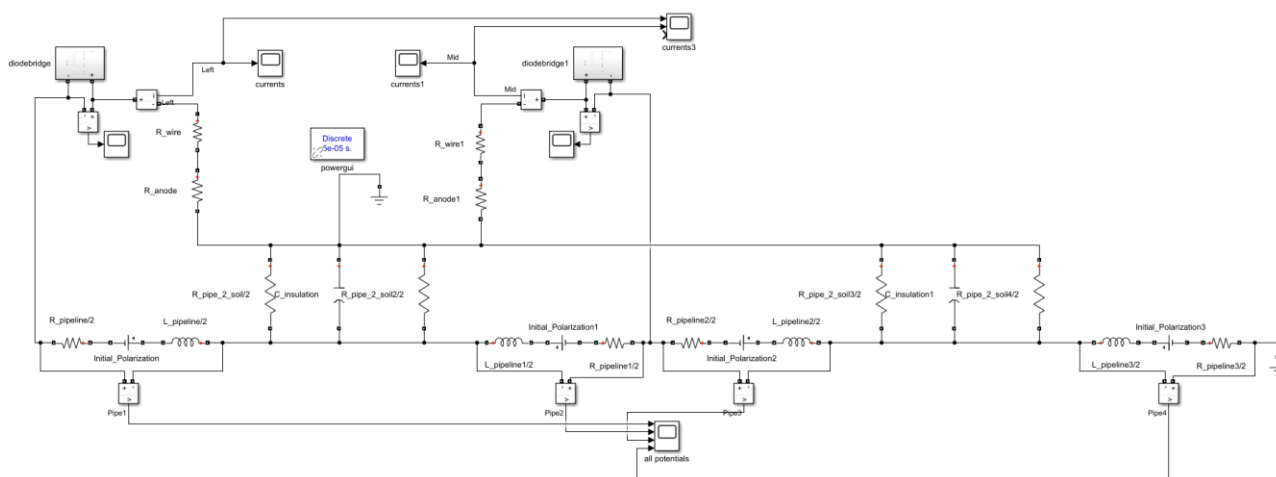


Рис. 149. Модель трубопроводу, що захищений трьома СКЗ (ІІІ СКЗ відключена)

Споживаний струм:

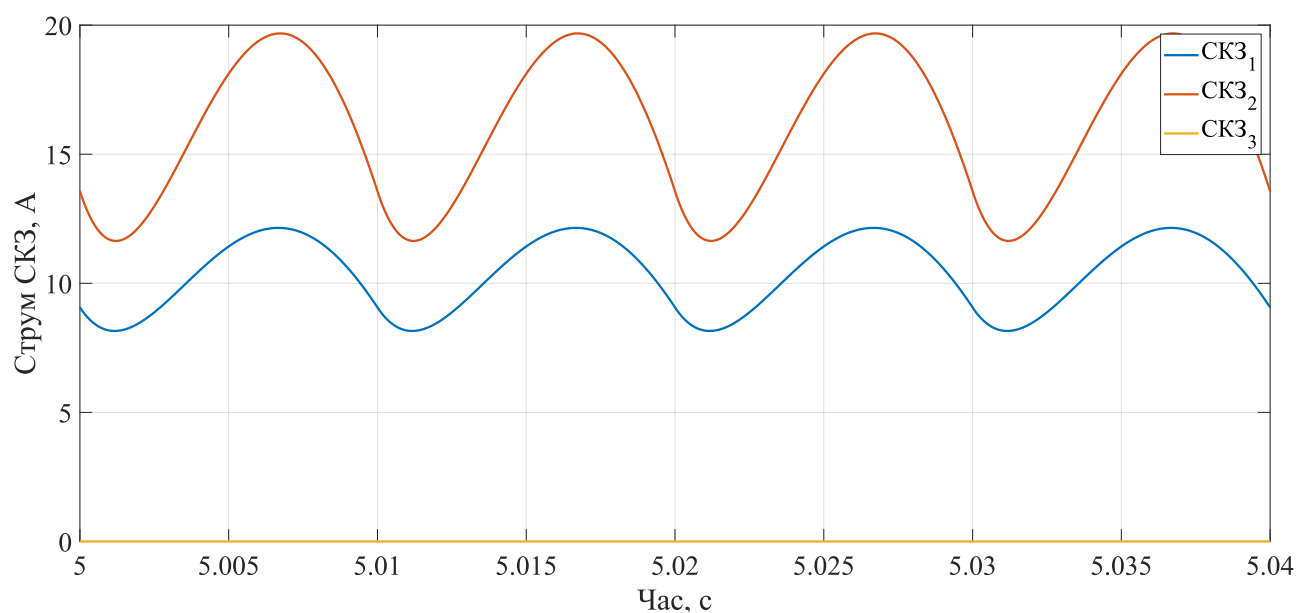


Рис. 150. Струми СКЗ, за синфазного підключення

Потенціали:

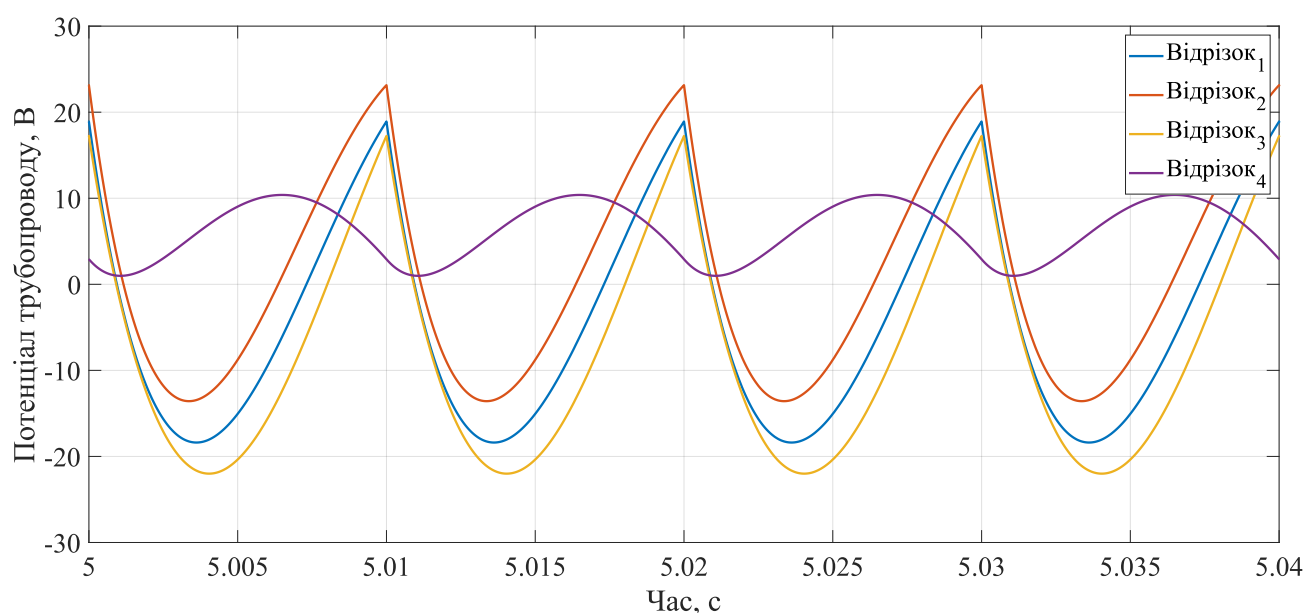


Рис. 151. Потенціали відрізків трубопроводу, за синфазного підключення

Отримані графіки симетричні випадку із відключенням першої СКЗ при синфазній роботі двох інших станцій.

Із зсувом фаз отримаємо наступні залежності. Струм:

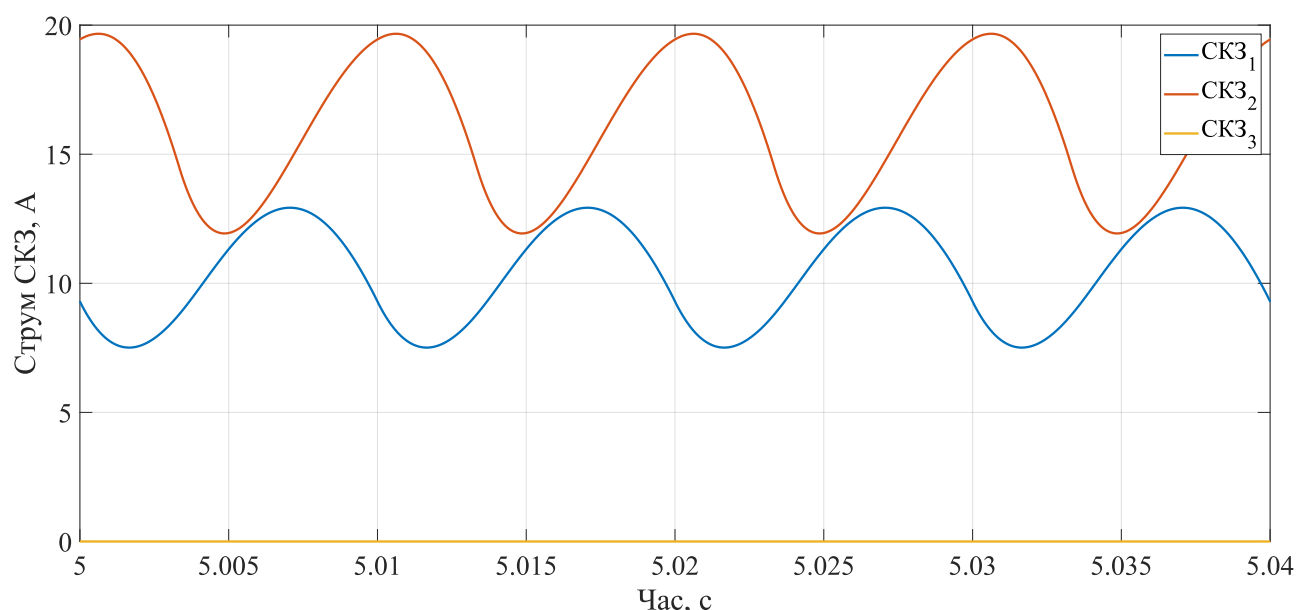


Рис. 152. Струми СКЗ, за несинфазного підключення

Продемонстровані залежності мають відмінний від випадку відключення першої СКЗ вигляд, через інший напрямок зсуву фаз. В результаті чого величини струму другої СКЗ мають дещо менші максимальні значення, а струм іншої СКЗ, що залишається не відключеної, має збільшені значення у порівнянні із попереднім випадком при відключеній першій СКЗ.

Зміна потенціалів:

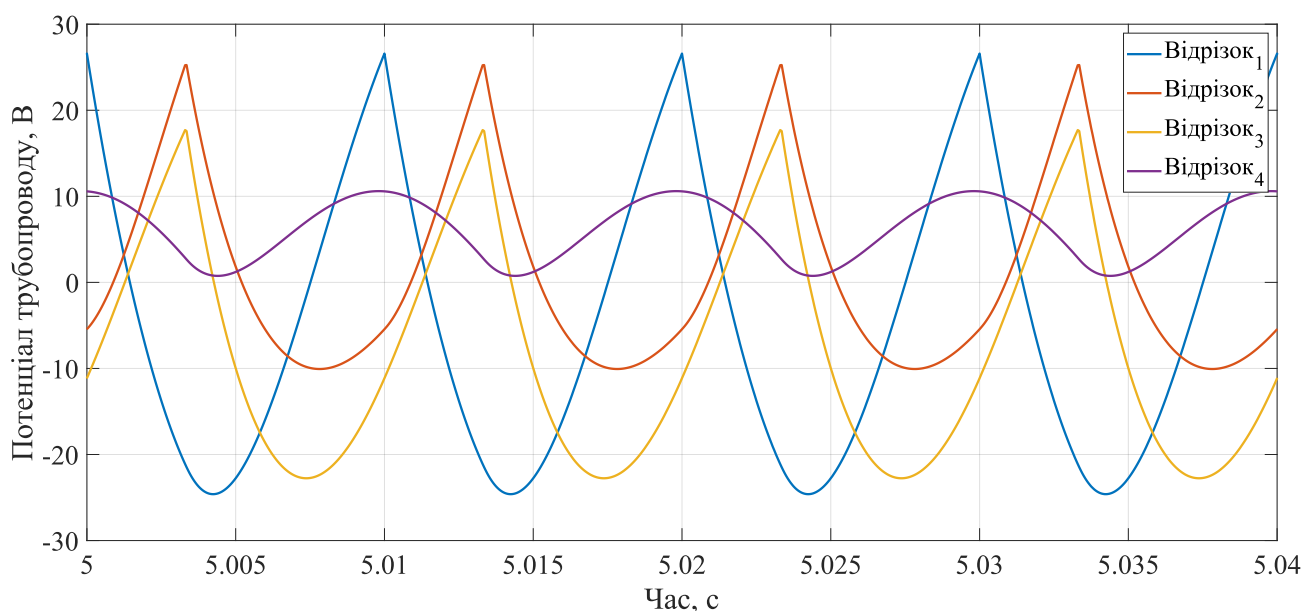


Рис. 153. Потенціали відрізків трубопроводу, за несинфазного підключення

Четвертий відрізок, залишається не захищеним із середнім потенціалом 6,18 В. Третій та перший зазнають надмірної катодної поляризації із середніми значеннями в -7,75 В і -4,15 В відповідно. Другий відрізок знаходиться під корозійним впливом із середнім значенням захисного потенціалу в 1,18 В.

При вимкненні другої СКЗ, модель приймає наступний вигляд:

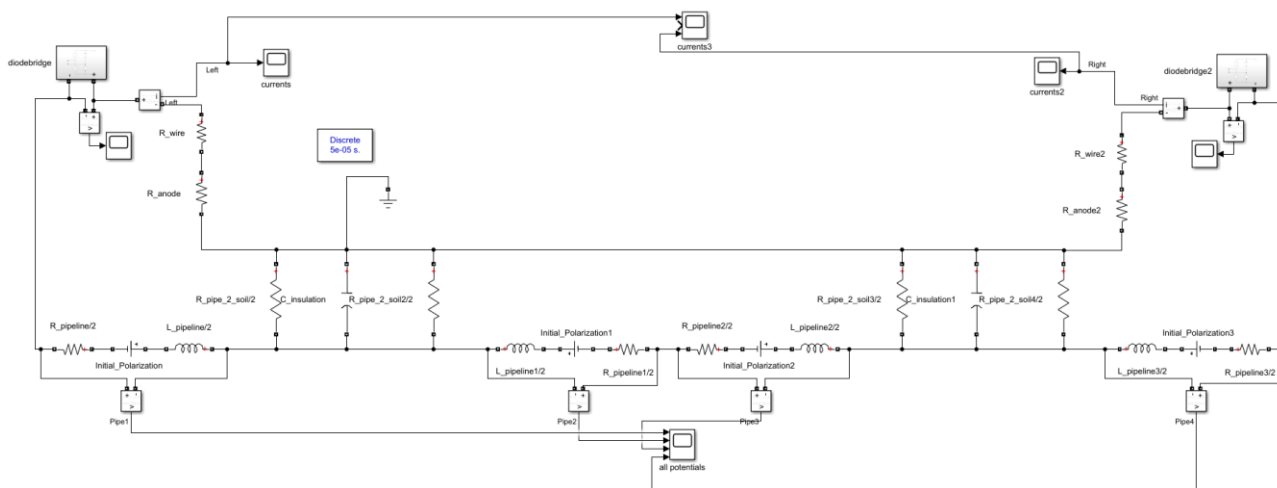


Рис. 154. Модель трубопроводу, що захищений трьома СКЗ (II СКЗ відключена)

Графік споживаного струму:

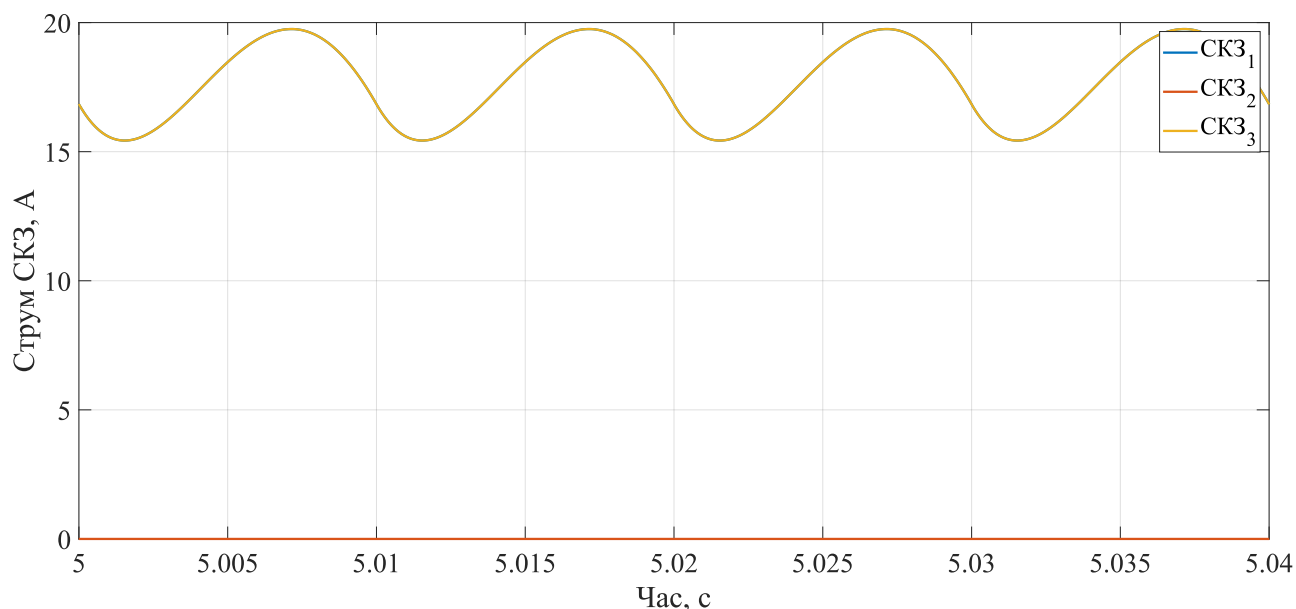


Рис. 155. Струми СКЗ, за синфазного підключення

Перша та друга СКЗ споживають однаковий струм, що коливається навколо сталого значення.

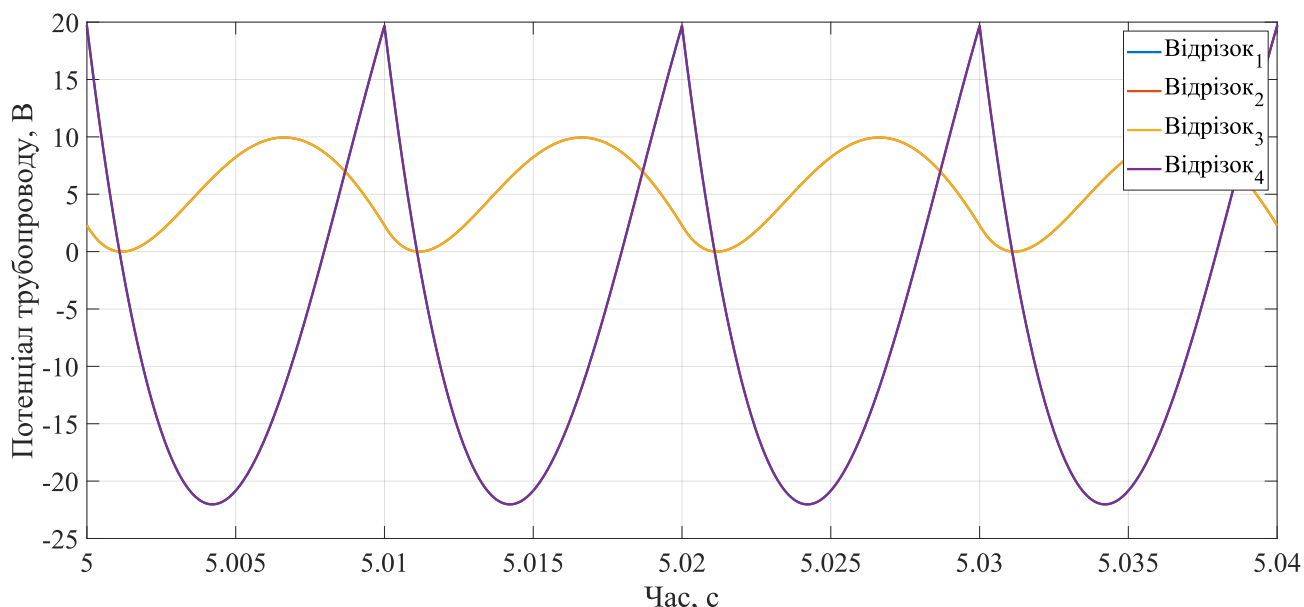


Рис. 156. Потенціали відрізків трубопроводу, за синфазного підключення

Зміна потенціалів за часом першого і четвертого відрізків є однаковими і в середньому становить -6,9 В. А для другого і третього, які також співпадають становить 5,45 В.

Для несиметричного підключення струм має наступну залежність.

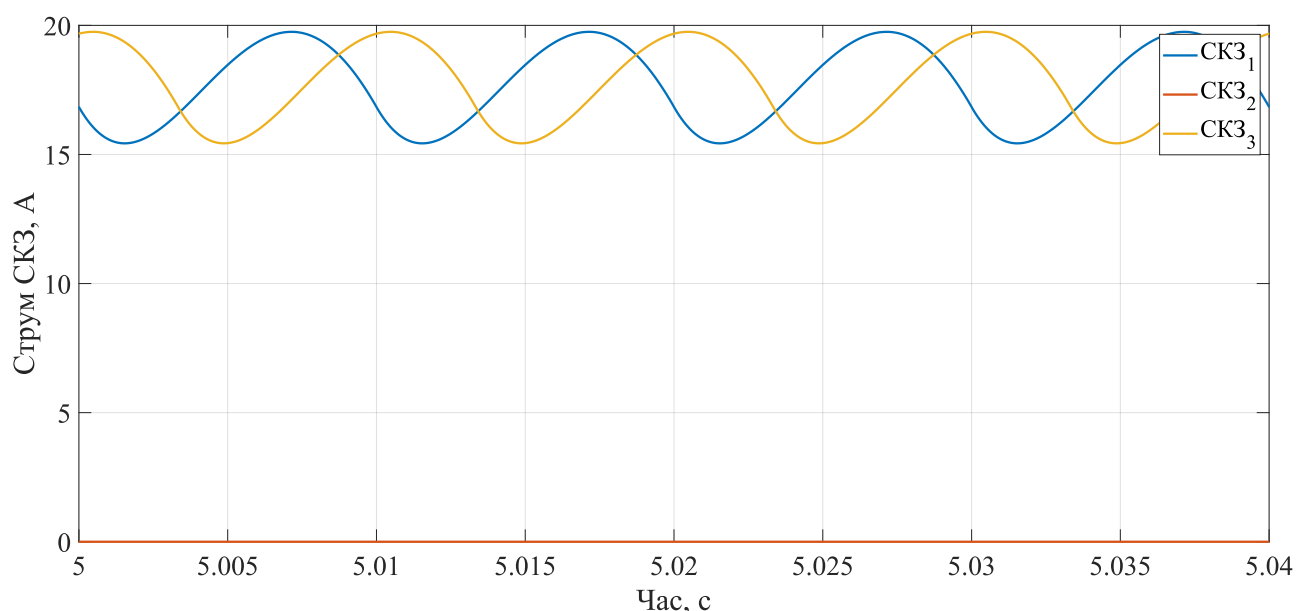


Рис. 157. Струми СКЗ, за несинфазного підключення

Спостерігається зсув фаз струму при збереженні його величини як і у синфазному випадку.

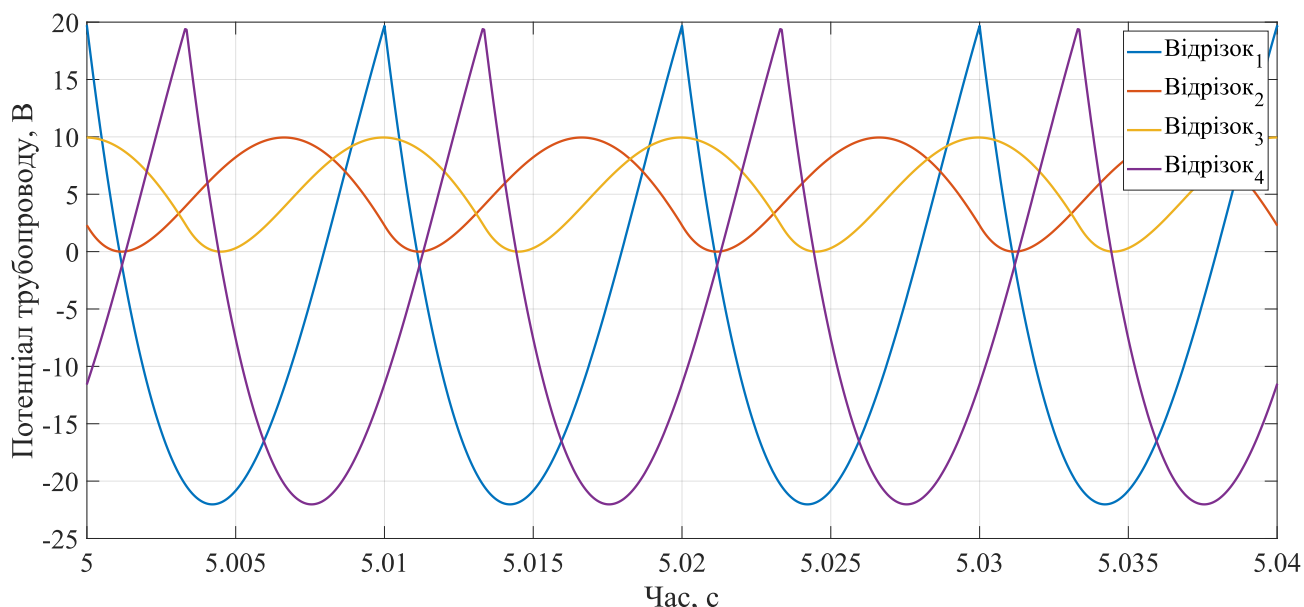


Рис. 158. Потенціали відрізків трубопроводу, за несинфазного підключення

Зміна потенціалів із часом також показує наявність зсуву фаз із середнім значенням для першого та четвертого відрізків $-6,9$ В, а для другого і третього $5,45$ В.

Продемонстрована серія моделювань наочно демонструє, що відключення будь-якої із трьох суміжних станцій катодного захисту призводить до дестабілізації розподілу захисного потенціалу по підключеним до них відрізків трубопроводу. При цьому небажані впливи, викликані відключенням станції утворюють обидва можливі випадки: поява позитивного потенціалу, що прискорює корозію, та надмірна катодна поляризація, яка провокує утворення водню, що призводить до відшарування ізоляції [51].

На основі отриманих спостережень можливо зроби висновок, що у випадку відключення станції катодного захисту, необхідно модифікувати режими роботи суміжних станцій для забезпечення деякого мінімального захисного потенціалу. Формування хоча б деякого захисного потенціалу, який би забезпечував потенціал споруди менший за природній потенціал металу трубопроводу, є необхідною умовою підтримки мінімального протикорозійного захисту, що є важливим приймаючи до уваги вік і стан сучасних українських трубопроводів.

4.6 Рекомендації

На основні проведених досліджень, можливо зробити висновки про необхідність розробки таких законів керування станціями катодного захисту, які можуть забезпечити оперативне реагування на зміни стану суміжних станцій за умов часткового блекауту (знеструмлення). Основною метою законів керування є забезпечення максимально можливого за поточних умов рівня захисного потенціалу, який сповільнює швидкість протікання корозійних процесів в підземних сталевих трубопроводах. При цьому захисний потенціал, що можливо утворювати в наведеному нештатному режимі, часто може не сягати нормативних значень в $-0,75$ В, а принаймні повинен подовжувати цілісність підземного трубопроводу шляхом утримання потенціалу більш від'ємного за власний потенціал металу трубопроводу в умовах відсутності електрохімічного захисту.

До можливих шляхів модифікації законів керування станціями катодного захисту:

1. Забезпечити узгодження фаз до яких підключено живлення випрямлячів суміжних станцій;
2. Уніфікувати схемотехнічне виконання станцій катодного захисту, що сумісно працюють та є поєднаними гальванічно об'єктом захисту;
3. Приймаючи до уваги наявність ємнісної складової схеми заміщення підземних сталевих трубопроводів, використовувати частотний спектр вихідного сигналу СКЗ, в якості каналу керування. Шляхом регулювання кута керування силових ключів перетворювача, можливо змінювати розподіл потужності за частотою, що в свою чергу змінює величину струму, що проходить через ізоляцію до навколишнього середовища, яка відіграє роль ємнісного компонента.

В третьому розділі наголошувалась увага на подвійній складовій струмів у системі «СКЗ – ґрунт – трубопровід» які обумовлюють корозійні процеси, що представлена струмами стікання натікання на трубопровід із ґрунту і струмами, що перетікають по його поверхні. Як наслідок, утворюються необхідність надання рекомендацій та законів керування щодо мінімізації корозійних впливів кожного з

струмів (стікання або натікання до навколишнього середовища та струмів вирівнювання).

Струми, що стікають або натікають на підземний трубопровід із навколишнього середовища, а отже приймають основну участь у корозійних процесах за умови їх домінування за амплітудою, що викликані саме взаємодією металу газопроводу і ґрунту, є основним фокусом робіт багатьох дослідників, і як наслідок представляють собою питання яке має достатньо широкий спектр рекомендацій та алгоритмів щодо їх мінімізації. На основі моделювання впливів різних частотних складових на трубопровід в розділах три та чотири зроблено висновки, що у випадку пошкодженої, недосконалої, застарілої, пористої ізоляції струми стікання / натікання становлять значну частину усієї потужності, що споживається станцією катодного захисту *і майже не залежить від частоти*.

Відповідно, схемотехнічне рішення випрямляча у складі СКЗ, яке безпосередньо обумовлює спектр частот у складі сигналу на виході станції катодного захисту, не відіграє значної ролі і може обиратися виходячи із необхідності забезпечення потрібного рівня керування системою. При цьому максимальну гнучкість керування режимами роботи СКЗ, забезпечує саме використання сучасних високочастотних перетворювачів.

У протилежному випадку, коли підземний трубопровід має нову, якісну ізоляцію, значного впливу на систему завдає її ємнісна складова у електротехнічній схемі заміщення. Це в свою чергу обумовлює вплив високочастотних складових вихідного сигналу станцій катодного захисту на величину струмів стікання натікання. Що означає, що із підвищенням якості ізоляції трубопроводу, більш бажаними схемотехнічними рішеннями, є класичні, такі як мостовий некерований та найпростіший керований випрямлячі, що забезпечують мінімальне розповсюдження потужності вихідного сигналу у високочастотну зону.

З іншого боку, розглядаючи струми, що перетікають поверхнею трубопроводу основним методом їх зменшення є забезпечення мінімальної різниці потенціалів, що формуються СКЗ, що працюють суміжно.

До засобів мінімізації різниці потенціалів відносяться:

Використання уніфікованих схемотехнічних рішень в складі станцій катодного захисту. Однакове виконання випрямлячів СКЗ надає змогу мінімізувати відмінності між вихідними сигналами суміжних СКЗ, тим самим уникаючи різних миттєвих значень потенціалів, а отже звести до мінімуму їх різницю. Крім того уніфіковане рішення дає можливість припустити виключення факторів які впливають на систему із боку випрямляча, таких як різний коефіцієнт корисної дії та затримка на відкриття силових ключів.

Наступним методом є забезпечення однакових рівнів потужності, що надається станціями для захисту підземного сталевого трубопроводу. Таким чином забезпечуються однакові амплітуди коливань потенціалу, що також мінімізує різницю потенціалів на суміжних станціях.

За умови виконання двох попередніх умов різниця потенціалів між станціями може утворюватися через відмінність фаз вихідних сигналів, що призводить до різних миттєвих значень. Підключення суміжних станцій катодного захисту до однієї фази живлення забезпечує мінімізацію впливу цього фактору.

Ще одним із можливих факторів, що впливають на утворення захисного потенціалу на підземному трубопроводі є конструкція і матеріал анодного заземлення, які приймають участь в формуванні ланцюга СКЗ – ґрунт – трубопровід. Відповідно їх неоднорідність і різнотиповість впливає на величину струмів стікання / натікання, що в свою чергу впливають на загальну потужність СКЗ і співвідношення із струмами поверхнею трубопроводу.

Крім того, для забезпечення автоматизованого вирівнювання потенціалів можливо запропонувати алгоритми синхронізованої роботи силовими ключами суміжних станцій катодного захисту, основним завданням яких є забезпечення і підтримання якомога однакових рівнів потенціалів між станціями, тим самим мінімізуючи струми перетікання по трубопроводу.

Отже, виходячи із вище наведеної інформації можливо зробити наступні висновки. По-перше, найбільша різниця потенціалів спостерігається при роботі суміжних станцій катодного захисту при їх не синфазному підключенні до джерела.

Підключення до однієї фази призводить до зменшення різниці потенціалів, а отже і зменшення величини струмів вирівнювання, але повне їх усунення не є фактично досяжним. На практиці ми можемо лише асимптотично наближуватись до нульової різниці потенціалів, підтримуючи її допустимий рівень.

Це обумовлюється характером зміни струму із часом. Розглядаючи струм, що споживається із СКЗ, як струм, що складається із двох складових (струмів перетікання по трубопроводу і струмів стікання – натікання на трубопровід), є логічним пов'язати їх із відповідними частинами схеми заміщення. Тобто струми перетікання протікають через індуктивну складову, а отже не можуть змінюватись миттєво за малий час Δt . І навпаки, оскільки струми стікання - натікання в значній мірі залежать від якості ізоляції, і відповідно протікають через утворену нею ємність, вони повинні змінюватись миттєво.

Однак, насправді, який би малий за довжиною Δl відрізок трубопроводу не розглядався чи моделювався, струми, що стікають чи натікають на трубопровід через ізоляцію, потім подорожують поверхнею трубопроводу до точки підключення станції катодного захисту. А отже, протікають по послідовно підключеним індуктивністю та ємністю.

На основі наведених аргументів можливо зробити наступні висновки: струми стікання – натікання також не можуть змінюватись миттєво; величина відрізка трубопроводу для якого розглядаються струми, не відіграє значної ролі, а отже відсутня необхідність моделювання системи із використанням приватних похідних та розподілених параметрів.

Зазвичай формування захисного та поляризаційного потенціалу відбувається в результаті протікання струмів, що розглядаються як незмінні за значенням. Однак фактично характер зміни струмів за часом є змінним, із наявністю нестационарних складових, і значним впливом стану ізоляції трубопроводу. А отже миттєве значення потенціалу буде відрізнятись від миттєвого значення струму на виході СКЗ, який цей потенціал обумовлює, а також мати зсув за фазою через наявність індуктивності.

Висновки

Окремо досліджено сумісну роботу двох суміжних станцій катодного захисту, що електрично пов'язані між собою ниткою трубопроводу. Доведено, що при їх синфазному підключенні до джерела змінної напруги, струми вирівнювання, що протікають вздовж трубопроводу практично відсутні, а вся споживана потужність використовується безпосередньо на впровадження протикорозійного захисту. Натомість підключення суміжних СКЗ до різних фаз призводить до виникнення значних знакозмінних струмів перетікання, миттєві значення яких можуть досягати декількох ампер. Такі струми не беруть участі у захисті металу, але зумовлюють додаткові втрати енергії та погіршення ефективності системи катодного захисту. Обґрунтовано, що зазначене протиріччя між вимогами синфазного підключення СКЗ до мережі, з метою мінімізації зрівняльних струмів, та практичними можливостями є системною проблемою трубопровідних мереж.

Досліджено вплив стану ізоляційного покриття та типу випрямляча у складі СКЗ на величину струмів перетікання між суміжними станціями. Показано, що для класичних діодних мостових випрямлячів різниця струмів, зумовлена наявністю або відсутністю ємнісної складової ізоляції, швидко нівелюється після завершення перехідних процесів. Натомість у випадку транзисторних високочастотних перетворювачів ця різниця зберігається постійно, що свідчить про істотний вплив високочастотних складових вихідного сигналу на корозійні процеси, особливо за наявності якісної ізоляції. Це дозволило обґрунтувати доцільність використання класичних схем випрямлення в системах із добре збереженим ізоляційним покриттям.

Проаналізовано частотні властивості індуктивної та ємнісної складових схеми заміщення підземного трубопроводу. Встановлено, що зі зростанням частоти значення як індуктивності, так і ємності зменшуються, що призводить до збільшення відповідних струмів. На цій основі обґрунтовано можливість використання частотного спектра вихідного сигналу СКЗ як додаткового каналу керування процесом формування захисного потенціалу. Показано, що ефективність

такого керування повинна враховувати стан ізоляції та геометричні параметри трубопроводу, які визначають параметри електротехнічної схеми заміщення.

Приймаючи до уваги фізичний зв'язок між струмами корозії, поляризаційними процесами та втратою маси металу на основі закону Фарадея, показано, що саме густина анодного струму корозії є кількісною мірою швидкості корозійного руйнування, а її зменшення безпосередньо приводить до зниження корозійних втрат. Обґрунтовано допустимі рівні густини струму корозії, які відповідають прийнятним швидкостям проникаючої корозії, та визначено граничні значення різниці потенціалів між суміжними точками підключення СКЗ, за яких корозійний вплив струмів перетікання може вважатися несуттєвим. Таким чином створено кількісну основу для оцінювання корозійної небезпеки, зумовленої неузгодженою роботою суміжних станцій катодного захисту.

У підпункті 4.5 виконано серію імітаційних експериментів для системи з трьома суміжними СКЗ, що захищають два послідовні відрізки трубопроводу. Проаналізовано симетричні та несиметричні режими їх роботи, а також випадки відключення однієї зі станцій за синфазного та різнофазного живлення. Отримані результати переконливо демонструють, що відключення будь-якої з суміжних СКЗ призводить до різкої дестабілізації розподілу потенціалів уздовж трубопроводу. При цьому одночасно можуть виникати як зони з додатними потенціалами, що прискорюють корозійні процеси, так і ділянки з надмірною катодною поляризацією, небезпечною з точки зору інтенсивного виділення водню та відшарування ізоляційного покриття. Показано, що різнофазне підключення станцій додатково посилює ці негативні ефекти за рахунок зростання струмів та фазових зсувів.

На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що у випадку аварійного або вимушеного відключення однієї зі станцій катодного захисту необхідною є оперативна модифікація режимів роботи суміжних СКЗ. Навіть формування мінімального захисного потенціалу, більш від'ємного за природний потенціал металу трубопроводу, є суттєво кращим за повну відсутність електрохімічного

захисту, особливо з огляду на значний вік і технічний стан більшості діючих трубопроводів.

Наведені моделі дали змогу сформулювати практичні рекомендації щодо побудови законів керування станціями катодного захисту в умовах змінної структури системи протикорозійного захисту та нестабільного енергопостачання. Обґрунтовано доцільність уніфікації схемотехнічних рішень СКЗ, узгодження фаз живлення суміжних станцій та забезпечення близьких рівнів вихідної потужності. Показано, що мінімізація різниці потенціалів між СКЗ є ключовим чинником зменшення струмів перетікання по трубопроводу, які не беруть безпосередньої участі у формуванні захисного потенціалу, але суттєво погіршують корозійну та енергетичну ефективність системи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих теоретичних результатів та комп'ютерного моделювання розв'язано актуальну науково-прикладну задачу вдосконалення законів керування і практичних напрацювань зі використання електротехнічних систем катодного захисту підземних сталевих трубопроводів з урахуванням неоднорідності їх структури, стану ізоляційного покриття, фізико-хімічних властивостей ґрунту а також особливостей роботи випрямлячів суміжних станцій катодного захисту, що дозволило знизити корозійну небезпеку тривало експлуатованих трубопроводів, що набувають неоднорідностей їх електротехнічних параметрів, та підвищити енергоефективність їх систем катодного захисту. Основні науково-прикладні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз сучасних світових і національних тенденцій розвитку у сфері електрохімічного захисту підземних сталевих трубопроводів, існуючих методів формування захисного потенціалу, апаратних рішень станцій катодного захисту та нормативно-технічної бази щодо експлуатації трубопроводів, у т.ч. з неоднорідною структурою. В результаті встановлено, що основним методом транспортування природного газу до споживачів є підземні сталеві трубопроводи. Однак, за час їх експлуатації, трубопроводи зазнають різноманітних впливів від навколишнього середовища, які призводять протікання корозійних процесів, які провокують пошкодження цілісності, що в свою чергу є причиною небажаних і небезпечних наслідків. Засоби протикорозійного захисту обов'язково наявні на трубопроводах і поділяються на дві основні групи: пасивний (ізоляція) і активний (катодний) захисти. Аналіз публікацій та нормативних документів, як вітчизняних так і міжнародних, дав змогу звернути увагу на те, що через розгалужену топологію газопровідних систем та їх довготривалий термін експлуатації, вони піддаються різноманітним впливам навколишнього середовища, які безпосередньо впливають на їх стан та роботу систем електрохімічного захисту, що в свою чергу впливає на процес формування захисного потенціалу вздовж нитки трубопроводу. Крім того

помітний ріст популярності трубопроводів із поліетилену, та їх використання для прокладання і відновлення трубопроводів, що допускається нормативною документацією, не може не впливати на роботу систем катодного захисту і потребує дослідження.

2. Розглянуто можливі види неоднорідностей та виявлено, що наявність ремонтних вставок, виготовлених із поліетилену або просто нового трубопроводу із непошкодженими стінками і новою ізоляцією, призводить до підвищення корозійної небезпеки в суміжних ділянках.

3. Проведено аналіз існуючих моделей системи «станція катодного захисту – ґрунт – підземний сталевий трубопровід», які використовуються в інженерній і науковій літературах, для вивчення різних параметрів системи. В результаті виявлено, що хоча моделі можуть сильно відрізнятися одна від одної за ступенем деталізації і кількістю елементів системи, що приймаються до уваги, однак жодна з наведених не моделей не приймає до уваги неоднорідності із помітно \ принципово відмінними електротехнічними параметрами. Наведено схему заміщення, яку можливо використати для моделювання трубопроводу із наявністю неоднорідності із стрибкоподібною зміною електротехнічних параметрів.

4. Розглянуто типові схеми модулів перетворювачів в складі станцій катодного захисту і досліджено їх роботу на навантаження різних типів. Проведено моделювання та дослідження роботи наведених схем на еквівалентну схему заміщення трубопроводу, за допомогою спектрального аналізу розподілу потужності, що дає можливість розглядати класичні схеми випрямлячів, як найбільш ефективні в складі СКЗ, з точки зору їх взаємодії із трубопроводом і його неоднорідностями.

5. Виконано моделювання різних конфігурацій схеми заміщення і їх взаємодія із випрямлячами СКЗ. Проаналізовано роботу керованих тиристорних випрямлячів за різних кутів керування і транзисторних випрямлячів, та показано, що найбільш несприятливі результати отримано для випрямлячів із ШІМ керуванням силовими ключами, для яких характерні різкі імпульсні перенапруги та надширокий спектр високочастотних складових. Також досліджено роботу ШІМ випрямляча за різних

станів ізоляційного покриття відрізка трубопроводу, що показую значну наявність високочастотних сигналів при пошкодженій ізоляції.

6. Розглянуто шляхи модифікації схеми заміщення, як може більш коректно описувати електричні властивості взаємодії ізоляційного покриття та ґрунту. Показано, що деградація ізоляції з часом, зміна питомого опору ґрунту, а також зростання повздовжнього опору трубопроводу істотно впливають на параметри схеми заміщення. Обґрунтовано необхідність урахування зміни параметрів ізоляції та ґрунту із часом, під час моделювання та проектування систем СКЗ.

7. Досліджено сумісну роботу двох суміжних станцій катодного захисту, що електрично пов'язані між собою ниткою трубопроводу. Продемонстровані впливи струмів вирівнювання на якість протикорозійного захисту, а також визначено залежність впливу стану ізоляційного покриття та типу випрямляча у складі СКЗ на величину струмів перетікання між суміжними станціями. Показано, що для класичних діодних мостових випрямлячів негативний ефект є мінімальним, а для транзисторних високочастотних перетворювачів зберігається постійно, що викликано істотним впливом високочастотних складових вихідного сигналу у його складі.

Проаналізовано частотні властивості індуктивної та ємнісної складових схеми заміщення підземного трубопроводу. Встановлено, що зі зростанням частоти значення як індуктивності, так і ємності зменшуються, що призводить до збільшення відповідних струмів. На цій основі обґрунтовано можливість використання частотного спектра вихідного сигналу СКЗ як додаткового каналу керування процесом формування захисного потенціалу. Показано, що ефективність такого керування повинна враховувати стан ізоляції та геометричні параметри трубопроводу, які визначають параметри електротехнічної схеми заміщення.

8. Виконано серію імітаційних експериментів для системи з трьома суміжними СКЗ та їх симетричними та несиметричними режимами роботи, а також випадки відключення кожної зі станцій. Отримані результати переконливо демонструють, що відключення будь-якої з суміжних СКЗ призводить до різкої дестабілізації розподілу потенціалів уздовж трубопроводу. При цьому одночасно

можуть виникати як зони з додатними потенціалами, що прискорюють корозійні процеси, так і ділянки з надмірною катодною поляризацією, небезпечною з точки зору інтенсивного виділення водню та відшарування ізоляційного покриття. Показано, що різнофазне підключення станцій додатково посилює ці негативні ефекти за рахунок зростання струмів та фазових зсувів.

9. Сформульовано практичні рекомендації щодо побудови законів керування станціями катодного захисту в умовах змінної структури системи протикорозійного захисту та нестабільного енергопостачання. Обґрунтовано доцільність уніфікації схемотехнічних рішень СКЗ, узгодження фаз живлення суміжних станцій та забезпечення близьких рівнів вихідної потужності. Показано, що мінімізація різниці потенціалів між СКЗ є ключовим чинником зменшення струмів перетікання по трубопроводу, які не беруть безпосередньої участі у формуванні захисного потенціалу, але суттєво погіршують корозійну та енергетичну ефективність системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Протокол № 10-4(ГР) – 2019 засідання Громадської ради при Міністерстві енергетики та вугільної промисловості України від 2 липня 2019 року. Додаток 2 до Протоколу № 10-4(ГР) – 2019. URL: <https://mev.gov.ua/storinka/protokol-no-10-4hr-2019-zasidannya-hromadskoyi-rady-pry-ministerstvi-enerhetyky-ta> (дата звернення: 10.05.2026).
2. Результати моніторингу функціонування ринку природного газу за IV квартал 2024 року, Національна Комісія, що Здійснює Державне Регулювання у Сферах Енергетики та Комунальних Послуг. URL: https://www.nerc.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/Sfery_Gaz/Monitoring_ryнку_gaz/2024/monitoryng_gaz_IV-2024.pdf (дата звернення: 14.02.2025).
3. Нафтогаз, Газорозподіл. Показники 2023 р. URL: <https://www.naftogaz.com/business/gas-distribution> (дата звернення: 05.04.2024).
4. План Розвитку Газотранспортної Системи Тов "Оператор ГТС України" на 2021–2030 роки. Київ, 2020. URL: <https://tsoua.com/wp-content/uploads/2020/10/TYNDP-2021-2030-TSO-4.1.pdf> (дата звернення: 18.06.2024).
5. Протяжність та структура власності газорозподільних систем, URL: https://map.ua-energy.org/uk/resources/8ff9aac6-34e1-4932-ae4f-97f3896aed29/?_ga=2.244269381.1360191742.1718703785-274564711.1718703058 (дата звернення: 05.02.2023).
6. Штойко І.П. Методи розрахунку залишкового ресурсу труб магістральних нафтогазопроводів з урахуванням їх корозійно-водневої деградації: дис. канд. техн. наук: спец. 01.02.04. Львів, 2018. 175 с.
7. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study, 2016 by NACE International, 15835 Park Ten Place. (n.d.). URL: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf> (дата звернення: 21.05.2026).

8. Chaudhery Mansar Hussain, Chandrabhan Verma, Jeenat Aslam, Ruby Aslam, Saman Zehra Handbook of Corrosion Engineering. 2023. P. 459. ISBN 9780323951852, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95185-2.00023-X>
9. Товариство з обмеженою відповідальністю «Оператор ГТС України». Історія. URL: <https://tsoua.com/pro-nas/istoria> (дата звернення: 20.09.2025).
10. Столітня історія Львівської газівни або сторінки із історії газифікації Львівщини. URL: <https://photo-lviv.in.ua/stolitnia-istoriia-lvivskoi-hazivni-abo-storinky-iz-istorii-hazyfikatsii-lvivshchyny/> (дата звернення: 18.09.2024).
11. Кіровоградгаз. Історія створення та діяльності підприємства. URL: <https://new.kirgas.com/about/> (дата звернення: 28.11.2025).
12. Tkachenko M. O., Kosteniuk Yu. B. State of the Gas Transportation System: Current Challenges and Risks. Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy, 2 (43). 2022. P. 29–40. [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2022.2\(43\).29-40](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2022.2(43).29-40)
13. Правила технічної експлуатації магістральних газопроводів: СОУ 49.5-30019801-115:2014 [Текст] / УКПТРАНСГАЗ ; [розроб.: В. Костянян (керівник розроб.) та ін.]. Київ : Індустрія, 2014. 265 с. : рис., табл. (Стандарт організації України).
14. Кодекс 2:2021 Газорозподільчі системи. Рекомендації щодо проектування, будівництва, контролювання за будівництвом, введення та виведення з експлуатації газорозподільчих систем. [Чинний від 2022-09-01]. Вид. офіц. Київ, 2022. 92 с.
15. ДБН В.2.5-20:2018 Газопостачання. [Чинний від 2020-06-01] Вид. офіц. Київ, 2019. 109 с.
16. Chernova O., Vytyaz O., Martyniuk R., Fedorovych I. Rational methods of operation of underground gas storages and mitigation of energy losses. Nafta-Gaz. 78. 2022. 187-196. 10.18668/NG.2022.03.03.
17. Чекурін В., Пономарьов Ю., Притула М., Химко О. Підхід до автоматизації управління газотранспортною системою України. 2020. №4(5). С. 23–31. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.04.04>

18. Процеси підземного зберігання газу [Текст]: підручник / М.А. Дудля, Л.М. Ширін, Е.А. Федоренко. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2012. 412 с.
19. Огляд основних причин критичного стану газорозподільної системи України в умовах зростаючих викликів. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/ogliad-osnovnykh-prychyn-krytychnogo-stanu-gazorozpodilnoi-systemy-ukrainy-v-umovakh-zrostaiuchykh-vyklykiv> (дата звернення: 09.10.2023).
20. 12th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970–2022) URL: <https://www.egig.eu/reports> (дата звернення: 21.12.2025).
21. Про ринок природного газу : Закон України від 11.03.2026 р. № 329-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19/ed20260311#Text>
22. Кодексу газотранспортної системи: затв. постановою від 30 вересня 2015 р. № 2493. Київ, 2015. 137 с.
23. Кодекс газорозподільних систем: затв. постановою від 30 вересня 2015 р. № 2494. Київ, 2015. 165 с.
24. Directive 2009/73/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 2003/55/EC (OJ L 211, 14.8.2009. P. 94–136)
25. Regulation (EC) No 715/2009 of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 on conditions for access to the natural gas transmission networks and repealing Regulation (EC) No 1775/2005 (OJ L 211, 14.8.2009. P. 36–54).
26. The Energy Community Treaty (OJ L 198, 20.7.2006. P. 18–37).
27. Планування і забудова територій ДБН Б.2.2-12:2019 [Чинні від 2019-04-26] Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019, 185 с.
28. Правила безпеки систем газопостачання: затв. наказом від 15 травня 2015 р. № 285. Київ: Мін'юст України, 2015. 68 с.
29. Газорозподільчі системи. Рекомендації щодо проектування, будівництва, контролювання за будівництвом, уведення та виведення з експлуатації

газорозподільчих систем : КОДЕКС 2:2021. [Чинний від 2022-09-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 87 с.

30. Газопроводи з поліетиленових труб. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво : ДБН В.2.5-41:2009. [Чинні від 2010-08-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 149 с. (Державні будівельні норми України).
31. Труби поліетиленові для подачі горючих газів. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-73-98 [Чинні від 2001-08-01]. Київ : Держбуд України, 1998. 43 с.
32. Будівельні матеріали. Деталі з'єднувальні для газопроводів із поліетиленових труб. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-179:2009 [Чинні від 2009-08-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 49 с.
33. Будівельні матеріали. Перехідники поліетилен-сталь для газопроводів із поліетиленових труб. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-177:2009 [Чинні від 2009-08-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 18 с.
34. ISO 13623:2017 Petroleum and natural gas industries — Pipeline transportation systems. 3rd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2017. 118 p.
35. ASME B31.8-2022. Gas transmission and distribution piping systems. New York : The American Society of Mechanical Engineers, 2022. 224 p.
36. EN 12007-1:2012 Gas infrastructure – Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar. Part 1: General functional requirements. Brussels : CEN, 2012. 34 p.
37. EN 12007-2:2012 Gas infrastructure – Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar. Part 2: Specific functional requirements for polyethylene (MOP up to and including 10 bar). Brussels : CEN, 2012. 32 p.
38. EN 12007-3:2015 Gas infrastructure – Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar. Part 3: Specific functional requirements for steel. Brussels : CEN, 2012. 28 p.
39. EN 12007-4:2012 Gas infrastructure – Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar. Part 2: Specific functional requirements for renovation. Brussels : CEN, 2012. 40 p.

- 40.ДСТУ 4219:2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. [Чинний від 2003-12-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 72 с.
- 41.ДСТУ Б В.2.5-29:2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Системи газопостачання. Газопроводи підземні сталеві. Загальні вимоги до захисту від корозії. [Чинний від 2007-02-01]. Вид. офіц. Київ : Мінбуд України, 2007. 119 с.
- 42.ВБН В.2.3-00018201.01.01.01-96. Система антикорозійного захисту об'єктів нафтогазового комплексу. Основні положення. Загальні вимоги. [Чинний від 1996-12-01]. Київ : Держнафтогазпром України, 1996. 35 с.
- 43.Інструкція 320.03329031.008–97 Інструкція з електрохімічного захисту підземних газопроводів та підземних резервуарів зрідженого газу. К : УкрНДІнжпроект, 1997. 110 с
- 44.ISO 15589-1:2015 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems. Part 1: On-land pipelines. 2nd ed. Geneva: International Organization for Standardization, 2015. 80 с.
- 45.EN 12954:2019 General principles of cathodic protection of buried or immersed onshore metallic structures. Brussels: CEN, 2019. 40 p.
- 46.NACE SP0169-2024 Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems. Houston, AMPP, 2024. 69 p.
- 47.Quartermann, C. L. The On-Ramp for Hydrogen: The US Natural Gas Network. Atlantic Council, Global Energy Center, 2023. 20 p. ISBN 978-1-61977-285-4.
- 48.Lipiäinen S., Lipiäinen K., Ahola A., Vakkilainen E. Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy. International Journal of Hydrogen Energy. 2023. V. 48. Issue 80. P. 31317–31329. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.283>.
- 49.Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. Посібник. Том 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г. М. Никифорчин та ін.; за заг. ред. В. В. Панасюка. Львів: “Сполом”, 2009. 504 с. ISBN 978-966-665-493-2, ISBN 978-966-665-558-8

50. Corrosion Accidents URL: <https://corrosion-doctors.org/Forms/Accidents.htm> (дата звернення: 01.05.2026).
51. Peabody, A. W. Peabody's control of pipeline corrosion. ed. by R. L. Bianchetti. NACE International. 2001. P. 347.
52. Stephen Lower Chem1 Virtual Textbook Simon Fraser University. URL : <https://www.chem1.com/acad/webtext/virtualtextbook.html> (дата звернення: 12.03.2025).
53. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Ел. ресурс] : підр. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв. Електронні текстові дані. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с.
54. Lyon S., Bingham R., Mills D. Advances in corrosion protection by organic coatings: What we know and what we would like to know. Progress in Organic Coatings. 2017. V. 102. P. 2–7. <https://doi:10.1016/j.porgcoat.2016.04.030>.
55. Morsch S., Lyon S., Greensmith P., Smith S., Gibbon S. Mapping water uptake in organic coatings using AFM-IR. Faraday Discussions. 2015. V. 180. P. 527–542. <https://doi:10.1039/c4fd00229f>.
56. Morsch S., Liu Y., Lyon S., Gibbon, S. Insights into Epoxy Network Nanostructural Heterogeneity Using AFM-IR. ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. V. 8(1). P. 959–966. <https://doi:10.1021/acsami.5b10767>.
57. Nazeer, A., Madkour, M. Potential use of smart coatings for corrosion protection of metals and alloys: A review. Journal of Molecular Liquids. 2018. V. 253. P. 11–22. <https://doi:10.1016/j.molliq.2018.01.027>.
58. Mittal, V. Self-healing anti-corrosion coatings for applications in structural and petrochemical engineering. Handbook of Smart Coatings for Materials Protection. 2014. P. 183–197. <https://doi:10.1533/9780857096883.2.183>.
59. Sun D., An J., Wu G., Yang J. 2015. Double-layered reactive microcapsules with excellent thermal and non-polar solvent resistance for self-healing coatings.

- Journal of Materials Chemistry A. 2015. V. 3(8). P. 4435–4444.
<https://doi:10.1039/c4ta05339g>.
60. Powell M., Quesada-Cabrera R., Taylor A., Teixeira D., Papakonstantinou I., Palgrave R., Parkin, I. Intelligent Multifunctional VO₂/SiO₂/TiO₂ Coatings for Self-Cleaning, Energy-Saving Window Panels. *Chemistry of Materials*. 2016. V. 28(5). P. 1369–1376. <https://doi:10.1021/acs.chemmater.5b04419>.
 61. Le Zhang, Rui Li, Hao Ding, Daimei Chen, Xuan Wang Preparation of a self-cleaning TiO₂-SiO₂/PFDTs coating with superamphiphobicity and photocatalytic performance. *Progress in Organic Coatings*. 2024. V. 197, ISSN 0300-9440, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108767>.
 62. BinSabt M., Nazeer A., Madkour M., Al-Sagheer F. Hydrothermally modified PVA/ZnS-NCQD nanocoating for stainless steel corrosion protection in saline water. *RSC Advances*. 2016. V. 6(9). P. 6888–6895. <https://doi:10.1039/c5ra26581a>
 63. Grigoriev D., Shchukina E., Tleuova A., Aidarova S., Shchukin D. Core/shell emulsion micro- and nanocontainers for self-protecting water based coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2016. V. 303. P. 299–309. <https://doi:10.1016/j.surfcoat.2016.01.002>.
 64. Li J., Kong Z., Liu X., Zheng B., Fan Q., Garratt E., Jin H. Strategies to anode protection in lithium metal battery: A review. *InfoMat*. 2021. <https://doi:10.1002/inf2.12189>.
 65. Yan C., Zhang X.-Q., Huang J.-Q., Liu Q., Zhang Q. Lithium-Anode Protection in Lithium–Sulfur Batteries. *Trends in Chemistry*. 2019. Volume 1, Issue 7, P. 693–704 <https://doi:10.1016/j.trechm.2019.06.007>.
 66. Yao Y., Zhang X., Li B., Yan C., Chen P., Huang J., Zhang, Q. A compact inorganic layer for robust anode protection in lithium-sulfur batteries. *InfoMat*. 2019. <https://doi:10.1002/inf2.12046>.
 67. Yu Y., Huang G., Wang J., Li K., Ma J., Zhang, X. In Situ Designing a Gradient Li⁺ Capture and Quasi-Spontaneous Diffusion Anode Protection Layer toward

- Long-Life Li-O₂ Batteries. *Advanced Materials*. 2020. <https://doi:10.1002/adma.202004157>.
68. Yan J., Liu X., Li B., Yu J., Ding, B. (2018). Mixed Ionic and Electronic Conductor for Li-Metal Anode Protection. *Advanced Materials*. 2018. V. 30(31). <https://doi:10.1002/adma.201803156>.
69. Paz Martínez-Viademonte M., Abrahamsi S., Hack T., Burchardt M., Terryn H. A Review on Anodizing of Aerospace Aluminum Alloys for Corrosion Protection. *Coatings*. 2020. V. 10(11). P. 1106. <https://doi:10.3390/coatings10111106>.
70. He Zhu, Jingfei Li Advancements in corrosion protection for aerospace aluminum alloys through surface treatment, *International Journal of Electrochemical Science*. 2024. V. 19. Issue 2, P. 100487, ISSN 1452–3981, <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100487>.
71. Jothi V., Adesina A. Y., Kumar A., Al-Aqeeli N., Ram, J. S. N. Influence of an anodized layer on the adhesion and surface protective performance of organic coatings on AA2024 aerospace Al alloy. *Progress in Organic Coatings*. 2019. <https://doi:10.1016/j.porgcoat.2019.105396>.
72. Evitts R., Kennell G. Cathodic Protection. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. 2018. P. 301–321. <https://doi:10.1016/b978-0-323-52472-8.00015-0>.
73. Whitmore D. Galvanic cathodic protection of corroded reinforced concrete structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018. V. 199. P. 05006. <https://doi:10.1051/matecconf/201819905006>.
74. Krishnan N., Kamde D. K., Doosa Veedu Z., Pillai R. G., Shah D., Velayudham R. Long-term performance and life-cycle-cost benefits of cathodic protection of concrete structures using galvanic anodes. *Journal of Building Engineering*. 2021. V. 42. P. 1-14. <https://doi:10.1016/j.jobbe.2021.102467>.
75. Kainuma S., Yang M., Ishihara S., Kaneko A., Yamauchi, T. Corrosion protection of steel members using an Al-Zn base sacrificial anode and fiber sheet in an atmospheric environment. *Construction and Building Materials*. 2019. V. 224. P. 880–893. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.067>.

76. Angst U. A Critical Review of the Science and Engineering of Cathodic Protection of Steel in Soil and Concrete. *CORROSION*. 2019. P. 1420-1433. <https://doi.org/10.5006/3355>
77. Xu L., Xin Y., Ma L., Zhang H., Lin Z., Li, X. Challenges and Solutions of Cathodic Protection for Marine Ships. *Corrosion Communications*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.08.003>
78. Radwan A., Elbatran A., Mehanna A., Shehadeh M. Experimental Study on Using the Aluminum Sacrificial Anode as a Cathodic Protection for Marine Structures. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Marine and Environmental Sciences*. 2017. Vol. 11. No:1, 2017.
79. Pienaar L. B., Jimoh A. A., Yusuff A. A., Options for alternative electrical power supplies for ICCP in remote areas of gauteng province of South Africa, Part 1: Technical considerations. Cape Town, South Africa: IEEE AFRICON. 2017. P. 1236-1241. <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2017.8095659>.
80. Galal Osman M. Application of Renewable Energy Sources Cathodic Protection and their Economical Aspects. *Mansoura Engineering Journal*. 2021. Vol. 10. Issue 1. Article 20. <https://doi.org/10.21608/bfemu.2021.184722>.
81. Durham M. Solar Powered Cathodic Protection Using Residual Potential. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1987. IA-23(3). P. 433–439. <https://doi.org/10.1109/tia.1987.4504929>
82. Ji Tao, Liao Xiao, Zhang Shiping, He Yan, Zhang Xiaoying, Zhang Xiong, Li Weihua. Cement-Based Thermoelectric Device for Protection of Carbon Steel in Alkaline Chloride Solution. *Materials (Basel, Switzerland)*. 2022. V. 15. 10.3390/ma15134461.
83. Khan Muhammad, Khan Faizullah, Khan Surat, Athar Syed. Efficiency and Cost Analysis of Power Sources in Impressed Current Cathodic Protection System for Corrosion Prevention in Buried Pipelines of Balochistan. Pakistan. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 414. 012034. 10.1088/1757-899X/414/1/012034.

84. Zhong J., Lin L. Flexible Electret Generator for Self-Powered Metal Cathodic Protection. 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII). 2019. <https://doi.org/10.1109/transducers.2019.8808177>.
85. Laoun B., Niboucha K., Serir L. Cathodic protection of a buried pipeline by solar energy. *Journal of Renewable Energies*. 2009. Vol. 12 99 – 104 DOI:10.54966/jreen.v12i1.123
86. Maka A. O. M., Chaudhary T. N., Alaswad G. et al. Applications of solar photovoltaics in powering cathodic protection systems: a review. *Clean Techn Environ Policy* 26. 2024. P. 2755–2776 <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02750-0>.
87. Byrne A., Holmes N., Norton B. State-of-the-art review of cathodic protection for reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete Research*. 68. 2016. P. 664–677. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00083>.
88. Sibiya C.A., Numbi B.P., Kusakana, K. Modelling and Simulation of a Hybrid Renewable. Battery System Powering a Cathodic Protection Unit. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*. 2021. P. 203–208. DOI:10.18178/IJEETC.10.3.203-208.
89. Sibiya Cyncol, Kusakana Kanzumba, Numbi, B. Smart System for Impressed Current Cathodic Protection Running on Hybrid Renewable Energy. 2018. P. 129-133. DOI:10.1109/OI.2018.8535796.
90. Yong Guo, Jifeng Ding, Xiangyang Li, Jiarun Li. Study of Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) on the Steel Pipeline under DC Stray Current Interference. *International Journal of Electrochemical Science*. 2021. V. 16. Issue 5. P. 210547. ISSN 1452-3981. <https://doi.org/10.20964/2021.05.59>.
91. Kim Y.-S., Seok S., Lee J.-S., Lee S. K., Kim, J.-G. (2018). Optimizing anode location in impressed current cathodic protection system to minimize underwater electric field using multiple linear regression analysis and artificial neural network methods. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2018. V. 96. P. 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2018.08.012>.

92. Sun H., Wei L., Zhu M., Han N., Zhu J.-H., Xing F. Corrosion behavior of carbon fiber reinforced polymer anode in simulated impressed current cathodic protection system with 3% NaCl solution. *Construction and Building Materials*. 2016. V. 112. P. 538–546. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.141>.
93. Qiao G., Guo B., Ou J., Xu F., Li Z. Numerical optimization of an impressed current cathodic protection system for reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2016. V. 119. P. 260–267. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.012>.
94. Pfeiffer R. A., Young J. C., Adams R. J., Gedney, S. D. Higher-order simulation of impressed current cathodic protection systems. *Journal of Computational Physics*. V. 394. 2019. P. 522-531. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.06.008>.
95. Станція катодного захисту УПТЕ-М URL : <http://elmet.com.ua/upte-m> (дата звернення: 03.05.2026).
96. Станція катодного захисту ІПАУ URL : <http://elmet.com.ua/ipau> (дата звернення: 04.05.2026).
97. Станції катодного захисту «ЕЛКОН» (СКЗ) URL : [http://esmatech.com.ua/ua/peretvoryvachi_katodnogo_zahistu/stanciii_katodnogo_zahistu_\(skz\).html](http://esmatech.com.ua/ua/peretvoryvachi_katodnogo_zahistu/stanciii_katodnogo_zahistu_(skz).html) (дата звернення: 23.03.2026).
98. Перетворювач електричний катодного захисту URL : http://esmatech.com.ua/ua/peretvoryvach_elektrichnij_katodnogo_zahistu.html (дата звернення: 30.03.2026).
99. Перетворювачі катодного захисту від корозії типів В-ОПЕК URL : <https://zeaz.com.ua/product/27-electotex/podstanc/110-b-opec.html> (дата звернення: 12.04.2026).
100. Перетворювачі катодного захисту ПКЗ.ПІБЕК URL : <https://www.texnotek.com/products/drughaja-produkcija/preobrazovateli-katodnoj-zashhity-pkzpvek> (дата звернення: 16.07.2024).
101. Bachir-Bey T., Belhaneche-Bensemra N. Investigation of Polyethylene Pipeline Behavior after 30 Years of Use in Gas Distribution Network. *Journal of*

- Materials Engineering and Performance. 2020. V. 29(10). P. 6652–6660.
<https://doi:10.1007/s11665-020-05118-9>.
102. Niu L., Wang Y., Lin N., Yue Y., Fu W. et al. Performance Analysis of Natural Gas Polyethylene Pipes Based on the Arrhenius Equation. Fluid Dynamics & Materials Processing. 2025. V. 21(6). P. 1473–1487.
<https://doi.org/10.32604/fdmp.2025.062623>
 103. Călcâi L., Radermacher L., Burlacu A. Behavioral Analysis of High-Density Polyethylene Gas Distribution Pipes Under Load. Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section. 2022. V. 68(3). P. 125–134.
<https://doi.org/10.2478/bipca-2022-0025>
 104. Ran W.-S., Niu L., Wang Y., Lin N., Feng G.-W., Lan, H.-Q. A Lifetime Prediction Method of Pressured Gas Polyethylene Pipes by Strain-Hardening Modulus and Tensile Test. Applied Sciences. 2023. V. 13(13). P. 7965.
<https://doi.org/10.3390/app13137965>
 105. Thermoplastic Pipe Market Size, Share & Industry Analysis [Ел. ресурс] // Fortune Business Insights. URL : <https://www.fortunebusinessinsights.com/thermoplastic-pipe-market-106497> (дата звернення: 11.05.2026).
 106. Plastic Pipe Market Size and Growth 2025 to 2034 [Ел. ресурс]. Precedence Research. URL : <https://www.precedenceresearch.com/plastic-pipe-market> (дата звернення: 08.04.2026).
 107. Plastic Pipe Market Size, Share & Trends Analysis Report [Ел. ресурс]. Grand View Research. URL : <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/plastic-pipe-market-report> (дата звернення: 16.04.2026).
 108. Winston Revie R., Herbert H. U. Corrosion and corrosion control: An introduction to corrosion science and engineering. 4th ed. John Wiley & Son, 2008. ISBN 9780471732792.
 109. Правила улаштування електроустановок : офіц. вид. Міненерговугілля України. Київ, 2017. 736 с.

110. Aziukovskiy O., Rogoza M., Yakimets S. System of electrochemical protection against corrosion with adaptation to change electrotechnical parameters of protection object. *Electromechanical and energy saving systems*. 2018. V. 4(44). P. 60–67. <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2018.4.44.60-67>.
111. Zak, Ahmad. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 934 p.
112. Corbett R. A. Cathodic Protection as an Equivalent Electrical Circuit. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1985. Vol. IA-21. No. 6. P. 1533–1538.
113. Ващишак І. Р., Ващишак С. П., Цих В. С., Яворський А. В. (2015). Комплексне обстеження підземних нафтогазопроводів. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2015. № 1. <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/434>.
114. Abate F., Di Caro D., Di Leo G., Pietrosanto A. (2020). A Networked Control System for Gas Pipeline Cathodic Protection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. V. 69(3). P. 873–882. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2906968>
115. Цих В. Багатопараметровий контроль стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів. *Вісник ТНТУ*. 2013. Том 71. № 3. С.220-229.
116. Попов В. *Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems*. Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems. 201). P. 1–774.
117. Ma Chenglian, Liu Chunming. Influence of Pipeline Insulation Leakage Points on the Distribution of Geomagnetically Induced Current and Pipe-Soil Potential. *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 147470-147480. 10.1109/ACCESS.2019.2946224.
118. Sharm S., Maheshwari S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2017. V. 38. P. 203-217. <https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2016.12.039>.
119. Qiao Q., Cheng G., Wu W., Li Y., Huang H., Wei Z. (2016). 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. V. 64. P. 126–143. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.015>.
120. Liu L., Yu Z., Jiang Z., Hao J., Liu W. Observation Research on the Effect of UHVDC Grounding Current on Buried Pipelines. *Energies*. 2019. V. 12(7). P. 1279. <https://doi.org/10.3390/en12071279>
 121. Hakimian Soroosh, Bouzid, Hakim, Hof Lucas. Corrosion failures of flanged gasketed joints: A review. *Journal of Advanced Joining Processes*. 2024. V. 9. P. 100200. 10.1016/j.jajp.2024.100200.
 122. 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*. 2019. V. 116. P. 511–529. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.027>
 123. Kiss I., Alexa, V. Study on the Deformability Characteristics of Steels for Seamless Tubes and Pipes destined for the Petrochemical Industry. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2020. V. 17. P. 89-111. <https://doi.org/10.12700/aph.17.5.2020.5.5>.
 124. Reichel T., Pavlyk V., Loose T. Throughout Simulation of Manufacturing of Longitudinally Welded Steel Pipe with SYSWELD. 2009.
 125. 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. V. 29. P. 8130-8144. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05280-0>
 126. Shawgi A., Vince O., Mary F., Kathleen K., Catalin T. Designing in-house cathodic protection system to assess the long-term integrity of natural gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. V. 94. 2021. ISSN 1875-5100. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104116>.
 127. Volkan Cicek, Bayan Al-Numan. *Corrosion Engineering and Cathodic Protection Handbook: With Extensive Question and Answer Section*. Scrivener Publishing LLC, 2017. 768 p. DOI:10.1002/9781119284338.

128. Азюковський О. Сезонний вплив на режими роботи електротехнічної системи протикорозійного захисту. Міжнародна науково-технічна конференція Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. 2020. С. 277–280.
129. Азюковський О. О., Рогоза М. В., Якимець, С. М. (2018). Система електрохімічного захисту від корозії з адаптацією до зміни електротехнічних параметрів об'єкту захисту. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2018. (4-С). С. 60–67.
130. Azyukovsky A.A. Analysis of the application of the galvanic circuits in schemes of the cathodic protection for underground pipelines [Text] / A.A. Azyukovsky, E.A. Didevich. Journal of Engineering Sciences. Sumy: Sumy State University, 2018. V. 5. Issue 1. P. F1–F4. DOI: 10.21272/jes.2018.5(1).f1.
131. Яворський А. В., Ващишак С. П., Карпаш А. М. Фазовий метод контролю ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів. METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL. 2008. 2 (21). С : 14–18.
132. Abbassen Lyes, Benamrouche Nacereddine. Design and Simulation of a Cathodic Protection System at impressed current control. 2023.
133. Mechanical Rectifiers [Ел. ресурс] Douglas Self's Museum of Retrotech. URL : <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/mechrect/mechrect.htm> (дата звернення: 17.08.2025).
134. Керовані випрямлячі: Навчальний посібник/ М. М. Казачковський. Дніпропетровськ: НГА України, 1999. 229 с.
135. Шкрабець Ф. П., Ципленков Д. В., Куваєв Ю. В., Іванов О. Б., Панченко В. І., Колб А. А. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2004. 512 с.
136. Теорія сигналів та електричних кіл. Теорія сигналів : конспект лекцій / О. М. Кобяков, О. В. Д'яченко, І. Є. Бражник, Т. О. Протасова. Суми : Сумський державний університет, 2022. 125 с.

137. Теорія сигналів [Ел. ресурс] : навч. посіб. для студ. Спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / А. О. Попов. Електронні текстові данні Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 268 с.
138. Теоретичні основи комп'ютерних систем збирання, перетворення та передачі інформації: підруч. / О. М. Заславський, К. В. Соснін, Д. С. Зибалов, Д. В. Славінський, Є. К. Воскобойник; М-во освіти та науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2019. 292 с.
139. Перелигін Б. В., Ткач Т. Б., Гор'єв С. А. Спектральний і прикладний аналіз даних моніторингу: навчальний посібник. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2020. 133 с.
140. Теорія електричних кіл та сигналів: навч. посіб.: у 2 ч. В.М. Горєв ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2021. Ч. 2. 107 с.
141. Boashash Boualem. Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference. Elsevier, 2003. P. 770.
142. Guo Tiantian, Zhang Tongpo, Lim Enggee, Lopez-Benitez Miguel, Ma Fei, Yu Limin. A Review of Wavelet Analysis and Its Applications: Challenges and Opportunities. IEEE Access. 2022. V. 10. P. 58869-58903. 10.1109/ACCESS.2022.3179517.
143. Азюковський О. Зміна електротехнічних параметрів підземного металевого трубопроводу під впливом високочастотної складової напруги станцій катодного захисту. Електрифікація транспорту. 2015. №10. С. 98–107.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. O. Aziukovskyi, S. Shykhov Formation of the protective potential of underground steel pipelines in the context of the development of modern converter technologies, Coll.res.pap.nat.min.univ. Dnipro, 2024. №79. P. 210–221. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.210> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: аналіз апіорної інформації про об'єкт дослідження, формалізований опис моделі, підготовка і обробка даних моделювання, ілюстрацій і діаграм, математичні розрахунки та формулювання висновків).

2. Азюковський, О. О., Шихов, С. К. Станції катодного захисту підземних сталевих трубопроводів як джерела полігармонійних сигналів. Електротехнічні та інформаційні системи. Дніпро, 2024. №106. С. 15–19. <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-3> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: постановка дослідного завдання, обґрунтування методології досліджень, підготовка ілюстрацій та аналіз отриманих результатів).

3. Aziukovskyi O., Papaika Y., Podoltsev O., Babenko M., Shykhov S. Simulation of the operation modes of the cathodic protection complex of pipelines in the approach of overhead power lines. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. Dnipro, 2024. № 6. P. 73 - 78. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/073> (Стаття в періодичному науковому виданні Scopus, кuartиль Q3. Особистий внесок здобувача: представлення схеми заміщення підземного сталевих трубопроводу).

4. Aziukovskyi, O O; Pivniak, H H; Babenko, M V; Shykhov, S K Influence of the protective potential distribution of a steel underground pipeline on electrochemical corrosion processes. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. Dnipro, 2025. № 2. P. 155 – 163. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-2/155> (Стаття в періодичному науковому виданні Scopus, кuartиль Q3. Особистий внесок здобувача: аналіз апіорної інформації про об'єкт дослідження, формалізований опис математичної моделі системи «СКЗ – ґрунт – трубопровід» та проведення розрахунків).

5. Азюковський, О. О., & Шихов, С. К. Симетричні і несиметричні режими роботи суміжних станцій катодного захисту. Електротехнічні та інформаційні системи. Дніпро, 2026 № 109. С. 91–96. <https://doi.org/10.32782/EIS/2026-109-11> (Стаття в науковому фаховому виданні України категорії Б. Особистий внесок здобувача: постановка дослідного завдання, обґрунтування методології досліджень, підготовка даних моделювання та графіків та формулювання висновків).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

Шихов С. К. Вплив стану ізоляції підземних сталевих трубопроводів на рекомендований тип випрямляча в складі станції катодного захисту. XVI Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», м. Дніпро, 04–06 березня 2026 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2026. С. 245-247. URL: https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Scientific_Spring_2026.pdf (Тези доповіді)

О.О. Азюковський, С.К. Шихов методи мінімізації корозійних ризиків викликаних роботою суміжних станцій катодного захисту. Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: XX міжнар. конф., м. Дніпро, 5 грудня 2025 р. Дніпро: НТУ "ДП", 2025. С. 21-25. URL: https://pzks.nmu.org.ua/ua/science/2025_fin.pdf (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, моделювання досліджуваного об'єкту та критичний аналіз результатів)

Шихов С. К. Моделювання підземного сталевих трубопроводу з урахуванням його електротехнічних параметрів, XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», м. Дніпро, 26–28 березня 2025 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2025. С. 168-169. URL: https://ecology.nmu.org.ua/ua/Studies/Scientific_Spring_2025.pdf (Тези доповіді)

Aziukovskyi, O., Shykhov, S., & Babenko, M. (2025). Development of Protective Potential for Underground Steel Pipelines in the Context of Modern Converter Technologies. Physical and Chemical Geotechnologies, 9(1), 091002. URL: https://pcgt.in.ua/archives/2025/PCGT_2025_091002.php (Тези доповіді. Особистий

внесок здобувача: постановка задачі досліджень, обґрунтування методології досліджень та формулювання висновків)

Азюковський О. О., Шихов С. К. Сучасні тренди катодного захисту підземних сталевих трубопроводів. Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2023. м. Дніпро, 15 грудня 2023 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2023. С. 24-26. URL: https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_2023.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, підготовка ілюстрацій та формулювання висновків*)

S. K. Shykhov., DC rectifiers as a part of cathodic protection systems of underground steel gas pipelines. The Seventh International Scientific Multidisciplinary Conference of Students and Beginner Scientists «Modern Technologies: Improving the Present and Impacting the Future», Dnipro, November 23-24, 2023. Дніпро: Український державний університет науки і технологій; 2023. Р. 91. URL: <https://crust.ust.edu.ua/items/abb93fc9-5526-4240-bc90-438a004e4fbc> (*Тези доповіді*)

Азюковський О. О., Шихов С. К., Бабенко М.В. Станція катодного захисту підземних сталевих трубопроводів як джерело полігармонійних сигналів. Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2022. м. Дніпро. 25 грудня 2022 р. Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 52-54. URL: https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_%202022.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: постановка задачі досліджень, моделювання досліджуваного об'єкту, підготовка ілюстрацій та формулювання висновків*)

Патент на корисну модель:

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. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1891913/> (*Патент на корисну модель. Особистий внесок здобувача: патентний пошук*)

ДОДАТОК Б

Акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження

УКРАЇНА
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ДАЙВЕР»

39630, м. Кременчук, вул. Батуринська б.3, кв.1
www.diver.biz.ua ел.пошта: diverltd@gmail.com

UKRAINE
PRIVATE LIMITED COMPANY
«DIVER»

39630, Baturynska str. 3, ap.1, Kremenchug,
www.diver.biz.ua e-mail: diverltd@gmail.com

р/р UA463003350000000026008557906 АТ «Райффайзен Банк АВАЛЬ» м. Кременчука МФО 300335
код ЄДРПОУ 30244575 Інд.податковий № 302445716351

Вих. 06/10-01 від 06.10.2025 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ТОВ «Дайвер»
Пархоменко М.Г.
«06» жовтня 2025 р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Шихова Станіслава Кириловича на тему:

**«Електротехнічна система катодного захисту підземного сталевих газопроводу з
неоднорідною структурою»**

Режими роботи станцій катодного захисту підземних сталевих трубопроводів мають технологічні особливості на які впливає електротехнічна структура трубопроводу, яка відіграє визначну роль у формуванні розподілу захисного потенціалу вздовж трубопроводу. Це підтверджує актуальність проведення наукових досліджень з визначення параметрів впливу схематичного рішення перетворювачів станцій катодного захисту на корозійну ситуацію підземних сталевих трубопроводів. В дисертаційній роботі Шихова С.К. продемонстровано підвищення корозійної небезпеки при наявності ремонтних вставок із поліетилену або нової сталевих труби.

Запропоноване рішення є науково обґрунтованим та практично корисним. Закони автоматичного керування станціями катодного захисту, які пов'язані гальванічно підземним сталевим трубопроводом з електротехнічними неоднорідностями, що синтезовані в дисертаційній роботі Шиховом С.К можуть бути впроваджені в умовах систем електрохімічного захисту «МН «Мічуринськ – Кременчук» підводний перехід через р. Хорол; МН «Одеса – Броди» підводний перехід через р. Мурафа; МН «Кременчук – Херсон» підводний перехід через р. Дніпро; МГ «Прогрес» підводний перехід через р. Південний Буг; МН «Снігурівка - Одеса» перехід через р. Південний Буг» для забезпечення подовженого терміну експлуатації відновлених трубопроводів.

Директор ТОВ «Дайвер»



Пархоменко М.Г.