



DOI 10.28925/2663-4023.2024.24.312320

УДК 004.056.5

Крючкова Лариса Петрівна

д.т.н., професор, професор кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID ID: 0000-0002-8509-6659
l.kriuchkova@kubg.edu.ua

Дяків Віталій Юрійович

студент
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, Київ, Україна
ORCID ID 0009-0007-6444-8874
vydiakiv.fitu20@kubg.edu.ua

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ПОЛЯ РАМКОВИХ АНТЕН

Анотація. Антена є невід’ємною складовою будь-якого радіотехнічного пристрою, призначеного для передачі або прийому інформації за допомогою радіохвиль через навколишній простір. Дослідження енергетичних, фазових та поляризаційних характеристик електромагнітних полів поблизу випромінюючих систем мають велике значення не тільки з наукової точки зору, а й для вирішення багатьох технічних задач. Актуальним є завдання розрахункового прогнозування та інструментального контролю рівнів електромагнітних полів поблизу антен для цілей забезпечення електромагнітної безпеки. Важливе значення має проблема аналізу характеристик електромагнітної сумісності близько розташованих антен, зокрема, розрахунок захисних екранів, інші теоретичні і практичні завдання. При вирішенні проблем електромагнітної сумісності особливий інтерес представляє структура поля в ближній зоні антени, її характеристика спрямованості, рівні бічного випромінювання, а також визначення значень електричного і магнітного полів. Ближні поля електромагнітних випромінювачів мають складну просторову структуру, тому теоретичний аналіз хвильових процесів поблизу подібних випромінювачів можливий тільки шляхом комп’ютерного моделювання випромінювачів із заданими розмірами при заданій довжині хвилі. Широке застосування рамкових провідних антен обумовлює необхідність розробки нових підходів і методик для дослідження їх просторових характеристик. Мета публікації — програмна реалізація розрахунку просторових значень вектора магнітної індукції рамкових антен. Розглядається аналітичний метод дослідження просторових характеристик ближнього поля рамкових антен, який може використовуватися при синтезі систем, в структурі яких застосовуються рамкові антени, та проведенні наукових досліджень у сфері інформаційних технологій, технічного захисту інформації, при вирішенні проблем електромагнітної сумісності технічних систем. Використання програмного забезпечення для обчислення та візуалізації магнітного поля дозволяє детально аналізувати просторовий розподіл магнітного поля рамкових антен.

Ключові слова: магнітні рамкові антени; ближнє поле; аналітичний метод дослідження; вектор магнітної індукції; просторова характеристика; 3D-візуалізація.

ВСТУП

Рамкові антени є широко поширеним засобом створення і приймання електромагнітних хвиль. Перші згадки про магнітні рамкові антени можна зустріти в роботах 1888 року відомого вченого Генріха Герца, де він доводив той факт, що електрично мала рамка з периметром, набагато меншим довжини хвилі, має діаграму спрямованості у формі цифри «вісім». Деякий час рамкова антена залишалася поза



увагою аж до XX століття. Лише у 1906 році американський учений Шеллер використав магнітну рамку для визначення напрямку приходу електромагнітної хвилі. Того ж року в американських військових почали з'являтися антенні конструкції з використанням магнітних рамок для пеленгаційних систем.

Революцію в розробці пеленгаційних систем зробили два італійці Белліні та Този у 1907 році. Створену ними радіогонометричну систему почали широко використовувати у морському флоті та авіації. Успіхи розвитку радіотехніки та лампової техніки призвели до того, що до кінця першої світової війни багато країн мали досить досконалі системи для радіонавігації морських кораблів і літаків та для пеленгації джерел радіовипромінювань.

Друга світова війна також дала величезний поштовх розвитку приймальних рамкових антен. В Англії були створені феритові магнітні антени. Їхня відмінність — наявність сердечника з високою магнітною проникністю, який дозволяв зменшити розміри магнітної рамки.

З тих пір рамкові антени не тільки не втратили своєї актуальності, а й продовжують розширювати сферу застосування, стаючи невід'ємною частиною нових радіотехнічних пристроїв [1] – [3]. Пильний інтерес дослідників і розробників до рамкових антен пов'язаний з відомими перевагами цього класу антен: поліпшеними малогабаритними характеристиками і можливістю застосування сучасних технологій при серійному виробництві як випромінювачів, так і пристроїв збудження, узгодження та управління характеристиками випромінювання.

Рамкові антени використовують в системах мобільного зв'язку, технічних пристроях захисту інформації, охоронної сигналізації тощо. Дослідженням даного класу антен присвячена велика кількість наукових робіт. Однак розрахунки характеристик, як правило, ґрунтувалися на різних наближеннях і припущеннях.

При проектуванні антен, в якості одного з шляхів досягнення цієї мети розробляють строгу математичну модель випромінювання антени у вільному просторі, яка дозволяє в рамках обраної фізичної моделі оцінити похибку розрахунків, підвищити точність інженерних розрахунків і скоротити час, що витрачається на їх проведення. Рішення даної задачі дозволяє створювати антени з поліпшеними характеристиками і в той же час сприяє скороченню обсягу робіт, пов'язаних з макетуванням і експериментальними дослідженнями, що є технічно дуже складним завданням та вимагає забезпечення умов випромінювання, близьких до реальних.

При вирішенні проблем електромагнітної сумісності особливий інтерес представляє структура поля в ближній зоні антени, її характеристика спрямованості, рівні бічного випромінювання, а також визначення значень електричного і магнітного полів.

Дослідження енергетичних, фазових та поляризаційних характеристик електромагнітних полів поблизу випромінюючих систем мають велике значення не тільки з наукової точки зору, але й для вирішення багатьох технічних задач. Актуальним є завдання розрахункового прогнозування та інструментального контролю рівнів електромагнітних полів поблизу антен для цілей забезпечення електромагнітної безпеки. Важливе значення має проблема аналізу характеристик електромагнітної сумісності близько розташованих антен, зокрема, розрахунок захисних екранів, інші теоретичні і практичні завдання.

Ближні поля електромагнітних випромінювачів мають складну просторову структуру [4], тому теоретичний аналіз хвильових процесів поблизу подібних випромінювачів можливий тільки шляхом комп'ютерного моделювання випромінювачів із заданими розмірами при заданій довжині хвилі.

Широке застосування рамкових проводових антен обумовлює необхідність розробки нових підходів і методик для дослідження їх просторових характеристик.

Мета публікації — програмна реалізація розрахунку просторових значень вектора магнітної індукції рамкових антен.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Аналітичний розрахунок просторових значень вектора електромагнітної індукції рамкової антени

Магнітне поле струму індуктивного джерела може бути обчислено як векторна сума (суперпозиція) полів, що створюються окремими елементарними ділянками струмів [5]:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3},$$

де $d\vec{l}$ — вектор елемента провідника довжиною dl , проведений у напрямку протікання струму (Рис.1);

\vec{r} — радіус-вектор, проведений з цього елемента провідника в задану точку простору;

$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} (\frac{Гн}{м})$ — магнітна постійна.

Враховуючи, що розміри джерела поля значно менше довжини хвиль (система квазістаціонарна), фазовим запізненням можна знехтувати.

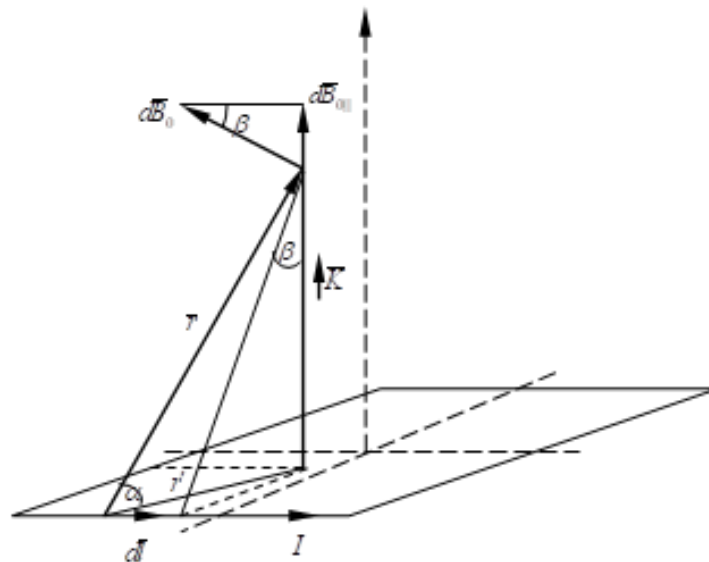


Рис. 1. Розрахункова схема ближнього поля рамкової антени

Модуль вектора магнітної індукції (рис. 1)

$$\vec{B}_0 = \frac{\mu_0 I_1 W_1}{4\pi} \oint_l \frac{\sin \alpha \sin \beta}{r^2} dl$$

де I_1 — величина струму в рамці; W_1 — число витків рамки;
 α — кут між векторами $d\vec{l}$ і \vec{r} ; β — кут між векторами $d\vec{B}_0$ і $d\vec{B}_{0||}$.



Програмна реалізація розрахунку просторових значень вектора магнітної індукції рамкових антен

Нами визначено просторовий розподіл значень вектора магнітної індукції рамкової антени розміром 0,7х0,6 м (рис. 2).

Нами визначено просторовий розподіл значень вектора магнітної індукції прямокутних рамкових антен розміром 0.5м×0.5м (рис. 3) та 0.4м×0.6м (рис. 4). При розробці використовуються наступні бібліотеки:

- *Math* — для математичних розрахунків.
- *Numpy* — для створення послідовності рівномірного розподілених значень, за якими будуватиметься графік.
- *Plotly* — для побудови графіка та створення файлу з графіком.

Користувачеві пропонується ввести розміри *size_x* та *_y* рамки, відстань *z* до площини візуалізації, силу струму *I*.

Вигляд при запуску:

Запитуються основні характеристики

```
Введіть розмір x рамки: 0.5
Введіть розмір y рамки: 0.5
Введіть відстань до площини візуалізації: 0.1
Введіть силу струму: 1
```

При введенні невірної значення параметра користувачу пропонується ввести значення знову.

```
Введіть розмір x рамки: -5
Значення має бути більше або дорівнювати 0
Введіть розмір x рамки: 0.5
Введіть розмір y рамки: s
Введіть дійсне число
Введіть розмір y рамки: 0.5
Введіть відстань до площини візуалізації: -4
Значення має бути більше або дорівнювати 0
Введіть відстань до площини візуалізації: 0.1
Введіть силу струму: 1
```

Обчислення проводить функція [6]–[8] *calculate_magnetic_field* (*x*, *y*), яка обчислює значення вектора магнітної індукції у кожній точці простору (*x*, *y*). При цьому враховується відстань до рамки, розміри рамки, сила струму, кути повороту та нахилу, а також інші параметри. За допомогою бібліотеки *numpy* [9] генерується сітка у просторі для відображення значень вектора магнітної індукції. Точки на меші розміщуються залежно від розмірів рамки та кроку дискретизації. Для кожної точки на сітці викликається функція *calculate_magnetic_field* (*x*, *y*), для обчислення значення вектора магнітної індукції.

За допомогою бібліотеки *plotly.graph_objs* створюється 3D-візуалізація просторового розподілу вектора магнітної індукції рамкової антени. Після цього за допомогою бібліотеки *plotly* 3D-візуалізація зберігається у форматі HTML і автоматично відкривається для перегляду.

Лістинг програми розрахунку та побудови просторового розподілу вектора магнітної індукції рамкової антени подано на рис. 2.

```
import math
import numpy as np
import plotly.graph_objs as go
import plotly.io as pio

def input_float(prompt, min_value=None, max_value=None):
    while True:
        try:
            value = float(input(prompt))
            if min_value is not None and value < min_value:
                print(f"Значення має бути більше або дорівнювати {min_value}")
            elif max_value is not None and value > max_value:
                print(f"Значення має бути менше або дорівнювати {max_value}")
            else:
                return value
        except ValueError:
            print("Введіть дійсне число")

# Вхідні параметри
size_x = input_float("Введіть розмір x рамки: ", 0)
size_y = input_float("Введіть розмір y рамки: ", 0)
z = input_float("Введіть відстань до площини візуалізації: ", 0)
q = input_float("Введіть силу струму: ")

ks1 = math.pi / 3 # Кут повороту рамки
fi = math.pi / 15 # Кут нахилу площини
u = 0.001 # Напруга
step = 21 # Крок дискретизації
# Константи
kx = 1e+07
mu_0 = 4 * math.pi * 1e-7 # Магнітна стала

# Функція для обчислення магнітної індукції в точці (x, y)
def calculate_magnetic_field(x, y):
    r1 = math.sqrt(z**2 + (size_y - abs(y))**2)
    cos1 = (size_x - x) / math.sqrt(r1**2 + (size_x - x)**2)
    cos2 = -(size_x + x) / math.sqrt(r1**2 + (size_x + x)**2)
    cos3 = (size_y - abs(y)) / r1
    b1 = (q * u * (cos1 - cos2) * cos3 / r1) * 1e-07

    r2 = math.sqrt(z**2 + (size_y + abs(y))**2)
    cos1 = (size_x - x) / math.sqrt(r2**2 + (size_x - x)**2)
    cos2 = -(size_x + x) / math.sqrt(r2**2 + (size_x + x)**2)
    cos3 = (size_y + abs(y)) / r2
    b2 = (q * u * (cos1 - cos2) * cos3 / r2) * 1e-07

    r3 = math.sqrt(z**2 + (size_x - x)**2)
    cos1 = (size_y + abs(y)) / math.sqrt(r3**2 + (size_y + abs(y))**2)
    cos2 = -(size_y - abs(y)) / math.sqrt(r3**2 + (size_y - abs(y))**2)
    cos3 = (size_x - x) / r3
    b3 = (q * u * (cos1 - cos2) * cos3 / r3) * 1e-07

    r4 = math.sqrt(z**2 + (size_x + x)**2)
    cos1 = (size_y - abs(y)) / math.sqrt(r4**2 + (size_y - abs(y))**2)
    cos2 = -(size_y + abs(y)) / math.sqrt(r4**2 + (size_y + abs(y))**2)
    cos3 = (size_x + x) / r4
    b4 = (q * u * (cos1 - cos2) * cos3 / r4) * 1e-07

    b = b1 + b2 + b3 + b4
    return b * math.sin(math.pi / 2 - fi) * kx

# Створення сітки для візуалізації
x = np.linspace(-size_x / 2, size_x / 2, int(size_x * step))
y = np.linspace(-size_y / 2, size_y / 2, int(size_y * step))
X, Y = np.meshgrid(x, y)

# Обчислення магнітної індукції для кожної точки
Z = np.vectorize(calculate_magnetic_field)(X, Y)

# Візуалізація за допомогою Plotly
fig = go.Figure(data=[go.Surface(x=X, y=Y, z=Z, colorscale='Viridis')])
fig.update_layout(title='Магнітне поле рамкової антени', scene=dict(xaxis_title='X',
yaxis_title='Y', zaxis_title='B'), width=800, height=600)

# Налаштування офлайн режиму для Plotly
fig.write_html("antenna field.html", auto_open=True)
```

Рис. 2. Лістинг програми розрахунку та побудови просторового розподілу вектора магнітної індукції рамкової антени

Фрагменти просторового розподілу вектора магнітної індукції рамкової антени розміром $0.5\text{м} \times 0.5\text{м}$ та $0.4\text{м} \times 0.6\text{м}$ подано відповідно на рис. 3 та рис. 4.

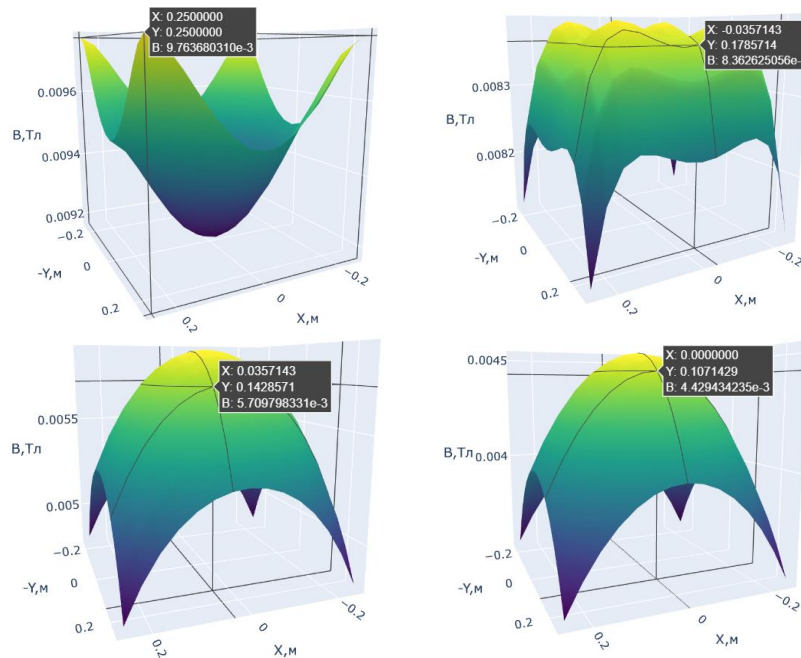


Рис. 3. Фрагменти просторового розподілу вектора магнітної індукції рамкової антени розміром $0.5\text{м} \times 0.5\text{м}$

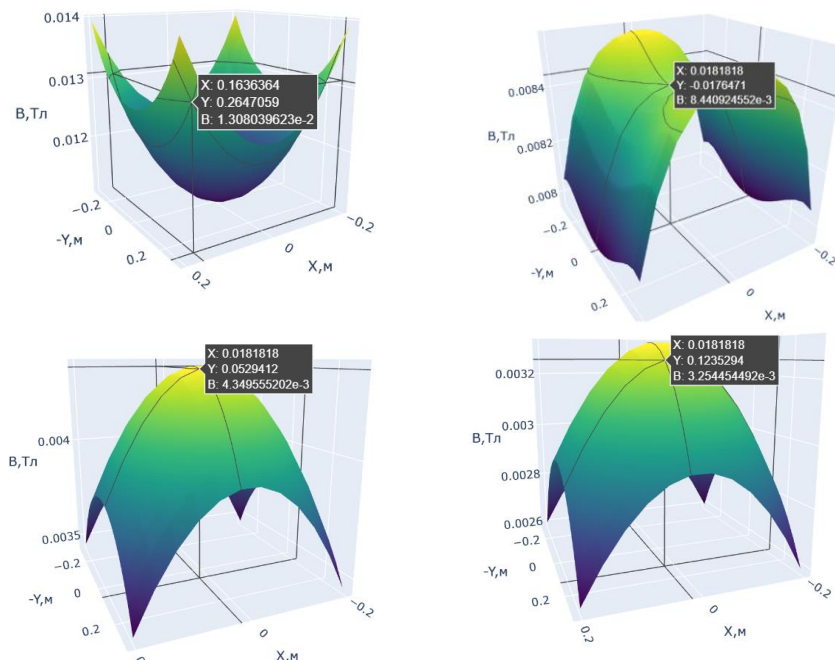


Рис. 4 Фрагменти просторового розподілу вектора магнітної індукції рамкової антени розміром $0.4\text{м} \times 0.6\text{м}$



ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянутий метод розрахунку і візуалізації просторових значень вектора магнітної індукції рамкових антен може використовуватися при синтезі систем, в структурі яких застосовуються рамкові антени, та проведенні наукових досліджень у сфері інформаційних технологій, технічного захисту інформації, при вирішенні проблем електромагнітної сумісності технічних систем і електромагнітної безпеки.

Перспективним напрямком подальших досліджень є удосконалення аналітичних та експериментальних методів визначення просторових характеристик проводових антен складної конфігурації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hulak, H., Kriuchkova, L., Skladannyi, P., & Opirskyy, I. (2021) Formation of requirements for the electronic record-book in guaranteed information systems of distance learning. *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2923, 137–142.
2. Kriuchkova, L., Skladannyi, P., & Vorokhob, M. (2023). PRE-PROJECT SOLUTIONS FOR BUILDING AN AUTHORIZATION SYSTEM BASED ON THE ZERO TRUST CONCEPT. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 3(19), 226–242. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.13.226242>
3. Perevertailo, V. V., & Kuzmichev, A. I. (2018). A new aspect of the development of antenna structures: from frame antennas to ring resonators and electromagnetic metamaterials. *Proceedings of the XII Scientific and Practical Conference “Perspective directions of modern electronics”*, 20–26.
4. Shokalo, V. M., Usin, V. A., Gretsikh, D. V., Khoroshko, V. O., & Kryuchkova, L. P. (2012). *Fields and waves in systems of technical protection of information: a textbook for students of higher educational institutions. Ch.1*. Collegium.
5. Kryuchkova, L. P. (2018). Investigation of spatial characteristics of the near-field of frame antennas. *Modern Information Protection*, 1, 17–22.
6. Phillips, D. (2010). *Python 3. Object-oriented programming: a book for programmers with tips on how to use OOP in code*. Packt Publishing.
7. Slatkin, B. (2019). *Effective Python: 90 Specific Ways to Write Better Python: A book with tips for writing optimized code*. Pearson Education.
8. Ramalho, L. (2015). *Fluent Python: a book for developers with a detailed description and examples of the programming language's capabilities*. O'Reilly Media.
9. VanderPlas, J. (2016). *Python Data Science Handbook*. O'Reilly Media.

**Larysa Kriuchkova**

Doctor of sciences, professor, professor of Volodymyr Buriachok
Department of Information and Cybersecurity

Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-8509-6659

l.kriuchkova@kubg.edu.ua

Vitalii Diakiv

student

Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0009-0007-6444-8874

vydiakiv.fitu20@kubg.edu.ua

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE CALCULATION OF THE FRAME ANTENNAS FIELD SPATIAL DISTRIBUTION

Abstract. An antenna is an integral part of any radio device designed to transmit or receive information using radio waves through the surrounding space. Investigations of the energy, phase and polarization characteristics of electromagnetic fields near industrial systems may be of great importance not only from a scientific point of view, but also for a wide variety of technical problems. Relevant is the task of structural prediction and instrumental control of the level of electromagnetic fields near the antennas for the purpose of ensuring electromagnetic safety. The problem of analyzing the characteristics of electromagnetic compatibility of closely located antennas, in particular, the calculation of protective screens, other theoretical and practical tasks, is of great importance. When solving problems of electromagnetic compatibility, the structure of the field in the near zone of the antenna, its directional characteristics, levels of lateral radiation, as well as determination of values of electric and magnetic fields are of particular interest. The near fields of electromagnetic emitters have a complex spatial structure, therefore the theoretical analysis of wave processes near such emitters is possible only through computer modeling of emitters with specified dimensions at a specified wavelength. The widespread use of frame wire antennas necessitates the development of new approaches and methods for researching their spatial characteristics. The purpose of the publication is the software implementation of the calculation of the spatial values of the magnetic induction vector of frame antennas. An analytical method of studying the spatial characteristics of the near field of frame antennas is considered, which can be used in the synthesis of systems in which frame antennas are used, and in conducting scientific research in the field of information technology, technical information protection, when solving problems of electromagnetic compatibility of technical systems. The use of software for calculating and visualizing the magnetic field allows you to analyze in detail the spatial distribution of the magnetic field of frame antennas.

Keywords: : magnetic frame antennas; near field; analytical research method; magnetic induction vector; spatial characteristics; 3D visualization.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Hulak, H., Kriuchkova, L., Skladannyi, P., & Opirskyy, I. (2021) Formation of requirements for the electronic record-book in guaranteed information systems of distance learning. *CEUR Workshop Proceedings*, Vol. 2923, 137–142.
2. Kriuchkova, L., Skladannyi, P., & Vorokhob, M. (2023). PRE-PROJECT SOLUTIONS FOR BUILDING AN AUTHORIZATION SYSTEM BASED ON THE ZERO TRUST CONCEPT. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, 3(19), 226–242. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.13.226242>
3. Perevertailo, V. V., & Kuzmichev, A. I. (2018). A new aspect of the development of antenna structures: from frame antennas to ring resonators and electromagnetic metamaterials. *Proceedings of the XII Scientific and Practical Conference “Perspective directions of modern electronics”*, 20–26.



4. Shokalo, V. M., Usin, V. A., Gretsikh, D. V., Khoroshko, V. O., & Kryuchkova, L. P. (2012). *Fields and waves in systems of technical protection of information: a textbook for students of higher educational institutions. Ch.1.* Collegium.
5. Kryuchkova, L. P. (2018). Investigation of spatial characteristics of the near-field of frame antennas. *Modern Information Protection, 1*, 17–22.
6. Phillips, D. (2010). *Python 3. Object-oriented programming: a book for programmers with tips on how to use OOP in code.* Packt Publishing.
7. Slatkin, B. (2019). *Effective Python: 90 Specific Ways to Write Better Python: A book with tips for writing optimized code.* Pearson Education.
8. Ramalho, L. (2015). *Fluent Python: a book for developers with a detailed description and examples of the programming language's capabilities.* O'Reilly Media.
9. VanderPlas, J. (2016). *Python Data Science Handbook.* O'Reilly Media.



This work is licensed under Creative Commons Attribution-noncommercial-sharealike 4.0 International License.