

ХАРАКТЕР ЗМІНИ НАД ЗЕМНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРОТЯЖНОГО ПІДЗЕМНОГО ПРОВІДНИКА

© Драбич Петро, Дуб Петро, Нічога Віталій, Стецько Ігор, 2004

Розглянуто характер змін над земною поверхнею електричної складової електромагнітного поля протяжної підземної металевої комунікації у вигляді безмежно довгого лінійного проводу, розташованого під землею, з урахуванням параметрів ґрунту і повітря.

Character of overground changes of the electrical component of the electromagnetic field of a stretched underground metallic communication in the shape of the infinitely long linear wire which is situated under ground with taking into account the parameters of ground and air is considered.

1. Загальна постановка задачі

Постійно зростаюча кількість нових об'єктів енергетики, різних галузей промисловості та сільського господарства призводить до збільшення та ущільнення протяжних підземних комунікацій (нових кабелів та труб, телекомунікацій), які забезпечують зв'язок та енергопостачання. Умовою ефективного використання і забезпечення безаварійної роботи захованих під землею вказаних комунікацій є уточнення даних про їх розташування та контроль технічного стану, зокрема виявлення місць пошкодження ізоляційного покриття і вивчення в цих місцях корозійних процесів.

Найефективнішим на сьогодні для розв'язання вказаного комплексу завдань є електромагнітний метод, який ґрунтується на вимірюванні деяких параметрів електромагнітного поля, що виникає при протіканні вздовж осі комунікації змінного електричного струму, який вводиться туди за допомогою спеціальних генераторів, або у вигляді гармоніки струму катодного захисту [1–11].

Існуючі електромагнітні пошуково-вимірювальні системи (ЕПВС) [1–11] не завжди забезпечують необхідну завадостійкість визначення інформативних числових характеристик зареєстрованого сигналу. В цьому плані очевидною є потреба розробки нових методів і алгоритмів підвищення завадостійкості. Крім того, відомі ЕПВС, як правило, вимірюють числові характеристики лише магнітної складової випромінюваного комунікацією електромагнітного поля [1–3, 11]. Електрична ж складова, яка містить додаткову інформацію про обстежуваний об'єкт, на сьогодні практично не використовується. Це обмежує функціональні можливості сучасних ЕПВС. Тому завдання виявлення, дослідження і використання нових інформативних ознак компонент електричної складової електромагнітного поля підземних комунікацій з метою створення багатofункціональних ЕПВС є, без сумніву, актуальним.

Зараз вимірювання параметрів електричної складової поля здійснюється контактним методом. Якщо комунікація знаходиться під водою, то визначення контактним методом поздовжньої та радіальної компонент електричної складової не становить істотних труднощів.

Визначати контактним методом (наприклад, методом "виносного електрода" або методом градієнтних вимірювань) на поверхні ґрунту можна лише розподіл поздовжньої компоненти. Водночас за результатами вимірювань визначають стан ізоляційного покриття і, обробляючи

одержані дані поряд зі значеннями параметрів магнітної складової електромагнітного поля комунікацій, оцінюють корозійні процеси в місцях пошкодження.

Контактні методи вимірювання параметрів електричної складової є малопродуктивними, а в деяких випадках, коли, наприклад, комунікація розміщена під асфальтовим або бетонним покриттям, вони стають практично непридатними.

Тому для визначення параметрів компонент електричної складової доцільно спробувати використати безконтактний метод.

2. Аналіз стану досліджень електромагнітного поля протяжних підземних комунікацій

Аналіз робіт, які розглядають розрахунок і вимірювання параметрів електромагнітних полів протяжних підземних провідників зі змінним струмом (див. детальну бібліографію в [11]), показує, що аналізу електричних складових поля приділяється набагато менше уваги, аніж аналізу магнітних складових. Це пояснюється тим, що для вимірювання поля підземних провідників переважно використовуються або безконтактні методи вимірювання числових характеристик змінного магнітного поля, або контактні методи вимірювання параметрів постійного електричного поля. У деяких роботах (наприклад, [12]) наведені математичні вирази для визначення поздовжньої та радіальної складових електричного поля в ґрунті, але середовище вважається однорідним, тобто ігнорується наявність границі земля-повітря. Тому наведені там результати не можуть бути навіть приблизною оцінкою значень електричного поля над поверхнею землі, чи хоча б безпосередньо біля неї.

Подібні задачі розв'язуються геофізиками. Так, наприклад, у [13] аналізується магнітне поле безмежно довгого провідника зі струмом, що знаходиться у землі. Аналіз проводиться тільки для поля в ґрунті, а електричне поле не розглядається взагалі. Однак наведені в [13] методи аналізу лінійних провідників за наявності границі земля-повітря дають змогу без особливих труднощів перейти до аналізу електричної складової поля.

3. Постановка завдання

Для використання безконтактного методу необхідно дослідити структуру і характер зміни компонент електричної складової як у ґрунті, так і на його поверхні. Зокрема, необхідно отримати аналітичні вирази для електричної складової, дослідити залежності її числових характеристик від частоти струму в комунікації, глибини її залягання в ґрунті, висоти розміщення первинного перетворювача над землею поверхнею і параметрів ґрунту.

Проведені дослідження дають можливість сформулювати вимоги і завдання для розробки ефективних багатофункціональних ЕПВС.

На початку таких досліджень доцільно, очевидно, розглянути найпростішу модель підземної протяжної комунікації зі струмом у вигляді нескінченно довгого лінійного провідника, ізольованого від середовища. Провідник спрямований паралельно до поверхні землі. При цьому параметри ґрунту і повітря залишаються незмінними в межах відповідних півпросторів. Така модель може видаватися такою, що досить далека від реальних підземних кабелів чи тим більше трубопроводів. Зокрема вона передбачає, що електричне поле має тільки складову, паралельну до провідника. На практиці поле може мати також і складові у площині, що перпендикулярна до провідника. Тим не менше і така модель може виявитися дуже корисною, оскільки у багатьох випадках поява радіальної складової поля, а, отже, відхилення просторового розподілу від розрахованого за найпростішою моделлю може свідчити про наявність дефекту в підземних комунікаціях, коли через пошкодження ізоляції виникає витік струму у ґрунт. Таким чином, виявлення значної радіальної складової або істотної зміни поздовжньої складової може сприяти діагностиці технічного стану підземної комунікації. Крім того, уже за такої моделі можна дати певні оцінки впливу параметрів середовища на рівень поля, виявити частоти, найсприятливіші для вимірювання електричного поля, дати певні рекомендації щодо параметрів електричної антени для прийому досліджуваного поля, зокрема її розмірів. Слід також зазначити, що аналогічна модель

успішно використовується при розрахунку і вимірюванні магнітних полів протяжних провідників на відносно низьких частотах (до 1,5 кГц). При цьому навіть нехтують впливом середовища. Навіть магнітне поле трубопроводу можна достатньо точно обчислити, замінивши його безмежно довгим лінійним провідником з таким самим струмом у вакуумі. Практично уся апаратура для визначення струму і координат підземних кабелів та трубопроводів, а також для безконтактних методів виявлення дефектів у їх ізоляції використовує таку модель [11].

Отже, вказану модель можна застосувати на початковому етапі досліджень. Надалі можна буде перейти до складніших моделей полів протяжних підземних комунікацій, які точніше враховуватимуть параметри середовища, геометрію провідників тощо.

4. Виведення формули для розрахунку в повітрі електричного поля протяжного провідника зі струмом, розташованого під землею

Модель, на основі якої проводиться аналіз електромагнітного поля, показано на рис. 1. Тут осі X, Y, Z утворюють праву систему координат; безмежно довгий, ізольований від середовища, провід зі струмом (амплітуда якого I не змінюється вздовж провідника, а частота дорівнює ω) знаходиться у площині XOZ на відстані h від поверхні ґрунту. Повітря і ґрунт характеризуються питомими провідностями σ , абсолютними магнітними та діелектричними проникностями μ та ϵ , позначеними відповідними індексами $пов$ і $гр$. Ці параметри вважаються сталими у відповідних напівпросторах.

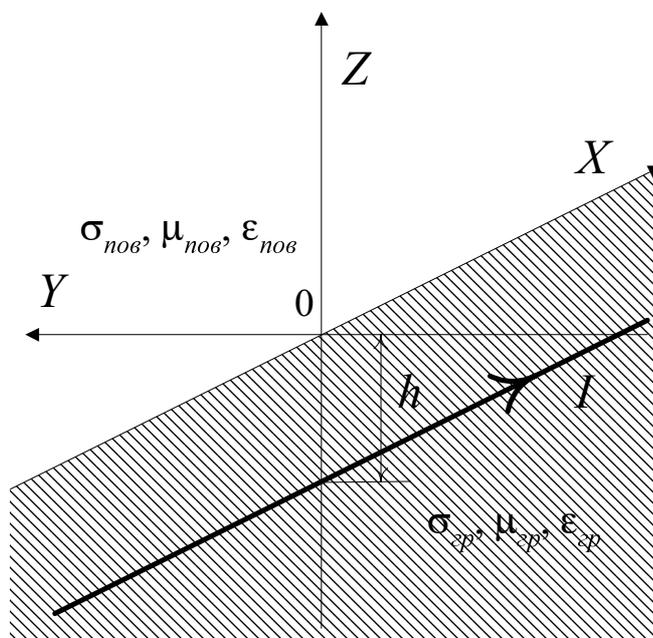


Рис. 1. Безмежно довгий провід з синусоїдним струмом, який розташовано під землею

Для розглядуваного випадку система рівнянь Максвелла запишеться в такий спосіб:

$$\text{rot}\vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} + \vec{J}; \quad (1)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}; \quad (2)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0; \quad (3)$$

$$\text{div}\vec{D} = 0, \quad (4)$$

де \vec{H} і \vec{E} – комплексні вектори напруженостей магнітної та електричної складової електромагнітного поля; \vec{J} – густина стороннього струму, що визначається зовнішнім джерелом (у повітрі вона дорівнює у цьому разі нулю).

У (4) згідно з наведеним у [13] обґрунтуванням прийнято, що густина об'ємного заряду $\rho = 0$.

Вводячи у відомий спосіб [13] комплексний вектор-потенціал \vec{A} , можна привести систему рівнянь (1)–(4) (за умови, що $\vec{J} = 0$) до рівняння Гельмгольца відносно \vec{A} :

$$\Delta \vec{A} = k^2 \vec{A}, \quad (5)$$

де хвилеве число $k^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\epsilon\mu$.

При цьому \vec{A} вводиться в такий спосіб [13], що

$$\vec{H} = \text{rot} \vec{A}; \quad (6)$$

$$\vec{E} = \frac{\text{rot rot} \vec{A}}{\sigma + j\omega\epsilon}. \quad (7)$$

Для безмежно довгого проводу, паралельного до осі X , і за однорідності обох напівпросторів можна вважати, що існує тільки складова вектора-потенціала A_X , яка не залежить від X . Водночас (5) і (7) переходять у такі вирази:

$$\Delta A_X = k^2 A_X, \quad (8)$$

$$E_X = -\frac{\frac{\partial^2 A_X}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 A_X}{\partial Z^2}}{\sigma + j\omega\epsilon}. \quad (9)$$

У [13] показано, що вектор-потенціал A_X , який задовольняє рівнянню (9), для середовища, в якому відсутні сторонні джерела поля, можна записати:

$$A_X = \frac{I}{2\pi} \int_0^\infty \left[f_1(\lambda) e^{Z\sqrt{\lambda^2+k^2}} + f_2(\lambda) e^{-Z\sqrt{\lambda^2+k^2}} \right] \cos \lambda Y d\lambda, \quad (10)$$

де $f_1(\lambda)$ і $f_2(\lambda)$ – у загальному випадку довільні функції λ , які надалі будуть визначені з граничних умов; а в середовищі, в якому знаходиться джерело поля (безмежно довгий лінійний провідник з синусоїдним струмом) і в якому рівняння Гельмгольца буде вже неоднорідним, вектор-потенціал додатково має особливість, яку можна подати вектором-потенціалом такого самого провідника в однорідному середовищі [13], який виражається у циліндричній системі координат в такий спосіб:

$$A_{X_{\text{стоп}}} = \frac{I}{2\pi} K_0(kr), \quad (11)$$

де K_0 – функція Макдональда; r – відстань від провідника. Для (11) існує таке подання інтегралом Зоммерфельда [13], який для нашого випадку можна записати:

$$K_0(kr) = \int_0^\infty \frac{e^{-|h+Z|\sqrt{\lambda^2+k^2}}}{\sqrt{\lambda^2+k^2}} \cos \lambda Y d\lambda. \quad (12)$$

Якщо вважати, що корені в усіх виразах беруться з додатною дійсною складовою, то для збіжності інтегралів у верхньому напівпросторі необхідно прийняти $f_1(\lambda) = 0$, а в нижньому – $f_2(\lambda) = 0$. Тоді вирази для вектора-потенціала у верхньому і нижньому напівпросторах можна записати на основі (10) і з урахуванням (11) і (12) в такий спосіб:

$$A_{X_{\text{нос}}} = \frac{I}{2\pi} \int_0^\infty f_{2_{\text{нос}}}(\lambda) e^{-Z\sqrt{\lambda^2+k_{\text{нос}}^2}} \cos \lambda Y d\lambda; \quad (13)$$

$$A_{X_{\text{зп}}} = \frac{I}{2\pi} \int_0^\infty \left[\frac{e^{-|h+Z|\sqrt{\lambda^2+k_{\text{зп}}^2}}}{\sqrt{\lambda^2+k_{\text{зп}}^2}} + f_{1_{\text{зп}}}(\lambda) e^{Z\sqrt{\lambda^2+k_{\text{зп}}^2}} \right] \cos \lambda Y d\lambda. \quad (14)$$

У цьому разі в наведених вище формулах застосовуються індекси *нов* (повітря) і *гп* (грунт), але вони справедливі і для будь-яких інших поєднань середовищ (повітря і вода, вода і грунт тощо), якщо звичайно весь простір з достатньою для аналізу точністю можна замінити двома напівпросторами.

Розглядатимемо тільки випадки, коли $Z > -h$, тобто розглядаються точки простору над провідником. Для цієї умови $|h + Z| = h + Z$ і (14) можна записати

$$A_{X_{gp}} = \frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{-(h+Z)\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}}}{\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}} + f_{1_{gp}}(\lambda) e^{Z\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}} \right] \cos \lambda Y d\lambda. \quad (15)$$

Граничні умови для розглядуваної задачі записуються так:

$$A_{X_{нов}, Z=0} = A_{X_{gp}, Z=0}; \quad (16)$$

$$\left(\frac{\partial A_{X_{нов}}}{\partial Z} \right)_{Z=0} = \left(\frac{\partial A_{X_{gp}}}{\partial Z} \right)_{Z=0}. \quad (17)$$

Знайдемо похідні $A_{X_{нов}}$ і $A_{X_{gp}}$ по Z :

$$\frac{\partial A_{X_{gp}}}{\partial Z} = \frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} \left[-e^{-(h+Z)\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}} + f_{1_{gp}}(\lambda) \sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2} e^{Z\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}} \right] \cos \lambda Y d\lambda; \quad (18)$$

$$\frac{\partial A_{X_{нов}}}{\partial Z} = \frac{-I}{2\pi} \int_0^{\infty} f_{2_{нов}}(\lambda) \sqrt{\lambda^2+k_{нов}^2} e^{-Z\sqrt{\lambda^2+k_{нов}^2}} \cos \lambda Y d\lambda. \quad (19)$$

Підставивши в (13), (15), (18) і (19) $Z = 0$, отримаємо

$$A_{X_{нов}, Z=0} = \frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} f_{2_{нов}}(\lambda) \cos \lambda Y d\lambda; \quad (20)$$

$$A_{X_{gp}, Z=0} = \frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{-h\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}}}{\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}} + f_{1_{gp}}(\lambda) \right] \cos \lambda Y d\lambda; \quad (21)$$

$$\left(\frac{\partial A_{X_{gp}}}{\partial Z} \right)_{Z=0} = \frac{I}{2\pi} \int_0^{\infty} \left[-e^{-h\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}} + f_{1_{gp}}(\lambda) \sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2} \right] \cos \lambda Y d\lambda; \quad (22)$$

$$\left(\frac{\partial A_{X_{нов}}}{\partial Z} \right)_{Z=0} = \frac{-I}{2\pi} \int_0^{\infty} f_{2_{нов}}(\lambda) \sqrt{\lambda^2+k_{нов}^2} \cos \lambda Y d\lambda. \quad (23)$$

Отже, можна записати систему рівнянь (16) і (17) у такому вигляді:

$$\frac{e^{-h\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}}}{\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}} + f_{1_{gp}}(\lambda) = f_{2_{нов}}(\lambda); \quad (24)$$

$$-e^{-h\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}} + f_{1_{gp}}(\lambda) \sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2} = -f_{2_{нов}}(\lambda) \sqrt{\lambda^2+k_{нов}^2}. \quad (25)$$

З системи рівнянь (24) і (25) знаходимо

$$f_{2_{нов}}(\lambda) = \frac{2e^{-h\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2}}}{\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2} + \sqrt{\lambda^2+k_{нов}^2}}. \quad (26)$$

Тоді вектор-потенціал у верхньому напівпросторі (повітрі) дорівнює

$$A_{X_{нов}} = \frac{I}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-h\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2} - Z\sqrt{\lambda^2+k_{нов}^2}}}{\sqrt{\lambda^2+k_{gp}^2} + \sqrt{\lambda^2+k_{нов}^2}} \cos \lambda Y d\lambda. \quad (27)$$

Використавши (9), можна з (27) знайти вираз для напруженості електричного поля у повітрі (яка у цьому разі має тільки поздовжню компоненту, паралельну до провідника), утвореного синусоїдним струмом, що протікає по безмежно довгому лінійному провіднику, який знаходиться у ґрунті:

$$E_X = -\frac{Ij\omega\mu}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-h\sqrt{\lambda^2+k_{zp}^2}-Z\sqrt{\lambda^2+k_{нов}^2}}}{\sqrt{\lambda^2+k_{zp}^2} + \sqrt{\lambda^2+k_{нов}^2}} \cos \lambda Y d\lambda. \quad (28)$$

5. Деякі результати розрахунків електричного поля протяжного підземного провідника

Використовуючи вираз (28), можна провести розрахунки величини електричного поля підземного протяжного провідника, які дали б змогу виявити залежність поля від таких параметрів, як частота струму в провіднику, глибина залягання комунікації в ґрунті, відстань від поверхні землі точки визначення величини поля, електричні параметри ґрунту тощо.

За цих розрахунків незмінними були прийняті $Y=0$, струм у провіднику $I=1$ А, відносна магнітна проникність повітря і ґрунту $\mu_{відн}=1$, питома провідність повітря $\sigma_{нов}=2,2 \cdot 10^{-18}$ (Ом·м)⁻¹ (середнє значення питомої провідності атмосфери біля поверхні землі), відносна діелектрична проникність повітря $\epsilon_{нов}=1$.

Деякі результати розрахунків модуля електричного поля показані на рисунках. Оскільки задача розрахунку електричного поля багатопараметрична, обмежимося тільки поданням невеликої кількості розрахункових даних. На рис. 2 показані залежності величини поля від висоти розташування точки вимірювання над землею за різних значень питомої провідності ґрунту. Було прийнято, що $\epsilon_{zp}=2$, глибина залягання провідника – 0,2 м, а частота струму $f=10^4$ Гц. З нього можна побачити, що вплив провідності порівняно незначний, якщо врахувати великий діапазон змін цього параметра. Згасання величини поля із збільшенням висоти над поверхнею землі також змінюється мало.

Можна зазначити, що розрахунки показують, що вплив такого параметра, як питома провідність ґрунту, починає відчуватися, починаючи тільки з досить високих частот (порядку 500 кГц), коли у виразі для k_{zp}^2 величина $\omega\epsilon_{zp}$ стає близькою до σ_{zp} .

На рис. 3 показана залежність поля від глибини залягання провідника зі струмом за тих самих параметрів, що й на рис. 2.

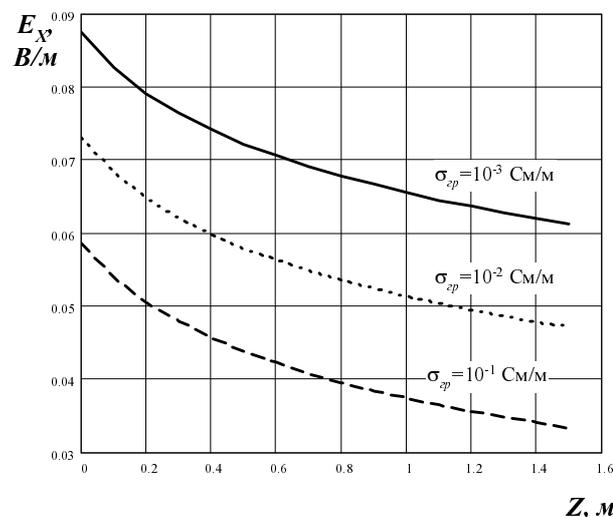


Рис. 2. Залежність поля від висоти над землею за різної провідності ґрунту

На рис. 4 показана залежність електричного поля від частоти. Тенденція до зростання рівня поля з частотою характерна і для вищих частот, принаймні в тому діапазоні, в якому, на наш погляд, доцільно проводити вимірювання (до 100 кГц). На ще вищих частотах справедливість розглядуваної моделі потребує глибшого аналізу й обґрунтування.

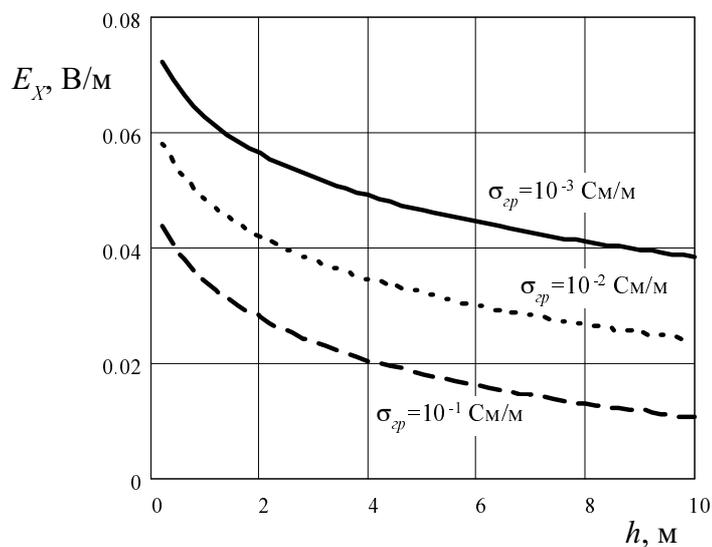


Рис. 3. Залежність поля від глибини залягання провідника за різної провідності ґрунту

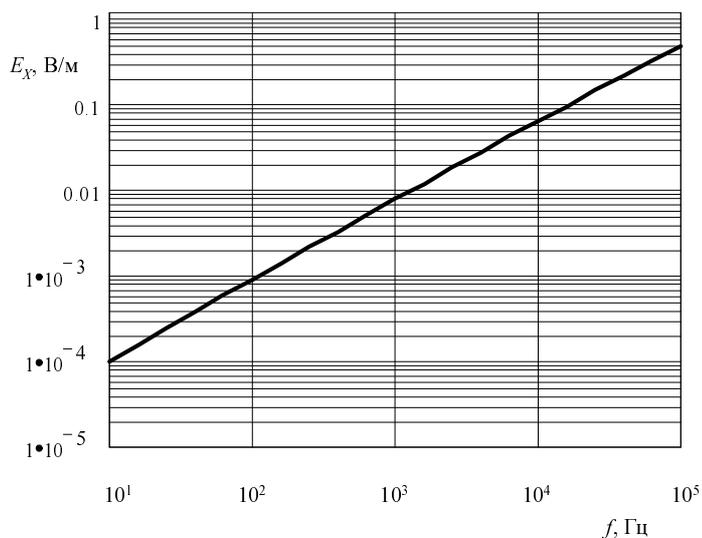


Рис. 4. Залежність електричного поля від частоти ($\epsilon_{cp} = 2$, $\sigma_{cp} = 1 \cdot 10^{-3}$ C/m, $h=2$ м, $Z=0,2$ м)

Висновки

і перспективи подальших досліджень

У роботі отримано вираз для визначення надземної електричної компоненти електромагнітного поля підземного протяжного провідника з урахуванням наявності границі між двома середовищами (у цьому разі – повітря). З використанням цього виразу проведені розрахунки, які дають змогу виявити характер впливу на рівень електричного поля таких параметрів, як глибина залягання провідника, висота точки визначення поля над поверхнею землі, провідність та діелектрична проникність ґрунту і повітря. З результатів цих розрахунків можна зробити висновок про перспективність безконтактного вимірювання змінного електричного поля для виявлення розташування підземних провідників, визначення струмів у них, а в перспективі й для оцінки наявності

дефектів в ізоляції провідників, які проявляються появою у ґрунті струмів, що протікають не паралельно до провідника. В усякому разі рівень електричного поля достатній для того, щоб успішно здійснювати його вимірювання з використанням електричних антен (наприклад, штирових).

У подальших дослідженнях потрібно буде провести розрахунки для складніших моделей підземних провідників, здійснити більший обсяг експериментальних досліджень, визначити, які частоти будуть найсприятливішими для застосування, оптимізувати параметри приймальної антени.

1. Гордиенко В.И., Убогий В.П., Ярошевский Е.В. *Электромагнитное обнаружение инженерных коммуникаций и локальных аномалий.* – К., 1981. 2. Бахмутский В.Ф., Зуенко Г.И. *Индукционные кабелеискатели.* – М., 1970. 3. Плахтий А.К. *Приборы и методы поиска подземных сооружений при выполнении инженерно-геодезических работ.* – М., 1969. 4. *Строительство кабельных сооружений связи: Справочник* / Д.А. Барон, И.И. Гроднев, В.Н. Евдокимов и др. – М., 1968. 5. А.с. 1471138 (СССР). МКІ⁴ G01V3/10. *Бесконтактный измеритель тока в трубопроводе* / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенец – Оубл. 07.04.1989, Бюл. №13. 6. Григорович К.К., Ягола Г.К. *Методы и средства оценки состояния изоляционных покрытий подземных трубопроводов // Коррозия и защита в нефтяной промышленности.* – М., 1979. – №9. – С. 17–20. 7. Драбич П.П. *Поиск и обследование протяженных электропроводящих коммуникаций // Измерительная техника.* – 1996. – №3. – С.56–58. 8. Драбич П.П. *Электромагнитная система определения координат подземных инженерных коммуникаций // Измерительная техника.* – 1996. – №7. – С. 14–23. 9. Патент 2119094 (Великобританія). МКІ⁴ G01V3/10. *Пристрій для вимірювання дефектів у ізоляційних покриттях* / П. Таймен, Р. Тутер. – Оубл. 09.11.1983. 10. Патент 2070783А (Великобританія). МКІ⁴ R19/00. *Вимірювання струму в провіднику* / М.І. Хауелл, Е. Дуглас, С. Чаммерс – Оубл. 09.09.1981. 11. Джала Р.М. *Електромагнітні обстеження і контроль корозії трубопроводів // Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під загальною ред. В.В. Панасюка.– Т.5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під ред. З.Т. Назарчука.* – Львів: ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2001. – Розд. 5. – С. 263–330. 12. Дикмарова Л.П. *Расчет параметров электромагнитного поля подземного трубопровода для задач контроля коррозионной защиты // Техническая электродинамика.* –1998. – №3. – С. 10–14. 13. Бурсиан В.Р. *Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке.* – Л., 1972.