

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 652.1:586.24

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-3>

### СТАНЦІЇ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ПІДЗЕМНИХ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ ЯК ДЖЕРЕЛА ПОЛІГАРМОНІЙНИХ СИГНАЛІВ

**Азюковський Олександр Олександрович,**

кандидат технічних наук, доцент,

професор кафедри електропривода

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0003-1901-4333

SCOPUS AUTHOR ID: 56449175100

**Шихов Станіслав Кирилович,**

аспірант, асистент кафедри електропривода

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0009-0000-9459-9277

**Мета** – дослідження спектрального розподілу потужності вихідного сигналу станції катодного захисту підземних сталевих нафтогазопроводів.

**Методи.** Методами теоретичного аналізу досліджено засоби електрохімічного захисту підземних сталевих трубопроводів, що використовуються в Україні та за кордоном. Декомпозовано систему катодного захисту на низку підсистем. У процесі аналізу впливу визначених складників було синтезовано і формалізовано припущення щодо впливу характеру форми вихідного сигналу випрямлячів у складі катодного захисту на його ефективність. Для конкретизації висунутого припущення методами моделювання і математичного аналізу за допомогою перетворення Фур'є синтезовано модель вихідного сигналу ідеалізованих випрямлячів станцій катодного захисту. Проведено порівняння результатів спектрального аналізу для різних типів випрямлячів та їх законів керування.

**Результати.** Отримані результати спектрального аналізу вихідних сигналів випрямлячів демонструють наявність потужності до 0,1 мВт у діапазоні високих частот. Оскільки навіть незначний струм у 4,5 мкА, що стікає з трубопроводу в навколишнє середовище протягом року, є достатнім для винесення маси металу, що еквівалентна наскрізному отвору площею 1 мм<sup>2</sup> у стінці підземного сталевого трубопроводу, зазначена потужність може викликати послаблення корозійного захисту в деяких точках трубопроводу. Для уникнення вказаного ефекту необхідно звернути увагу на вивчення впливу форми вихідного сигналу на розподіл захисного потенціалу вздовж трубопроводу.

**Новизна.** Уточнено ступінь впливу та діапазон значень взаємозалежності між параметрами режиму роботи елементів електротехнічної системи катодного захисту та електротехнічними параметрами об'єкта захисту.

**Цінність.** Результати, що отримані, підтверджують доцільність більш детального дослідження впливу високочастотних складників сигналу станцій катодного захисту на ефективність катодного захисту.

**Ключові слова:** підземний сталевий трубопровід, електрохімічна корозія, станція катодного захисту, випрямляч, спектральний аналіз.

**Aziukovskyi Oleksandr, Shykhov Stanislav. Rectifiers of cathodic protection stations for underground steel pipelines as sources of polyharmonic signals**

**Purpose.** Research of the spectral power distribution of the output signal of the cathodic protection stations' rectifiers for underground steel oil and gas pipelines.

**Methods.** The methods of theoretical analysis are used to study the means of electrochemical protection of underground steel pipelines used in Ukraine and abroad. The cathodic protection system is decomposed into a number of subsystems. In the process of analyzing the influence of the identified components, assumptions were synthesized and formalized regarding the influence of the nature of the output signal waveform of rectifiers as part of cathodic protection on its effectiveness. To concretize the assumption, using modeling and mathematical analysis with the Fourier transform a model of the output signal of idealized rectifiers of cathodic protection stations was synthesized. The results of spectral analysis for different types of rectifiers and their operating principles have been compared.

**Results.** The results of the spectral analysis of the output signals of the rectifiers demonstrate the presence of power up to 0.1 mW in the high frequency range. Since even a small current of 4.5 μA flowing from the pipeline

into the environment during a year is sufficient to carry away a mass of metal equivalent to a through hole of 1 mm<sup>2</sup> in the wall of an underground steel pipeline, this power can cause a weakening of corrosion protection at some points of the pipeline. To avoid this effect, attention should be paid to studying the effect of the output signal waveform on the distribution of the protective potential along the pipeline.

**Originality.** The impact degree and the range of interdependence between the operating mode parameters of the electrical system elements of cathodic protection and the electrical parameters of the object of protection are specified.

**Practicality.** The results obtained confirm the expediency of a more detailed study of the influence of high-frequency signal components of cathodic protection stations on the effectiveness of cathodic protection.

**Key words:** underground steel pipeline, electrochemical corrosion, cathodic protection station, rectifier, spectral analysis.

**Актуальність.** Українська мережа газопровідного транспорту виділяється своєю протяжністю і розгалуженістю серед країн Європейського Союзу. 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) [1], та розвинена Газорозподільна мережа (ГРМ), яка за даними НКРЕКП сягає близько 290 тис. км [2].

Переважна більшість нафтогазопроводів України представлена транспортною системою підземних сталевих трубопроводів. Вони характеризуються високими показниками механічної стійкості до впливу геотектонічних зсувів ґрунту і довготривалим терміном експлуатації, що є критичним для забезпечення безперебійного транспортування газу. З іншого боку, сталеві трубопроводи мають значну схильність до електрохімічної корозії, яка характеризується винесенням металу з конструкції до оточуючого електроліту, роль якого виконує ґрунт навколо трубопроводу. Надійний захист трубопроводного транспорту від корозійних ризиків є важливим завданням для забезпечення економічної та екологічної безпеки країни.

**Аналіз літературних джерел.** Для захисту підземних сталевих трубопроводів застосовуються пасивні й активні методи, що разом формують комплекс електрохімічного захисту від корозії. Пасивні методи представлені різноманітними засобами, як-от: нанесення захисних покриттів, оброблення поверхонь і легування металу, використання інгібіторів, уникання корозійно-небезпечних ділянок під час прокладання трубопроводів, обмеження джерел блукаючих струмів тощо [3, с. 131]. До активних методів відносять: анодний, катодний та протекторний захисти. Анодний захист застосовується для електрохімічного захисту вуглецевих і низьколегованих нержавіючих сталей, титану, високолегованих сплавів на основі заліза, з яких підземні трубопроводи виготовляти економічно недоцільно. Катодний та протекторний захисти функціонують за принципами зниження швидкості корозійних процесів

унаслідок зниження потенціалу металу, що захищають. При цьому для катодного захисту використовується джерело зовнішнього струму, параметри якого налаштовуються під поточний стан електрохімічної системи. А протекторний захист для створення різниці потенціалу використовує власні електричні потенціали об'єкта, що захищають, і жертвового аноду [3, с. 44].

У межах населених пунктів для захисту трубопроводів середнього і низького тиску найчастіше використовуються саме станції катодного захисту зовнішнім струмом, що зумовлено як складною геометрією трубопроводів та структурою ґрунту в містах, так і техніко-економічними показниками самих станцій, оскільки порівняно з іншими засобами такі установки забезпечують необхідний рівень захисного потенціалу в значному радіусі разом із можливістю підлаштувати параметри станції під поточний стан ґрунту та об'єкта, що захищають.

Станції катодного захисту зовнішнім струмом представлені двома умовними підгрупами: мережевими та автономним. Автономні станції стають у нагоді, коли підключення до електричних мереж утруднене чи неможливе (розташування у віддалених регіонах, економічна недоцільність прокладання тощо). Такі станції живляться від різнотипних мотор-генераторів [4], відновлювальних джерел [5], з акумуляторними блоками або без них [6]. Однак найбільшого розповсюдження для катодного захисту набули станції, які живляться від мережі. Це зумовлено широкою доступністю точок підключення до промислової мережі, особливо в районах населених пунктів. Джерелом постійного струму в подібних станціях виступає блок «трансформатор – випрямляч» [4] у різноманітних конфігураціях.

**Мета роботи.** Оскільки вихідний сигнал випрямляча представляє собою не суто постійний сигнал, а пульсуючий, ці пульсації, потрапляючи на підземний сталевий трубопровід, безпосередньо впливають на ефективність катодного захисту. Для подальшого дослідження особливостей та ступеня впливу такої дії необхідно оцінити рівні пульсацій і височастотних

складників за допомогою спектрального розподілу потужності.

**Матеріали і методи.** У станціях катодного захисту можуть використовуватись різноманітні конфігурації випрямлячів, які залежать безпосередньо від цілей, які переслідувались під час її розроблення. Зазвичай у разі вибору 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 усього різноманіття базові й найбільш широко використовувані схеми однофазних випрямлячів представлені вказаними нижче конфігураціями.

Однофазна мостова схема випрямлення (рис. 1) підключається до вторинної обмотки знижувального трансформатора для випрямлення обох напівперіодів змінної напруги. Це досягається за допомогою поперемінного включення двох пар напівпровідникових ключів (VD1 – VD3 та VD2 – VD4).

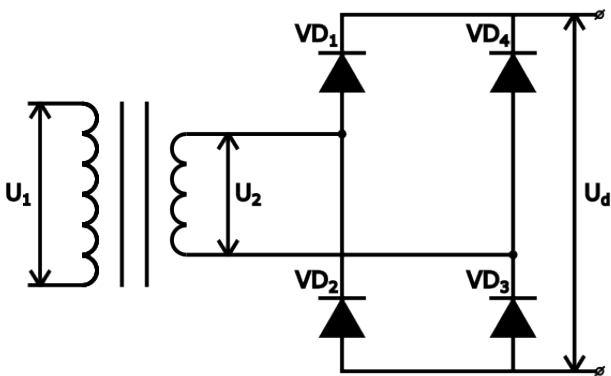


Рис. 1. Схема однофазного мостового випрямляча

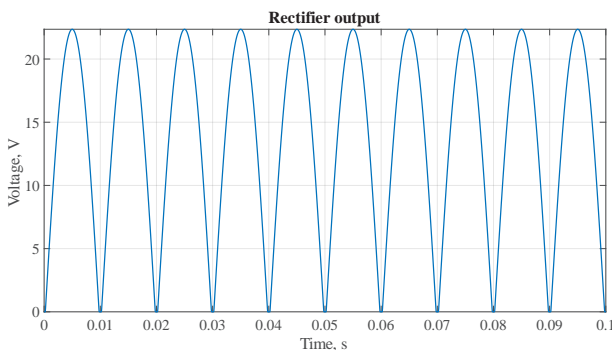


Рис. 2. Вихідний сигнал однофазного мостового випрямляча

Така схема широко використовується в значному діапазоні потужностей через свою простоту, надійність та довговічність. Під час роботи випрямляч використовує обидві півхвилі змінного джерела (рис. 2), а отже, має частоту пульсації вихідної напруги, що дорівнює подвоєній частоті живлення.

Значення випрямленої напруги на виході такого випрямляча залежить від амплітуди вхідної змінної напруги. Регулювання вихідної напруги здійснюється або зміною величини змінної напруги, що надходить до випрямляча, наприклад, шляхом перемикання виводів на вторинній обмотці трансформатора, або вже після випрямлення з використанням додаткових перетворювачів постійного струму. Усі варіанти ускладнюють і здорожують схему випрямляча, що є небажаним. У такому випадку використовуються керувані випрямлячі, що дають змогу регулювати рівень середньовипрямленої напруги на навантаженні в процесі випрямлення.

Для побудови керуваних випрямлячів постійного струму використовуються керувані ключі на кшталт тиристорів. Схему такого випрямляча зображено на рис. 3.

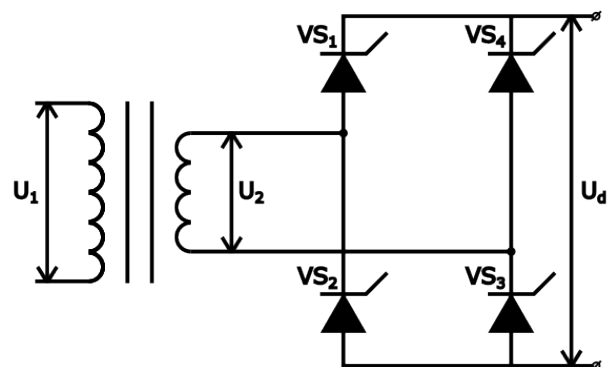


Рис. 3. Схема однофазного мостового керуваного випрямляча

У таких випрямлячах регулювання середнього значення випрямленої напруги досягається за допомогою використання 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 кутом запалювання  $\alpha$ . Регулюючи кут керування в діапазоні від 0 до 180, можливо зменшувати середньовипрямлену напругу від номінального значення до 0 (рис. 4).

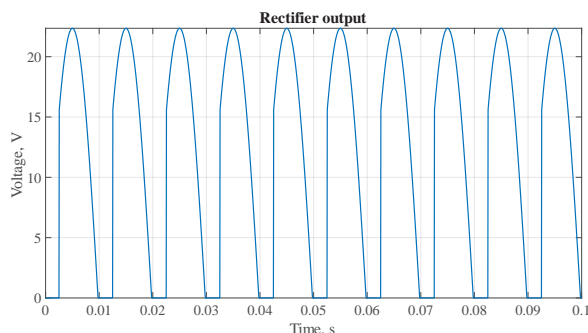


Рис. 4. Вихідний сигнал однофазного мостового керованого випрямляча

**Результати дослідження.** Виконавши розподіл потужності за частотою для вихідних сигналів випрямлячів за допомогою перетворення Фур'є [7], було отримано такі результати. На рис. 5 спектральний розподіл однофазного мостового випрямляча без регулювання середньовипрямленої напруги демонструє наявність потужності більше граничних 0,1 мВт включно до частоти в 1000 Гц. На рис. 6–8 зображено спектральний розподіл потужності керованого однофазного мостового випрямляча з різними кутами керування ( $\alpha = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ). За отриманими результатами, спостерігається зростання високочастотної потужності вихідного сигналу зі збільшенням кута керування від 0 до  $90^\circ$ , з подальшим спаданням у разі збільшення кута керування більшим за  $90^\circ$ .

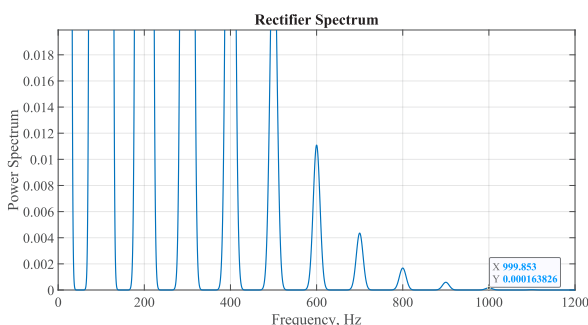


Рис. 5. Спектр однофазного мостового випрямляча

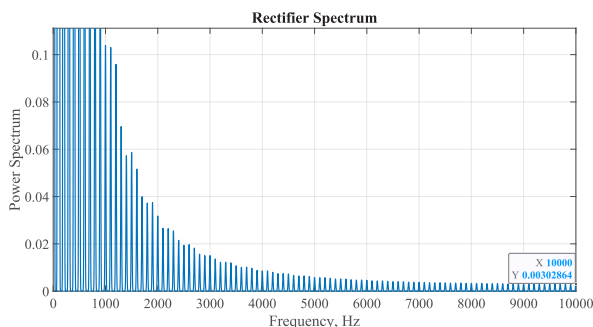


Рис. 6. Спектр однофазного мостового керованого випрямляча ( $\alpha = 45^\circ$ )

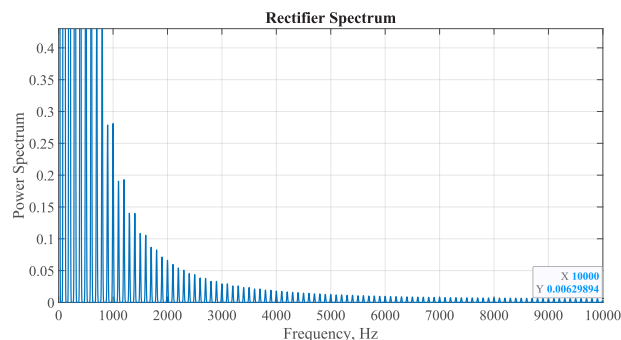


Рис. 7. Спектр однофазного мостового керованого випрямляча ( $\alpha = 90^\circ$ )

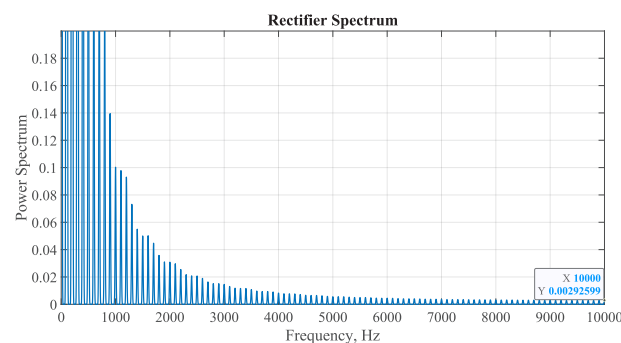


Рис. 8. Спектр однофазного мостового керованого випрямляча ( $\alpha = 135^\circ$ )

**Дискусія.** Якщо розглядати систему підземного сталевго трубопроводу і станцію катодного захисту як систему з електротехнічними параметрами [8], то стає наочним той факт, що значення реактивних опорів у схемі заміщення залежать від частоти прикладеної напруги. Отримані результати чітко демонструють, що пульсуюча форма вихідного сигналу та характер регулювання середньовипрямленої напруги випрямлячів станцій катодного захисту зумовлюють наявність високочастотних складників. Оскільки електротехнічні параметри підземного сталевго трубопроводу змінюються з частотою, відповідного впливу зазнають і струми, що протікають у системі. Так, значення реактивного опору ізоляції 100 метрів підземного трубопроводу діаметром 108 мм у бітумній ізоляції за частоти 100 Гц сягає  $16,25\text{к}\Omega$ , а за частоти 10 000 Гц зменшується до  $162,5\Omega$ , що у свою чергу призводить до зростання струмів, що стікають із трубопроводу через ізоляцію до навколишнього середовища. Цей ефект найяскравіше проявляє себе у випадку керованого випрямляча з максимальним кутом керування, рівним  $90^\circ$ . З іншого боку, залежно від електротехнічних параметрів системи, яку захищають, можуть також проявляти себе інші ефекти, котрі в наведених випадках не розглядалися, як, наприклад,

поява затримок закриття силових ключів або утворення переривчастих струмів, що не може не впливати на електрохімічний захист об'єкта.

**Висновки.** Вихідний сигнал випрямляча в структурі станцій катодного захисту підземних сталевих трубопроводів не є суто постійним, а має пульсуючу форму, що своєю чергою призводить до

появи високочастотних складників під час розподілу потужності. Дослідження впливу таких складників на ефективність електрохімічного захисту й оцінювання їх можливих шкідливих впливів, що проявляються в локальному послабленні захищеності об'єкта, є одним із можливих напрямків підвищення екологічної та економічної безпеки України.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. 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: 20.09.2024).
2. 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](https://map.ua-energy.org/uk/resources/8ff9aac6-34e1-4932-ae4f-97f3896aed29/?_ga=2.244269381.1360191742.1718703785-274564711.1718703058) (дата звернення: 20.09.2024).
3. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування : підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М.В. Бик та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с.
4. Khan Muhammad, Khan Faizullah Khan Surat, Athar Syed. (2018). 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. 414. 012034. 10.1088/1757-899X/414/1/012034.
5. 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. DOI: 10.18178/IJEETC.10.3.203-208
6. Byrne A., Holmes N., Norton B. State-of-the-art review of cathodic protection for reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete Research*. 2016, 68, 664-677.
7. Азюковський О.О. Формування високочастотним інверторним випрямлячем захисного потенціалу підземного сталевих трубопроводу. *Гірничі електромеханіка та автоматика: наук : техн. зб.* 2013. Вип. 91. С. 37–41.
8. Азюковський О.О. Зміна електротехнічних параметрів підземного металевих трубопроводу під впливом високочастотної складової напруги станцій катодного захисту. *Електрифікація транспорту*. 2015. № (10). С. 98–107.

#### REFERENCES:

1. Plan rozvytku Hazotransportnoyi Systemy Tov "Operator HT-S Ukrayiny" na 2021 – 2030 roky, [Gas Transportation System Development Plan of "Operator GTS of Ukraine" Co., Ltd. for 2021–2030] Kyiv, 2020, <https://tsoua.com/wp-content/uploads/2020/10/TYNDP-2021-2030-TSO-4.1.pdf> [in Ukrainian].
2. Protyazhnist' ta struktura vlasnosti hazorozpodil'nykh system [The extent and ownership structure of gas distribution systems], [https://map.ua-energy.org/uk/resources/8ff9aac6-34e1-4932-ae4f-97f3896aed29/?\\_ga=2.244269381.1360191742.1718703785-274564711.1718703058](https://map.ua-energy.org/uk/resources/8ff9aac6-34e1-4932-ae4f-97f3896aed29/?_ga=2.244269381.1360191742.1718703785-274564711.1718703058) [in Ukrainian].
3. M. V., Byk, O. I. Buket, & G. S., Vasiliev (2018). Metody zakhystu obladnannya vid koroziyi ta zakhyst na stadiyi proektuvannya [Methods of protecting equipment from corrosion and protection at the design stage [Electronic resource]: sub. for students specialty 161 "Chemical technologies", specializations "Electrochemical technologies of inorganic and organic materials". Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 318 p. [in Ukrainian].
4. Khan, Muhammad & Khan, Faizullah & Khan, Surat & Athar, Syed. (2018). 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. 414. 012034. 10.1088/1757-899X/414/1/012034.
5. Sibiya, C.A., Numbi, B.P., & Kusakana, K. (2021). Modelling and Simulation of a Hybrid Renewable/Battery System Powering a Cathodic Protection Unit. International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications. DOI:10.18178/IJEETC.10.3. 203–208.
6. Byrne, A., Holmes, N., & Norton, B. (2016). State-of-the-art review of cathodic protection for reinforced concrete structures. *Magazine of Concrete Research*, 68, 664–677.
7. Azyukovsky, O.O. (2013). Formuvannya vysokochastotnym invertornym vypryamlyachem zakhysnoho potentsialu pidzemnoho stalevoho truboprovodu [Formation of the protective potential of an underground steel pipeline by a high-frequency inverter rectifier] O.O. Azyukovskiy Mining electromechanics and automation: science. – technical coll. Issue 91. pp. 37–41 [in Ukrainian].
8. Azyukovsky, O. O. (2015). Zmina elektrotekhnichnykh parametriv pidzemnoho metalivoho truboprovodu pid vplyvom vysokochastotnoyi skladovoyi napruhy stantsiy katodnoho zakhystu, [Changes in the electrical parameters of the underground metal pipeline under the influence of the high-frequency voltage component of the cathodic protection stations]. *Electrification of transport*, (10), 98–107.