

МЕТЕЛИЦЯ АРТЕМ

Вінницький технічний фаховий коледж

ORCID ID: [0000-0002-9383-7752](https://orcid.org/0000-0002-9383-7752)e-mail: artemmetelicha@gmail.com**КОВАЛЕНКО ВІКТОР**

Запорізький національний університет

ORCID ID: [0000-0001-5950-4412](https://orcid.org/0000-0001-5950-4412)e-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com**ТРОМСЮК ВОЛОДИМИР**

Вінницький технічний фаховий коледж

ORCID ID: [0000-0001-5022-8159](https://orcid.org/0000-0001-5022-8159)e-mail: 2013tvd@gmail.com**ФОРМАНЧУК МИКОЛА.**

Вінницький технічний фаховий коледж

ORCID ID: [0009-0006-4186-0965](https://orcid.org/0009-0006-4186-0965)e-mail: mif530522@gmail.com**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИМЕТРИЧНОГО ВІБРАТОРА**

В роботі наведено результати синтезу математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні. Визначено залежність між густиною потоку потужності та радіусом відстані від вібратора, що є важливим фізичним показником для побудови антен мобільних телефонів. Наведена математична модель може бути використана для розрахунків та проектування радіотехнічних та телекомунікаційних систем та пристроїв, що використовують симетричні вібратори для забезпечення мінімального впливу електромагнітного випромінювання на здоров'я людини.

Ключові слова: симетричний вібратор, електрична складова поля, діаграма спрямованості.

METELYTSYA ARTEM

Vinnytsia Technical Applied College

KOVALENKO VIKTOR

Zaporizhzhia National University

TROMSIUK VOLODYMYR

Vinnytsia Technical Applied College

FORMANCHUK MYKOLA

Vinnytsia Technical Applied College

MATHEMATICAL MODEL OF SYMMETRIC VIBRATOR

In the work, theoretical and experimental studies of the mathematical model of the value of the power flux density of the wave symmetric vibrator in the near zone were carried out using the MMANA-GAL software package. The density and structure of the field of an elementary electric emitter in the near zone have been determined. Directional diagrams of a half-wave symmetric vibrator with wavelengths of 0.5λ , λ , and 100λ were constructed. The directionality of electromagnetic wave radiation is of great importance in radio communication technology. The directionality of radiation can be ensured if the size of the antenna significantly exceeds the length of the emitted or received wave. The development of portable antennas for mobile phones is determined by two main aspects – acceptable broadband and maximum uniformity of electromagnetic radiation along the azimuthal angle with a high amplification factor. These conditions contradict the fact that the antenna is raised close to the human head with a wavelength comparable to the wavelength. During telephone conversations, the subscriber's head absorbs and scatters the electromagnetic energy emitted by the antenna, so that the meridional uniformity of the radiation is disturbed. The proposed mathematical model of the value of the power flow density of the wave symmetric vibrator in the near zone allows us to reduce the impact of the electrical component on human health. Such conclusions were drawn based on the results of simulation modeling of a half-wave symmetric vibrator using a synthesized mathematical model for the power flux density of a symmetric wave vibrator in the near zone in the MMANA-GAL environment, taking into account the fact that the direction of electric and magnetic radiation changes by 90 degrees with an increase in wavelength. The results of the study can be used for the development of effective antennas to reduce the negative impact on human health, in particular on the functioning of the brain.

Keywords: symmetric vibrator, electric field component, directional diagram.

Постановка проблеми

Симетричні вібратори є важливими елементами радіотехнічних та телекомунікаційних систем, без яких складно уявити сучасні системи зв'язку. Одним із ключових параметрів, який характеризує ефективність роботи симетричного вібратора, є густина потоку потужності у ближній зоні. Тому розробка математичної моделі густини потоку потужності є важливим науковим завданням, яке має практичне значення. Синтез математичної моделі густини потоку потужності симетричного вібратора дає можливість виявити вплив електромагнітного випромінювання на мозок людини. Результати дослідження такої моделі можуть бути використані для розрахунку ефективності роботи вібратора в радіотехнічних системах, а також для вдосконалення конструкції вібраторів, випромінювання яких буде менше впливати на мозок людини.

З розвитком мобільного зв'язку, який переходить на все більш високі частоти, стало актуально розглядати питання, які вивчають поширення електромагнітного поля ближньої зони оскільки це стосується впливу електромагнітного поля на людину, тому що мобільний телефон знаходиться на відстані в декілька міліметрів від кори головного мозку і працює на досить високій частоті, 890...915 МГц та 1710...1785 МГц

[1, 2, 3]. Системи зв'язку 4G та 5G працюють ще на більш високих частотах 2.5...3.7 ГГц [4].

На сьогодні для аналізу електромагнітного поля, що випромінюється антеною, використовують описи електричної і магнітної складових, що стосуються дальньої зони. Але дані результати будуть справедливими лише в тому випадку, коли антена мобільного телефону знаходиться на досить великій відстані від користувача.

Оскільки математичному аналізу електромагнітного випромінювання у ближній та проміжній зонах приділено мало уваги внаслідок ускладнення формул для розрахунку, то основним завданням роботи є виведення математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні. Також виконані експериментальні дослідження віртуальної моделі розподілу радіального потоку потужності у програмному пакеті MMANA-GAL [5].

Аналіз останніх джерел

У роботах [1, 2, 3, 6] було визначено співвідношення, які дозволили оцінювати спрямованість симетричних дротяних тонких вібраторів у ближній та проміжній зонах їх полів. Автори розглянутих робіт запропонували методику дослідження впливу електромагнітного випромінювання мобільного телефону на кору головного мозку людини. В роботах [7, 8] проведено оцінку взаємодії електромагнітного поля антени мобільного пристрою зв'язку з мозком людини. Дослідження авторів опрацьованих праць показують, що тривале електромагнітне випромінювання мобільного телефону чинить небажаний вплив на тканини головного мозку, нагріває їх та може спричинити небажані наслідки для здоров'я людини. Тому розглянутих праць пропонують різні методи зменшення впливу випромінювання мобільного телефону на голову людини.

Жорсткі вимоги до рівня потужності електромагнітного випромінювання, що поглинають певні органи людини [7, 8], який характеризує ступінь впливу мобільний телефон-людина, вимагають проведення досить складних і дорогих експериментальних вимірювань. Засоби такого контролю повинні бути неінвазивними і неспотвореними. В таких умовах зростає роль математичного та імітаційного моделювання високочастотних електромагнітних полів, що створюються мобільними телефонами, зокрема їх антенами, і насамперед, розрахунку рівня потужності випромінювання, яке поглинають окремі органи людини. Для цих цілей потрібно мати досить просту і зрозумілу математичну модель густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні.

У роботах [9, 10, 11] було наведено моделювання різних випромінювачів електромагнітних сигналів, які дають досить точні результати для визначення експериментальних залежностей між геометричними параметрами і характеристиками антени. Розгляд моделювання різних випромінювачів електромагнітних сигналів дозволяє сформулювати методику дослідження математичної моделі густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні. Побудова діаграм спрямованості для різних довжин хвиль дозволяє знайти ефективні величини при яких симетричний вібратор буде працювати найбільш ефективно та з найменшим впливом на окремі мозок людини.

Метою роботи є синтез математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні та імітаційне дослідження моделі розподілу радіального потоку потужності у програмному пакеті MMANA-GAL. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) синтезувати спрощену математичну модель густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні; 2) отримати та опрацювати результати імітаційного моделювання густини потоку електромагнітного випромінювання у ближній зоні для довжин хвиль $0,5\lambda$, λ , 100λ .

Виклад основного матеріалу

Для синтезу математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні необхідно умовно розмістити тонкий симетричний вібратор довжиною $2l$ у сферичній системі координат таким чином, як показано на рис. 1 і визначили електричну і магнітну складові електромагнітного поля [2].

$$\dot{E}_\theta = \frac{I_0 \cdot r \cdot \sin \theta}{j \cdot 4\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_a \cdot \sin kl} \cdot \left[\int_0^l \frac{1 + jkr_1 - k^2 \cdot r_1^2}{r_1^4} \cdot \sin k(l-z) \cdot e^{-jkr_1} dz + \int_{-l}^0 \frac{1 + jkr_2 - k^2 r^2}{r_2^4} \cdot \sin k(l-z) \cdot e^{-jkr_2} dz \right], \quad (1)$$

де E_θ – комплексна амплітуда меридіональної складової електричного поля;

I_0 – амплітуда гармонічного електричного струму в елементарному електричному випромінювачі довжиною l ;

r – відстань від випромінювача до зазначеної точки випромінювання;

z – ширина випромінювання в ближній зоні;

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon$ – абсолютна діелектрична проникність середовища, яке оточує досліджуваний випромінювач;

$k = 2\pi / \lambda$ – коефіцієнт фази випромінюваної вібратором електромагнітної хвилі, λ – довжина хвилі.

$$\dot{E}_r = \frac{I_0}{j \cdot 2\pi \cdot \varpi \cdot \varepsilon_a \cdot \sin kl} \cdot \left[\int_0^l \frac{1+jkr_1}{r_1^4} \sin k(l-z) \cdot e^{-jkr_1} \cdot \sqrt{r_1^2 - r^2 \sin^2 \theta} dz + \int_{-l}^0 \frac{1+jkr_2}{r_2^4} \sin k(l+z) \cdot e^{-jkr_2} \cdot \sqrt{r_2^2 - r^2 \sin^2 \theta} dz \right], \quad (2)$$

$$\dot{H}_\phi = \frac{I_0 \cdot r \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot \sin kl} \cdot \left[\int_0^l \frac{1+jkr_1}{r_1^3} \sin k(l-z) \cdot r^{jk_1} dz + \int_{-l}^0 \frac{1+jkr_2}{r_2^3} \sin k(l-z) \cdot e^{-jkr_2} dz \right]. \quad (3)$$

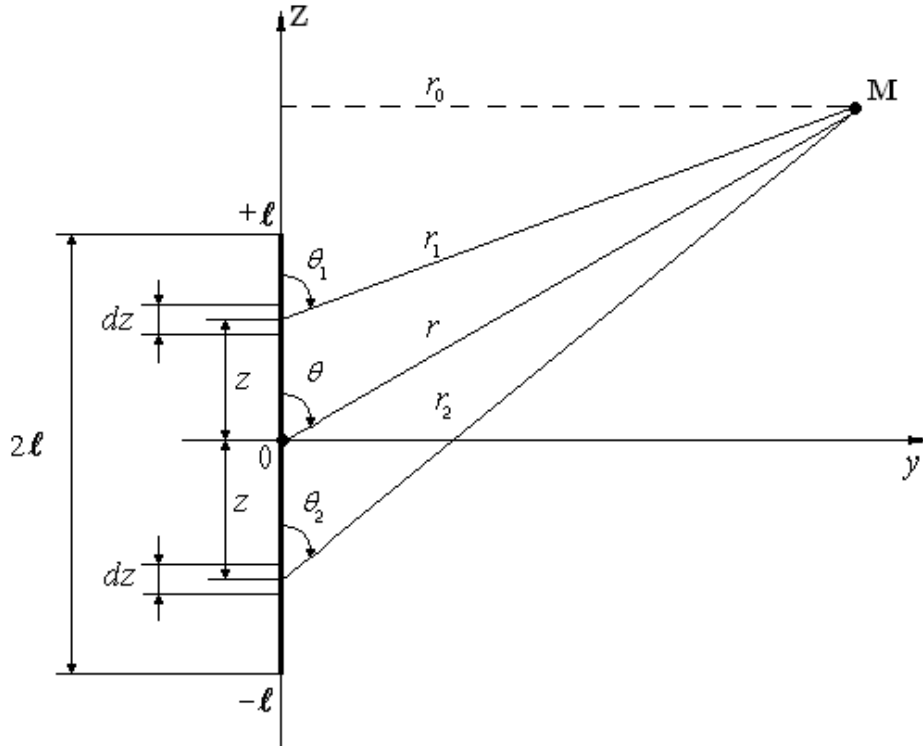


Рис. 1. Ілюстрація до спрямованості вібратора в ближній зоні

Відомо [1], що при роботі напівхвильового та хвильового симетричного вібратора у ближній зоні утворюються два потоки потужності електричного поля. Один з них визначається вектором густини цього потоку, спрямованого радіально від вібратора ($\bar{\Pi}_r$) і знаходиться за формулою:

$$\bar{\Pi}_r = [\bar{E}_\theta \bar{H}_\phi], \quad (4)$$

де \bar{E}_θ і \bar{H}_ϕ – ортогональні електричні та магнітні, відповідно, складові поля спрямованого радіально від симетричного вібратора.

Другий потік потужності електричного поля спрямований по дотичній до меридіанної координатної лінії сферичної системи координат ($\bar{\Pi}_\theta$) і знаходиться за формулою:

$$\bar{\Pi}_\theta = [\bar{E}_r \bar{H}_\phi], \quad (5)$$

де \bar{E}_r і \bar{H}_ϕ – ортогональні електричні та магнітні, відповідно, складові поля спрямовані по дотичній меридіанної координатної лінії сферичної системи координат від симетричного вібратора.

У дальній зоні меридіальним потоком потужності у порівнянні з радіальним можна знехтувати через дуже мале значення складової поля $E_r \ll E_\theta$.

Для визначення величини радіального потоку потужності використаємо вираз (5), а значення складової H_ϕ отримаємо переписавши вираз (3) для умов дальньої зони:

$$\dot{H}_\phi = j \frac{l_0 \sin \theta \cdot k \cdot e^{-jkr}}{4\pi \cdot \sin kl \cdot r} \left[\int_0^l \sin k(l-z) dz + \int_{-l}^0 \sin k(l+z) dz \right] \quad (6)$$

Оцінювання величини радіального потоку потужності будемо за значенням потоку потужності за період гармонічної електромагнітної хвилі:

$$\bar{P}_{cep} = \bar{r}_0 \frac{1}{2} R_e \left[\dot{E}_\theta \bar{H}^* \right], \quad (7)$$

де

$$\bar{H}_\phi^* = \bar{\phi}_0 j \frac{I_0 \cdot k \cdot \sin \theta \cdot e^{jkr}}{4\pi \sin kl \cdot r} \cdot \left[\int_0^l \sin k(l-z) dz + \int_{-l}^0 \sin k(l+z) dz \right]. \quad (8)$$

Таким чином

$$\bar{P}_{cep} = \bar{r}_0 \frac{1}{2} R_e \left[\dot{E}_\theta \cdot \bar{H}_\phi^* \right]. \quad (9)$$

або

$$P_{cep} = \frac{1}{2} R_e \left\{ \dot{E}_\theta \bar{H}_\phi^* \right\}. \quad (10)$$

Після підстановки значень \dot{E}_θ з виразу (1) та \bar{H}_ϕ^* з виразу (8) у вираз (10), отримаємо:

$$P_{cep} = \frac{I_0^2 \cdot k^3 \cdot \sin^2 \theta \cdot e^{jkr}}{32\pi^2 \sin^2 kl \cdot r^2 \cdot \xi_a} \left[\int_0^l \sin k(l-z) dz + \int_{-l}^0 \sin k(l+z) dz \right]^2. \quad (11)$$

Застосувавши програму MMANA-GAL здійснимо дослідження розподілу радіального потоку потужності для симетричного вібратора. Для цього перепишемо вираз (11) з урахуванням, що $k = 2\pi / \lambda$, та $k = \omega \sqrt{\mu_a \cdot \xi_a}$:

$$P_{cep} = \frac{\pi \cdot I_0^2 \cdot \sin^2 \theta}{4r^2 \cdot \lambda^3 \cdot \xi_a} \left[\int_0^{\lambda/4} \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{4} - z \right) dz + \int_{-\lambda/4}^0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\lambda}{4} + z \right) dz \right]^2. \quad (12)$$

Для прикладу, взявши $\lambda=1$ м, $I_0=1$ А, осатаній вираз матиме вигляд:

$$P_{cep} = \frac{\pi}{4r^2 \cdot \xi_a} \left[\int_0^{1/4} \sin 2\pi \left(\frac{1}{4} - z \right) dz + \int_{-1/4}^0 \sin 2\pi \left(\frac{1}{4} + z \right) dz \right]^2 \cdot \sin^2 \theta. \quad (13)$$

Вважаючи, що сухе повітря має значення $\xi \approx 1$ (оскільки $\xi = \xi_a$), то вираз (12) буде мати вид:

$$P_{cep} = \frac{9\pi^2 \cdot 10^{-9}}{r^2} \left[\int_0^{1/4} \sin 2\pi \left(\frac{1}{4} - z \right) dz + \int_{-1/4}^0 \sin 2\pi \left(\frac{1}{4} + z \right) dz \right]^2 \cdot \sin^2 \theta. \quad (14)$$

Програмний пакет MMANA-GAL [5] дозволяє дослідити діаграму спрямованості різних типів антен в залежності від довжин хвиль та геометричних розмірів антен у 3D зображенні.

Для визначення форми діаграми спрямованості напівхвильового симетричного вібратора з довжинами хвиль $0,5\lambda$, λ , 100λ побудуємо їх в середовищі MMANA-GAL. Результати імітаційного моделювання напівхвильового симетричного вібратора у відповідності до синтезованої математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні наведено на рисунках 2–4.

Результати імітаційного моделювання напівхвильового симетричного вібратора у відповідності до синтезованої математичної моделі значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні у середовищі MMANA-GAL показують, що зі збільшенням довжини хвилі напрямок електричного і магнітного випромінювання змінюється на 90° . Це означає, що більш небезпечне електричне випромінювання при довжині хвилі 100λ буде спрямоване не у голову, вгору і вниз від голови. Таким чином електрична складова електромагнітного поля буде в меншій мірі впливати на головний мозок людини. Але при цьому збільшиться вплив магнітної складової, яка вважається більш безпечною для організму людини.

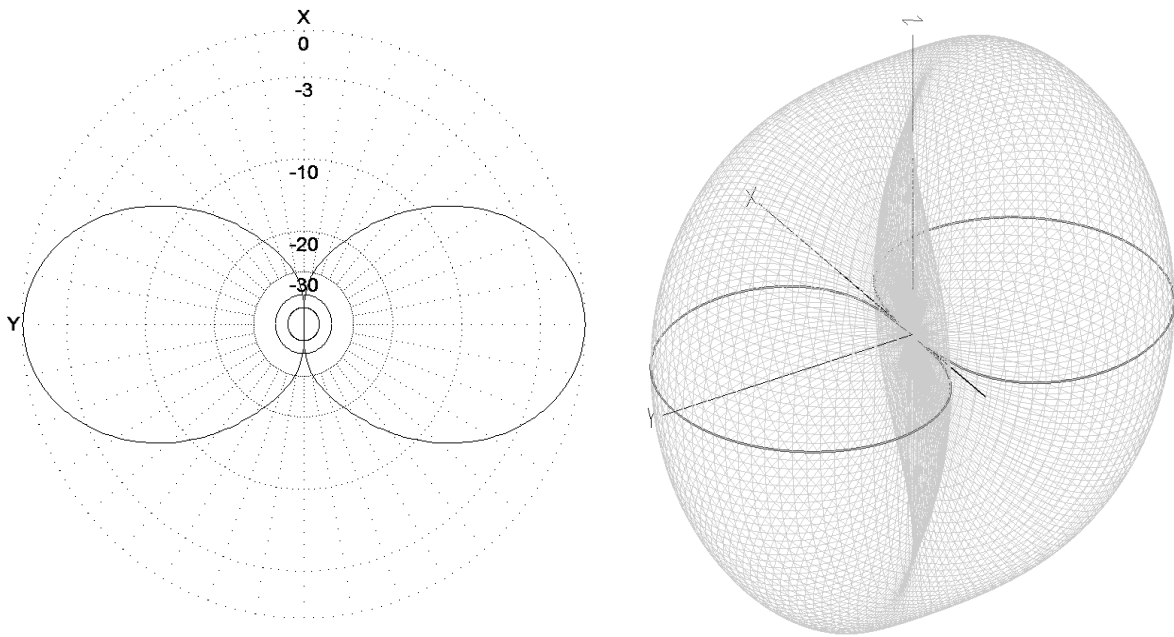


Рис. 2. Діаграма спрямованості напівхвильового симетричного вібратора для довжини хвилі $0,5\lambda$

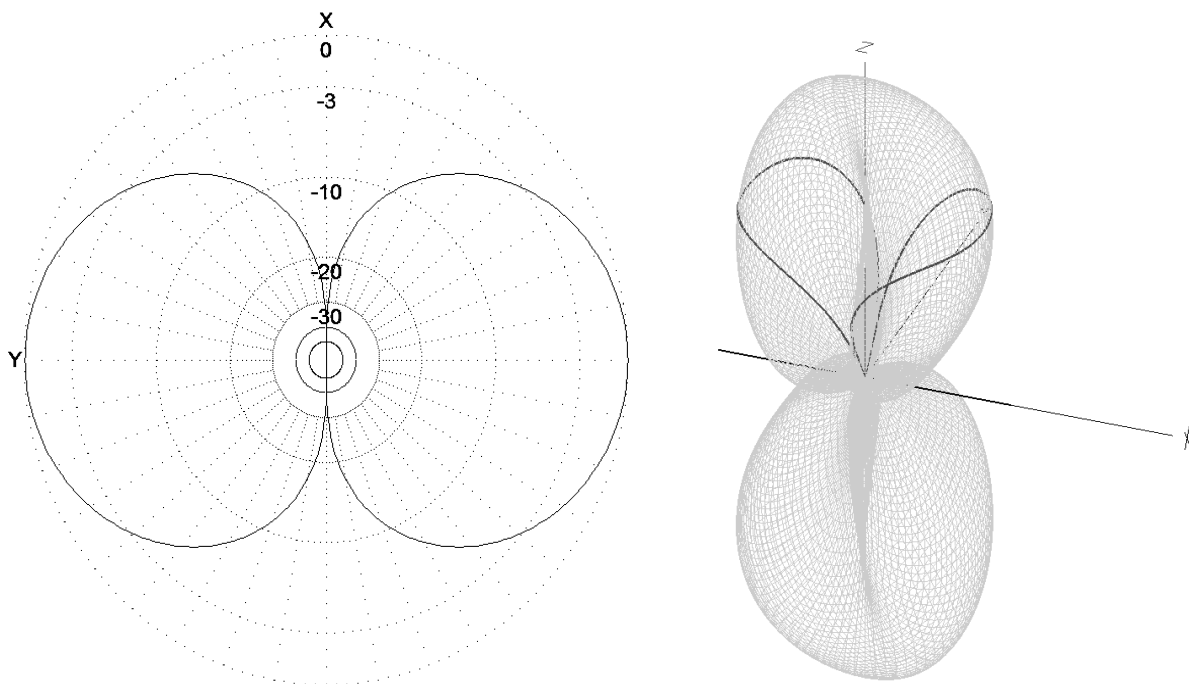


Рис. 3. Діаграма спрямованості напівхвильового симетричного вібратора для довжини хвилі λ

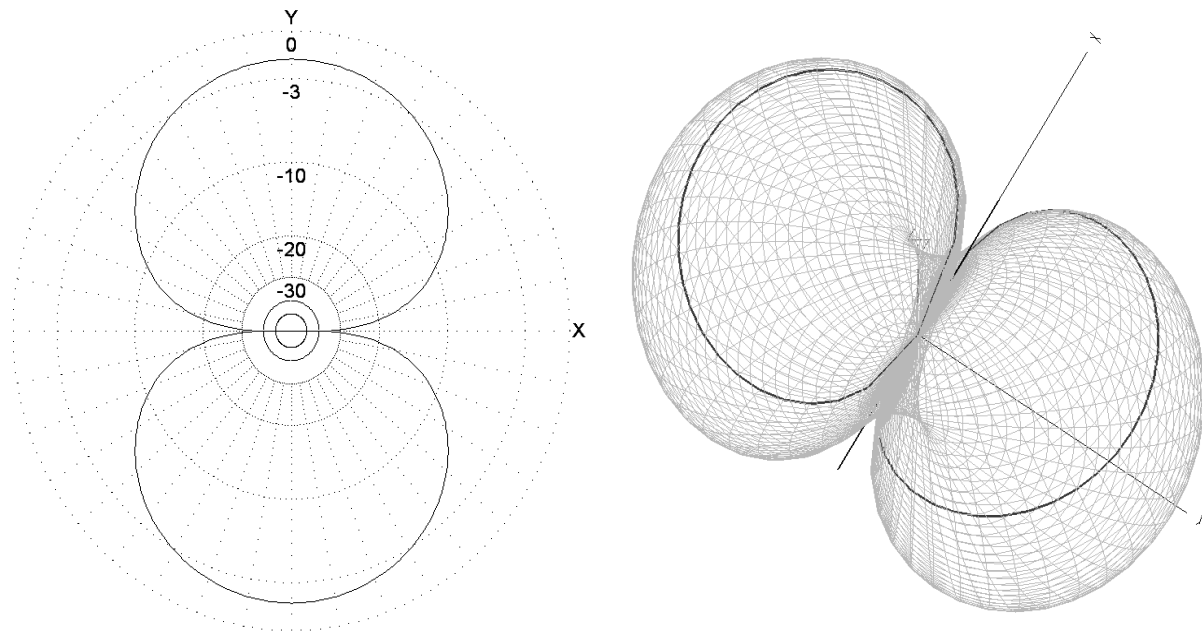


Рис. 4. Діаграма спрямованості напівхвильового симетричного вібратора для довжини хвилі 100λ .

Висновки

Отримана математична модель значення густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні дозволяє дослідити властивості електромагнітного поля у ближній зоні. Діаграми спрямованості показують, що зі збільшенням відстані до телефону вплив електромагнітного випромінювання зменшуються. Імітаційне моделювання в середовищі MMANA-GAL також показує, що зі зростанням довжин хвилі вплив електричної складової на організм людини буде менший оскільки вона буде направлена не в голову людини. Тому така математична модель є досить перспективною для подальших досліджень антен мобільних телефонів і в перспективі зменшення впливу електромагнітного випромінювання на мозок людини.

Аналіз впливу різних параметрів на значення густини потоку потужності показав, що відстань до випромінювача та довжина хвилі мають найбільший вплив на значення та форму діаграми спрямованості. Також було проведено дослідження моделі розподілу радіального потоку густини потужності, яке показало, що цей потік має максимальне значення в напрямку перпендикулярному до вібраторів та зменшується зі збільшенням відстані від них. Математична модель густини потоку потужності хвильового симетричного вібратора у ближній зоні є важливою для розуміння характеристик випромінювача електромагнітного поля. Вона дозволяє визначити оптимальні параметри для досягнення необхідної густини потоку потужності та забезпечує підґрунтя для подальшого розвитку цієї технології із забезпеченням мінімального впливу на здоров'я людини.

Література

1. Крушевський Ю. В. Дослідження структури поля і спрямованості електричного елементарного випромінювача в ближній і проміжній зонах / Ю. В. Крушевський, Ю. І. Кравцов, В. В. Чернига // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 2. – 9 с. – URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4335/61.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
2. Крушевський Ю. В. Структура електромагнітних потоків елементарного електричного випромінювача в ближній і проміжній зонах / Ю. В. Крушевський, О. М. Салямон // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 3. – 9 с. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/52160507.pdf>
3. Крушевський Ю. В. Вплив електромагнітного випромінювання пристроїв стільникового зв'язку на людину / Ю. В. Крушевський, Ю. І. Кравцов, Я. О. Бородай // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 1. – 9 с. – URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/48/48>
4. Bulashenko A., Piltyay S., Polishchuk A., Bulashenko O. New Traffic Model of M2M Technology in 5G Wireless Sensor Networks. 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), 25-27 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 125-131. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
5. PRO version MMANA-GAL. Professional antenna software. URL: <http://gal-ana.de/promm/index.htm>.
6. Семенов А. О. Дослідження густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах / А. О. Семенов, О. О. Семенова, Б. О. Пінаєв, О. В. Білик, О. О. Шпильовий // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Технічні науки. – 2022. – № 3 (72). – С. 13–19. – URL: http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2022/3_2022/3_2022.pdf#page=19

7. Protsenko M.B. Interaction of model human head with the antenna of the mobile terminal / M. B. Protsenko, L.I. Stepanova, O.O. Perley, V.G. Ishchenko // Proc. of X-th International Conf. «Antenna Theory and Techniques (ICATT)», 21–24 Apr. 2015. – Kharkiv, 2015. – P. 261–263.
8. Степанова Л.І. Оцінка взаємодії електромагнітного поля антени мобільного терміналу з головою користувача / Л.І. Степанова // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – Вінниця, 2016. – № 6. – 8 с. – URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/issue/archive>.
9. Бойко Ю. М. Моделювання характеристик ширококугової антенної системи для пеленгації БПЛА / Ю. М. Бойко, О. І. Полікарівських, В. П. Ткачук, В. М. Авдеев, О. С. Свістунов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2022. – № 3 (309). – С. 158–167.
10. Karpova L. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing / L. Karpova, J. Boiko, O. Eromenko // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2019. – P. 1–6.
11. Карпова Л. В. Моделювання НВЧ пристроїв і антен в задачах їх аналізу, синтезу та оптимізації / Л. В. Карпова, О. О. Бойко, І. І. Чесановський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький, 2019. – № 5 (277). – С. 180–188.

References

1. Krushevskiy Yu. V. Doslidzhennia struktury polia i spriamovanosti elektrychno elementarnoho vyprominiuvacha v blyzhnii i promizhnii zonakh / Yu. V. Krushevskiy, Yu. I. Kravtsov, V. V. Chernyha // Naukovi pratsi VNTU. – 2008. – № 2. – 9 s. – URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4335/61.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
2. Krushevskiy Yu. V. Struktura elektromagnitnykh potokiv elementarnoho elektrychno vyprominiuvacha v blyzhnii i promizhnii zonakh / Yu. V. Krushevskiy, O. M. Saliamon // Naukovi pratsi VNTU. – 2008. – № 3. – 9 s. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/52160507.pdf>
3. Krushevskiy Yu. V. Vplyv elektromagnitnoho vyprominiuvannya prystroiv stilykovo zviazku na liudynu / Yu. V. Krushevskiy, Yu. I. Kravtsov, Ya. O. Borodai // Naukovi pratsi VNTU. – 2008. – № 1. – 9 s. – URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/48/48>
4. Bulashenko A., Piltyay S., Polishchuk A., Bulashenko O. New Traffic Model of M2M Technology in 5G Wireless Sensor Networks. 2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), 25–27 Nov. 2020, Kyiv, Ukraine, pp. 125–131. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
5. PRO version MMANA-GAL. Professional antenna software. URL: <http://gal-ana.de/promm/index.htm>.
6. Semenov A. O. Doslidzhennia hustyny potoku elektromagnitnoho vyprominiuvannya vid elementarnoho elektrychno vyprominiuvacha u blyzhnii ta promizhnykh zonakh / A. O. Semenov, O. O. Semenova, B. O. Pinaiev, O. V. Bilyk, O. O. Shpylovyi // Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Tekhnichni nauky. – 2022. – № 3 (72). – S. 13–19. – URL: http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2022/3_2022/3_2022.pdf#page=19
7. Protsenko M.B. Interaction of model human head with the antenna of the mobile terminal / M. B. Protsenko, L.I. Stepanova, O.O. Perley, V.G. Ishchenko // Proc. of X-th International Conf. «Antenna Theory and Techniques (ICATT)», 21–24 Apr. 2015. – Kharkiv, 2015. – P. 261–263.
8. Stepanova L.I. Otsinka vzaïemodii elektromagnitnoho polia anteny mobilnoho terminalu z holovoïu korystuvacha / L.I. Stepanova // Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. – Vinnytsia, 2016. – № 6. – 8 s. – URL: <http://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/issue/archive>.
9. Boiko Yu. M. Modeliuvannya kharakterystyk shyrokosmuhovoi antennoi systemy dlia pelenhatsii BPLA / Yu. M. Boiko, O. I. Polikarovskiykh, V. P. Tkachuk, V. M. Avdieiev, O. S. Svistunov // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2022. – № 3 (309). – S. 158–167.
10. Karpova L. Synthesis of ambiguity functions for complex radar signal processing / L. Karpova, J. Boiko, O. Eromenko // 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2019. – P. 1–6.
11. Karpova L. V. Modeliuvannya NVCh prystroiv i anten v zadachakh yikh analizu, syntezu ta optymizatsii / L. V. Karpova, O. O. Boiko, I. I. Chesanovskiy // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – Khmelnytskyi, 2019. – № 5 (277). – S. 180–188.