

О. Р. Рихальський, С. В. Петраш, А. В. Антонюк

МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕННИХ СИСТЕМ ІЗ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЇХ ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ PLHR-ВИПРОМІНЮВАННЯ В ІОНОСФЕРІ

За допомогою супутникових досліджень був відкритий ефект відображення в іоносфері гармонічного випромінювання електромереж (power line harmonic radiation – PLHR). Встановлено, що потужні споживачі електроенергії формують на частотах, пов'язаних із частотою електромереж і її численними гармоніками, техногенні сигнали. Вони викликають зміни параметрів плазми та електромагнітного поля в іоносфері. Проте, незважаючи на багаторазові спроби, на сьогодні немає пояснення ефекту PLHR.

Метою статті є часткове якісне дослідження числовим методом впливу випромінювання високовольтних ліній електропередач на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері на основі теорій електромагнітного поля, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері.

Високовольтні лінії електропередач розглянуто як антенну систему, яка складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним елементарним електричним вібраторам, які підняті за допомогою опор над землею поверхнею. Числовим методом здійснено моделювання повітряних ліній електропередач різних класів та конфігурацій як антенних систем у програмному середовищі MMANA. Зокрема, досліджено зміну коефіцієнта підсилення антенних систем відповідних моделей повітряних ліній електропередач у смузі частот гармонічного випромінювання електромереж PLHR. Діаграма спрямованості горизонтального елементарного електричного вібратора має пелюстковий характер із певною глибиною провалів залежно від параметрів Землі та її поверхні, уздовж якої випромінювання відсутнє. Явище інтерференції впливає на зміну коефіцієнта підсилення залежно від частоти та висоти встановлення антени. Також має значення клас моделі повітряної лінії та її геометричні розміри.

Отримані результати чисельного моделювання не суперечать висновкам аналітичного методу дослідження – теорії електромагнітного поля, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері.

Необхідна для реєстрації мультіплетів інтенсивність ліній PLHR досягається, зокрема, за рахунок значної об'ємної густини енергії поля електромереж, зміну якої досліджено чисельним моделюванням (аналіз зміни коефіцієнта підсилення антенних систем відповідних моделей повітряних ліній електропередач у визначеній смузі частот). У разі високої об'ємної густини енергії поля електромереж виникають мультіплети з великою кількістю сателітів (до десяти і більше) з інтервалом 50 Гц. Цю особливість якісно підтверджено зміною коефіцієнта підсилення за зміни частоти на 50 Гц, який приймає достатньо великі значення. У разі низької густини енергії поля електромереж та високих концентрацій вільних електронів можливий режим генерації нового

електромагнітного поля, що пояснює можливість утворення мультиплетів з інтервалом 100 Гц між лініями. Вказана особливість якісно підтверджена значеннями коефіцієнта підсилення на частотах, кратних 100 Гц, які не менше 2 дБі.

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

Постановка проблеми в загальному вигляді. На сьогодні є значний обсяг експериментальних даних супутникових досліджень, які свідчать про наявність в іоносфері кластерів (мультиплетів) спектральних ліній гармонік із частотами 50 (60) Гц (до 10–15 ліній), центрованих біля середньої частоти, яка змінюється в широкому діапазоні – від 1 кГц до 15 кГц [1]. Ці дані отримано в експериментах на штучних супутниках Землі (ШСЗ) [1–11], що підтверджує проникнення сигналів на гармоніках із частотами електромереж в іоносферу через їх неповне затухання. Вони можуть бути виміряні за наявності на борту високочутливих датчиків.

Це явище вивчається для встановлення кількісних залежностей та можливих негативних наслідків у разі подальшого збільшення виробництва електроенергії. Водночас дослідження ефекту PLHR (power line harmonic radiation) має самостійне фундаментальне значення як один із проявів взаємодії електромагнітного поля із частково іонізованою плазмою.

Об'єктом дослідження є механізм формування гармонічного випромінювання електромереж (PLHR) в іоносфері, запропонований в [1], а предметом – вплив на зміну густини поля електромереж (інтенсивність ліній PLHR для реєстрації мультиплетів) коефіцієнта підсилення високовольтних ліній електропередач (ЛЕП), які розглянуто як антенну систему, що складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним елементарним електричним вібраторам (ЕЕВ), які підняті за допомогою опор над землею поверхнею, у відповідній смузі частот.

Метою роботи є часткове якісне дослідження впливу випромінювання високовольтних ЛЕП на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері, запропонований в [1], на основі теорій електромагнітного поля, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері числовим методом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що, незважаючи на багаторазові спроби, на сьогодні пояснення ефекту PLHR немає. Навіть про ділянку, де утворюються PLHR, тривають суперечки: розглядаються гіпотези, згідно з якими вони або створюються через нелінійні взаємодії в іоносфері, або ж генеруються на земній поверхні через спотворення форми струму у високовольтних лініях електропередач.

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 ШСЗ [1].

У повітряних ЛЕП змінного струму поле спрямованої хвилі неекрановане й існує у вільному просторі довкола ліній, тому електромережі протяжністю сотні й тисячі

кілометрів можна розглядати як антени значної потужності випромінювання. Основним фактором, що визначає пропускну здатність і дальність передачі повітряних ліній, 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), виконані з круглих проводів [2, 11].

У [2] аналітичним методом проведено розрахунок складових амплітуди напруженості електричного поля ЕЕВ у ближній зоні, результати якого свідчать про 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 [12–16].

Отже, необхідно провести часткове якісне чисельне моделювання зміни коефіцієнта підсилення високовольтних ЛЕП як антенної системи, що складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним ЕЕВ, які підняті за допомогою опор над землею поверхнею, у відповідній смузі частот.

Формулювання завдання дослідження. 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 ЕЕВ, що підняті за допомогою опор над землею поверхнею.

Виклад основного матеріалу. Серед сучасних прикладних програм (ELNEC, EZNEC, NEC4WIN95, MMANA) найменше обмежень має програма відомого японського програміста Makoto Mori (JE3NHT) – MMANA (максимальна кількість: проводів – 512, джерел – 64, навантажень – 100, точок розрахунку – 8192) [12]. Збіг практичних результатів із розрахунковими достатньо високий [12].

Горизонтальні антени низько підвішені над реальною землею поверхнею (рівною, пласкою з відносною діелектричною проникністю 13 та провідністю 5 мСм/м) [13], [12]. Земля в моделі діє як ідеальний рефлектор (насправді таким не будучи), і поле, створене такою антеною, додається до поля, відбитого від ідеальної поверхні землі, у результаті маємо еквівалентність двоелементній антені, спрямованій у зеніт.

Моделювання конструкцій і розмірів ЛЕП проводилося відповідно до їх класифікації за робочою напругою [11].

За допомогою програми MMANA розраховано параметри та характеристики антенних систем повітряних ЛЕП із різними класами напруги та відповідної конструкції. Обчислення проводилося на частотах від 1 кГц до 5 кГц із кроком зміни частоти 50 Гц, що відповідає смузі частот гармонічного випромінювання електромереж PLHR.

Аналіз отриманих даних. На рис. 1 зображено модель повітряної ЛЕП середнього класу напруги 10 кВ, зміна коефіцієнта підсилення (G_a , dBi) та відношення рівня випромінювання вперед / назад (F/V) від частоти, діаграми спрямованості (ДС) антени

в горизонтальній та вертикальній площинах на частоті 4 кГц.

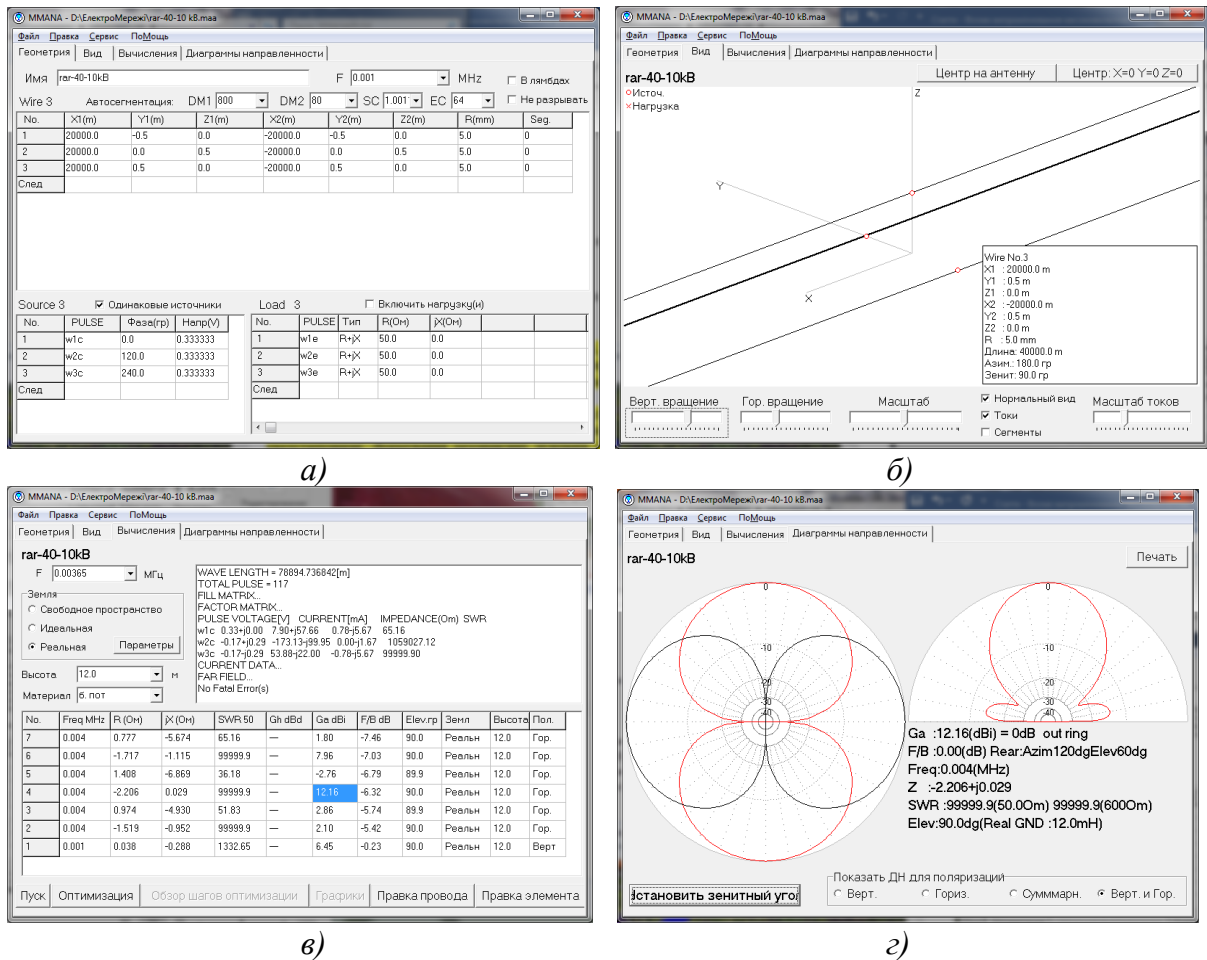


Рис. 1. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП середнього класу напруги 10 кВ

На рис. 2 наведено модель повітряної ЛЕП середнього класу напруги 35 кВ та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

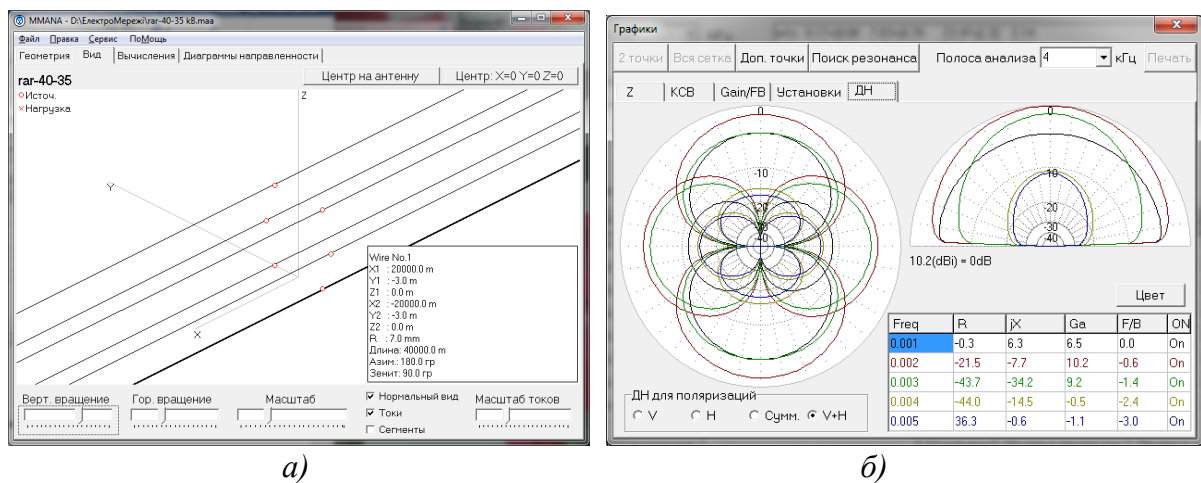


Рис. 2. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП середнього класу напруги 35 кВ

На рис. 3 показано модель повітряної ЛЕП високого класу напруги 110 кВ та результати моделювання її параметрів у смузі частот від 2 кГц до 3 кГц.

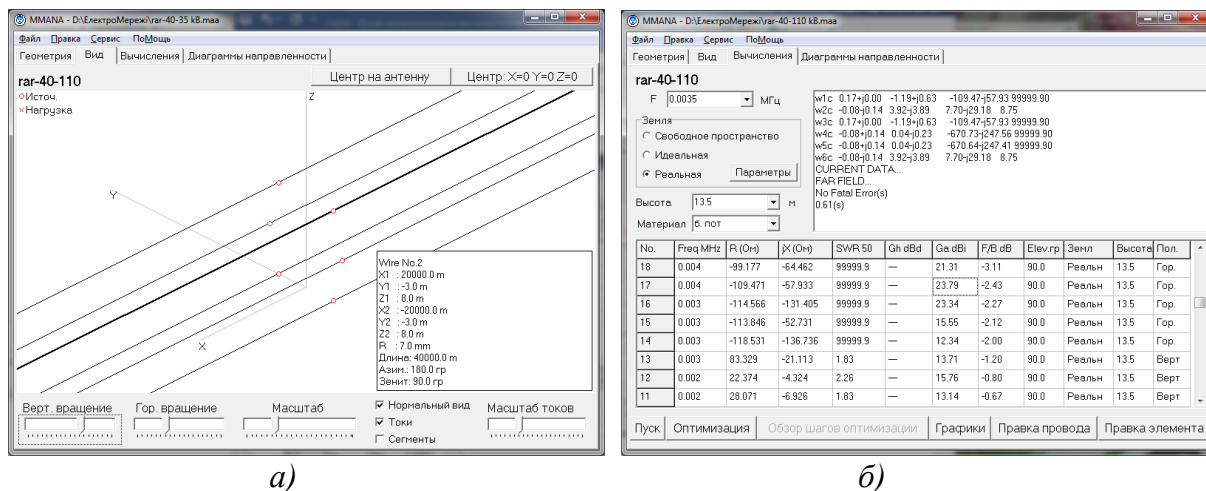


Рис. 3. Результати моделювання параметрів антени повітряної ЛЕП високого класу напруги 110 кВ

На рис. 4 зображено модель повітряної ЛЕП високого класу напруги 220 кВ та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

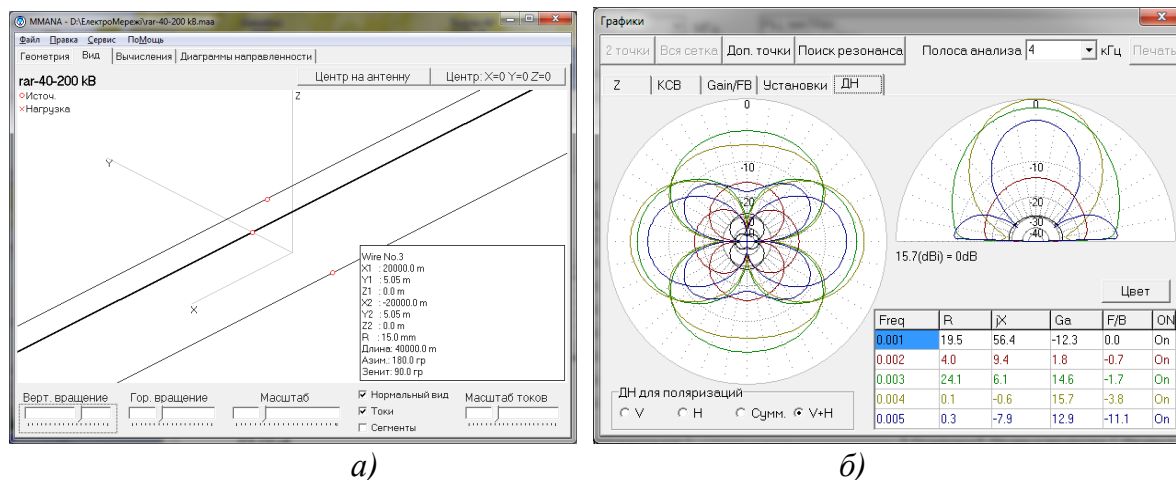


Рис. 4. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП високого класу напруги 220 кВ

На рис. 5 наведено модель повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 330 кВ (конструкція опор рис. 1а [2]) та результати моделювання її параметрів у смузі частот від 3 кГц до 4 кГц.

На рис. 6 показано модель повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 330 кВ (конструкція опор рис. 1б [2]) та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

На рис. 7 наведено модель повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 550 кВ (конструкція опор рис. 1б [2]) та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

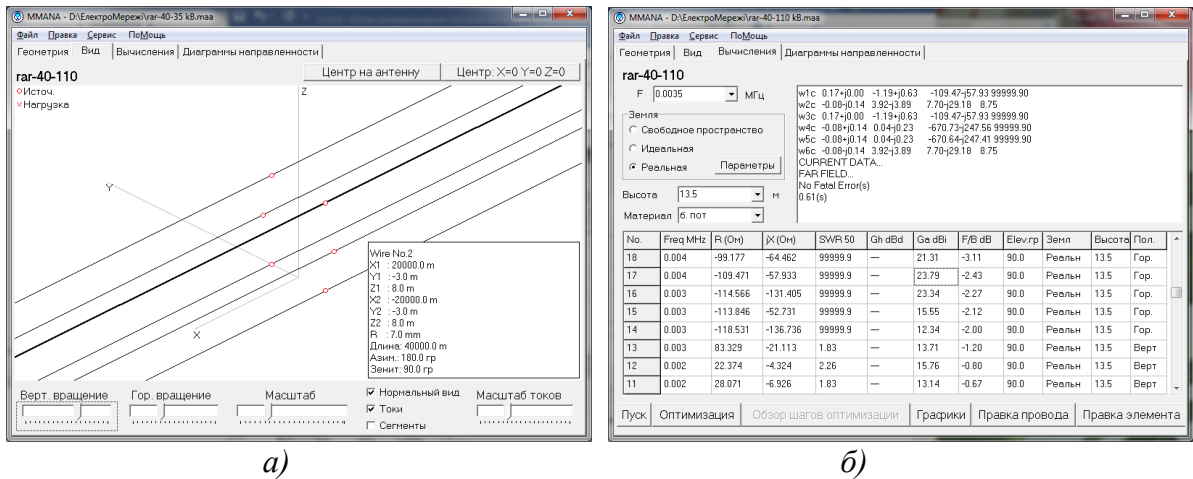


Рис. 5. Результати моделювання параметрів антени повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 330 кВ (конструкція опор рис. 1а [2])

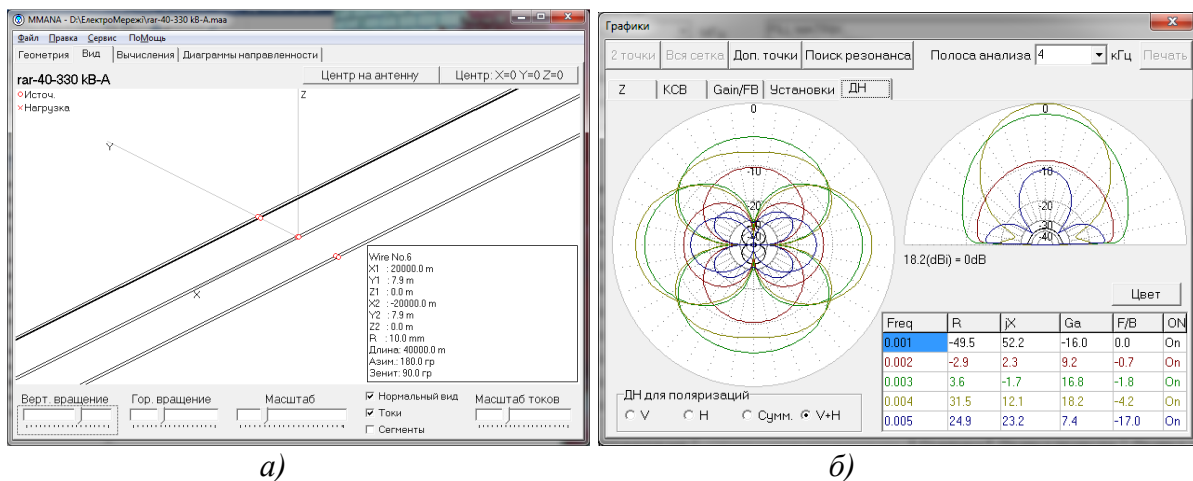


Рис. 6. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 330 кВ (конструкція опор рис. 1б [2])

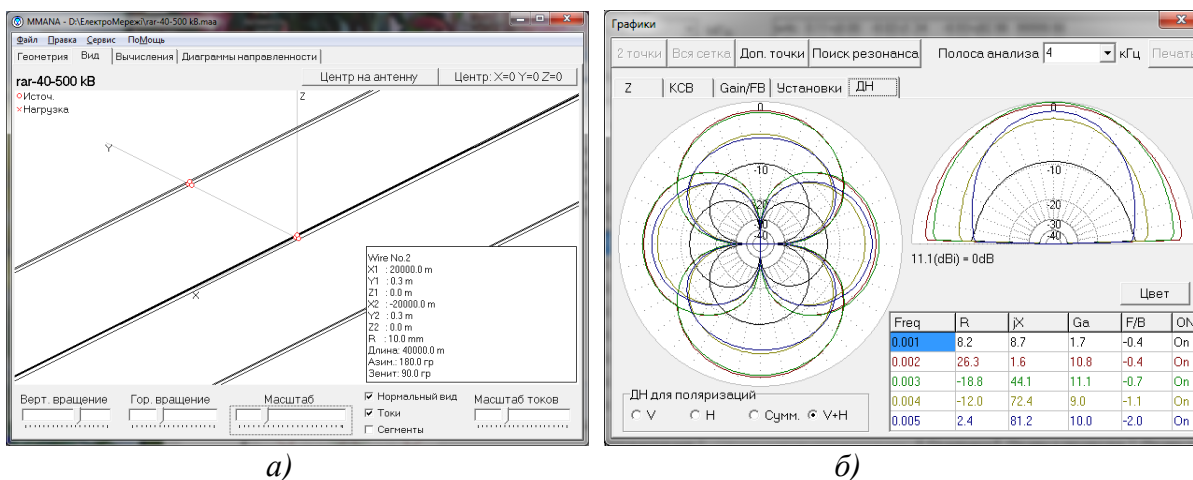


Рис. 7. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП надвисокого класу напруги 550 кВ (конструкція опор рис. 1б [2])

На рис. 8 зображено модель повітряної ЛЕП ультрависокого класу напруги 750 кВ (конструкція опор рис. 1б [2]) та результати моделювання її параметрів і характеристик у смузі частот від 1 кГц до 5 кГц.

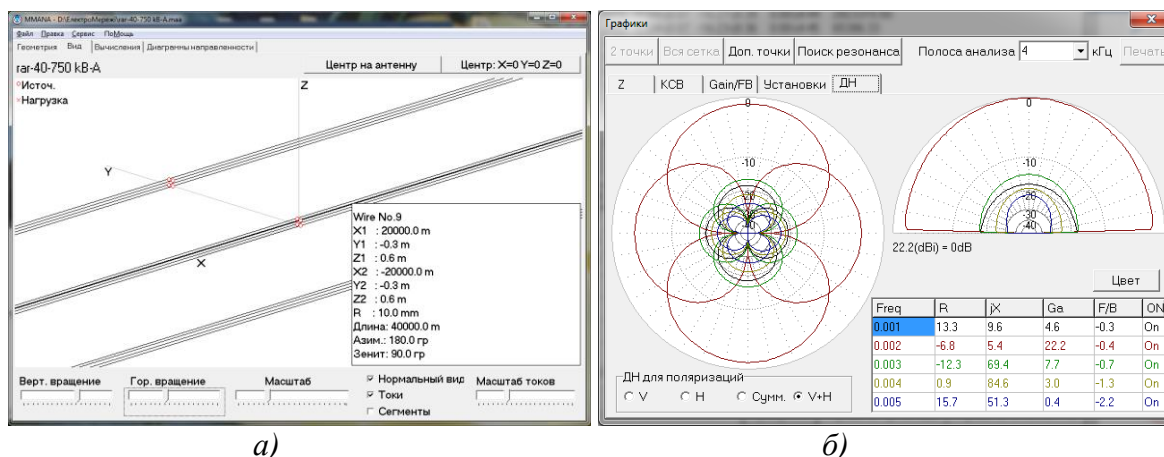


Рис. 8. Результати моделювання параметрів та характеристик антени повітряної ЛЕП ультрависокого класу напруги 750 кВ (конструкція опор рис. 1б [2])

Зведені результати чисельного моделювання повітряних ЛЕП різних класів за напругою та конструкцій опор, а також зміни коефіцієнта підсилення в смузі частот наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати чисельного моделювання параметрів повітряних ЛЕП різних класів за напругою та конструкцій опор

Клас моделей повітряних ЛЕП	Параметри			
	$(G_{\min} \dots G_{\max})$, дБі	$(f_{\min} \dots f_{\max})$, кГц	$G_{\max}$, дБі	$f_{\max}$, кГц
Середній				
10 кВ	6,45...12,16	1...4	12,16	4
35 кВ	18,29...-1,1	1...5	18,29	4
Високий				
110 кВ	12,34...23,79	2...4	23,79	4
220 кВ	-12,3...17,9	1...5	17,13	4
Надвисокий				
330 кВ (рис. 1а) [2]	7,37...32,69	3...4	32,69	3
330 кВ (рис. 1б) [2]	-16...7,4	1...5	45,7	3
500 кВ (рис. 1б) [2]	1,7...10	1...5	11,1	3
Ультрависокий				
750 кВ (рис. 1б) [2]	4,6...0,4	1...5	25,89	2

Отже, результати чисельного моделювання не суперечать результатам аналітичного методу дослідження [2] – теорії електромагнітного поля, антен та розповсюдження електромагнітних хвиль в атмосфері.

ДС горизонтального ЕЕВ має пелюстковий характер із певною глибиною провалів залежно від параметрів Землі та її поверхні. Уздовж земної поверхні випромінювання відсутнє.

Явище інтерференції впливає на зміну коефіцієнта підсилення залежно від частоти та висоти встановлення антени. Також має значення клас моделі повітряної лінії та її геометричні розміри.

Відповідно до результатів моделювання, наведених в табл. 1, максимальний коефіцієнт підсилення антенних систем відповідних моделей повітряних ЛЕП буде на частоті 4 кГц для середнього та високого, на частоті 3 кГц для надвисокого й ультрависокого класів за напругою.

На краях смуги частот від 1 кГц до 5 кГц коефіцієнт підсилення має мінімальні значення, посередині – максимальні.

Значення коефіцієнта підсилення за зміни частоти на 50 Гц від 3 кГц до 4 кГц (рис. 1) більше 2 дБі, однак є одне максимальне 12,16 дБі та мінімальне -2,7 дБі.

Отже, у результаті проведеного аналітичним [2] та числовим методами часткового якісного дослідження впливу випромінювання високовольтних ЛЕП 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 виході приймальної антени на цих частотах та їх гармоніках.

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 густини енергії поля електромереж було досліджено аналітичним методом (розрахунок амплітуд напруженостей електричного поля в іоносфері на різних висотах) [2] та чисельного моделювання (дослідження зміни коефіцієнта підсилення у відповідній смузі частот).

3. У режимі детектора випромінювання мереж – високої об'ємної густини енергії їх поля виникають мультиплети зі значною кількістю сателітів (до десяти і більше) з інтервалом 50 Гц [1]. Цю особливість якісно підтверджено зміною коефіцієнта підсилення при зміні частоти на 50 Гц, який приймає достатньо великі значення.

4. За низької густини енергії поля електромереж та високих концентрацій вільних електронів можливий режим генерації нового електромагнітного поля, що пояснює можливість утворення мультиплетів з інтервалом 100 Гц між лініями [1]. Вказана особливість якісно підтверджена значеннями коефіцієнта підсилення антенних систем відповідних моделей повітряних ЛЕП на частотах, кратних 100 Гц, які не менше 2 дБі.

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

6. Точність числового методу обумовлена максимальною кількістю точок розрахунку в програмі MANNA – 8192 [16], що дозволяє отримати достатній збіг із практичними результатами [16].

Висновки. У результаті дослідження змодельовано вплив випромінювання високовольтних ЛЕП на механізм формування гармонічного випромінювання в іоносфері

Наукова новизна полягає в якісному поясненні причини зміни інтенсивності ліній PLHR через зміну коефіцієнта підсилення високовольтних ЛЕП, які розглянуто як антенну

систему, що складається з випромінювачів, еквівалентних горизонтальним ЕЕВ, які підняті за допомогою опор над земною поверхнею.

Практичну цінність підтверджено можливістю застосування запропонованого підходу для дослідження ефекту PLHR як одного з проявів взаємодії електромагнітного поля з частково іонізованою плазмою.

Перспективою подальших досліджень є чисельне моделювання 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. 2013. Вип. 48. С. 180–197. ISSN 1024-588X.
2. Рихальський О. Р., Каращук Н. М., Нетребко Р. В. Аналітичне дослідження впливу випромінювання високовольтних ліній електропередач на формування гармонічного випромінювання в іоносфері // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 26 (I). С. 81–92. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.07>
3. Випромінювання ліній електропередач у навколосемному просторі / Д. Ф. Дудкін, В. О. Проненко, В. Є. Корепанов, С. І. Клімов // Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20, № 5. С. 27–34. ISSN 1561-8889. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.07>
4. Comparison of Magnetospheric Line Radiation and Power Line Harmonic Radiation: A Systematic Survey Using the DEMETER Spacecraft / F. Nemec, O. Santolic, M. Parrot, J. Berthelier // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. P. A04301. <https://doi.org/10.1029/2006ja012134>
5. Power Line Harmonic Radiation Observed by Satellite: Properties and Propagation Through the Ionosphere / F. Nemec, O. Santolic, M. Parrot, J. Bortnik // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. P. A08317. <https://doi.org/10.1029/2008ja013184>
6. Nemec F., Parrot M., Santolik 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. P. A11301. <https://doi.org/10.1029/2010JA015718>
7. 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.
8. Zelenyj L. M., Gurevich A. V., Klimov S. I. Academic Microsatellite CHIBIS-M // Space Research. 2014. Vol. 1, Iss. 1. P. 52.
9. Simoes F., Pfaff R., Freudenreich H. Satellite Observations of Schumann Resonances in the Earth's Ionosphere // Geophys. Res. Lett. 2011. № 38. P. L22101. <https://doi.org/10.1029/2011GL049668>
10. Francisco C. M. Connecting Renewable Power Plant to the Brazilian Transmission Power System. Washington, DC (USA), The institute of Brazilian business and public management issues. The Minerva program. 2012. 37 p.

11. Розвиток атомної енергетики та об'єднаних енергосистем / К. Б. Денисевич (Ч. 2), Ю. О. Ландау (Вступ, ч. 1, розділ 1, післямова), В. О. Нейман (Ч. 2), В. М. Сулейманов (Ч. 2). URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4> (дата звернення 20.04.2025).
12. Все про програму MMANA. URL: <https://coollib.cc/b/703491-igor-viktorovich-goncharenko-kompyuternoe-modelirovanie-antenn-vse-o-programme-mmmana/read> (дата звернення: 20.04.2025).
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Кривуци В. Г. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу : навч. посіб. Київ : ДУІКТ, 2012. 596 с.

Стаття надійшла до редакції 02.06.2025.

REFERENCES

1. Vavrukh, M., & Korepanov, V. (2013). Mekhanizm formuvannia linii harmonichnoho vyprominiuvannia v ionosferi [Mechanism of Formation of Harmonic Radiation Lines in the Ionosphere]. *Visnyk Lvivskoho un-tu [Bulletin of Lviv University. The series is physical]*, 48, 180–197. ISSN 1024-588X. [in Ukrainian].
2. Rykhalskyi, O. R., Karashchuk, N. M., & Netrebko, R. V. (2024). Analitychne doslidzhennia vplyvu vyprominiuvannia vysokovoltnykh linii elektroperedach na formuvannia harmonichnoho vyprominiuvannia v ionosferi [Analytical Study of the Influence of the Radiation of High-Voltage Power Lines on the Formation of Harmonic Radiation in the Ionosphere]. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems. Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 26 (I), 81–92. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.26.07> [in Ukrainian].
3. Dudkin, D. F., Pronenko, V. O., Korepanov, V. Ye, & Klimov, S.I. (2014). Vyprominiuvannia linii elektroperedach u navkolozemnomu prostori [Power Line Radiation in the Near-Earth Space]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia [Space Science and Technology]*, 20, 5, 27–34. ISSN 1561-8889. <https://doi.org/10.15407/knit2014.05.027> [in Ukrainian].
4. Nemec, 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.*, 112, A04301. <https://doi.org/10.1029/2006ja012134>
5. Nemec, F., Santolic, O., Parrot, M., & Bortnik, J. (2008). Power Line Harmonic Radiation Observed by Satellite: Properties and Propagation Through the Ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 113, A08317. <https://doi.org/10.1029/2008ja013184>

6. Nemec, 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.*, 115, A11301. <https://doi.org/10.1029/2010JA015718>
7. Barbe, K., Pintelon, R., & Schoukens, J. (2010). Welch Method Revisited: Nonparametric Power Spectrum Estimation Via Circular Overlap. *IEEE Trans. Signal Process*, 58, 553–565. <https://doi.org/10.1109/tsp.2009.2031724>
8. Zelenyj, L. M., Gurevich, A. V., & Klimov, S. I. (2014). Academic Microsatellite CHIBIS-M. *Space Research*, 1, 1, 52.
9. Simoes, F., Pfaff, R., & Freudenreich, H. (2011). Satellite Observations of Schumann Resonances in the Earth's Ionosphere. *Geophys. Res. Lett*, 38, L22101. <https://doi.org/10.1029/2011GL049668>
10. Francisco, C. M. (2012). *Connecting Renewable Power Plant to the Brazilian Transmission Power System*. Washington, DC (USA), The institute of Brazilian business and public management issues. The Minerva program.
11. Denysevych, K. B., Landau, Yu. O., Neiman, V. O., & Suleimanov, V. M. (n.d.). *Rozvytok atomnoi enerhetyky ta ob'iednanykh enerhosystem [Development of Nuclear Power and Integrated Energy Systems]*. Retrived from <http://energetika.in.ua/ua/books/book-4> [in Ukrainian].
12. *Vse pro prohramu MMANA [All about the MMANA Program]*. (n.d.). Retrived from <https://coollib.cc/b/703491-igor-viktorovich-goncharenko-kompyuternoe-modelirovanie-antenn-vse-o-programme-mmmana/read> [in Ukrainian].
13. Shokalo, V. M., Pravda, V. I., & Usin, V. A. et al. (2009). *Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl. Ch. 1. Osnovy teorii elektromahnitnoho polia [Electrodynamics and Propagation of Radio Waves. Part 1. Fundamentals of the Theory of the Electromagnetic Field]*. Kharkiv [in Ukrainian].
14. Shokalo, V. M., Pravda, V. I., & Usin, V. A. et al. (2010). *Elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl. Ch. 2. Vyprominiuvannia ta poshyrennia elektromahnitnykh khvyl [Electrodynamics and Propagation of Radio Waves. Part 2. Radiation and Propagation of Electromagnetic Waves]*. Kharkiv [in Ukrainian].
15. Pilinskyi, V. V. (2014). *Tekhnichna elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl [Technical Electrodynamics and Propagation of Radio Waves]*. Kyiv [in Ukrainian].
16. Kryvutsy, V. H. (2012). *Teoriia i praktyka upravlinnia vykorystanniam radiochastotnoho resursu [Theory and Practice of Management of Radio Frequency Resource Use]*. Kyiv [in Ukrainian].

O. R. Ryhalsky, S. V. Petrash, A. V. Antonyuk

MODELING OF ANTENNA SYSTEMS FROM HIGH-VOLTAGE POWER LINES TO INVESTIGATE THE INFLUENCE OF THEIR RADIATION ON THE FORMATION OF PLHR RADIATION IN THE IONOSPHERE

Satellite research has revealed the effect of power line harmonic radiation (PLHR) reflection in the ionosphere. It has been established that powerful consumers of electricity generate technogenic signals at frequencies related to the frequency of the power grid and its

harmonics. They cause changes in the parameters of the plasma and the electromagnetic field in the ionosphere. However, despite repeated attempts, there is no explanation for the PLHR effect to date.

The aim of the article is a partial qualitative study using a numerical method of the influence of radiation from high-voltage power lines on the mechanism of formation of harmonic radiation in the ionosphere, based on the theories of the electromagnetic field, antennas, and the propagation of electromagnetic waves in the atmosphere.

High-voltage power lines are considered as an antenna system consisting of emitters equivalent to horizontal elementary electric vibrators, which are raised above the earth's surface by means of supports. The numerical method has been used to simulate overhead power lines of various classes and configurations as antenna systems in the MMANA software environment. In particular, the change in the gain of antenna systems of the corresponding models of overhead power lines in the frequency band of harmonic radiation of PLHR power networks. The directivity diagram of a horizontal elementary electric vibrator has a petal-like character with a certain depth of dips depending on the parameters of the Earth and its surface, along which radiation is absent. The phenomenon of interference affects the change in the gain depending on the frequency and height of the antenna installation. The class of the overhead line model and its geometric dimensions also matter.

Numerical modeling does not contradict the conclusions of the analytical research method – the theory of the electromagnetic field, antennas, and the propagation of electromagnetic waves in the atmosphere.

The intensity of PLHR lines necessary for registering multiplets is achieved, in particular, due to the significant volumetric energy density of the power grid field, the change of which was studied by numerical modeling (analysis of the change in the gain of antenna systems of the corresponding models of overhead power lines in a certain frequency band). In the case of high volumetric energy density of the electric grid field, multiplets with a large number of satellites (up to ten or more) with an interval of 50 Hz arise. This feature is qualitatively confirmed by the change in the gain coefficient with frequency changes of 50 Hz, which takes on sufficiently large values. In the case of low energy density of the electric grid field and high concentrations of free electrons, a new electromagnetic field generation mode is possible, which explains the possibility of the formation of multiplets with an interval of 100 Hz between lines. This feature is qualitatively confirmed by the values of the gain at frequencies multiples of 100 Hz, which are not less than 2 dBi.

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