

О. О. АЗЮКОВСЬКИЙ (ДЕРЖАВНИЙ ВНЗ «НГУ»)

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 49000, м. Дніпропетровськ, пр. Карла Маркса, 19, тел. +380562 47 23 85, ел.пошта: [azalex@mail.ru](mailto:azalex@mail.ru), ORCID: 0000-0003-1901-4333

## ЗМІНА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДЗЕМНОГО МЕТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДУ ПІД ВПЛИВОМ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ СКЛАДОВОЇ НАПРУГИ СТАНЦІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

### Вступ

Трубопровідний транспорт є найбільш ефективним для транспортування значних об'ємів сировини на великі відстані [1]. Природний газ є важливою складовою енергетичної системи України, яка має одну з найбільш розгалужених трубопровідних систем в Європі. Понад 90 відсотків цієї системи складають підземні металеві трубопроводи. Забезпечення транспортування енергетичної сировини без втрат є важливою задачею. Неконтрольовані витоки природного газу, аміаку, нафти окрім фінансових збитків несуть значні екологічні ризики. Мінімізацію втрат забезпечує цілісність трубопроводу, як елемента системи транспортування. Порушення цілісності металевого трубопроводу значною мірою зумовлено електрохімічною корозією. Зниження електрохімічних корозійних процесів забезпечується системою електрохімічного захисту від корозії підземних металевих трубопроводів. До цієї системи, в якості активних елементів входять станції електрохімічного (катодного) захисту (СКЗ). СКЗ створюють захисний потенціал на трубопроводі шляхом формування сталого напруги певної величини. Це зумовлює таке поле струмів в ґрунті, що перешкоджає стіканню струмів з трубопроводу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В Україні також є розвинена мережа залізничного електрифікованого транспорту [1,6]. Електротехнічна система залізничного транспорту для забезпечення живлення локомотивів в якості зворотного дроту використовує рейкову колію. Забезпечення теоретично мінімального опору на практиці не є можливим, що зумовлює стікання струму з рейок до ґрунту. Все це ускладнює поле струмі в навколишньому середовищі та зумовлює коливання захисного потенціалу за довжиною підземного трубопроводу [3-5]. Підвищення якості захисту підземного металофонду забезпечується використанням СКЗ нового схемотехнічного рішення [1]. До

такого відносяться використання височастотних інверторів струму (напруги), що значно покращує не тільки масо-габаритні показники, а й забезпечує широкі регульовальні властивості СКЗ. Водночас, перехід до височастотного перетворення електричної енергії вносить певні особливості у роботу електротехнічного комплексу системи електрохімічного захисту від електрохімічної корозії підземних металевих трубопроводів [2].

### Матеріали досліджень

Розглянемо електротехнічну систему електрифікованого рейкового транспорту та підземний металевий трубопровід, що знаходиться під захистом СКЗ. Електричними параметрами такої системи є [2,6]:

$R_p^r$  – перехідний опір рейкової колії;

$R_p^t$  – перехідний опір підземного металевого трубопроводу;

$Z_t$  – повний опір підземного металевого трубопроводу;

$Z_{kd}$  – коефіцієнт, що враховує вплив контактного дроту на рейкову колію;

$R_{tg}$  – перехідний опір між підземним металевим трубопроводом та умовною точкою виміру безпосередньо поблизу трубопроводу;

$\alpha_t = \sqrt{\frac{Z_t}{R_p^t}}$  – стала розповсюдження підземного металевого трубопроводу;

$\alpha = \sqrt{\frac{Z_p}{R_p^r}}$  – стала розповсюдження рейкової колії;

$\sigma$  – провідність ґрунту.

Наведені електричні параметри визначаються на основі первинних параметрів електротехнічної системи, що розглядається:

$\sigma_p$  – питома провідність рейок;

$\sigma_t$  – питома провідність підземного металевого трубопроводу;

$R_t^t$  – опір ізоляційного слою підземного металевого трубопроводу;

$R_t^f$  – опір баласту рейкової колії;

$\mu_r$  – магнітна проникність рейок;

$\mu_t$  – магнітна проникність підземного металевого трубопроводу;

$f$  – частота електромагнітного поля.

Повний опір трубопроводу залежить від значенні поглинання в матеріалі провідника

(трубопроводу)  $\gamma_t = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}}$ . Для матеріалів, що як зазвичай використовуються при виготовленні металевих труб прийємо:

$$\sigma_t = 7.7 \cdot 10^6 \text{ } 1/\text{ohm} \cdot \text{m}, \rho_t = 0.13 \text{ ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{m},$$

$$\mu = 4\pi 10^{-7} 200, \omega = 100\pi \text{ - промислова частота.}$$

Коефіцієнт згасання для трубопроводу за таких

$$\text{умов дорівнює: } \gamma_t = \sqrt{\frac{61600 \cdot \pi^2}{2}} = 551 \text{ } 1/\text{m}.$$

Прийнявши мінімальну товщину стінок трубопроводу  $h_t = 0.003 \text{ mm}$  визначимо коефіцієнт  $\gamma_t \cdot h_t \geq 1.65$ .

Повний опір трубопроводу визначається виразом:

$$Z_t = Z_{po} + \tilde{Z}_t \quad (1)$$

Поверхневий опір трубопроводу визначається згідно виразу:

$$Z_{po} = \frac{(1-i)\gamma_t}{2\pi r_t \sigma_t} \text{ctg}((1-i)\gamma_t h_t) \quad (2)$$

Опір трубопроводу, що зумовлено впливом навколишнього середовища (грунту) визначається як:

$$\tilde{Z}_t = \frac{\mu\omega}{8} + \frac{i\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t} \quad (3)$$

де  $\mu = 4\pi 10^{-7}$  - магнітна проникність ґрунту,

$\gamma = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$  - коефіцієнт згасання в ґрунті,  $\sigma$  - провідність ґрунту. Враховуючи вираз, що визначає погонний опір трубопроводу сталому струму:

$$R_t^0 = \frac{1}{2\pi h_t r_t \sigma_t} \quad (4)$$

запишемо:

$$Z_t = R_t^0 \theta \left( (1-i)\gamma_t h_t \right) + \frac{\omega\mu}{8} + \frac{i\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t} \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} \theta &= \theta'(\gamma_t h_t) + i\theta''(\gamma_t h_t) = \\ &= (1-i)\gamma_t h_t \times \text{ctg}(1-i)\gamma_t h_t \end{aligned} \quad (6)$$

Запишемо вирази для обчислення  $\theta'$  та  $\theta''$  (комплексні функції безрозмірного параметра  $\gamma_t h_t$ ):

$$\theta' = \gamma_t h_t \frac{\text{sh}2\gamma_t h_t + \sin 2\gamma_t h_t}{\text{ch}2\gamma_t h_t - \cos 2\gamma_t h_t}, \quad (7)$$

$$\theta'' = \gamma_t h_t \frac{\text{sh}2\gamma_t h_t - \sin 2\gamma_t h_t}{\text{ch}2\gamma_t h_t - \cos 2\gamma_t h_t} \quad (8)$$

За умови, коли виконується вираз  $\gamma_t h_t = 0$  то  $\theta' = 1, \theta'' = 0$  (випадок для сталого струму). У випадку, коли  $\gamma_0 h > 2$  то  $\theta' = \theta'' = \gamma_t h_t$  (полий провідник розглядається як суцільний, через вплив скін ефекту коли глибина скінпрошарку менше ніж товщина стінок трубопроводу).

Шляхом введення до виразу (5)  $\omega, \mu$ , враховуючи вираз (6) отримаємо вираз для визначення повного опору трубопроводу:

$$Z_t = R_t' + iR_t'' \quad (9)$$

$$R_t' = R_t^0 \theta' + 4.9 \cdot 10^{-5} \quad (10)$$

$$R_t'' = R_t^0 \theta'' + 6.3 \cdot 10^{-5} \ln \frac{93}{\sqrt{\sigma_t} r_t} \quad (11)$$

де  $R_t^0$  - погонний опір трубопроводу;  $\sigma$  - провідність ґрунту;  $r_t$  - радіус труби;  $R_t'$  - активний опір трубопроводу змінному струму;  $R_t''$  - реактивний опір трубопроводу змінному струму.

Вираз (10) містить складові, що залежать від частоти струму. На активний опір трубопроводу значною мірою впливає не тільки частота але й радіус трубопроводу (рис. 1). Трубопроводі мережі України крім трубопроводів високого та середнього тиску містять мережі низького тиску, які складаються з труб невеликого діаметру.

Збільшення діаметру трубопроводу зумовлює зменшення активного опору. Починаючи з радіусу  $r_t = 0.4 \text{ m}$  спостерігається помітне збільшення активного опору. Використання труб невеликого діаметру є типовим для га-

з розподільчих мереж низького тиску, до якого підключені кінцеві споживачі. Активний опір такого сегменту трубопроводів найбільшою мірою залежить від частоти (рис.1). Використання в станціях катодного захисту перетворювачів електричної енергії, що зорганізовані

на сучасних схемотехнічних рішеннях зумовлює наявність високочастотних сигналів на їх виходу [2]. Це явище викликане наявністю інвертора, що забезпечує роботу високочастотного трансформатора.

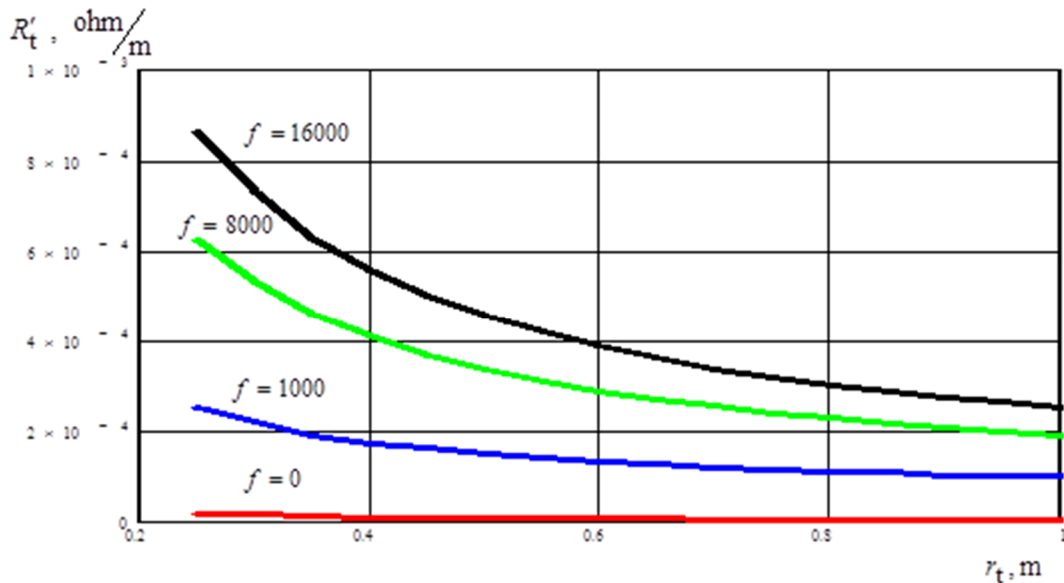


Рис. 1. Залежність активного опору трубопроводу від його радіуса

До того ж, слід розрізнити частоту сигналу на виході трансформатора та частоту комутації силових ключів, яка залежить від законів керування ключами. Формування захисного потенціалу підземного металевого трубопроводу СКЗ з високочастотним перетворювачем відбувається за інших умов, ніж для випадку класичних випрямлячів напруги промислової частоти

(рис.2). Трубопроводи невеликого діаметру (до  $0.25\text{m}$ ) характеризуються більшою залежністю від частоти ніж магістральні трубопроводи. Реактивний опір трубопроводу (11) також значною мірою залежить від частоти пульсацій випрямленої напруги для труб діаметром до  $0.5\text{m}$  (рис. 3).

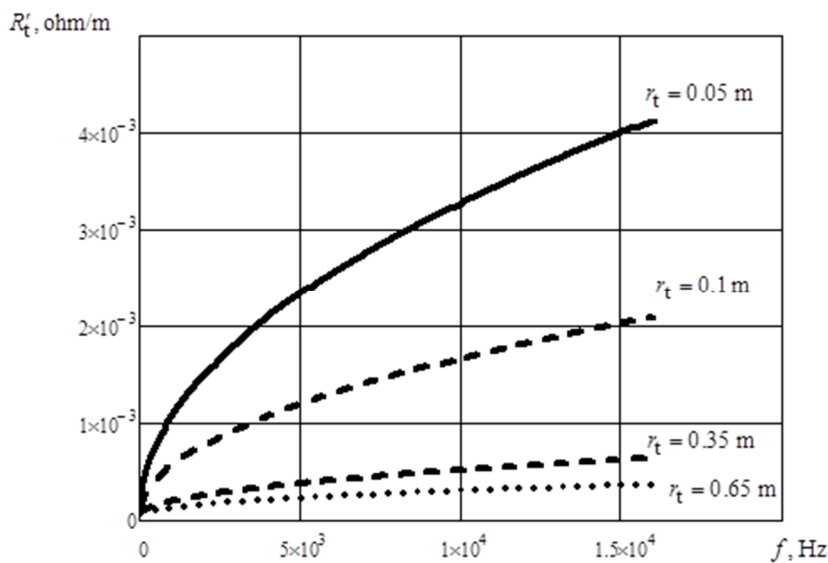


Рис. 2. Залежність активного опору трубопроводу від частоти струму

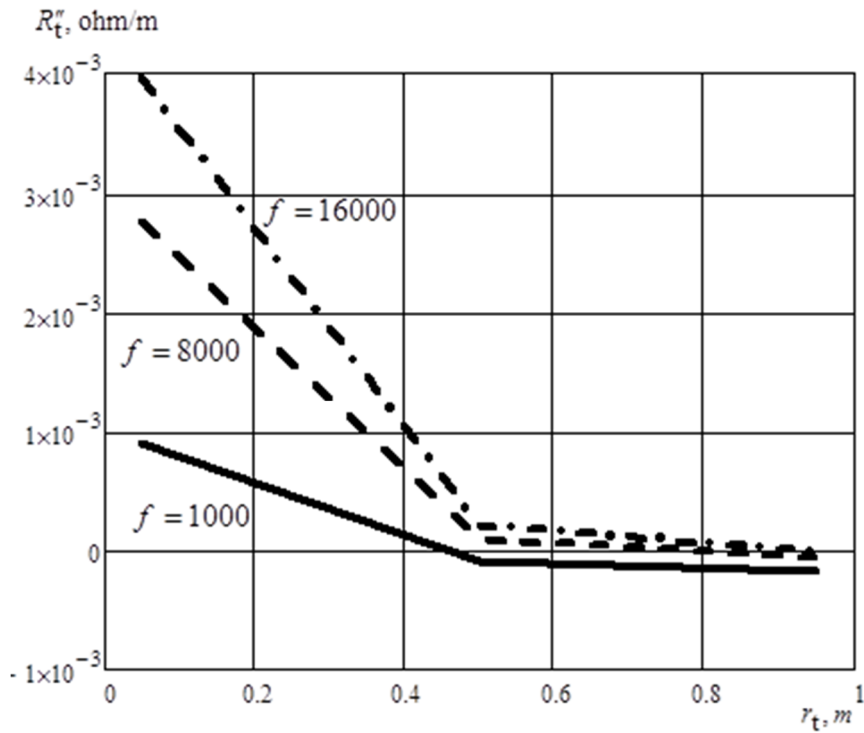


Рис. 3. Залежність реактивного опору трубопроводу від його радіусу

Повний опір трубопроводу (9) має аналогічну залежність від частоти пульсацій випрямленої напруги та радіусу трубопроводу. Слід зауважити, що збільшення опору трубопроводу зумовлює збільшення струмів, що стікають. Реактивний опір приблизно на порядок більше, ніж активний опір, що характеризує об'єкт навантаження станцій катодного захисту. Він також має тенденцію до збільшення зі зменшенням діаметру трубопроводів й зростанням частоти напруги, й має найбільше значення для діаметрів, що властиві розподільчим мережам (менше ніж 0.5 m).

Повний опір трубопроводу визначається виразом, що містить модуль та фазу [6]:

$$Z_t = |Z_t| e^{i\phi_t} \quad (12)$$

Модуль повного опору трубопроводу на основі (10-11):

$$|Z_t| = \sqrt{(R_t')^2 + (R_t'')^2} \quad (13)$$

Фаза повного опору трубопроводу визначається згідно виразу:

$$\phi_t = \text{arctg}\left(\frac{R_t''}{R_t'}\right) \quad (14)$$

Прийнято вважати, що для випадку промислової частоти 50 Hz значення фази повного опору змінюється незначною мірою та належить діапазону  $[75^\circ \div 83^\circ]$ . Під час розрахунків значення фази приймається фіксованою, що впливає на розрахунок сталої розповсюдження трубопроводу [4,6]. У випадку, коли частота комутації ключів починається від 1000 Hz й сягає 16000 Hz й вище, твердження про незмінність фази повного опору є некоректним (рис. 4).

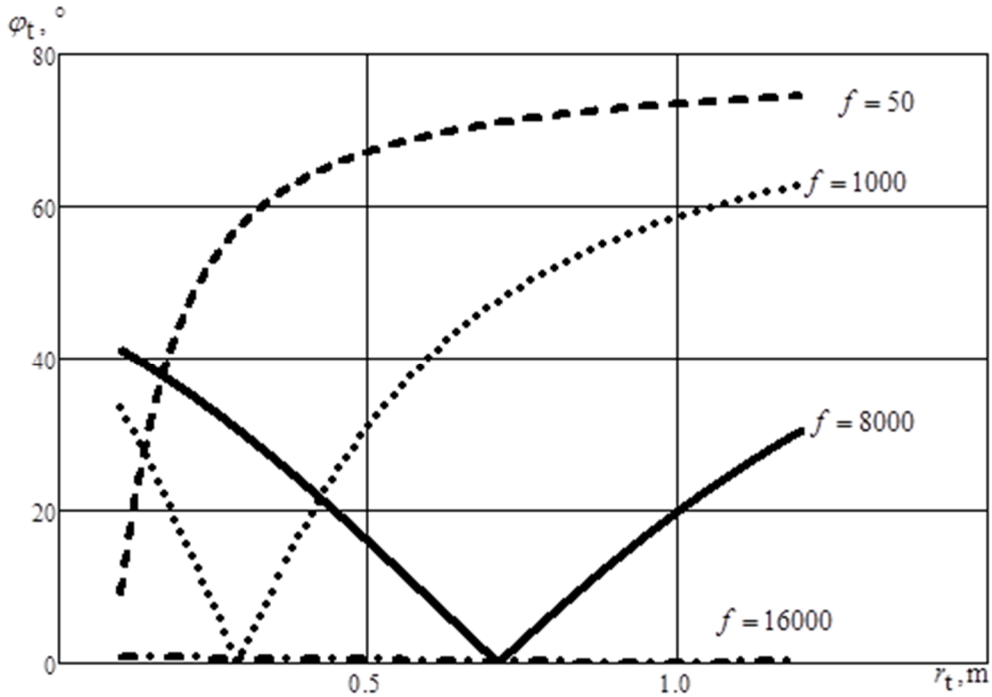


Рис. 4. Залежність фази повного опору трубопроводу від його радіусу

Дійсно, для частоти 50Hz починаючи з радіусу трубопроводу понад 0.08m значення фази повного опору стрімко зростає й набуває практично сталого значення з діаметру трубопроводу 0.5 m. Інша залежність спостерігається для частот від 1000Hz (рис. 4). Так, для частоти 1000Hz для діаметрів трубопроводу від 0.1m до 0.28m спостерігається зменшення фази повного опору практично до нульового значення. У подальшому, зі зростанням діаметру трубопроводу фаза повного опору також зростає й сягає діапазону значень  $[75^\circ \div 83^\circ]$ . Для частоти 8000Hz зменшення фази спостерігається вже до 0.75m. Частота напруги у 16000Hz взагалі починається зі значення у  $0.9^\circ$  для мінімальних значень трубопроводу й зменшується до нульового значення при радіусі, що дорівнює 0.95m, після чого фаза повного опору зростає (рис. 4,5).

Наведені залежності є основою для побудови нових підходів до формування захисного потенціалу підземного металевих трубопроводу враховуючи наявність у електротехнічній системі «СКЗ – підземний трубопровід – ґрунт – залізнична колія» нового частотного складу сигналів, що утворюються внаслідок використання сучасних схемотехнічних рішень. Крім

того, врахування високочастотної складової сигналу на виході СКЗ впливає на алгоритм визначення сталої розповсюдження трубопроводу під час розрахунку системи електрохімічного захисту підземних металевих трубопроводів.

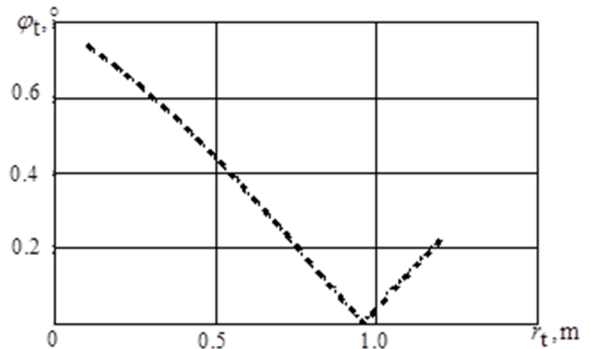


Рис. 5. Залежність фази повного опору трубопроводу від його радіусу для частоти напруги 16000 Hz

Відомо [5,6], що перехідний опір визначається з врахуванням опору ізоляційного покриття трубопроводу та перетинного опору:

$$R_t^p = R_t^{iz} + R_t^l \quad (15)$$

де  $R_t^{iz}$  - опір ізоляційного покриття трубопроводу.

Перетинний опір трубопроводу визначається як:

$$R_t^1 = \frac{1}{\pi\sigma} \ln \frac{1.12}{\gamma\sqrt{r_t H}} \quad (16)$$

де  $H$  - глибина залягання трубопроводу,

$\gamma = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$  - коефіцієнт згасання в ґрунті.

Перетинний опір трубопроводу від його радіусу має аналогічну до рис. 1 залежність. Також, він є залежним від частоти напруги на виході з СКЗ (рис. 6). Спостерігається тенденція до збільшення опору зі зменшенням радіусу трубопроводу та частоти напруги.

Стала розповсюдження підземного металевого трубопроводу  $\alpha_t = \sqrt{\frac{Z_t}{R_p^t}}$  на відміну від

класичного випадку з використанням промислової частоти, за іншими частотними діапазонами має інші значення для малих радіусів трубопроводу (рис. 7).

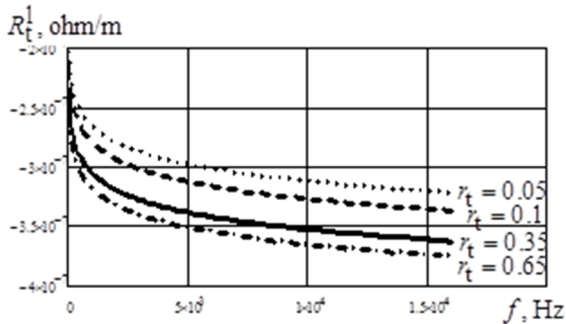


Рис. 6. Залежність повздовжнього опору трубопроводу від частоти

$$L_t = \frac{1}{(2\pi f)^2} \frac{1}{2\pi h_t r_t \sigma_t} \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t \cdot \frac{sh 2\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t - \sin 2\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t}{ch 2\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t - \cos 2\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t} + \frac{6.3}{2\pi f} 10^{-5} \ln \left( \frac{93}{\sqrt{\sigma_t r_t}} \right) \quad (17)$$

Характер зміни індуктивності відрізняється для різних діаметрів трубопроводів та частот (рис. 8). Трубопроводи великого діаметру (магістральні, середнього та низького тиску) мають значення індуктивності близькі оди до од-

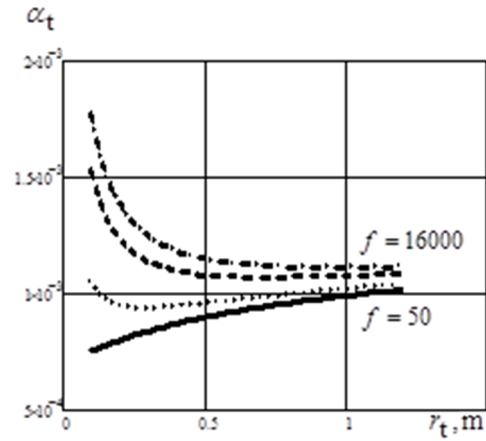


Рис. 7. Залежність сталої розповсюдження трубопроводу від його радіусу

значення сталої розповсюдження для височастотного діапазону відрізняється від значень, розраховуються для 50Hz (рис. 7), особливо для діаметрів трубопроводу  $[0.25 \div 0.5]$  м. Це пояснюється змінами в значеннях фази повного опору трубопроводу (14), які для височастотного діапазону не можуть бути прийнятими такими, що не змінюються (рис. 4). Важливим параметром схеми заміщення трубопроводної мережі є індуктивність (рис. 8), яка визначається з врахуванням (9-11):

ного. Для трубопроводів з радіусом до 0,25m (розподільчі мережі низького тиску) цей параметр коливається в значних межах.

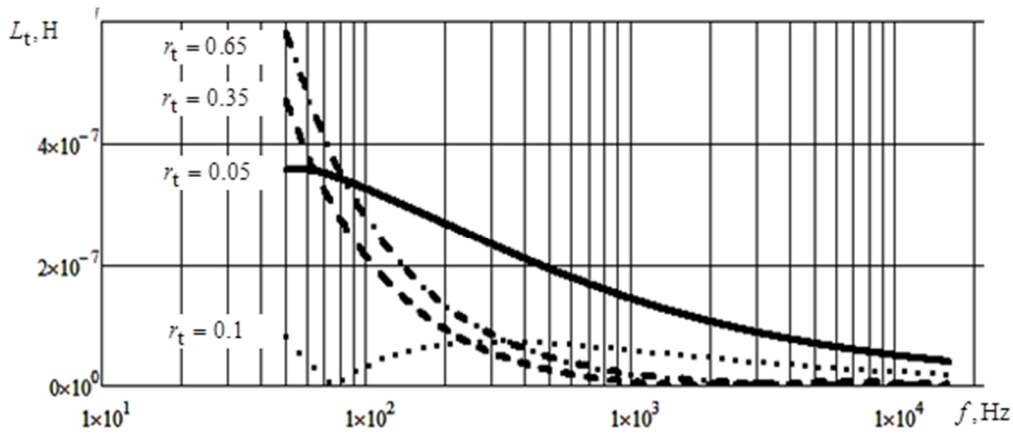


Рис. 8. Індуктивність трубопроводу в залежності від частоти при фіксованих діаметрах

Згідно (18) здійснивши аналіз зміни сталої такої частотний діапазон вихідної напруги розповсюдження трубопроводу визначається СКЗ, що забезпечує її найменше значення  $\alpha_t$ .

$$\alpha_t = \frac{\frac{1}{2\pi h_t r_t \sigma_t} \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} \frac{sh 2 sh 2 \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t + \sin 2 \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t}{ch 2 \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t - \cos 2 \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t} + 4.9 \cdot 10^{-5} + R_t^{iz} + \frac{1}{\sigma \pi} \ln \frac{1.12}{\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} \sqrt{r_t H}}}{i \left( \frac{1}{2\pi h_t r_t \sigma_t} \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t \frac{sh 2 sh 2 \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t - \sin 2 \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t}{ch 2 \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t - \cos 2 \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t} + 6.3 \cdot 10^{-5} \ln \frac{93}{\sqrt{\sigma_t t_t}} \right) + R_t^{iz} + \frac{1}{\sigma \pi} \ln \frac{1.12}{\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} \sqrt{r_t H}}} \quad (18)$$

Розрахунок параметрів підземного трубопроводу для сталого струму у сучасних умовах є неповною мірою інформативним та таким, що відповідає дійсності, оскільки сучасні поля струмів, що блукають та сигнали на виході СКЗ (на відстані декількох метрів від точки підключення до об'єкту, що захищається) містять значну змінну складову. Це змінює умови функці-

онування електротехнічної системи електрохімічного захисту підземних трубопроводів від корозії.

Електротехнічні параметри рельсової мережі розраховуються подібно до аналогічних параметрів трубопроводу. Повний опір подібно до (9) визначається як

$$Z_{rp} = R'_{r0} + iR''_{r0} = \left( \frac{\gamma_r}{2\pi r_q^r \sigma_r} + 4.9 \cdot 10^{-5} \right) + \left( \frac{\gamma_r}{2\pi r_q^r \sigma_r} + 6.3 \cdot 10^{-5} \ln \left( \frac{93}{\sqrt{\sigma_r^r}} \right) \right) \quad (19)$$

де  $\sigma_r = \frac{10^6}{\rho_r} = \frac{10^6}{0.21}$  провідність ґрунту,  $r_q^r$  еквівалентний радіус рейки.

Зважаючи на те, що залізнична рейка на відміну від трубопроводу, уявляє собою суцільний металевий провідник з еквівалент-

ним радіусом, що належить діапазону  $[0.045 \div 0.055] m$ , розглянемо вплив частоти напруги на величину повного опору та його фази (рис. 9, 10).

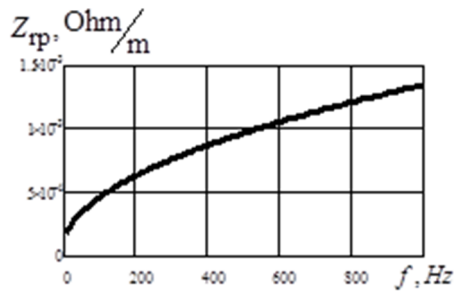


Рис. 9. Повний опір одношляхової колії в залежності від частоти

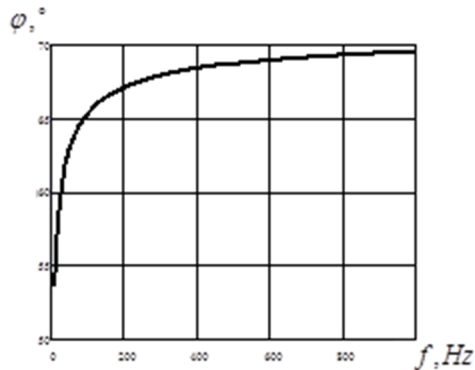


Рис. 10. Фаза повного опору одношляхової колії в залежності від частоти

Повий опір одноколіїної рейкової колії також як й у випадку з підземним металевим трубопроводом (рис. 2) є таким, що зростає із збільшенням частоти, що в свою чергу зумовлює збільшення струмів, які стікають з рейок до ґрунту й формують поле струмів, що блукають. Фаза повного опору (рис. 10) найбільш помітно

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aziukovskyi A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskyi // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013– P. 47 – 55.
2. Азюковський О.О. Формування високочастотним інверторним випрямлячем захисного потенціалу підземного сталевого трубопроводу. / О.О.Азюковський // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – С. 37-41.
3. Бешта О.С. Сумісна робота станцій катодного захисту підземних металевих трубопроводів від електрхімічної корозії / О.С. Бешта, О.О.Азюковський // Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали наук.-техн. конф. — Севастополь: Сев. НТУ, 2013. — С. 17-19.
4. Вербенць Б. Я. Безконтактний метод і прилади для контролю протикорозійного захисту підземних

змінюється в діапазоні частот від 50 Hz до 600 Hz, після чого сягає рівня  $69 \div 73$  Hz де й лишається на незмінному рівні, що відповідає прийнятим під час розрахунку параметрам [4,6].

#### Висновки

Наведені результати аналізу впливу частот вихідної напруги станцій катодного захисту підземного металевого трубопроводу на електротехнічні параметри системи «СКЗ – підземний трубопровід – ґрунт – залізнична колія» свідчать про можливість побудови нового підходу до процесу формування захисного потенціалу шляхом врахування змін у величинах індуктивності, сталої розповсюдження (опосередкованої характеристики струмів, стікання з трубопроводу), частотного впливу на об'єкт, що захищається. Вказаний підхід найбільшою мірою є ефективним при використанні його у розподільчих газотранспортних мережах з трубопроводами невеликого діаметру, які є такими, що домінують за кілометражем у загальній газотранспортній системі України. До того ж, трубопроводи низького тиску розташовані в місцях, в яких є активними струми, що блукають, які зумовлені техногенними факторами.

Для рейкових колій, вплив високочастотної складової є помітним тільки під час формування повного опору рейкової колії. Фаза повного опору є такою, що змінюється у відносно низькому діапазоні частот, що викликає необхідність врахування цього явища під час розрахунку корозійної активності середовища.

#### REFERENCES

1. Aziukovskyi A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskyi // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013– P. 47 – 55.
2. Azyukovskiy O. Formuvannia vysokochastotnym invertornym vypryamliachem zakhysnoho potentsialu pidzemnoho stalevoho truboprovodu. [Formation of high-frequency inverter rectifier protective potential of underground steel pipeline]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka: nauk. – tekhn. zb.* [Mining Electromechanics and Automation: Science.], 2013. Vol. 91, pp. 37-41.
3. Beshta A. Sumisna robota stantsij katodnoho zakhystu pidzemnykh metalevykh truboprovodiv vid elektrokhimichnoi korozii [Joint work stations of cathodic protection of underground metal pipelines from electrochemical corrosion]. *Problemy pidvyschennia efektyvnosti elektromekhanichnykh peretvorivachiv v elektroenerhetychnykh systemakh: Materialy nauk.-tekhn. konf.* [Prob-



трубопроводів: дис. кандидата технічних наук: 05.11.13 / Вербенець Богдан Ярославович. – Л., 2011. – 106 с.

5. Скляр С. А. Математические модели и информационные технологии автоматизированного управления системами противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.13.06/ Скляр Станислав Александрович.- Х., 2002 - 168с.

6. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения./ И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1967 – 227с.

Надійшла до друку 01.12.2012.

lems efficiency electromechanical converters in electric power systems, scientific-technical materials. Conf.]. Sevastopol, 2013, pp. 17-19.

4. Verbenets B. Ya. *Bezkontaktnyj metod i pryklady dlia kontroliu protykorozijnoho zakhystu pidzemnykh truboprovodiv* PhD, Diss. [Contactless method and instruments for monitoring corrosion protection of underground pipelines. PhD, Diss.]. Lviv., 2011, 106 p.

5. Skliarov S. A. *Matematycheskye modely i informatsyonnye tekhnolohyy avtomatyzirovannoho upravleniya systemamy protyvokorrozyonnoj zaschyty mahystral'nykh truboprovodov* PhD, Diss. [Mathematical models and information technology of automated control systems of corrosion protection of pipelines. PhD, Diss.] Kharkiv., 2002, 168 p.

6. Stryzhevskiy I. V. *Teoriya y raschet vliyaniya elektrifytsirovannoy zheleznoj dorohy na podzemnye metallicheskiye sooruzheniya*. [Theory and calculation of the impact of electrified railway on underground metallic structures]. Moskva, Mechanical Engineering Publ., 1967, 227 p.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Муха А. М.*

Трубопровідний транспорт є найбільш ефективним для транспортування значних об'ємів природного газу. Електрохімічна корозія є одним з головних чинників руйнування цілісності підземного металевого трубопроводу, якій протидіє система електрохімічного (катодного) захисту. Метою та завданням роботи є аналіз процесів змін електротехнічних параметрів підземного металевого трубопроводу під впливом високочастотної складової напруги станцій катодного захисту (СКЗ).

Підвищення якості захисту підземного металевих трубопроводів забезпечується використанням СКЗ нового схемотехнічного рішення з ланками високочастотного перетворення сигналу. Електротехнічні параметри системи можуть змінюватися в залежності від частоти сигналів на її вході. Методика, що використовується під час розгляду процесів полягає у математичному аналізі параметричних залежностей з використанням графічної ілюстрації. Основний матеріал статті містить аналіз математичних виразів, що описують вплив високочастотної складової напруги на виході СКЗ на об'єкт, що підлягає захисту.

Наведені результати аналізу впливу частот вихідної напруги станцій катодного захисту підземного металевих трубопроводів на електротехнічні параметри системи «СКЗ – підземний трубопровід – грунт – залізнична колія» свідчать про можливість побудови нового підходу до процесу формування захисного потенціалу шляхом врахування змін у величинах індуктивності, сталої розповсюдження (опосередкованої характеристики струмів, стікання з трубопроводу). Наукова новизна полягає у обґрунтованні можливості, шляхом вибору відповідної частоти сигналу на виході станцій катодного захисту, формування таких параметрів схеми заміщення підземного металевих трубопроводів, за яких стікання струмів з трубопроводу є мінімальним. Практичне значення полягає у отриманні залежностей параметрів електротехнічної системи від частоти сигналу, що дозволяє розраховувати елементи СКЗ.

Високочастотні сигнали на виході станцій катодного захисту зумовлюють зміни електротехнічних параметрів, що впливають на процес формування захисного потенціалу на підземному металевому трубопроводі.

**Ключові слова:** станція катодного захисту, підземний металевий трубопровід, електрохімічна корозія, повздовжній опір, фаза повздовжнього опору.

УДК 652.1:586.24

А. А. АЗЮКОВСКИЙ (ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВУЗ «НГУ»)

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», 49000, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19, тел. +380562 47 23 85, эл.почта: [azalexs@mail.ru](mailto:azalexs@mail.ru), ORCID: 0000-0003-1901-4333

## ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОГО СТАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

© Азюковський О. О., 2015

Трубопроводный транспорт является наиболее эффективным для транспортировки значительных объемов природного газа. Электрохимическая коррозия является одним из главных факторов нарушения целостности подземного металлического трубопровода. Коррозии противодействует система электрохимической (катодной) защиты. Целью и задачей работы является анализ процессов изменения электротехнических параметров подземного металлического трубопровода под влиянием высокочастотной составляющей напряжения станций катодной защиты (СКЗ).

Повышение качества защиты подземного металлофонда обеспечивается использованием СКЗ нового схемотехнического решения со звеньями высокочастотного преобразования сигнала. Электротехнические параметры системы могут меняться в зависимости от частоты сигналов на ее входе. Методика, используемая при рассмотрении процессов, заключается в математическом анализе параметрических зависимостей с использованием графических иллюстраций. Основной материал статьи содержит анализ математических выражений, описывающих влияние высокочастотной составляющей напряжения на выходе СКЗ на объект, подлежащий защите.

Приведенные результаты анализа влияния частот выходного напряжения СКЗ подземного металлического трубопровода на электротехнические параметры системы «СКЗ - подземный трубопровод - почва - железнодорожная колея» свидетельствуют о возможности построения нового подхода к процессу формирования защитного потенциала путем учета изменений в величинах индуктивности, постоянной распространения (опосредованной характеристики токов стекания с трубопровода). Научная новизна заключается в обосновании возможности, путем выбора соответствующей частоты сигнала на выходе СКЗ, формирования таких параметров схемы замещения подземного металлического трубопровода, при которых стекание токов из трубопровода является минимальным. Практическое значение состоит в получении зависимостей параметров электротехнической системы от частоты сигнала, позволяет рассчитывать элементы СКЗ.

Высокочастотные сигналы на выходе станций катодной защиты обуславливают изменения электротехнических параметров, влияющих на процесс формирования защитного потенциала на подземном металлическом трубопроводе.

**Ключевые слова:** станция катодной защиты, подземный металлический трубопровод, электрохимическая коррозия, продольное сопротивление, фаза продольного сопротивления.

Внутренний рецензент *Сиченко В. Г.*

Внешний рецензент *Муха А. Н.*

UDC 652.1:586.24

O. O. AZIUKOVSKYI (NATIONAL MINING UNIVERSITY)

National Mining University, 49000, Dnipropetrovsk, 19, Karl Marks Str., tel. +380562 47 23 85, email: [azalexs@mail.ru](mailto:azalexs@mail.ru), ORCID: 0000-0003-1901-4333

## CHANGING THE ELECTRICAL PARAMETERS OF UNDERGROUND STEEL PIPELINES UNDER THE INFLUENCE OF HIGH VOLTAGE COMPONENTS OF CATHODIC PROTECTION STATIONS

Pipeline transport is the most effective for transporting large volumes of natural gas. Electrochemical corrosion is one of the key factors destroying the integrity of underground of the metal pipelines. The corrosion process counteracts cathodic protection system. The purpose and objective of the article is to analyze the processes of change of electrical parameters of the underground metal pipelines, which is under the influence of part of high-frequency voltage of cathodic protection stations (CPS).

Improving the quality of protection provided by an underground pipeline, using the CPS with the new circuit solutions. These CPS units contain high-frequency signal conversion. Electrical parameters of the system may vary depending on the frequency of the signal at its input. The methodology, which is used in the analysis process, is the mathematical analysis of parametric dependencies with graphic illustrations. The main material of the article contains the analysis of mathematical expressions that describe the impact of high-frequency component of the output voltage CPS on the pipeline.

The results of analysis of influence of the frequency of the output voltage CPS of underground metal pipelines on the electrical parameters of the system "CPS - underground pipeline - soil - railway track" indicate the possibility of building a new approach to the formation of protective potential by taking into account changes in the values of inductance, the propagation constant. Scientific novelty consists in the justification opportunity, by selecting the appropriate frequency of the output signal CPS, make such the parameters of equivalent circuit of underground metal pipelines, which the provide the minimum currents. The practical significance is to provide a dependency the parameters of electrotechnical systems from the signal frequency. This allows you to calculate the elements of the CPS.

High-frequency signals at the output of cathodic protection stations cause changes in electrical parameters that affect the process of forming the protective capacity at an underground metal pipelines.

**Keywords:** cathodic protection station. underground metal pipeline, electrochemical corrosion, the longitudinal resistance, the phase of the longitudinal resistance.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Muha A. M.*