

Анализуя табличные данные, можно заметить, что, отклонения значений мощности, полученных в результате применения как метода коэффициента спроса, выражение (1), так и формулы (2) очень большие. Для ПУ с системой ЭКЦ отклонение значения активной мощности составляет 215,5 % - при использовании выражения (1) и 127,1 % - выражения (2). Отклонение значений активной мощности для ПУ с системой АТК и на базе АД с релейно-контакторной схемой оказываются ненамного меньшими, нежели при первом случае, однако так же превышают предельно допустимые значения погрешности.

На основе сопоставления значений электрических нагрузок систем АТК и АД с релейно-контакторной схемой управления можно заметить следующее. При одинаковых по мощности электроприводах ( $P_{\text{ном}}=800$  кВт) значения фактической мощности отличаются между собой на 16 % (302 кВт – АТК, против 351,6 кВт - АД). Применение электроприводов с системой АТК позволяет снизить продолжительность цикла подъема ПУ и соответственно повысить ее производительность. Однако существенным минусом при использовании преобразователей является повышение реактивной мощности и снижение коэффициента мощности (рис.2).

Поскольку данные методы разрабатывались еще для условий, когда в качестве электропривода для ПУ использовались традиционные АД с релейно-контакторной схемой управления, а так же с учетом внедрения новых типов электродвигателей с системой преобразователей АТК или ЭКЦ, то применение рассмотренных методов определения нагрузки будет некорректным и получаемые результаты окажутся неточны из-за большой погрешности. Поэтому возникает необходимость в разработке новой методики, которая позволит учесть недостатки ранее используемых и получать достоверные результаты в пределах допустимой погрешности.

### **Список литературы**

1. Указания по определению электрических нагрузок в промышленных установках [Текст] : Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок. – М. : Энергия, 1968. – № 6.– С. 3–17.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Разумним Ю.Т.*

УДК 652.1:586.24

**О.О. Азюковський, канд. техн. наук**

*(Україна, м. Дніпропетровськ, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»)*

### **ФОРМУВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИМ ІНВЕРТОРНИМ ВИПРЯМЛЯЧЕМ ЗАХИСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПІДЗЕМНОГО СТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДУ**

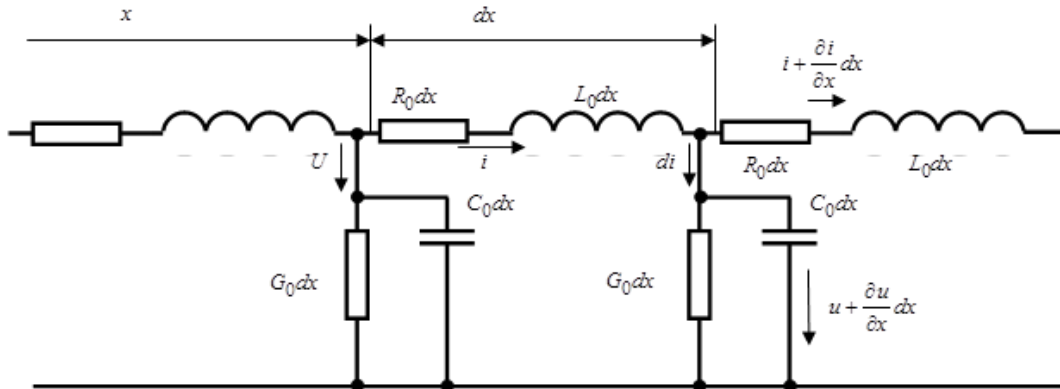
**Вступ.** Розвиток сучасної елементної бази водночас з підвищенням рівня вимог до якості захисту від електрохімічної корозії підземного металевих трубопроводу зумовлює впровадження нових схематичних рішень з організації станцій катодного захисту (СКЗ). Матеріали, що ізолюють трубопровід від корозії, забезпечують високий опір протіканню електричного струму. Покращення ізоляційних характеристик підземного сталевих трубопроводу зумовлює зміни у співвідношенні величин електричної схеми заміщення та виникненню електромагнітних фізичних процесів, що до цього часу були не властиві електротехнічній системі захисту підземного сталевих трубопроводу від електрохімічної корозії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить,** що ускладнення картини розподілу захисного потенціалу підземного сталевих трубопроводу може призвести до зниження якості його захисту від електрохімічної корозії [1,2]. Неузгодженість у роботі станцій електрохімічного захисту також викликає струми вирівнювання, що протікають сталевим трубопроводом [3,4]. У сукупності це погіршує стан захисту від електрохімічної корозії підземних сталевих трубопроводів [1]. Використання під час створення електротехнічної системи захисту підземного трубопроводу від електрохімічної корозії сучасної елементної бази, що покращує характеристики СКЗ, водночас змінює параметри струмів натікання з анодного заземлювача до трубопроводу.

**Метою роботи є** обґрунтування можливості виникнення відхилень значення захисного потенціалу підземного сталевих трубопроводу від загальної залежності за умови використання сучасних СКЗ.

**Матеріали досліджень.** Незважаючи на те, що довжина підземних комунікацій сягає десятків кілометрів, потенціал та струм стікання (натікання) сталевих підземного трубопроводу змінюються як за ча-

сом, так й за відстанню від точки підключення СКЗ, все ж розглянемо систему з розподіленими параметрами (рис. 1). Електричними параметрами сталевго підземного трубопроводу є:  $R_0$  – поздовжній активний опір одиниці довжини трубопроводу;  $L_0$  – індуктивність одиниці довжини трубопроводу;  $C_0$  – ємність одиниці довжини трубопроводу;  $G_0$  – поперечна провідність одиниці довжини трубопроводу (не є зворотною величиною відносно до  $R_0$ ).



**Рис. 1. Схема заміщення підземного сталевго трубопроводу як системи з розподіленими параметрами**

Поділивши довжину лінії на ділянки  $dx$ , запишемо величини активного опору, індуктивності, провідності та ємності відповідно як  $R_0 dx$ ,  $L_0 dx$ ,  $G_0 dx$ ,  $C_0 dx$ . Струм, що протікає на початку ділянки  $dx$ , визначимо величиною  $i$ , потенціал між сталевим трубопроводом та ґрунтом – як  $u$ . У певний проміжок часу значення струму дорівнює  $i$ . Через наявність струмів стікання з трубопроводу до навколишнього середовища (або навпаки) у кінці ділянки  $dx$  значення струму дорівнюватиме  $i + \frac{\partial i}{\partial x} dx$ . Величина  $\frac{\partial i}{\partial x}$  характеризує швидкість зміни струму зі зміною координати  $x$ . Швидкість, що помножена на відстань  $dx$  дорівнює значенню приросту струму на відстані  $dx$ . Значення потенціалу  $u$  підземного сталевго трубопроводу відносно ґрунту в кінці ділянки  $dx$  визначається також як  $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ . За другим законом Кірхгофа для ділянки  $dx$  запишемо:

$$-u + R_0 dx i + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx = 0. \quad (1)$$

Після спрощення виразу (1) маємо:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} + R_0 i. \quad (2)$$

Струм контуру, що створений ділянкою  $dx$ ,

$$i = di + i + \frac{\partial i}{\partial x} dx. \quad (3)$$

Незважаючи на те, що струм  $di$ , який натікає на підземний сталевий трубопровід (внаслідок дії статичній катодного захисту), дорівнює сумі струмів через ємність та провідність, запишемо::

$$di = \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) G_0 dx + \frac{\partial}{\partial t} C_0 dx \left( u + \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \quad (4),$$

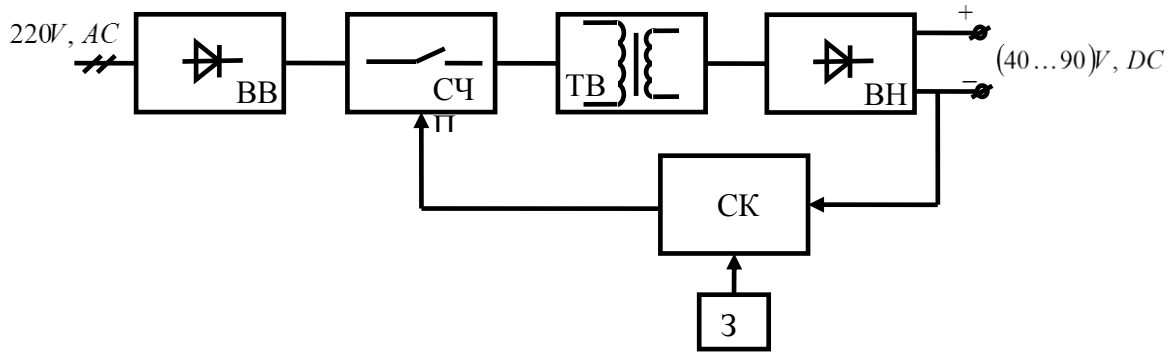
або:

$$di = u G_0 dx + C_0 dx \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (5)$$

Підставивши рівняння (5) у вираз (3), отримаємо:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (6)$$

Сучасні СКЗ створені за високочастотним принципом перетворення сигналу (рис. 2). Головною перевагою їх є високі масо-габаритні характеристики, ККД та регульовальні характеристики, що дозволяють інтегрувати ці СКЗ до загальних систем автоматичного керування процесами захисту від електрохімічної корозії.



**Рис. 2. Інверторний високочастотний випрямляч**

Високовольтний випрямляч (ВВ) здійснює випрямлення напруги, яка за допомогою силового частотного перетворювача (СЧП) формується до змінної. Змінна напруга надходить до високочастотного трансформатора (ТВ), який перетворює рівень напруги до потрібного значення. Потім низьковольтний випрямляч (ВН) випрямляє напругу, що подається до підземного сталевому трубопроводу та анодного заземлювача. Система керування (СК) відпрацьовує сигнал завдання з блока (3) шляхом зміни параметрів комутації силових ключів у СПЧ. Приймавши сигнал на виході СКЗ правильної геометричної форми та розклавши його в ряд Фур'є, запишемо:

$$f(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos(2\omega t) - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos(4\omega t) + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos(6\omega t) - \dots \right). \quad (7)$$

Напругу на підземному сталевому трубопроводі можливо визначити за такою формулою [5]:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{\alpha x} e^{j(\psi_0 + \beta x)} + \dot{A}_2 e^{-\alpha x} e^{j(\psi_p - \beta x)}, \quad (8)$$

а струму, що протікає через трубопровід, як:

$$\dot{i} = -\frac{\dot{A}_1}{z_v} e^{\alpha x} e^{j(\psi_0 + \beta x - \varphi_v)} + \frac{\dot{A}_2}{z_v} e^{-\alpha x} e^{j(\psi_p - \beta x) - \varphi_v}, \quad (9)$$

де  $z_v$  – хвильовий опір, який визначається так:

$$z_v = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = z_v e^{j\psi_v}. \quad (10)$$

Здійснивши перехід від комплексних напруги та струму до функцій часу шляхом перемноження виразів (8) та (9) на величину  $\sqrt{2}e^{j\omega t}$  й взявши від добутку уявну частину, запишемо:

$$u = A_1 \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x) + A_2 e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x), \quad (11)$$

де  $A_1, A_2$  – сталі інтегрування;  $\alpha$  – коефіцієнт згасання;  $\beta$  – коефіцієнт фази;  $\psi_0, \psi_p$  – фази хвилі що падає та хвилі, що є віддзеркаленням;  $x$  – відстань від точки підключення СКЗ.

Струм, що протікає через трубопровід:

$$i = \frac{A_1}{z_v} \sqrt{2} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \psi_0 + \beta x - \psi_v) + \frac{A_2}{z_v} \sqrt{2} e^{-\alpha x} \sin(\omega t + \psi_p - \beta x - \psi_v). \quad (12)$$

Розглядаючи електротехнічну систему підземний сталевий трубопровід – навколишній ґрунт – станція електрохімічного захисту як систему з розподіленими параметрами, за навантаження приймемо кінцеву ділянку  $G_0 dx$ ,  $C_0 dx$ ,  $R_0 dx$ ,  $L_0 dx$ . За умови, коли не виконується рівняння:

$$\frac{z_v}{z_n} = 1 \quad (13)$$

де  $z_n$  – опір навантаження, спостерігається неузгодженість між параметрами навантаження та хвильового опору лінії. У цьому випадку, в підземному сталевому трубопроводі спостерігається разом зі хвилями, що рухаються, хвилі, що стоять. Тоді напруга для цього випадку запишеться так:

$$\dot{u} = u_2 \cos(\beta y) + j \frac{z_v}{z_n} \sin(\beta y) \quad (14)$$

або так:

$$\dot{u} = \dot{u}_2 e^{j\beta y} + j \left( \frac{z_v}{z_n} - 1 \right) \dot{u}_2 \sin \beta y, \quad (15)$$

де  $u_2$  – напруга в кінці трубопроводу.

Залежність напруги трубопроводу в функції відстані від його кінця має такий вигляд:

$$u = u_2 \sqrt{\cos^2(\beta y) + \left( \frac{z_v}{z_n} \right)^2 \sin^2(\beta y)}. \quad (16)$$

Незважаючи на те, що значення опору навантаження менше величини хвильового опору мережі, що підлягає захисту від електрохімічної корозії, можна записати:  $\frac{z_v}{z_n} > 1$ . А це говорить про те, що наприкінці лінії напруга трубопроводу є мінімальною. З виразу (16) видно, що на відстані, яка дорівнює чверті хвилі ( $\beta y = \frac{\pi}{2}$ ), напруга буде максимальною.

Використання сучасних схемотехнічних рішень під час створення СКЗ, зумовлює перехід до високочастотного перетворення електричної енергії. Частота комутації силових ключів досягає 28 – 43 кГц, що відповідає довжині хвилі 10,7 – 6,98 км. з розрахунку частоти першої гармоніки. При довжині гальванічно неізолюваних ділянок підземних сталевих трубопроводів у декілька десятків кілометрів, внаслідок взаємодії хвилі, що падає з хвилею, що стоїть можливе утворення змішаної хвилі. Наявність вузлів з нульовим значенням напруги на трубопроводі та пучностей з максимальним значенням стає причиною:

- утворення ділянок трубопроводу, що знаходяться без захисту від електрохімічної корозії;
- наявності ділянок з максимальним значенням напруги на трубопроводі, що викликає режим перекompенсації захисного потенціалу й зумовлює виділення водню;
- утворення анодних та катодних зон за довжиною підземного трубопроводу збільшує струми вирівнювання, що сприяє появі додаткових зон локальної корозійної небезпеки.

**Висновки.** Покращення фізико-хімічних параметрів ізоляційного покриття в сукупності з використанням сучасних високочастотних перетворювачів може призвести до ускладнення графіку залежності розподілу потенціалу підземного трубопроводу за його довжиною, що погіршує його корозійний стан.

#### Список літератури

1. Вербенець Б. Я. Безконтактний метод і прилади для контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів: дис. кандидата технічних наук: 05.11.13 / Вербенець Богдан Ярославич. – Л., 2011. – 106 с.

2. Склярів 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/ Склярів Станіслав Александрович.- Х., 2002 – 168с.
3. Бешта О.С. Сумісна робота станцій катодного захисту підземних металевих трубопроводів від електрохімічної 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. Aziukovskiy A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskiy // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013– P. 47 – 55.
5. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения./ И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1967 – 227с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Слесаревим В.В.*

УДК 371.315:621.3

*А.С. Головченко, канд. техн. наук*

*(Україна, м. Дніпропетровськ, Державний ВНЗ “Національний гірничий університет”)*

### **МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДИСЦИПЛІН “ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ” ТА “ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО”**

Дисципліни “Електротехнічні матеріали” та “Електроматеріалознавство” є нормативними в навчальних планах за напрямками підготовки “Електротехніка та електротехнології” і “Електромеханіка”, що потребує приділяти достатньо велику увагу методології викладання цих дисциплін, особливо для тих студентів, які мають намір навчатися потім за спеціальністю “Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії”. Вже сама назва цієї спеціальності свідчить про актуальність пошуку новітніх науково-технічних рішень та необхідність глибокого розуміння процесів, що протікають в електротехнічних матеріалах. Важливою умовою якісного навчання студентів за цими дисциплінами є їх попередня і достатньо ґрунтовна підготовка з фундаментальних дисциплін – з фізики, основ електротехніки та вищої математики. Мається на увазі знання найбільш важливих фізичних явищ, які відбуваються в електротехнічних матеріалах як складовій частині будь-якого електротехнічного чи електронного обладнання, закономірності фізичних явищ та математичне формулювання цих закономірностей. На жаль, багато студентів обмежуються знаннями лише математичних формул, за допомогою яких описуються ті чи інші фізичні закони та процеси. Розглянемо типові ситуації, в яких опиняється викладач під час викладання згаданих раніше дисциплін.

#### **Закономірність процесу переміщення зарядів**

Почнемо з найбільш важливого для вивчення електротехнічних матеріалів фізичного явища – переміщення заряджених частинок, що звичайно називають електричним струмом. Перше питання, яке при цьому виникає: що ж таке електричний струм? Типова і по суті правильна відповідь студентів на це питання складається з трьох слів – упорядковане переміщення зарядів. На жаль у більшості випадків студенти не в змозі чітко відповісти, що ж означає кожне з цих слів. Викладач може пояснити це таким чином:

- заряди чи заряджені частинки можуть бути негативними або позитивними (бажано пояснити це за допомогою спрощеної моделі атома);

- переміщення зарядів чи заряджених частинок в принципі може бути будь-якого виду, у тому числі обертання електрона як складової частини атома навколо ядра чи навколо своєї осі;

5. - упорядкованість процесу переміщення зарядів залежить від поставленої задачі (у найбільш простих випадках упорядкованим вважається переміщення вільних електронів у замкненому електричному колі в межах покритих ізоляцією провідників).

Яка ж закономірність процесу переміщення заряджених частинок? Студенти не завжди називають у відповідь відомий ще зі школи закон Ома, інтегральна форма якого для окремої ділянки електричного кола  $I = \frac{U}{R}$  показує залежність електричного струму від електричної напруги  $U$  та електричного опору  $R$

цієї ділянки. У даному випадку електричний струм розглядається як параметр процесу переміщення зарядів і означає кількість зарядів  $q$ , які пройшли через відповідну зону спостереження за одиницю часу  $t$ .

Миттєве значення електричного струму  $i = \frac{dq}{dt}$  – це швидкість зміни електричного заряду.

Незважаючи на зовнішню простоту закону Ома, труднощі починаються при поясненні поняття опору  $R$ . Більшість студентів сприймають це поняття як числову характеристику. Наприклад, при  $R=20$  Ом,