

О. Р. Рихальський, Н. М. Карашук, Р. В. Нетребко

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ФОРМУВАННЯ ГАРМОНІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ІОНОСФЕРІ

Частково якісно аналітичним методом досліджено вплив випромінювання високовольтних ліній електропередач на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері на основі теорій електромагнітного поля, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері. Це дозволило інтерпретувати частотні особливості спостережуваних спектрів, зареєстрованих штучними супутниками Землі. Вплив випромінювання високовольтних ліній електропередач стає суттєвим через зростаючий рівень виробництва та використання електричної енергії потужними споживачами електроенергії, які формують на частотах, пов'язаних із частотою електромереж і її численними гармоніками, техногенні сигнали, що викликають зміну параметрів плазми та електромагнітного поля в іоносфері. Високовольтні лінії електропередач розглянуто як антенну систему, яка складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним елементарним електричним вібраторам, піднятим за допомогою опор над земною поверхнею. У першому наближенні Землю та атмосферу описано як сферично шарувате середовище, електричні параметри якого залежать тільки від висоти до гладкої сферичної поверхні. Аналітичним методом проведено розрахунок складових амплітуди напруженості електричного поля елементарного електричного вібратора в ближній зоні, який доводить дуже низьку потужність випромінювання. У дальній зоні розрахована потужність випромінювання становить 150,63 кВт за рахунок струму живлення 2,93 кА, оскільки електричний розмір такої антени дуже малий. Визначена амплітуда напруженості електричного поля в іоносфері з урахуванням ослаблення залежно від висоти шару змінюється в межах від 0,301 мВ/м до 6,01 мВ/м для висот від 100 км до 500 км. Отримані результати не суперечать раніше виміряним значенням.

Ключові слова: випромінювання електромереж; елементарний електричний вібратор; діаграма спрямованості; напруженість електричного поля; напруженість магнітного поля; іоносфера; випромінювання іоносфери.

Постановка проблеми в загальному вигляді. За допомогою супутникових досліджень у 80-х роках минулого століття був відкритий ефект відображення в іоносфері, і навіть у магнітосфері, гармонічного випромінювання електромереж (power line harmonic radiation (PLHR)) [1, 2]. Встановлено, що потужні споживачі електроенергії формують на частотах, пов'язаних із частотою електромереж і її численними гармоніками, техногенні сигнали, які викликають зміну параметрів плазми та електромагнітного поля (ЕМП) в іоносфері [1]. Цей вплив стає суттєвим через зростаючий рівень виробництва та використання електричної енергії. Створюється потік енергії від літосфери й атмосфери

© О. Р. Рихальський, Н. М. Карашук, Р. В. Нетребко, 2024

Землі та відбувається її передавання в напрямку земна поверхня – атмосфера – іоносфера – магнітосфера [1].

Одним із небезпечних наслідків PLHR-явища може бути підвищення висипання заряджених частинок із земних радіаційних поясів, що досить часто фіксується штучними супутниками Землі (ШСЗ) в разі одночасної реєстрації ЕМП і концентрації заряджених частинок [1]. Це явище повинно вивчатися для встановлення кількісних залежностей та можливих негативних наслідків, зумовлених подальшим збільшенням виробництва електроенергії. У той же час дослідження ефекту PLHR має самостійне фундаментальне значення як один із проявів взаємодії електромагнітного поля з частково іонізованою плазмою.

Зрозуміти механізм проникнення перших гармонік мережі також важливо, оскільки це відкриває можливість створення системи моніторингу локальних засобів виробництва та споживання електроенергії в глобальному масштабі, зокрема й прихованих [1–9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Випромінювання мультиплетних низькочастотних спектрів в іоносфері реєструється ШСЗ протягом багатьох років. Проте, незважаючи на численні спроби, пояснення ефекту PLHR немає [1]. Навіть про ділянку, де утворюються PLHR, ідуть суперечки: розглядаються гіпотези, що вони або створюються через нелінійні взаємодії в іоносфері, або ж генеруються на земній поверхні через спотворення форми струму в мережах.

В [1] обґрунтовано механізм формування низькочастотних гармонічних мультиплетів в іоносфері в рамках моделі взаємодії електронів із магнітним полем Землі та випромінюванням ліній електромереж із частотою 50-60 Гц, що дозволяє інтерпретувати частотні особливості спостережуваних спектрів, зареєстрованих штучними супутниками.

У повітряних лініях електропередач (ЛЕП) змінного струму поле спрямованої хвилі у вільному просторі, що оточує лінію, неекрановане, тому електромережі протяжністю сотні й тисячі кілометрів можна розглядати як антени значної потужності випромінювання. Основним фактором, що визначає пропускну здатність і дальність передавання повітряної лінії (ПЛ), є величина її лінійної напруги.

До відкритих ЛЕП належать: симетричні двопроводові лінії напругою 0,4 кВ; трипроводові лінії напругою 10 кВ; шестипроводові лінії для напруг 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ; дев'ятипроводові лінії для напруги 330 кВ (рис. 1а); дванадцятипроводові лінії для напруг 500 кВ, 750 кВ (рис. 1б), – які виконані з круглих проводів [10].

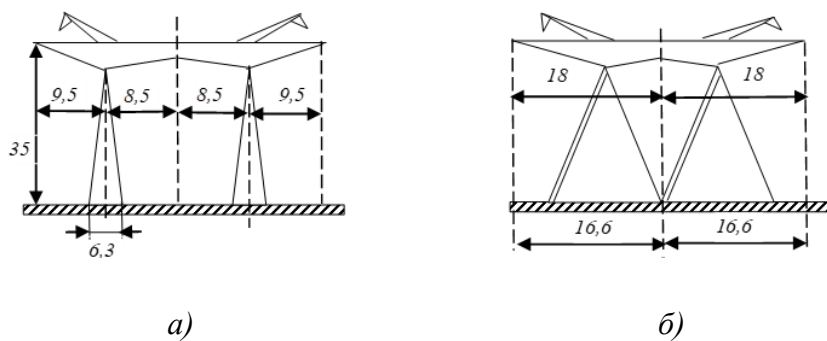


Рис. 1. Повітряні лінії ЛЕП змінного струму

Тому доцільно провести часткове якісне дослідження гіпотези, запропонованої в [1], про механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері, розглядаючи повітряні ЛЕП як антенну систему, яка складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним елементарним електричним вібраторам (ЕЕВ), що підняті за допомогою опор над поверхнею Землі.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є часткове якісне дослідження аналітичним методом впливу випромінювання високовольтних ЛЕП на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері, запропонований в [1] на основі теорій ЕМП, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль (ЕМХ) в атмосфері.

Виклад основного матеріалу

Аналітичний метод дослідження. Розглянемо ЕМП, яке випромінює повітряна ЛЕП змінного струму, аналізуючи поля випромінювання в ближній та дальній зонах ЕЕВ.

В [11–13] із застосуванням векторного потенціалу, рівнянь Максвелла та граничних умов отримано вирази для складових ЕМП у ближній зоні для ЕЕВ у сферичній системі координат.

Згідно з [11–13] амплітуду першої складової напруженості електричного поля за координатою θ (складова поля випромінювання в ближній зоні) можна записати так:

$$E_{\theta} = Z_c \frac{I l}{2 \cdot \lambda \cdot r^3}, \quad (1)$$

де $Z_c = \sqrt{\mu_a / \varepsilon_a}$ – характеристичний опір середовища для вільного простору 377 Ом;

l – довжина ЕЕВ, м;

ε_a – абсолютна діелектрична проникність середовища, Ф/м;

μ_a – абсолютна магнітна проникність середовища, Гн/м;

r – відстань від випромінювача до точки спостереження, м (км);

I – значення змінного струму вздовж ЕЕВ, А;

λ – довжина хвилі, м.

Відповідно до [11–13] амплітуду другої складової напруженості електричного поля за координатою θ знаходимо за виразом

$$E'_{\theta} = E_{\theta} \cdot k_1, \quad k_1 = \frac{\lambda}{2\pi \cdot r}. \quad (2)$$

Амплітуду третьої складової напруженості електричного поля за координатою θ (квазістаціонарна складова у ближній зоні) можна визначити в такий спосіб [11–13]:

$$E''_{\theta} = E'_{\theta} \cdot k_1. \quad (3)$$

Випромінювання ЕЕВ у дальній зоні має спрямовані властивості. Це пов'язано з неізотропністю випромінювача внаслідок векторного характеру лінійного струму, який збуджує вібратор. Відповідно до [13] для елементарного горизонтального вібратора в головних площинах нормовані діаграми спрямованості (ДС) визначають за виразами:

$$F^E(\theta) = |\cos \theta|, \quad F^H(\varphi) = 1. \quad (4)$$

Горизонтальний вібратор в екваторіальній площині не має спрямованих властивостей і створює горизонтально поляризовану хвилю. Для ідеально провідної поверхні за всіма кутами падіння хвилі на поверхню Землі ДС горизонтального вібратора має пелюстковий характер. Якщо земна поверхня є ідеальним діелектриком, то вона також має пелюстковий характер тільки з меншою глибиною провалів.

Потужність та опір випромінювання ЕЕВ залежать від електричних розмірів для вільного простору. Їх визначаємо за такими виразами [12, 13]:

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{2} I^2 \left[80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \right], \quad R_{\Sigma} = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2. \quad (5)$$

Для розрахунку напруженості електричного поля в дальній зоні в точці приймання користуються формулами для вільного простору, а вплив природного середовища враховують за допомогою комплексного множника впливу середовища (коефіцієнта ослаблення) [12, 13]. Він становить передатну функцію еквівалентного природному середовищу прохідного чотиріполюсника та характеризує зміну напруженості електричного поля в місці приймання порівняно з напруженістю електричного поля у вільному просторі. Його значення залежить від вибраної моделі середовища.

Вважатимемо поверхню Землі гладкою й однорідною з такими параметрами: відносною магнітною проникністю $\mu = 1$; комплексною відносною діелектричною проникністю $\hat{\epsilon} = \epsilon - j60\lambda\sigma$, де σ – еквівалентна провідність Землі, См/м. А атмосферу – однорідною, непоглинальною з такими параметрами: $\mu = 1$, $\epsilon = 1$, $\sigma = 0$.

Тоді амплітуду вектора напруженості електричного поля в напрямку максимального випромінювання антени без впливу множника ослаблення знаходимо за виразом [12]

$$E_0 = \frac{\sqrt{60P_{\Sigma}D}}{r}, \quad (6)$$

де D – коефіцієнт спрямованої дії випромінювача;

r – дальність до приймальної антени, м.

Нехай антена A_1 передавальна (проводова ЛЕП), антена A_2 приймальна (бортова антена ШСЗ), відстань між ними дорівнює r (висота орбіти ШСЗ). У подальшому параметри з індексом “1” належать до передавальної частини (ЕЕВ), із індексом “0” – до приймальної частини (ШСЗ) в іоносфері. Тоді потужність в приймальній антені без втрат дорівнює [12]

$$P_2 = P_{\Sigma 1} D_1 D_2 \frac{\lambda^2}{(4\pi r)^2}, \quad (7)$$

де $P_{\Sigma 1}$ – потужність випромінювання передавальної антени;

D_1 – коефіцієнт спрямованої дії передавальної антени;

D_2 – коефіцієнт спрямованої дії приймальної антени.

Характеристики антен, відстань між передавачем та приймачем, довжина хвилі можуть змінюватися на багато порядків. Тому величини у формулі (7) доцільно розглядати в логарифмічному масштабі в децибелах від опорного рівня [12]:

$$10\lg P_{\Sigma 1} + 10\lg D_1 + 10\lg D_2 = 10\lg P_2 + 20\lg(4\pi r) - 20\lg(\lambda),$$

$$P_{\Sigma 1}(\partial B, Bm) + D_1(\partial B) + D_2(\partial B) = P_2(\partial B, Bm) + 20\lg(4\pi r(m)) - 20\lg(\lambda(m)). \quad (8)$$

Основними втратами в радіолінії є ослаблення потужності в разі поширення радіохвиль у вільному просторі, зумовлені відношенням потужності сигналу на вході приймальної антени до потужності випромінювання передавальної антени за неспрямованих передавальної та приймальної антен ($D_1 = D_2 = 1$). Знайдемо основні втрати з виразу (7) [12]:

$$\frac{P_2}{P_{\Sigma 1}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \text{ або ж в децибелах } \Gamma_0 = 10\lg \frac{P_2}{P_{\Sigma 1}} = -20(\lg(4\pi r) - \lg \lambda). \quad (9)$$

У наведених вище формулах замість коефіцієнта спрямованої дії використовують коефіцієнт підсилення антени G . Формули для розрахунку напруженості поля в місці розташування приймальної антени та потужності на її виході $P_{2вих}$ на узгодженому навантаженні в разі заданих коефіцієнтів підсилення антен G_1, G_2 та потужності на вході передавальної антени P_{1ex} такі [12]:

$$E(r) = \frac{\sqrt{60P_{1ex}G_1}}{r} \cdot W, \quad P_{2вих} = P_{1ex}G_1G_2 \left(\frac{\lambda \cdot W}{4\pi r}\right)^2, \quad (10)$$

$$P_{1ex}(\partial B, Bm) + G_1(\partial B) + G_2(\partial B) =$$

$$= P_{2вих}(\partial B, Bm) + 20\lg(4\pi r(m)) - 20\lg(\lambda(m)) - W(\partial B),$$

де W – множник впливу середовища (коефіцієнт ослаблення) ЕМХ, який залежить від характеристик природного середовища.

У разі знаходження W для більшої висоти приймемо, що антени ідеально узгоджені й не мають втрат ($\eta_1 = 1, \eta_2 = 1, G_1 = D_1, G_2 = D_2, P_{1ex} = P_1, P_{2вих} = P_2$), де η_1, η_2 – коефіцієнти корисної дії відповідних антен.

Розрахунок модуля множника ослаблення можна проводити за наближеною формулою Шулейкіна – Ван дер Поля [12, 13]

$$|W| \approx \frac{2 + 0,3\rho}{2 + \rho + 0,6\rho}, \quad (11)$$

де ρ – чисельна відстань, яка визначається за виразом

$$\rho = \frac{\pi \cdot r_2}{\lambda \cdot |\dot{\epsilon}|} = \frac{\pi \cdot r_2}{\lambda \sqrt{\epsilon_2^2 + (60\sigma_2\lambda)^2}}. \quad (12)$$

За невеликих значень чисельної відстані ρ , множник ослаблення несуттєво змінюється відповідно до значень відстані, довжини хвилі й електричних властивостей середовища.

У першому наближенні Землю та навколоземний простір можна описати як сферично шарувате середовище, електричні параметри якого змінюються з висотою. Електродинамічна задача для цієї моделі полягає в розрахунку ЕМП у разі поширення радіохвиль у шарувато неоднорідному середовищі, електричні параметри якого залежать тільки від однієї координати, а саме висоти від гладкої сферичної земної поверхні.

Випромінювання PLHR відповідає діапазонам частот електромагнітних коливань дуже низьким частотам, інфранизьким частотам та наднизьким частотам [14], тому для розрахунків множника ослаблення цих хвиль у тропосфері та стратосфері ($r < 60$ км) згідно з [12] прийmemo значення відносної діелектричної проникності $\epsilon_2 = 1,00058$ та питомої провідності $\sigma_2 = 10^{-4} \dots 10^{-3}$ СМ/М.

Загасання радіохвиль у тропосфері зумовлено переважно гідрометеорами у вигляді туману або дощу. Радіохвилі селективно поглинаються на частотах власних коливань молекул водяної пари та кисню [12, 13].

За відомими параметрами шарів іоносфери діелектричну проникність та провідність для кожного шару можна знайти за такими виразами [12]:

$$\epsilon_2 = 1 - 3,19 \cdot 10^9 \frac{N_e (\text{ел/см}^3)}{(\omega^2 + \nu^2)}, \quad \sigma_2 = 2,82 \cdot 10^{-2} \frac{N_e (\text{ел/см}^3)}{(\omega^2 + \nu^2)} \nu \quad (\text{СМ/М}), \quad (13)$$

де N_e – концентрація електронів у шарах іоносфери, ел/м³;

$\omega = 2\pi f$ – колова частота ЕМХ рад/с;

f – лінійна частота ЕМХ, Гц;

ν – кількість співударів електронів з важкими частинками, с⁻¹.

Аналіз отриманих даних. Результати аналітичного методу дослідження. На основі викладеного матеріалу проведемо такі розрахунки:

1) складових амплітуди напруженості електричного поля у вільному просторі на відстані $r = 100 \dots 600$ км у ближній зоні, коли ЕЕВ довжиною $l = 40$ км збуджується змінним струмом із частотою $f = 50$ Гц, амплітудою $I = 2,93 \cdot 10^3$ А для кута $\theta = 0^\circ$ відповідно до виразів (1)–(3);

2) потужності та опору випромінювання ЕЕВ у повітрі за таких умов збудження згідно з виразом (5); амплітуди напруженості електричного поля в напрямку максимального випромінювання без урахування множника ослаблення за виразом (6);

3) основних втрат у разі поширення радіохвиль у вільному просторі в радіолінії протяжністю $r = 100 \dots 600$ км, що відповідає орбітам ШСЗ за виразом (9); потужності, яка надходить у приймальну антену високочутливих датчиків на борту ШСЗ, за потужності

випромінювання передавальної антени ЕЕВ довжиною $l = 40$ км, у разі незмінних умов збудження та неспрямованих передавальної та приймальної антен ($D_1 = D_2 = 1$) за (8);

4) відстань та коефіцієнт ослаблення в шарі атмосфери ($r \approx 60$ км), яка включає тропосферу та стратосферу, радіохвиль із частотою $f = 50$ Гц за виразами (11) і (12), враховуючи параметри шару [12]: діелектричну проникність $\varepsilon_2 = 1,00058$ та питому провідність $\sigma_2 = 10^{-4} \dots 10^{-3}$ См/м;

5) амплітуд напруженостей електричного поля в місці розташування приймальної антени $E(r)$ за виразом (10), у разі висот орбіт ШСЗ ($r = 100 \dots 600$ км), коефіцієнта підсилення передавальної антени $G = 1$, потужності випромінювання ЕЕВ у вільному просторі $P_{\text{вх}} = 150630$ Вт з урахуванням коефіцієнтів ослаблення шарів іоносфери $|W|$.

Результати розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків параметрів ЛЕП як ЕЕВ

№ з/п	Параметр	Результати розрахунків
1	$l = 40$ км, $f = 50$ Гц, $I = 2,93 \cdot 10^3$ А, $\theta = 0^\circ$, $r = 100 \dots 600$ км	
	E_θ , В/м	36, 82...6, 137 для 100...600 км
	E'_θ , В/м	351, 63...9, 76 для 100...600 км
	E''_θ , В/м	3358, 07...15, 52 для 100...600 км
2	$l = 40$ км, $f = 50$ Гц, $I = 2,93 \cdot 10^3$ А, $D = 1$	
	R_Σ , Ом	0,035
	P_Σ , Вт	150630
	E_0 , В/м	0, 03...0,005 для 100...600 км
3	$l = 40$ км, $f = 50$ Гц, $I = 2,93 \cdot 10^3$ А, $r = 100 \dots 600$ км, $D_1 = D_2 = 1$	
	Γ_0 , дБ	13,58...-1,98
	P_2 , дБВт	84,8...69,79
4	$l = 60$ км, $f = 50$ Гц, $\varepsilon_2 = 1,00058$, $\sigma_2 = 10^{-4} \dots 10^{-3}$ См/м	
	ρ	$8,73 \cdot 10^{-7} \dots 8,73 \cdot 10^{-8}$
	$ W_{\text{тр}} $	0,9999994...0,9999993
5	$G_1 = 1$, $r = 100 \dots 600$ км, $P_{\text{вх}} = 150630$ Вт	
	$E_{\text{день}}(100 \text{ км})$, В/м	$3,01 \cdot 10^{-2}$
	$E_{\text{ніч}}(100 \text{ км})$, В/м	$3,01 \cdot 10^{-2}$
	$E_{\text{день}}(200 \text{ км})$, В/м <i>зима</i>	$1,5 \cdot 10^{-2}$
	$E_{\text{ніч}}(330 \text{ км})$, В/м <i>зима</i>	$9,1 \cdot 10^{-3}$
	$E_{\text{день}}(400 \text{ км})$, В/м <i>літо</i>	$7,5 \cdot 10^{-3}$
	$E_{\text{день}}(500 \text{ км})$, В/м <i>літо</i>	$6,01 \cdot 10^{-3}$

Результати розрахунків чисельної відстані та множника ослаблення шару іоносфери $|W|$ для радіохвиль з частотою $f = 50$ Гц проведені за виразами (11)–(13), наведено в табл. 2.

Отже, у ближній зоні в разі переходу від електричної до магнітної енергії значна частина електричної повертається до джерела. Проте обмін енергією поля і джерела відбувається не повністю, певна її частина випромінюється.

Квазістаціонарна складова напруженості електричного поля в ближній зоні майже в 9,6–1,6 раза більше складової поля випромінювання. Тому потужність, що визначається полем ближньої зони, є лише реактивною. Вона обумовлює реактивний опір ЕЕВ.

Таблиця 2

Чисельна відстань та коефіцієнт ослаблення шарів іоносфери $|W|$ для радіохвиль із частотою $f = 50$ Гц

Шар	Добова поява шару	r_2 , км	ε_2	σ_2 , См/м	ρ	$ W $
D	Вдень	20	0,68	$2,82 \cdot 10^{-5}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	$\approx 0,9999993$
E	Вдень	15...20	$-4,8 \cdot 10^4$	$4,23 \cdot 10^{-2}$	$6,88 \cdot 10^{-10}$	$\approx 0,999999995$
E	Вночі	15...20	$-1,59 \cdot 10^3$	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$6,59 \cdot 10^{-6}$	$\approx 0,9999957$
F	Взимку вдень	120...140	$-6,37 \cdot 10^9$	5,63	$1,88 \cdot 10^{-11}$	$\approx 0,999999998$
F	Влітку вночі	200...230	$-7,97 \cdot 10^6$	0,7	$6,81 \cdot 10^{-10}$	$\approx 0,999999995$
F_1	Влітку вдень	100...130	$-7,97 \cdot 10^3$	1,13	$5,15 \cdot 10^{-10}$	$\approx 0,999999997$
F_2	Влітку вдень	100...200	$-2,87 \cdot 10^7$	2,54	$1,72 \cdot 10^{-10}$	$\approx 0,999999998$

Електричний розмір ЕЕВ у цьому разі малий, оскільки $l \ll \lambda$, тому він суттєвого впливу на потужність та опір випромінювання не має. Проте потужність випромінювання висока за рахунок струму живлення.

Амплітуда напруженості електричного поля у вільному просторі в дальній зоні обернено пропорційна відстані та збільшується зі зростанням потужності випромінювання.

Основними втратами в радіолінії є ослаблення потужності під час поширення радіохвиль в атмосфері. Вони залежать від довжини хвилі та протяжності радіолінії. Ослаблення радіохвиль із частотою 50 Гц у тропосфері та стратосфері незначне.

На поширення радіохвиль істотно впливає ділянка іоносфери. Найбільше ослаблення радіохвиль із частотою 50 Гц відбувається вдень у шарі D та вночі в шарі E .

Розраховані значення напруженостей електричного поля на різних висотах ШСЗ, наведені в табл. 1, не суперечать вимірним значенням, поданим у роботі [8].

Висновки. У результаті проведеного аналітичним методом часткового якісного дослідження впливу випромінювання високовольтних ліній електропередач на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері, запропонований в [1], можна зробити такі висновки.

1. Чим більший коефіцієнт підсилення передавальної антени на певних частотах гармонічного випромінювання електромереж – PLHR, тим більше значення потужності на вході та на виході приймальної антени на цих частотах.

2. В [1] зазначено, що необхідна для реєстрації мультиплетів інтенсивність ліній PLHR досягається, зокрема, за рахунок одного із трьох факторів – значної об'ємної густини енергії поля електромереж, зміну якої було досліджено аналітичним методом (розрахунок амплітуд напруженостей електричного поля в іоносфері на різних висотах).

3. Достовірність отриманих даних в аналітичному методі підтверджується збігом основних виразів за одиницями вимірювання.

4. Перспективи подальших досліджень полягають у числовому моделюванні зміни коефіцієнта підсилення в смузі частот із кроком 100 Гц за умов дослідження [4] та якісного порівняння результатів зі спектром з інтервалом між сателітами 100 Гц, який отримано на ШСЗ “Деметер” [4].

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Ваврух М., Корепанов В. Механізм формування ліній гармонічного випромінювання в іоносфері // Вісник Львівського ун-ту. Серія фізична. 2013. Вип. 48. С. 180–197. ISSN 1024-588X.
2. Випромінювання ліній електропередач у навколосемному просторі / Д. Ф. Дудкін, В. О. Проненко, В. Є. Корепанов, С. І. Клімов // Космічна наука і технологія. 2014. № 5 (90). С. 27–34. <http://dx.doi.org/10.15407/knit2014.05.027>
3. Comparison of Magnetospheric Line Radiation and Power Line Harmonic Radiation: A Systematic Survey Using the DEMETER Spacecraft / F. Nemeц, O. Santolic, M. Parrot, J. Berthelier // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. Article ID A04301. <http://dx.doi.org/10.1029/2006ja012134>
4. Power Line Harmonic Radiation Observed by Satellite: Properties and Propagation Through the Ionosphere / F. Nemeц, O. Santolic, M. Parrot, J. Bortnik // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. Article ID A08317. <http://dx.doi.org/10.1029/2008ja013184>
5. Nemeц F., Parrot M., Santolic O. Influence of Power Line Harmonic Radiation on the VLF Wave Activity in the Upper Ionosphere: Is it Capable to Trigger New Emissions // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. Article ID A11301. <https://doi.org/10.1029/2010JA015718>
6. Barbe K., Pintelon R., Schoukens J. Welch Method Revisited: Nonparametric Power Spectrum Estimation via Circular Overlap // IEEE Trans. Signal Process. 2010. № 58. P. 553–565. <http://dx.doi.org/10.1109/tsp.2009.2031724>
7. Zelenyj L. M., Gurevich A. V., Klimov S. I. Academic Microsatellite CHIBIS-M // Space Research. 2014. Vol. 1, Iss. 1. P. 52.

8. Simoes F., Pfaff R., Freudenreich H. Satellite Observations of Schumann Resonances in the Earth's Ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2011. № 38. Article ID L22101. <https://doi.org/10.1029/2011GL049668>
9. Francisco C. M. Connecting Renewable Power Plant to the Brazilian Transmission Power System // *The institute of Brazilian business and public management issues. The Minerva program.* Washington, DC (USA). 2012. 37 p.
10. Розвиток атомної енергетики та об'єднаних енергосистем / Денисевич К. Б. (Ч. 2), Ландау Ю. О. (Вступ, ч. 1, розділ 1, післямова), Нейман В. О. (Ч. 2), Сулейманов В. М. (Ч. 2). URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4> (дата звернення 20.04.2024).
11. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 1. Основи теорії електромагнітного поля : підруч. для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усін та ін. Харків : ХНУРЕ; Колегіум, 2009. 286 с.
12. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль : підруч. для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усін та ін. Харків : ХНУРЕ; Колегіум, 2010. 435 с.
13. Пілінський В. В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль : навч. посіб. для студентів напряму підготовки 6.050903 «Телекомунікації». Київ : Нац. техніч. ун-т України «КПІ», 2014. 336 с.
14. Кривуци В. Г. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу : навч. посіб. Київ : ДУІКТ, 2012. 596 с.

Стаття надійшла до редакції 24.06.2024.

REFERENCES

1. Vavrukh, M., & Korepanov, V. (2013). Mekhanizm formuvannia linii harmonichnoho vyprominiuvannia v ionosferi [The Mechanism of Formation of Lines of Harmonic Radiation in the Ionosphere]. *Visnyk Lvivskoho un-tu. Seriya fizychna [Bulletin of Lviv University. The series is physical]*, Iss. 48, 180–197. ISSN 1024-588X. Lviv [in Ukrainian].
2. Dudkin, D. F., Pronenko, V. O., Korepanov, V. E., & Klimov, S. I. (2014). Vyprominiuvannia linii elektropredach u navkolozemnomu prostori [Power Line Radiation in the Near-Earth Space]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia [Space science and technology]*, № 5 (90), 27–34. <http://dx.doi.org/10.15407/knit2014.05.027> [in Ukrainian].
3. Nemes, F., Santolic, O., Parrot, M., & Berthelier, J. (2007). Comparison of Magnetospheric Line Radiation and Power Line Harmonic Radiation: A Systematic Survey Using the DEMETER Spacecraft. *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, Article ID A04301. <http://dx.doi.org/10.1029/2006ja012134>
4. Nemes, F., Santolic, O., Parrot, M., & Bortnik, J. (2008). Power Line Harmonic Radiation Observed by Satellite: Properties and Propagation Through the Ionosphere. *J. Geophys. Res.*, Vol. 113, Article ID A08317. <http://dx.doi.org/10.1029/2008ja013184>
5. Nemes, F., Parrot, M., & Santolik, O. (2010). Influence of Power Line Harmonic Radiation on the VLF Wave Activity in the Upper Ionosphere: Is it Capable to Trigger New Emissions. *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, Article ID A11301. <https://doi.org/10.1029/2010JA015718>

6. Barbe, K., Pintelon, R., & Schoukens, J. (2010). Welch Method Revisited: Nonparametric Power Spectrum Estimation via Circular Overlap. *IEEE Trans. Signal Process.*, № 58, 553–565. <http://dx.doi.org/10.1109/tsp.2009.2031724>
7. Zelenyj, L. M., Gurevich, A. V., & Klimov, S. I. (2014). Academic Microsatellite CHIBIS-M. *Space Research, Vol. 1*, Iss. 1, 52.
8. Simoes, F., Pfaff, R., & Freudenreich, H. (2011). Satellite Observations of Schumann Resonances in the Earth's Ionosphere // *Geophys. Res. Lett.*, № 38. Article ID L22101. <https://doi.org/10.1029/2011GL049668>
9. Francisco, C. M. (2012). Connecting Renewable Power Plant to the Brazilian Transmission Power System. *The institute of Brazilian business and public management issues*. The Minerva program. Washington, DC (USA).
10. Denysevych, K. B., Landau, Yu. O., Neiman, V. O., & Suleimanov, V. M. (n.d.). *Rozvytok atomnoi enerhetyky ta ob'iednanykh enerhosystem [Development of Nuclear Energy and Combined Energy Systems]*. Retrived from <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4> [in Ukrainian].
11. Shokalo, V. M., Pravda, V. I., Usin, V. A., Vuntesmeri, V. S., & Hretskykh, D. V. (2009). *Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl. Ch. 1. Osnovy teorii elektromahnitnoho polia : pidruchnyk dlia studentiv VNZ [Electrodynamics and Propagation of Radio Waves. Part 1. Fundamentals of Electromagnetic Field Theory: Textbook for University Students]*. Kharkiv [in Ukrainian].
12. Shokalo, V. M., Pravda, V. I., Usin, V. A., Vuntesmeri, V. S., & Hretskykh, D. V. (2010). *Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl. Ch. 2. Vyprominiuvannia ta poshyrennia elektromahnitnykh khvyl: pidruchnyk dlia studentiv VNZ [Electrodynamics and Propagation of Radio Waves. Part 2. Radiation and Propagation of Electromagnetic Waves: Textbook for University Students]*. Kharkiv [in Ukrainian].
13. Pilinskyi, V. V. (2014). *Tekhnichna elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl : navch. posib. dlia studentiv napriamu pidhotovky 6.050903 «Telekomunikatsii» [Technical Electrodynamics and Propagation of Radio Waves: Teaching. Manual for Students of the field of training 6.050903 Telecommunications]*. Kyiv [in Ukrainian].
14. Kryvutsy, V. H. (2012). *Teoriia i praktyka upravlinnia vykorystanniam radiochastotnoho resursu : navch. posib [Theory and Practice of Managing the Use of Radio Frequency Resources. Education Manual]*. Kyiv [in Ukrainian].

O. R. Ryhalsky, N. M. Karashchuk, R. V. Netrebko

ANALYTICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE RADIATION OF HIGH-VOLTAGE POWER LINES ON THE FORMATION OF HARMONIC RADIATION IN THE IONOSPHERE

The influence of radiation from high-voltage power lines on the mechanism of harmonic radiation formation in the ionosphere is studied partially and qualitatively by analytical method on the basis of theories of the electromagnetic field, antennas, and propagation of electromagnetic waves in the atmosphere. This made it possible to interpret the frequency

features of the observed spectra registered by the Earth's artificial satellites. The impact of radiation from high-voltage power lines is becoming significant due to the growing level of electricity production and use by powerful electricity consumers, which generate man-made signals at frequencies related to the frequency of the power grid and its numerous harmonics, causing changes in the parameters of the plasma and electromagnetic field in the ionosphere. High-voltage power lines are considered as an antenna system consisting of radiators equivalent to horizontal elementary electric vibrators raised by means of supports above the earth's surface. In the first approximation, the Earth and the atmosphere are described as a spherically layered medium whose electrical parameters depend only on the height to a smooth spherical surface. The components of the electric field intensity amplitude of an elementary electric vibrator in the near-field have been calculated by the analytical method, which proves a very low radiation power. In the far zone, the calculated radiation power is 150.63 kW due to the supply current of 2.93 kA, since the electrical size of such antenna is very small. The determined amplitude of the electric field strength in the ionosphere, taking into account the attenuation depending on the height of the layer, varies from 0.301 mV/m to 6.01 mV/m for altitudes from 100 km to 500 km. The obtained results do not contradict previously measured values.

Keywords: *radiation of electric networks, elementary electric vibrator, directional diagram, electric field strength, magnetic field strength, ionosphere, ionosphere radiation.*