

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МАШИН І
СИСТЕМ ім. А.М. ПІДГОРНОГО
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Пелєвін Дмитро Євгенович

УДК 621.316:621.3.013

ДИСЕРТАЦІЯ

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ У ЖИТЛОВИХ
ПРИМІЩЕННЯХ БУДИНКІВ ТА МЕТОДИ ЙОГО
ЗМЕНШЕННЯ ДО БЕЗПЕЧНОГО РІВНЯ

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Дисертація подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Ідентифікація та зміст з іншими кваліфікаційними дисертаціями: _____ Д.Є. Пелєвін

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
Ф 64.050.04
Вибрано 05.05.2026



Харків – 2026

АННОТАЦІЯ

Пелєвін Дмитро Євгенович. Магнітне поле електромереж у житлових приміщеннях будинків та методи його зменшення до безпечного рівня. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2026 р.

Дисертація присвячена дослідженню магнітного поля (МП) промислової частоти, що створюється в житлових будинках зовнішніми та внутрішніми електромережами, та розробленню науково-методичних основ і засобів забезпечення електромагнітної сумісності електромереж з житловим середовищем шляхом зменшення індукції МП до безпечного для населення рівня.

На основі вивчення закордонних та вітчизняних публікацій розглянуте квазістаціонарне електромагнітне поле (ЕМП) електромереж промислової частоти та розподіл його електричної та магнітної складових.

Проведено аналіз забезпечення електромагнітної сумісності електромереж з житловим середовищем шляхом обмеження рівня їх електричного (ЕП) і магнітного (МП) полів відповідно до діючих санітарно-гігієнічних нормативів для населення.

Визначені основні джерела МП, що можуть створювати небезпеку для мешканців житлових будинків – наближені зовнішні високовольтні електромережі (ЛЕП), а також внутрішні електромережі (вбудовані трансформаторні підстанції (ТП), системи кабельного електрообігріву (СКЕ) житлових приміщень та внутрішні електромережи їх живлення (ВЕЖ).

Розглянуті відомі методи математичного моделювання та розрахунку МП електромереж у житлових приміщеннях будинків та методи і засоби нормалізації їх МП. Виявлені проблеми з забезпеченням електромагнітної сумісності

зовнішніх та внутрішніх електромереж з житловими приміщеннями будинків за МП, визначені шляхи їх вирішення та виконана постановка задач досліджень.

Запропоновано і експериментально обґрунтовано математичну модель МП повітряних ЛЕП, розроблено та верифіковано методику розрахунку МП ЛЕП, що визначає діюче значення індукції МП, яке підлягає санітарно-гігієнічному нормуванню, та доступне для вимірювання стандартними магнітометрами.

Досліджено розподіл МП для типових ЛЕП 0,4-330 кВ за межами їх законодавчо визначених за електричним полем охоронних зон, та обґрунтовано необхідність збільшення їх розміру для законодавчого обмеження діючого значення індукції МП на безпечному для населення рівні 0,5 мкТл.

Експериментально визначена і теоретично підтверджена незначна ефективність екранування МП промислової частоти ЛЕП стінами житлових будинків, в тому числі залізобетонних, якою можна знехтувати.

Запропоновані нові структурні методи зменшення до безпечного рівня (нормалізації) МП трифазних повітряних ЛЕП, що засновані на удосконаленні геометрії підвісу їх проводів і не потребують додаткового відчуження земельних ділянок. Запропоновані методи удосконалення підвісу проводів ЛЕП шляхом симетрування їх просторового розташування з підвищенням порядку p їх осової симетрії на основі запропонованої мультидипольної математичної моделі МП ЛЕП та розробленого методу векторної компенсації МП.

Виявлені умови удосконалення геометрії підвісу проводів двоколових повітряних ЛЕП за рівнем їх МП і запропоновані практичні рекомендації з перефазування проводів при модернізації діючих стандартних ЛЕП.

Експериментально досліджено розподіл індукції МП над міськими ТП 6(10)/0,4 кВ старої забудови потужністю до 400 (2x400) кВА, що складає від 8,0 до 30,0 мкТл і істотно перевищує гранично допустимий рівень 0,5 мкТл. Побудована нова математична модель МП ТП на основі закону Біо-Савара, яка інваріантна від відстані до точки спостереження і базується на МП його низьковольтного струмопроводу, та виконана її експериментальна верифікація.

Запропоновано удосконалений метод синтезу систем активного екранування ТП, який забезпечує нормалізацію рівнів МП на підлозі житлових приміщень, розташованих над ТП на малих (1,0–1,6 м) відстанях від джерела та виконана його експериментальна верифікація .

Досліджено МП ВЕЖ та СКЕ, та запропоновані методи його зменшення до безпечного рівня. Побудовані математичні моделі та методики розрахунку МП двожильних планарних і коаксіальних кабелів ВЕЖ та СКЕ, та здійснено їх експериментальне обґрунтування.

Показано, що індукція МП ВЕЖ на відстані 0,5 м для найгіршого випадку не перевищує 0,12 мкТл, що дозволяє при подальшому аналізі не враховувати ВЕЖ як джерело МП. Запропоновані рекомендації з проектування СКЕ з безпечним рівнем МП.

Показано, що невизначеність процесів комплексного впливу за МП групи електромереж негативно впливає на економічні показники засобів нормалізації МП. Запропоновано методи визначення комплексного впливу групи електромереж на рівень МП в житлових приміщеннях будинків. Запропоновані методи нормалізації МП від групи електромереж, що підтверджені результатами експерименту. Її використання дозволяє знизити необхідний коефіцієнт нормалізації K_m МП окремих електромереж на 12 – 56 % і відповідно зменшити економічні витрати на нормалізацію магнітного поля в житловому приміщенні.

Ключові слова: магнітне поле електромереж - повітряних ЛЕП, вбудованих трансформаторних підстанцій, внутрішніх електромереж житлових будинків та систем кабельного електрообігріву; методи та засоби моделювання і зменшення магнітного поля від електромереж в житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня.

ABSTRACT

Pelevin Dmytro. Magnetic fields from electrical networks in residential spaces of buildings and methods for reducing them to safe levels. – Manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of the industrial frequency magnetic field (MF) created in residential buildings by external and internal electrical networks, and the development of scientific and methodological foundations and means of ensuring the electromagnetic compatibility of electrical networks with the residential environment by reducing the MF induction to a safe level.

Based on the study of foreign and domestic publications, the quasi-stationary electromagnetic field of electrical networks of industrial frequency and the distribution of its electric and magnetic components were considered.

An analysis was carried out to ensure the electromagnetic compatibility of electrical networks with the residential environment by limiting the level of their electric and magnetic fields in accordance with the current sanitary and hygienic standards for the population.

The important main elements of MF, which can create insecurity for residents of residential buildings have been identified – nearby external high-voltage power lines (PL), as well as internal power lines (built-in transformers substations (TS), cable electrical heating systems (CEH) of residential premises and internal power supply networks (PSN).

Known methods of mathematical modeling and calculation of the MF of electrical networks in residential premises of buildings, as well as methods and means for normalizing their MF, have been considered. Problems with ensuring electromagnetic compatibility of external and internal electrical networks with residential premises of buildings are identified, ways of their solution are determined, and research tasks are formulated.

A mathematical model of the MF of overhead PL has been proposed and experimentally substantiated, the method for calculating the MF of PL has been developed and verified, which determines the effective value of the MP induction, which is subject to sanitary and hygienic regulation and is available for measurement by standard magnetometers.

The distribution of the MF of PL of 0.4-330 kV outside their legally defined protective zones for PL has been investigated, and the need to increase their size has been substantiated for the legislative limitation of the effective value of the MF induction at a level safe for the population of $0.5 \mu\text{T}$.

Experimentally determined and theoretically confirmed insignificant efficiency of shielding the industrial frequency MF of PL by the walls of residential buildings, including reinforced concrete ones which can be neglected.

New structural methods of reducing to a safe level (normalization) the MF of three-phase overhead PL are proposed, based on the improved of the geometry of the suspension of their wires and do not require additional alienation of land plots. The methods for improving the suspension of power transmission lines by symmetrizing their spatial arrangement with an increase the p order of axial symmetry based on the proposed multi-dipole mathematical model of the MF of PL and the developed method of vector compensation the MF is proposed.

Conditions for improving the geometry of suspension of wires of double-circuit overhead PL according to the level of their MF have been identified and practical recommendations are proposed for rephasing wires when modernizing existing standard PL.

The distribution of the MF induction over urban 6(10)/0.4 kV old-built TS with a capacity of up to 400 (2x400) kVA was experimentally investigated, which ranges from 8.0 to 30.0 μT and significantly exceeds the maximum permissible level of $0.5 \mu\text{T}$. A new mathematical model of the MF of the TS was constructed based on the Biot-Savart law, which is invariant from the distance to the observation point and is based on the MF of its low-voltage power line, and its experimental verification was performed

An improved method for synthesizing active shielding systems for TS is proposed, which provides normalization of the MF levels on the floor of residential premises located above TS at small (1.0–1.6 m) distances from the source and its experimental verification was performed.

The MF of the PSN and the CEH has been studied, and the proposed methods for reducing it to a safe level. Mathematical models and methods for calculating the MF of two-wire planar and coaxial cables of the PSN and the CEH have been constructed, and their experimental justification has been carried out.

It is shown that the MF induction by the PSN at a distance of 0.5 m for the worst case does not exceed $0.12 \mu\text{T}$, which allows for the further analysis not to consider the PSN as a source of the MF. Recommendations are proposed for the design of CEH with a safe level of the MF.

It is shown that the uncertainty of the processes of complex influence on the MF of a group of electric networks negatively affects the economic indicators of the MF normalization means. The methods for determining the complex impact of a group of electrical networks on the level of the MF in residential premises of buildings is proposed. Methods for normalizing MF from a group of power grids are proposed, which are confirmed by experimental results. Its use allows you to reduce the required normalization coefficient K_m MF of individual electrical networks by 12 – 56 % and, accordingly, reduce the economic costs of normalizing the magnetic field in the residential premises.

Keywords: magnetic field of electrical networks – overhead power lines, built-in transformer substations, internal electrical networks of residential buildings and cable electric heating systems; methods and means for modeling and reducing the magnetic field from electrical networks in residential premises to a level safe for the population.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science.

1. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелєвін Д.Є., Яковенко В.М. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*, 2012. № 1. С. 3–9.
URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1350>. (Scopus).

Здобувачу належить математична модель магнітного поля високовольтних ліній електропередачі та її експериментальне обґрунтування, санітарно-гігієнічна оцінка магнітного поля на границях охоронних зон.

2. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є. Дипольная модель магнитного поля трехфазной электрической цепи. *Технічна електродинаміка*, 2012. № 4. С. 3–7.
URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1378>. (Scopus).

Здобувачу належить теоретичне обґрунтування можливості використання двофазної моделі трифазного електричного кола для визначення дипольної складової його магнітного поля для випадку симетрії напруги живлення.

3. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелєвін Д.Є., Пилюгіна О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*, 2013. № 2. С. 3–9.
URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1145>. (Scopus, Q3).
<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100207636&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належить мультидипольна математична модель магнітного поля лінії електропередачі та її експериментальна перевірка, метод зменшення магнітного поля на основі удосконалення геометрії підвісу розщеплених проводів і підвищенні порядку їх осьової симетрії (метод векторної компенсації), приклади удосконалення схеми підвісу проводів дволанцюгової ЛЕП 330 кВ.

4. Пелєвін Д.Є. Методи зниження магнітного поля воздушних ліній електропередачі за межами охоронних зон. *Технічна електродинаміка*, 2014. № 5. С. 14–16. URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1023>. (Scopus, Q3). <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100207636&tip=sid&clean=0>

5. Пелєвін Д.Є. Екранування магнітного поля промислової частоти стінами житлових будинків. *Електротехніка і електромеханіка*, 2015. № 4. С. 53–55. URL: <http://eie.khpi.edu.ua/article/view/2074-272X.2015.4.10/44952>. (Web of Science).

6. Erisov A.V., Pelevin, D.Y., Pielievina K.D. Calculation method of electric power lines magnetic field strength based on cylindrical spatial harmonics. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016. no. 2. pp.24–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.2.04>. (Web of Science).

Здобувачу належить математична модель МП ЛЕП на основі циліндричних просторових гармонік, та метод розрахунку величини захисної зони ЛЕП на її основі.

7. Розов В.Ю., Грінченко В.С., Пелєвін Д.Є., Чуніхін К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*, 2016. № 3. С. 6–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.006>. (Scopus, Q3). <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100207636&tip=sid&clean=0>

8. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Pielievina K.D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017. no. 5. pp. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10>. (Web of Science).

Здобувачу належить математичне моделювання магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій в житлових приміщеннях та його експериментальна перевірка, санітарно-гігієнічна оцінка рівня магнітного поля та методи його нормалізації.

9. Rozov V.Y., Kundius K.D., Pelevin D.Y. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020. no. 3. pp. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.04>. (Scopus).

Здобувачу належить комп'ютерне моделювання магнітного поля та обґрунтування можливості зменшення магнітного поля в приміщеннях із вбудованими трансформаторними підстанціями до нормативного рівня з допомогою простіших систем активного екранування з однією (двома) планарними компенсаційними обмотками, визначення їх основних параметрів.

10. Rozov V.Y., Reutskyi S.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Approximate method for calculating the magnetic field of 330-750 kV high-voltage power line in maintenance area under voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022. no. 5. pp. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.12>. (Scopus, Q3). <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101066743&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належить методика вимірювання індукції магнітного поля ЛЕП та її експериментальна перевірка.

11. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Simulation of the magnetic field in residential buildings with built-in substations based on a two-phase multi-dipole model of a three-phase current conductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023. no. 5. pp. 87–93. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13>. (Scopus, Q3). <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101066743&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належить обґрунтування можливості заміщення вбудованої трансформаторної підстанції як джерела магнітного поля її низьковольтним струмопроводом, експериментальна перевірка мультидипольної моделі магнітного поля трансформаторної підстанції на повномасштабному макеті струмопроводу трансформаторної підстанції 100 кВА.

12. Rozov V.Y., Reutskyi S.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Magnetic field of electrical heating cable systems of the floors for residential premises. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024. no. 5. pp. 48–57.

DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.5.07>. (Scopus, Q3).

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101066743&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належить математична модель магнітного поля систем кабельного електрообігріву (СКЕ) і методика розрахунку МП та їх експериментальна перевірка, оцінка відповідності МП СКЕ санітарним нормам та рекомендації з безпечного використання СКЕ.

13. Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye, Reutskiy S.Yu, Kundius K.D, Vorushylo A.O. The complex influence of external and internal electricity networks on the magnetic field level in residential premises of buildings. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025. no. 4. pp. 11–19. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.02>. (Scopus, Q2).

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101066743&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належать методи визначення комплексного впливу групи електромереж на рівень сумарного магнітного поля в житлових приміщеннях та метод нормалізації сумарного МП на її основі.

Статті в наукових фахових виданнях України категорії Б:

14. Розов В.Ю., Кузнецов Б.І., Пелєвін Д.Є. Синтез нелинейного робастного управления системой компенсации искажений магнитного поля на основе аналитических моделей нелинейностей. *Електротехнічні та комп'ютерні системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»*, Одеса: «ОНПУ», 2011. № 03(79). С. 50–51. URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/560>.

Здобувачу належить обґрунтування актуальності теми досліджень та представлення прикладу системи компенсації.

15. Кузнецов Б.І., Пелєвін Д.Є., Бовдуй І.В., Коломиец В.В., Котлярів Д.О. Компенсация искажений магнитного поля промышленной частоты. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»*, 2012. №03(19). С. 135–

136. URL: https://www.researchgate.net/publication/297475462_Active_screening_of_industrial_frequency_magnetic_field_system_synthesis

Здобувачу належить виконання експериментальних досліджень систем компенсації.

16. Кузнецов Б.І., Нікітіна Т.Б., Пелєвін Д.Є., Бовдуй І.В., Волошко О.В., Винниченко О.В. Котлярів Д.О. Экспериментальное исследование макета системы активного экранирования магнитного поля вблизи токопроводов электростанций. *Наукові праці Донецького Національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика»*, 2013. №1(14), С. 134–137.

URL: https://www.researchgate.net/publication/387164345_Experimental_Research_of_the_Prototyping_System_of_Active_Screening_of_Magnetic_Field_Near_Power_Stations_Bus.

Здобувачу належить розроблення методики експериментальних досліджень системи активного екранування.

17. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є., Левіна С.В. Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях. *Електротехніка і електромеханіка*, 2013. № 6. С. 72–76.

URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2013.6.13>.

Здобувачу належить методика експериментального визначення коефіцієнту екранування магнітного поля феромагнітним каркасом житлового будинку.

18. Кузнецов Б.І., Бовдуй І.В., Пелєвін Д.Є., Волошко О.В., Винниченко О.В., Котляров Д.О. Исследование эффективности системы активного экранирования магнитного поля вблизи токопроводов электростанций. *Вестник НТУ «ХПИ» Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*. Харків: НТУ «ХПИ». 2013. № 36. С. 349–350. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/12e9a854-e822-4b13-9f0a-5caa0f6770fc/content>.

Здобувачу належить методика експериментальних досліджень систем активного екранування.

19. Пелєвін Д.Є. Магнітне поле двожильних електричних кабелів житлових приміщень. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2024. №7(197). С. 8–15. URL: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/311135>

20. Пелєвін Д.Є. Нормалізація магнітного поля в житлових приміщеннях, розташованих над вбудованими трансформаторними підстанціями 6(10)/0,4 кВ потужністю 100-400 кВА. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. № 2(12). С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.2.08>.

21. Пелєвін Д.Є. Розрахунок магнітного поля низьковольтного струмопроводу вбудованої трансформаторної підстанції. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Енергетика: надійність та енергоефективність»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. № 2(9). С. 63–71. DOI: [https://doi.org/10.20998/EREE.2024.2\(9\).310498](https://doi.org/10.20998/EREE.2024.2(9).310498).

Наукові праці за матеріалами конференцій
які засвідчують апробацію матеріалів дисертації :

22. Пелєвін Д.Є. Синтез системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты / Б.И Кузнецов., Д.Є. Пелєвін, І.В. Бовдуй, Д.А. Котлярів // *Технічна електродинаміка*, 2012. – №2. С. 131-132. (Scopus)
URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1311>.

Здобувачу належить виконання експериментальних досліджень систем активного екранування.

23. Розов В.Ю., Думанский Ю.Д., Пелєвін Д.Є., Левіна С.В. Исследование статического геомагнитного поля в жилых и общественных помещениях. *Гігієна населених місць: Зб. наук. пр. К.: ДУ «ІГМЕ АМНУ», Київ, Україна, 2013, Вип. 62, С. 169-176.* URL: http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IM AGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/gnm_2013_62_30.pdf.

Здобувачу належить аналіз коефіцієнту екранування магнітного поля феромагнітним каркасом житлового будинку.

24. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Вплив на житлове середовище електромагнітного поля міських трансформаторних підстанцій. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції «Фізичні фактори довкілля та їх вплив на формування здоров'я населення»*, м. Київ, 12–13 листопада 2020 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2020 р., Вип. 20, С. 24-26. URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/xvi_marzieiev_readings_proceedings_2020.pdf.

Здобувачу належить аналіз розподілу магнітного поля міських трансформаторних підстанцій.

25. Розов В.Ю., Реуцький С.Ю., Пелєвін Д.Є., Грецьких С.В. Особливості розрахунку магнітного поля повітряних ЛЕП 330-750 кВ в зоні виконання робіт без зняття напруги. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції (17 Марзєєвські читання) «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України»*, м. Київ, 21-22 жовтня 2021 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2021 р., Вип. 21, С. 325-329. URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/xvii_marzieiev_readings_proceedings_2021.pdf.

Здобувачу належить методика вимірювання індукції магнітного поля ЛЕП та її експериментальна перевірка.

26. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Методи нормалізації магнітного поля в житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанціями. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції (17 Марзєєвські читання) «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України»*, м. Київ, 21-22 жовтня 2021 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2021 р., Вип. 21, С. 329-331. URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/xvii_marzieiev_readings_proceedings_2021.pdf.

Здобувачем запропоновано методи нормалізації магнітного поля в житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанціями.

27. Pelevin D., Kundius K., Sokol O., Grinchenko V. Mitigation of urban substation magnetic field by active loop. *Book of Abstracts 2nd Workshop on Engineering Optimization – WEO 2021*, Warsaw, Poland, 7-8 October 2021. Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences, 2021, pp. 81-82. URL: <http://v4shm.ippt.pan.pl/WEO2021-BookOfAbstracts.pdf#page=81>

Здобувачу належить розрахунок магнітного поля трансформаторної підстанції.

28. Грінченко В.С., Пелєвін Д.Є. Математична модель магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції. *Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика. Поствоєнне відновлення»*, м. Харків, 16–17 листопада 2023 р. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023, С. 83-85.

URL: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2023/Tezy_2023/Zb_irka_tez_16_17_11_23.pdf.

Здобувачу належить математична модель магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції.

29. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є. Розрахунок магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції. *Тези доповідей XXVII Міжнародного симпозіуму SIEMA'2024, 24 - 25 жовтня 2024 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2024 р. С. 68.* URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/c1cfa909-791e-425f-99bb-cff6a062439d>.

Здобувачу належить методика розрахунку магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції.

30. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Магнітне поле вбудованих трансформаторних підстанцій при розкиді струмів навантаження. *Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Тези доповідей XXVII Міжнародного симпозіуму SIEMA'2025, 30–31 жовтня 2025 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2025 р. С. 18.* URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/siema/wp-content/uploads/sites/111/2026/02/Zbirnyk-tez-2025.pdf>

Здобувачу належить математичне моделювання магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій в житлових приміщеннях

31. Розов В.Ю., Пєлєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Дослідження магнітного поля повітряних леп 0,4-330 кВ на границі чинних охоронних зон та визначення необхідності їх збільшення. Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. *Тези доповідей XXVII Міжнародного симпозіуму SIEMA'2025, 30–31 жовтня 2025 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2025 р. С. 71. URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/siema/wp-content/uploads/sites/111/2026/02/Zbirnyk-tez-2025.pdf>.*

Здобувачу належить математична модель магнітного поля високовольтних ліній електропередачі, санітарно-гігієнічна оцінка магнітного поля на границях охоронних зон.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ЖИТЛОВИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ТА ШЛЯХИ ЇЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	19
1.1 Електромагнітне поле електромереж промислової частоти та його електрична і магнітна складові.....	19
1.2 Сучасне санітарно-гігієнічне нормування рівня магнітного поля для населення.....	23
1.3 Відомі методи математичного моделювання, розрахунку та визначення магнітного поля електромереж.....	34
1.4 Відомі методи та засоби зменшення магнітного поля електромереж.....	47
1.5 Визначення основних джерел магнітного поля, що можуть створювати небезпеку за магнітним полем для населення житлових будинків.....	64
1.6 Аналіз проблем забезпечення електромагнітної сумісності зовнішніх та внутрішніх електромереж з житловим середовищем за магнітним полем, та визначення шляхів їх вирішення. Постановка задач досліджень.....	82
1.7 Висновки до першого розділу	84
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ЖИТЛОВІ ПРИМІЩЕННЯ БУДИНКІВ.....	86
2.1 Математична модель магнітного поля ліній електропередачі.....	86
2.1.1 Моделювання діючого значення індукції магнітного поля ліній електропередачі.....	86
2.1.2 Теоретичні положення методу та методики розрахунку магнітного поля ліній електропередачі.....	95
2.2 Методика вимірювання діючого значення індукції магнітного поля ліній електропередачі.....	103

2.3 Експериментальна перевірка запропонованої математичної моделі магнітного поля ліній електропередачі та методики розрахунку індукції магнітного поля на її основі.....	107
2.3.1 Експериментальна перевірка в лабораторних умовах.....	107
2.3.2 Експериментальна перевірка в польових умовах.....	109
2.3.3 Визначення похибки розрахунку магнітного поля ліній електропередачі.....	112
2.3.4 Верифікована методика розрахунку магнітного поля ліній електропередачі.....	113
2.4 Визначення впливу будівельних конструкцій на рівень магнітного поля від ліній електропередачі у житлових приміщеннях будинків.....	113
2.4.1 Чисельне моделювання індукції магнітного поля всередині житлового будинку від зовнішньої високовольтної повітряної ліній електропередачі.....	114
2.4.2 Експериментальні дослідження ефективності екранування магнітного поля ліній електропередачі стінами житлових будинків.....	120
2.4.3 Визначення коефіцієнту екранування магнітного поля ліній електропередачі будівельними конструкціями житлових будинків.....	124
2.5 Санітарно-гігієнічна оцінка магнітного поля ліній електропередачі на межі чинних охоронних зон.....	125
2.5.1 Визначення максимально можливих значень індукції магнітного поля на межі чинних охоронних зон ліній електропередачі 0,4-330 кВ.....	125
2.5.2 Експериментальні дослідження розподілу магнітного поля діючих повітряних ліній електропередачі 0,4-110 кВ на границях їх чинних охоронних зон.....	127
2.5.3 Розрахунок безпечного розміру санітарно-захисних зон ліній електропередачі 0,4-330 кВ за магнітного поля та його верифікація.....	135
2.6 Висновки до другого розділу	145
РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРНІ МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	147
3.1 Загальні положення.....	147

3.2 Мультидипольна математична модель магнітного поля ліній електропередачі.....	148
3.3 Похибка мультидипольної моделі магнітного поля ліній електропередачі та умови її коректного використання.....	162
3.4 Удосконалення геометрії підвісу проводів ліній електропередачі на основі мультидипольної моделі для зменшення її магнітного поля.....	171
3.4.1 Метод векторної компенсації магнітного поля ліній електропередачі.....	172
3.4.2 Метод проектування ліній електропередачі з підвищеним порядком симетрії підвісу проводів для зменшення їх магнітного поля.....	174
3.4.3 Ефективність методу векторної компенсації магнітного поля ліній електропередачі.....	181
3.5 Удосконалення підвісу проводів двоколових ліній електропередачі на основі методу векторної компенсації.....	183
3.5.1 Індукція магнітного поля типових двоколових ліній електропередачі на стандартних опорах.....	184
3.5.2 Зменшення магнітного поля стандартних діючих двоколових ліній електропередачі шляхом перефазування їх проводів на основі методу векторної компенсації.....	187
3.6. Висновки за третім розділом	191
РОЗДІЛ 4 МАГНІТНЕ ПОЛЕ В ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ, РОЗТАШОВАНИХ НАД ВБУДОВАНИМИ ТРАНСФОРМАТОРНИМИ ПІДСТАНЦІЯМИ, ТА МЕТОДИ ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ ДО БЕЗПЕЧНОГО РІВНЯ.....	193
4.1 Загальні положення.....	193
4.2 Дослідження розподілу магнітного поля над вбудованими трансформаторними підстанціями та його санітарно-гігієнічна оцінка.....	194
4.3 Моделювання та розрахунок магнітного поля над вбудованою трансформаторною підстанцією.....	198
4.3.1 Математична модель магнітного поля над вбудованою трансформаторною підстанцією.....	198

4.3.2	Метод розрахунку магнітного поля над вбудованою трансформаторною підстанцією.....	204
4.3.3	Верифікація розробленої математичної моделі магнітного поля над трансформаторними підстанціями та методики його розрахунку.....	212
4.4	Вибір методів зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях над вбудованими трансформаторними підстанціями.....	215
4.5	Розробка методів та засобів екранування магнітного поля над вбудованими трансформаторними підстанціями	217
4.5.1	Вибір засобів екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій.....	217
4.5.2	Удосконалений метод та методика синтезу систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій.....	218
4.5.3	Синтез систем активного екранування для різних типів вбудованих трансформаторних підстанцій.....	222
4.6	Експериментальна перевірка розробленого методу синтезу систем активного екранування.....	228
4.7	Узагальнення результатів досліджень ефективності синтезованих систем екранування.....	232
4.8	Висновки за четвертим розділом	234
РОЗДІЛ 5 МАГНІТНЕ ПОЛЕ ВНУТРІШНІХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ ТА МЕТОДИ ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ ДО БЕЗПЕЧНОГО РІВНЯ		236
5.1	Загальні положення.....	236
5.2	Магнітне поле одножильних та двожильних планарних прямолінійних кабелів.....	237
5.3	Магнітне поле прямолінійних коаксіальних кабелів.....	245
5.4	Теоретичні та експериментальні дослідження індукції магнітного поля прямолінійних планарних та коаксіальних нагрівальних кабелів.....	247
5.5	Магнітне поле внутрішніх електромереж та його вплив на житлові приміщення.....	250

5.6 Магнітне поле систем кабельного електрообігріву та його вплив на житлові приміщення.....	252
5.6.1 Математична модель магнітного поля систем кабельного електрообігріву.....	252
5.6.2 Магнітне поле систем кабельного електрообігріву при використанні одножильних нагрівальних кабелів.....	257
5.6.3 Магнітне поле систем кабельного електрообігріву при використанні двожильних нагрівальних кабелів.....	258
5.7 Дослідження розподілу магнітного поля систем кабельного електрообігріву з нагрівальними кабелями різних типів.....	260
5.8 Експериментальні дослідження магнітного поля різних типів нагрівальних кабелів та систем кабельного електрообігріву на їх основі.....	263
5.9 Оцінка відповідності магнітного поля систем кабельного електрообігріву нормативному рівню.....	265
5.10 Методи нормалізації магнітного поля в житлових приміщеннях при використанні систем кабельного електрообігріву.....	266
5.11 Висновки за п'ятим розділом	267
РОЗДІЛ 6 ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ТА ВНУТРІШНІХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ НА РІВЕНЬ МП В ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ БУДИНКІВ.....	270
6.1 Загальні положення.....	270
6.2 Аналіз комплексного впливу групи з n електромереж за магнітного поля.....	272
6.3 Аналіз індивідуального впливу окремих електромереж.....	275
6.4 Дослідження комплексного впливу ліній електропередачі, трансформаторних підстанцій і систем кабельного електрообігріву за магнітним полем.....	279
6.5 Експериментальні дослідження комплексного впливу групи електромереж за магнітним полем.....	288
6.6 Методи нормалізації комплексного впливу групи електромереж за магнітним полем.....	295
6.7 Висновки до шостого розділу	297

ВИСНОВКИ ДО ДИСЕРТАЦІЇ.....	299
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	304
ДОДАТОК А – СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	347
ДОДАТОК Б – МАТЕРІАЛИ З ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ (Матеріали договору з НЕК «Укренерго», розроблена методика розрахунку МП)	356
ДОДАТОК В – АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	405

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВЕЖ – внутрішні електромережі живлення

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров'я

ГДР – гранично допустимий рівень

ДЖ – джерело живлення

ДМП – датчик магнітного поля

ЕМ – електромережа

ЕМП – електромагнітне поле

ЕП – електричне поле

ЕУ – електроустановка

ЕНО – енергонасичений об'єкт

ЕО – електрообладнання

ЗМП – зовнішнє магнітне поле

ЛЕП – лінія електропередачі

ММ – магнітний момент

МП – магнітне поле

НК – нагрівальний кабель

ПЕО – побутове електрообладнання

РП – розподільні підстанції

САЕ – система активного екранування

СКЕ – система кабельного електрообігріву

СУ – система управління

ТП – трансформаторна підстанція

КО – компенсаційна обмотка

КЛ – кабельна лінія

ВСТУП

Актуальність теми. Вирішення проблеми захисту здоров'я населення від біологічного впливу електромагнітного поля (ЕМП) електротехнічного обладнання і забезпечення його електромагнітної сумісності з житловим середовищем має високу соціальну значимість і є надзвичайно актуальним та важливим завданням покращення якості і тривалості життя населення. Пріоритетність для людства проблеми зменшення впливу ЕМП підтверджена Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ) [1, 2], яка реалізує, постійно діючий Міжнародний проект з ЕМП (The International EMF Project) [1], спрямований на вивчення впливу ЕМП на людину і захист від нього, в якому беруть участь практично всі розвинені країни світу.

Значне місце у дослідженнях ВООЗ займає ЕМП промислової частоти, яке створюється різними електротехнічними пристроями та електромережами на їх основі (лініями електропередачі (ЛЕП), міськими трансформаторними підстанціями (ТП) та ін.), що розташовані в зонах житлової забудови. Електромережі є основним джерелом магнітного поля (МП) промислової частоти, що негативно діє на населення житлових будинків, розташованих по їх трасах. Так, за висновками експертів ВООЗ, низькочастотне МП є більш небезпечним для здоров'я населення, ніж електричне поле (ЕП) [2]. Підґрунтям для формування цих висновків стало виявлення наприкінці ХХ століття канцерогенних властивостей низькочастотного магнітного поля (МП), зокрема МП електромереж, при його слабкому, але тривалому впливі на людину. Це зумовило розробку рекомендацій ВООЗ щодо максимально допустимого рівня індукції МП промислової частоти – на рівні 0,2–0,3 мкТл у житлових будинках [1, 3], розташованих поблизу ліній електропередачі (ЛЕП). Дотримання цих норм дозволяє знизити ймовірність виникнення онкологічних захворювань у населення та забезпечити електромагнітну сумісність електротехнічного обладнання електромереж із житловим середовищем.

В Україні дослідження проблем наукового санітарно-гігієнічного нормування МП промислової частоти для населення виконувалось починаючи з 1996 року в Інституті гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєєва НАМН України (зараз ДУ "Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України"), де було науково обґрунтований гранично допустимий рівень (ГДР) індукції МП в 0,5 мкТл для населення, що зараз прийнятий за основу в Україні [4].

Однак на сьогодні методи забезпечення індуктивної електромагнітної сумісності електротехнічного обладнання за параметрами МП з метою захисту здоров'я населення України від його негативного впливу на промисловій частоті досліджені вкрай недостатньо. Зокрема, для житлових приміщень – найбільш критичного середовища з точки зору дії МП через тривале перебування людей – недостатньо вивчені такі основні джерела МП, як високовольтні ЛЕП 10–330 кВ, ТП 6(10)/0,4 кВ, які забезпечують електроживлення будинків, а також такі внутрішні електромережі житлових будинків напругою 0,4 кВ, як системи електропостачання та електрообігріву. Крім того, на сьогодні відсутні ефективні та науково обґрунтовані методи і засоби визначення, розрахунку та нормалізації рівня МП, що утворюється від різних електромереж у житлових приміщеннях. Недостатньо досліджено вплив зовнішніх електромереж на рівень МП всередині будинків з урахуванням їх екранувального ефекту. Також бракує експериментально перевірених методів і технічних рішень для комплексного зменшення МП у житлових будівлях до безпечних для населення значень, зокрема шляхом створення електротехнічних систем екранування МП.

Тому дослідження, спрямовані на розвиток методів моделювання, розрахунку і нормалізації МП в житлових будинках від зовнішніх та внутрішніх електромереж, та розроблення науково-методичних основ і засобів його електромагнітної сумісності шляхом комплексного зменшення МП в житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня, є актуальними і вирішують важливі науково-прикладні проблеми електротехніки і електроенергетики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана під науковим консультуванням чл.- кор. НАН України д.т.н. проф. Розова В.Ю у відділі магнетизму технічних об'єктів Інституту енергетичних машин і систем імені А.М. Підгорного НАН України (раніше – Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України»). Роботу виконано за основних наукових напрямів та найважливіших проблем фундаментальних досліджень «Екологічні проблеми в енергетиці, 1.7.12.», та «Магнетизм технічних об'єктів, 1.7.6.3» в рамках держбюджетних тем «ТИША», № ДР 0110U005288, 2010–2014 рр.; «БІОМАГ», № ДР 0111U010333, 2012–2016 рр.; «ЕМП», № ДР 0113U001980; 2015–2019 рр.; МЕРЕЖА, № ДР 0111U010332, 2012–2016 рр.; Метод-М», № ДР 0113U001980, 2013–2015 рр.; БІОМАГ 2», № ДР 0116U005462, 2017 – 2021 рр.; «ЕМП ТП», № ДР 0119U101726, 2019 рр.; ЕКОМ», № ДР 0122U001772, 2022 – 2026 рр., а також госпдоговорів, що виконувались під науковим керівництвом та (або) за особистою участю здобувача.

Мета і задачі досліджень.

Метою дисертаційної роботи є дослідження МП промислової частоти, що створюється в житлових приміщеннях будинків зовнішніми та внутрішніми електромережами, та розроблення науково-методичних основ і засобів забезпечення електромагнітної сумісності електромереж з житловим середовищем шляхом зменшення індукції їх МП до безпечного для населення рівня. Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

- Виявити основні джерела МП промислової частоти, що створюють МП в житлових приміщеннях будинків.
- Визначити ефективність екранування МП промислової частоти будівельними конструкціями житлових будинків із типових будівельних матеріалів.
- Розробити аналітичний метод математичного моделювання МП повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ та наукові засади верифікованої методики розрахунку їх МП, що визначає діюче значення індукції, яке підлягає санітарно-гігієнічному

нормуванню, та доступне для вимірювання високоточними однокомпонентними магнітометрами.

- Визначити рівень індукції МП повітряних ЛЕП за межами їх чинних охоронних зон і його відповідність санітарним нормам для населення.

- Розробити нову математичну модель МП ЛЕП, яка прийнятна для моделювання індукції МП поблизу межі їх охоронних зон, та має чітку фізичну інтерпретацію для удосконалення геометрії підвісу проводів ЛЕП на її основі.

- Запропонувати новий метод зменшення МП ЛЕП, що не потребує відчуження додаткових земельних ділянок і реалізується шляхом симетрування системи розщеплених проводів фаз для досягнення осьової симетрії більш високого порядку.

- Розробити метод та методику проектування ЛЕП зі зменшеним МП та удосконаленими схемами підвісу розщеплених проводів їх фаз.

- Визначити умови удосконалення геометрії підвісу проводів двоколових ЛЕП для зменшення їх МП.

- Розробити математичну модель та методику розрахунку МП над міськими ТП 100–2х400 кВА при малих (біля 1 м) відстанях до житлових приміщень.

- Забезпечити подальший розвиток методу синтезу систем активного екранування (САЕ) МП вбудованих ТП для зменшення МП в житлових приміщеннях, що розташовані на малій (біля 1 м) висоті над ними.

- Розробити математичні моделі та верифіковані методики розрахунку МП дво жильних планарних та коаксіальних кабелів, що використовуються для систем кабельного електрообігріву (СКЕ) і внутрішніх електромереж (ВЕЖ) житлових приміщень.

- Дослідити МП СКЕ, що побудовані на основі сучасних дво жильних планарних нагрівальних кабелів (НК) з мінімальною відстанню між жилами 1,4 мм, та визначити доцільність їх використання в житлових приміщеннях.

- Дослідити МП СКЕ, що побудовані на основі сучасних коаксіальних НК, та визначити їх переваги при використанні в житлових приміщеннях.

- Дослідити МП ВЕЖ і визначити необхідність його зменшення.

– Розробити методи визначення комплексного впливу зовнішніх та внутрішніх електромереж на рівень МП в житлових приміщеннях будинків.

– Розробити науково-методичні основи забезпечення електромагнітної сумісності зовнішніх і внутрішніх електромереж з житловим середовищем при їх індивідуальному, або груповому впливі.

Об'єкт досліджень – магнітне поле промислової частоти в житлових будинках.

Предмет досліджень – методи визначення та зменшення до нормативного рівня індукції магнітного поля, що створюється в житлових приміщеннях будинків зовнішніми та внутрішніми електромережами.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення дисертації базуються на методах математичного та фізичного моделювання електромагнітних процесів в системі електромережа – житловий будинок – засоби екранування на основі скалярного магнітного потенціалу, на використанні закону Біо-Савара в поєднанні з принципом суперпозиції, на методах просторового гармонічного аналізу МП в різних системах координат, методах кінцевих елементів, методах числової обробки дискретних даних експерименту, аналітичних та чисельних методах аналізу та сучасних інформаційних технологіях.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше теоретично доведено, та експериментально підтверджено, що стіни та міжповерхові перекриття житлових будинків із типових будівельних матеріалів, зокрема, збірного залізобетону, мають низьку ефективність екранування МП промислової частоти електромереж, яка не перевищує 10%. Тому МП електромереж практично безперешкодно проникає в житлові приміщення, що є важливим чинником для розрахунку рівнів індукції МП, що створюються у житлових приміщеннях зовнішніми і внутрішніми електромережами.

2. Запропоновано та експериментально обґрунтовано новий аналітичний метод моделювання та верифіковану методику розрахунку МП трифазних ЛЕП. На відміну від відомих методів, що засновані на чисельних

методах або методі комплексних амплітуд, вони базуються на використанні в якості розрахункових величин виключно діючих значень магнітної індукції, які безпосередньо підлягають як санітарно-гігієнічному нормуванню, так і фізичному вимірюванню стандартними однокомпонентними магнітометрами. Це дозволяє узгодити результати моделювання з нормативними вимогами та даними натурних вимірювань, забезпечуючи високу достовірність отриманих результатів.

3. Вперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що за межами законодавчо визначених за ЕП чинних охоронних зон ЛЕП 110-330 кВ, рівень індукції МП може перевищувати гранично допустиме значення 0,5 мкТл в 1,5–5,6 рази, що обумовлює необхідність збільшення величини чинних охоронних зон ЛЕП.

4. Вперше теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена можливість використання для інженерних розрахунків двофазної математичної моделі МП трифазної ЛЕП, що дозволяє істотно спростити розрахунок МП, та визначено умови її коректного застосування при симетрії напруги живлення.

5. Вперше запропоновано та експериментально обґрунтовано мультидипольну математичну модель МП трифазних ЛЕП, яка характеризується представленням струмових кіл, утворених проводами різних фаз ЛЕП із міжфазною відстанню d , у вигляді сукупності незалежних елементарних мікроконтурів розміром $d \times a$. МП у точці спостереження визначається як суперпозиція полів, створюваних дипольними магнітними моментами (ММ) цих мікроконтурів. Модель має чітку фізичну інтерпретацію, що спрощує реалізацію структурних методів зменшення МП ЛЕП на її основі.

6. На основі розробленої мультидипольної моделі МП ЛЕП вперше запропоновано новий метод зменшення індукції їх МП ЛЕП – метод векторної компенсації, який на відміну від існуючих заснований на симетруванні системи розщеплених фазних проводів і досягненні осьової

симетрії більш високого порядку, що дозволяє зменшити МП шляхом взаємної компенсації ММ системи підвісу проводів та підвищення порядку її власної просторової гармоніки.

7. Набув подальшого розвитку і удосконалення метод синтезу САЕ МП вбудованих ТП 6(10)/0,4 кВ на основі закону Біо Савара, та виконана його експериментальна верифікація. Удосконалений метод на відміну від відомих забезпечує нормалізацію МП в житлових приміщеннях, розташованих на малих (біля 1 м) відстанях від ТП.

8. Вперше запропоновано та експериментально верифіковано аналітичні математичні моделі для розрахунку МП двожильних планарних і коаксіальних кабелів, що застосовуються у ВЕЖ житлових приміщень, та СКЕ їх підлог, і дозволяють виконувати точний розрахунок індукції їх МП.

9. Вперше запропоновано та верифіковано на основі фізичного експерименту методи визначення комплексного впливу сукупності зовнішніх та внутрішніх електромереж на рівень МП у житлових приміщеннях, а також методи нормалізації їх сумарного МП, що дозволяє встановлювати мінімально необхідні обмеження для окремих електромереж і на цій основі розробляти економічно ефективні заходи для нормалізації МП в житлових приміщеннях.

Практичне значення отриманих результатів для галузі електротехніки і електроенергетики та медичної екології:

- створено наукові основи верифікованої методики Міненерго з розрахунку МП ЛЕП;
- розроблено метод векторної компенсації МП ЛЕП, реалізація якого не потребує відчуження додаткових земельних ділянок;
- розроблено методики розрахунку індукції МП вбудованих ТП, ВЕЖ і СКЕ із різними типами нагрівальних кабелів та запропоновані методи та засоби забезпечення їх електромагнітної сумісності за МП;
- запропоновано методики розрахунку індукції МП двожильних планарних і коаксіальних НК;

- запропоновано методику синтезу ЛЕП з удоскональненим підвісом її розщеплених проводів фаз зі зменшеним МП, визначені умови удосконалення геометрії підвісу проводів двоколових повітряних ЛЕП для зменшення їх МП.

Результати роботи впроваджені на таких підприємствах і організаціях:

НЕК «Укренерго» (м. Київ) –наукові положення нової редакції нормативного документу «Міненерговугілля» «Розрахунок електричних і магнітних полів ліній електропередавання» СОУ-Н ЕЕ 20.179, 2016;

Міненерго України (м. Київ) в нормативному документі СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання» Методика (зі змінами), що введений в дію у 2016 році наказом Міненерговугілля від 01.07.16 № 423;

ТОВ «КиївПромЕлектроПроект (м. Київ) Мінрегіонбуду України при розробці нормативних документів з проектування міських трансформаторних підстанцій 6(10)/0,4 кВ з екологічно безпечним рівнем електромагнітного поля промислової частоти;

Науково-виробниче підприємство ХАРТРОН-АРКОС (м. Харків) при створенні магніточистих систем електроживлення різного типу об'єктів на основі двожильних планарних і коаксіальних кабелів для забезпечення їх електромагнітної сумісності;

Державна установа «Інститут громадського здоров'я ім. А.М. Мерзєєва НАМН України» (м. Київ) при розробці санітарно - гігієнічних нормативів МП промислової частоти для населення України;

Інститут енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України (м. Харків) при виконанні планових фундаментальних і прикладних наукових досліджень з визначення та зменшення магнітного поля різних технічних об'єктів в 8 наукових проектах за науковим напрямом «Магнетизм технічних об'єктів».

Особистий внесок здобувача.

Дисертація є завершеною науковою працею автора. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем

особисто, а саме:

- теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження, що МП промислової частоти практично без ослаблення проникає скрізь стіни і міжповерхові перекриття всіх типів житлових будинків;

- новий метод моделювання та верифікована методика розрахунку МП трифазних ЛЕП, що використовують в якості розрахункових величин виключно діючі значення магнітної індукції, що підлягають вимірюванню та санітарно-гігієнічному нормуванню;

- теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження перевищення рівня МП за межами діючих охоронних зон повітряних ЛЕП, розмір яких визначено за електричним полем;

- мультидипольна математична модель МП ліній електропередачі;

- метод векторної компенсації МП, заснований на симетруванні системи розщеплених проводів фаз ЛЕП для досягнення осової симетрії системи більш високого порядку;

- наукові засади зменшення до безпечного рівня електромагнітного впливу на житлове середовище міських ТП;

- аналітична методика розрахунку МП для вбудованої ТП, та новий метод синтезу систем активного екранування МП ТП при малих відстанях від підстанції до житлового приміщення;

- математичні моделі МП двожильних планарних та коаксіальних кабелів електромереж, та нагрівальних кабелів систем електрообігріву підлог житлових приміщень, методики розрахунку їх МП;

- аналітична модель МП СКЕ підлог житлових приміщень на основі планарних та коаксіальних нагрівальних кабелів і методика розрахунку індукції їх МП;

- методи визначення комплексного впливу групи електромереж на рівень сумарного МП в житлових приміщеннях, та нормалізація сумарного МП на їх основі.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертації, результати та висновки обговорено на: міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2014 р.); міжнародних симпозіумах «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки «SIEMA» (<https://web.kpi.kharkov.ua/siema/1503-2/>), (м. Харків, 2017 – 2025 рр., 10 доповідей) ; 2-му семінарі з інженерної оптимізації «WEO 2021» (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>) (Warsaw, Poland, 2021 р.); науково-практичних конференціях «Фізичні фактори довкілля та їх вплив на формування здоров'я населення» та «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України» (<https://health.gov.ua/events/conferences/marzieiev-readings/>) (Київ, 2021 р., 2022 р.); семінарах «Магнітне поле технічних об'єктів. Проблеми моделювання та вимірювання» Наукової Ради НАН України «Наукові основи електроенергетики» (<https://ied.org.ua/naukovi-podiyi/naukovi-seminary/>) (м. Харків, 2013 – 2024 р., 11 доповідей).

Публікації. Результати наукових досліджень викладено в 31 друкованих наукових працях, з яких: 21 – стаття у періодичних наукових фахових виданнях, з яких 13 у виданнях, внесених до наукометричних баз SCOPUS та/або Web of Science (Q3 – 5, Q2 – 1); 8 – статей в періодичних наукових фахових виданнях категорії Б; 10 – опубліковані у матеріалах апробаційного характеру.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації двома мовами, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 425 сторінок. Робота містить 295 сторінок основного тексту, 364 найменувань використаних джерел на 43 сторінках, 3 додатки на 64 сторінці, 144 рисунків за текстом, 44 таблиць за текстом.

РОЗДІЛ 1

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ЖИТЛОВИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ТА ШЛЯХИ ЇЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

1.1 Електромагнітне поле електромереж промислової частоти та його електрична і магнітна складові

Під електромережами (ЕМ) відповідно до [4] розуміємо сукупність електроустановок (ЕУ) для передавання та розподілу електричної енергії, які включають високовольтні ЛЕП, ТП та розподільні підстанції (РП), і лінії, які доставляють електроенергію до кінцевих споживачів. При цьому ЕУ – це комплекс взаємопов'язаного електрообладнання, призначеного для виробництва, передачі, розподілу, перетворення або споживання електричної енергії. Він включає в себе різне обладнання, таке як машини, апарати, лінії, допоміжне обладнання, а також будівлі і приміщення, де вони встановлюються.

В рамках дисертації розглядаються ЕМ, які формують МП всередині житлових приміщень. При цьому житлові приміщення будинків повинні відповідати санітарно-гігієнічним вимогам [4-13] щодо обмеження в них ГДР ЕП і МП для населення. Виконання цих вимог і забезпечить електромагнітну сумісність ЕМ з житловим середовищем.

До ЕМ, що розглядаються, в першу чергу відносяться потужні ЕМ, які розташовані поблизу житлових будинків, або вбудовані в них, а також внутрішні ЕМ житлових приміщень. Це можуть бути зовнішні високовольтні ЛЕП напругою 0,4-330 кВ, вбудовані в житлові будинки ТП 6(10)/0,4 кВ, а також внутрішні ЕМ житлових приміщень напругою 0,22 кВ (ВЕЖ та СКЕ).

Електричні мережі створюють ЕМП промислової частоти 50-60 Гц, дослідженню якого присвячена велика кількість публікацій [14-52].

При цьому математична модель ЕМП ЕМ описується системою рівнянь Максвелла [53-56]. Із сучасних зарубіжних наукових праць з теорії Максвелла

вказемо на фундаментальні монографії [57, 58]. Сучасні інженерні застосування теорії Максвелла представлені в [59, 60].

Рівняння Максвелла визначають ЕМП в середовищах зі властивостями, які змінюються безперервно, або кусково-неперервно, і є основою для аналітичного і чисельного моделювання будь-яких електромагнітних процесів, як у вакуумі, так і в матеріальних середовищах. В рамках даного аналізу рівняння Максвелла будуть цікавити нас як система диференціальних рівнянь в частинних похідних, яка підлягає математичному дослідженню і чисельному рішенню. Більш того, надалі при описі МП ЕМ будуть зроблені спрощення системи Максвелла, які дозволять розділити вивчення електричної і магнітної складових ЕМП (ЕП і МП) при моделюванні ЕМП промислової частоти.

Нагадаємо, що в нерелятивістському випадку найповнішою моделлю для розгляду електромагнітних процесів в матеріальних середовищах є наступна система рівнянь [54]:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial_t \mathbf{D} + \mathbf{j}_{ex}, \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \quad (1.2)$$

де $\mathbf{E}$ – напруженість електричного поля;

$\mathbf{H}$ – напруженість магнітного поля;

$\mathbf{D}$ и $\mathbf{B}$ – вектори електричної та магнітної індукції;

$\mathbf{j}$ – густина струму провідності;

$\mathbf{j}_{ex}$ – густина сторонніх струмів, створених джерелами, що знаходяться за межами даної області.

Першим рівнянням є узагальнений закон Ампера, який стверджує, що густина повного струму є вихором напруженості МП. Друге рівняння містить диференціальне формулювання закону Фарадея про те, що зміну в часі магнітної індукції породжує вихрове електричне поле.

Ця система рівнянь доповнюється ще двома незалежними рівняннями:

1) рівнянням безперервності, яке є законом Кулона і стверджує, що джерелом електричної індукції є густина вільних (не пов'язаних безпосередньо з середовищем) зарядів;

2) виражене в диференціальній формі ствердження про соленоїдальність вектора магнітної індукції і про відсутність вільних магнітних зарядів:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho, \quad (1.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0. \quad (1.4)$$

Ці рівняння зв'язують п'ять векторних величин: $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{D}, \mathbf{B}, \mathbf{j}$. Їх слід доповнити співвідношеннями, що встановлюють зв'язок між векторами поля в матеріальному середовищі. У загальному випадку ці співвідношення мають вигляд:

$$\mathbf{B} = \hat{\mu} \mathbf{H}, \quad \mathbf{D} = \hat{\epsilon} \mathbf{E}, \quad \mathbf{j} = \hat{\sigma} \mathbf{E}, \quad (1.5)$$

де $\hat{\mu}$ і $\hat{\epsilon}$ – тензори магнітної і діелектричної проникності;

$\hat{\sigma}$ – тензор електропровідності середовища.

Надалі розглядатимемо середовища, в яких властивості не залежать від векторів поля і частоти їх зміни в часі. Такі середовища називаються лінійними недиспергуючими. Крім того, як правило, вважатимемо їх за ізотропні. В цьому випадку, тензори магнітної і діелектричної проникності є скалярами. У вільному просторі (вакуумі):

$$\epsilon = \epsilon_0 = (1/36\pi) \times 10^{-9} \text{ Ф/м}; \quad \mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Г/м}.$$

З урахуванням цих матеріальних співвідношень, рівняння Максвелла можуть бути переписані у вигляді:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \varepsilon \partial_t \mathbf{E} + \mathbf{j}_{ex}, \quad (1.6)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \partial_t \mathbf{H}. \quad (1.7)$$

У такому записі вони пов'язують між собою тільки два вектори напруженості електричного і магнітного полів і складають повну систему незалежних рівнянь, достатньої (в сукупності з початковими і граничними умовами) для визначення ЕМП.

При розгляді окремих задач електротехніки, система Максвелла може бути спрощена. Особливо важливе значення в технічних застосуваннях займає квазістаціонарне ЕМП, до якого можна віднести і ЕМП ЕМ промислової частоти. Квазістаціонарним називається таке ЕМП, при вивченні якого можна нехтувати струмами зсуву в порівнянні із струмами провідності. В цьому випадку (1.6) набуває вигляду:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \mathbf{j}_{ex}, \quad (1.8)$$

Другим рівнянням квазістаціонарного наближення є (1.7), яке часто записують у вигляді:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}. \quad (1.9)$$

З рівняння (1.8) виходить, що квазістаціонарне ЕМП в кожному заданий момент часу повністю визначається розподілом електричних струмів в той же момент часу, і може бути знайдене по цьому розподілі так само, як це робиться для магнітостатичного поля [16]. Таким чином, різниця між квазістаціонарним і статичним полями виявляється тільки в рівнянні (1.9), яке описує виникнення індукованого електричного поля в змінних ЕМП. У більш загальній ситуації, коли фізичний простір включає провідні і непровідні області і нескінченно віддалені точки, необхідно використовувати так зване квазістатичне наближення

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \mathbf{j}_{ex}, \quad (1.10)$$

$$\operatorname{div} \mu \mathbf{H} = \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (1.11)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \quad (1.12)$$

$$\operatorname{div} (\epsilon \mathbf{E}) = 0. \quad (1.13)$$

Відзначимо, що ця система по суті розпадається, як і у разі постійного поля, на пари послідовно вирішуваних рівнянь (1.10), (1.11) і (1.12) (1.13). Перша з них повністю незалежна від іншої, оскільки ЕП, яке міняється поволі, в погано провідному середовищі, створює нехтовно малі струми провідності і зсуву і тому не породжує МП.

Таким чином, теоретичною основою для моделювання та розрахунку МП ЕМ промислової частоти, є спрощена система рівнянь Максвелла (1.10) – (1.11), що обумовлює окремий розгляд МП і ЕП.

1.2 Сучасне санітарно-гігієнічне нормування магнітного поля для населення

Через квазістаціонарний характер ЕМП ЕМ промислової частоти (1.10–1.13), їх електрична (ЕП) та магнітна (МП) складові розглядаються окремо, на відміну від високочастотних полів [16]. Відповідно, вимірювання, розрахунок та санітарно-гігієнічне нормування рівнів ЕП і МП для населення, яке визначає рівень індуктивної електромагнітної сумісності ЕМ з житловим середовищем, також виконуються роздільно [61, 62].

Нормуванню ЕМП ЕМ присвячені багаточисельні наукові дослідження [7-12, 61-90].

Раніш, у ХХ столітті, при санітарно-гігієнічному нормуванні приймалась до уваги тільки сильна миттєва дія складових ЕМП частотою 50-60 Гц (напруженість ЕП в одиниці кВ/м, індукція МП в одиниці мТл). Такі ЕП і МП

можуть призводити до миттєвого індукування в тілі людини небезпечного струму, що може призвести до паралічу легенів та серця. При цьому довготривала дія слабого ЕП та МП на тіло людини раніш не враховувалася.

Прикладом нормування короткотривалого впливу МП на населення є рекомендації міжнародної комісії із захисту від неіонізуючих випромінювань ICNIRP (The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [74]. Але в Україні, також як і в Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) і окремих країнах Європи, все більш прийнятою стає більш зважена концепція регламентування довготривалого впливу МП для населення житлових будинків. Вона заснована на проведених в кінці 20-го століття в США і Швеції масових медико-статистичні дослідженнях населення, що проживає поблизу ЛЕП [65-68]. Ці дослідження виявили канцерогенні властивості слабого (з індукцією в долі мкТл) МП промислової частоти (50-60 Гц).

З того часу МП вважається більш небезпечним для здоров'я, ніж ЕП ЛЕП, оскільки навіть при його слабкій, але довготривалій дії підвищується ймовірність виникнення онкологічних захворювань і генетичних мутацій, а динаміка росту МП в середовищі довгострокового перебування людей співпадає з динамікою ракових захворювань [65-68]. На основі цих досліджень змінилась уява про найбільш небезпечний характер дії МП відповідно до табл. 1.1, а ВООЗ рекомендований безпечний рівень індукції МП 50 (60) Гц, який складає 0,25–0,5 мкТл [1, 2].

Тому сьогодні небезпечним вважається МП з індукцією більш 0,25 мкТл [2, 62, 69], слабка але довготривала дія якого на житлове середовище може призводити до мутації клітин організму і ракових захворювань у населення. Для захисту здоров'я людей від довготривалої дії МП ЕМ, необхідне істотне зменшення його рівня. Тому в світі приймаються все більш жорсткі санітарні гранично допустимі рівні (ГДР) індукції МП промислової частоти. Так в Європі відповідно до національних стандартів деяких країн Європи [2, 6, 8, 72], це ГДР від 0,2 до 3,0 мкТл (табл. 1.4). Інтенсивно розробляються та впроваджуються методи і засоби визначення та зменшення МП ЕМ електромереж.

Таблиця 1.1 – Характер негативного впливу МП промислової частоти 50 (60) Гц на організм людини

Характер впливу	Допустимий рівень магнітної індукції	Результат впливу	Негативний ефект	Історія виявлення
Сильний миттєвий вплив	1000–2000 мкТл	Індукування в тілі людини струмів з діючим значенням більше 10 мА	Судомні скорочення м'язів аж до паралічу дихання і серця	19-е століття
Слабкий тривалий (роки) вплив	0,25–0,5 мкТл	Зростання ракових клітин	Підвищення ймовірності онкологічних захворювань	Кінець 20-го століття (Швеція, США)

Питання забезпечення комфортного проживання населення за МП в житлових будинках Європи, США, Канади, Австралії також регламентуються міжнародним стандартом SBM–2015 «Керівництво з оцінки будівельної біології для спальних приміщень» (Standard of building biology testing methods) [6], в якому рекомендується безпечний для проживання рівень індукції МП промислової частоти 50(60) Гц, наведений у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Міжнародний стандарт SBM–2015

Рекомендації з оцінки впливу МП змінного струму (50(60) Гц) для спальних приміщень.	Рівень індукції МП (<i>B</i>), мкТл	Характер негативного впливу на здоров'я людини
	< 0,2	Не впливає (No Anomaly)
	0,02 – 0,1	Не значний вплив (Slight Anomaly)
	0,1 – 0,5	Великий вплив (Severe Anomaly)
	>0,5	Надзвичайно великий вплив (Extreme Anomaly)

Рекомендації щодо рівня індукції МП в житлових приміщеннях, що зазначені в SBM–2015, визначають застереження, щодо біологічних ризиків, які з’являються в спальних районах. Згідно з табл. 1.2, серйозні аномалії (Severe Anomaly) МП відповідають рівню індукції 0,5 мкТл та мають великий негативний вплив на здоров’я людини і повинні бути обмежені хоча б на цьому рівні. Стандарт SBM–2015 широко використовується в світі для коректування вартості будинків за рівнем комфорту проживання, в тому числі за рівнем МП.

В Україні вирішення проблеми санітарно-гігієнічного нормування МП промислової частоти для населення виконується в Інституті гігієни та медичної екології НАМН України (зараз Державна установа «Інститут громадського здоров’я НАМН України»). Там, під керівництвом одного із провідних вчених-гігієністів д.т.н., проф. Думанського Ю. Д., були науково обґрунтовані гранично допустимі для населення при довготривалому впливі рівні діючого значення індукції МП промислової частоти величиною 0,5 мкТл [7], що були прийняті Міненерго України для житлових приміщень [4] і чинні з 2010 року. Вони відповідають сучасному світовому рівню, а також рекомендаціям ВООЗ і наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Чинні гранично допустимі рівні діючого значення індукції МП промислової частоти для населення, що прийняті в енергетичній галузі України (Табл. 2.3.2., ПУЕ, 2017)

Найменування територій	Допустимий рівень індукції магнітного поля
- усередині житлових приміщень,	0,5 мкТл
- на відстані 50 см від стін та побутових приладів;	3 мкТл
- на території житлової забудови;	10 мкТл
- у населеній місцевості.	20 мкТл

Але до сьогодні в Україні гранично допустимий рівень ЕМП промислової

частоти для населення на державному рівні регламентується нормативним документом ДСН 239-96 «Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань» [12]. В цьому документі єдиним фактором ЕМП, що негативно впливає на здоров'я населення визначено тільки ЕП, ГДР напруженості якого складає 0.5 кВ/м всередині житлових будинків і 1 кВ/м на території зони житлової забудови. При цьому ГДР індукції МП ніяк не визначено.

Відповідно до [12], для захисту населення від впливу ЕП встановлені санітарно-захисні зони для повітряних ЛЕП, якими вважається територія, на якій напруженість ЕП перевищує 1 кВ/м. Санітарно-захисна зона для ЛЕП [11] встановлюється у вигляді земельної ділянки, межі якої регламентуються по обидві сторони від неї на певній відстані від проекції крайніх фазних проводів на землю, в перпендикулярному до ПЛ напрямку: 20 м для ПЛ напругою 300 кВ; 30 м для ПЛ напругою 500 кВ; 40 м для ПЛ напругою 750 кВ; 55 м для ПЛ напругою 1150 кВ.

Охоронні зони об'єктів енергетики [11] встановлюються вздовж повітряних та кабельних ліній електропередачі та навколо електростанцій, електropідстанцій, струмопроводів і пристроїв, для забезпечення нормальних умов експлуатації об'єктів енергетики, запобігання ушкодженню, а також зменшення їх негативного впливу на людей та довкілля, суміжні землі та інші природні об'єкти.

Відповідно до [11] встановлені розміри охоронних зон електричних мереж уздовж повітряних ЛЕП – у вигляді земельної ділянки та повітряного простору, обмежених вертикальними площинами, що віддалені по обидва боки лінії від крайніх проводів за умови їх не відхиленого положення на таку відстань по горизонталі, на якій напруженість ЕП перевищує 1 кВ/м: 2 метри – до 1 кВ; 10 метрів – 3-20 кВ; 15 метрів – 35 кВ; 20 метрів – 110 кВ; 25 метрів – 150 кВ, 220 кВ; 30 метрів – 330 кВ, 400 кВ, 500 кВ; 40 метрів – 750 кВ. Ці охоронні зони, також як і санітарно-захисні зони, встановлені з урахуванням тільки напруженості ЕП без урахування МП.

Проте реальні рівні МП на межі межами встановлених за ЕП охоронних зон повітряних ЛЕП на сьогодні досліджено недостатньо.

Тому актуальною є задача дослідження фактичного рівня МП на межі чинних охоронних зон діючих повітряних ЛЕП напругою 0,4–330 кВ та підготовка пропозицій щодо визначення на державному рівні санітарно-захисних зон за МП для повітряних ЛЕП, індукція якого на їх межі в номінальних режимах роботи ЛЕП не повинна перевищувати ГДР 0,5 мкТл [4].

Вимоги сучасних світових стандартів з допустимого рівня довготривалого впливу МП промислової частоти (50-60 Гц) для населення, національні стандарти деяких країн Європи [2, 6, 8, 72], а також нормативні документи України [6], Міненерго України [4], та Державні будівельні норми України [9] зведені у табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Сучасні світові стандарти з допустимого рівня МП промислової частоти (50–60 Гц) для населення

Країни/ міжнародні організації	Гранично допустимий рівень індукції магнітного поля (ГДР)	Примітка
1	2	3
Рекомендації міжнародної комісії з неіонізуючого радіаційного захисту (CNIRP)	100 мкТл	Короткочасний вплив
Всесвітня організація охорони здоров'я (WHO)	0,2–0,3 мкТл	Рекомендації ВООЗ (довготривалий вплив)
Міжнародний стандарт SBM–2015 із забезпечення комфортного проживання населення.	0,5 мкТл	Умови комфортного проживання у житлових приміщеннях (довготривалий вплив)
Італія	3 мкТл	Національні стандарти

Продовження таблиці 1.4

1	2	3
Швейцарія	1 мкТл	Національні стандарти (довготривалий вплив)
Україна	Не визначено	Національний стандарт ДСН 239-96
Україна	0,5 мкТл	Нормативні документи Міненерго України. (ПУЕ)

Таким чином, рівень індукції МП частотою 50 Гц, що при довготривалій дії має властивості канцерогену класу «В» [7, 10, 62, 69, 75, 79, 81, 83-85] і повинен бути обмежений у житлових приміщеннях, принаймні, до гранично допустимого рівня 0,5 мкТл.

Особливості нормування МП ЛЕП. В якості нормування і контролю інтенсивності МП найбільш поширеним в світовій науково-технічній літературі є діюче значення вектору індукції МП [10]:

$$B_k(P) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [b(P, t)]^2 dt} = \frac{b_m(P)}{\sqrt{2}} = \frac{|\mathbf{b}(P)|_{\max}}{\sqrt{2}}, \quad (1.14)$$

де $T = 2\pi / \omega$ – період коливань;

$|\mathbf{b}|_{\max}$ – максимальне значення модуля вектору індукції, яке у разі однофазної лінії збігається з амплітудним значенням.

Проте, в ряді визначених в [91] досліджень розглядається еліптичний характер електромагнітного поля трифазної лінії і, на цій підставі, пропонується змінити контрольовану характеристику як магнітного, так і електричного поля. Зокрема, даючи визначення контрольованої характеристики напруженості поля, пишуть, що таким є ефективне (діюче) значення синусоїди, що має амплітуду,

яка дорівнює великій півосі еліпса, що описується вектором напруженості в даній точці. Для з'ясування доцільності такого підходу, розглянемо гармонійне в часі МП однофазної лінії.

В однофазній лінії струм змінюється в часі за гармонійним законом $i(t) = I_m \sin(\omega t)$ і, оскільки середовище лінійне, кожна компонента вектору індукції і її модуль міняються за таким же законом: $b_x, b_z, |\mathbf{b}| \sim \sin(\omega t)$. На рис. 1.1 а показана траєкторія (пряма АОВ), що описується вектором індукції і на рис. 1.1 б – графік зміни $|\mathbf{b}|$ за період $T = 2\pi / \omega$. Максимум модуля $|\mathbf{b}|_{max}$ досягається двічі за період при положенні вектора А і В. Мінімальне значення $|\mathbf{b}|$ дорівнює нулю.

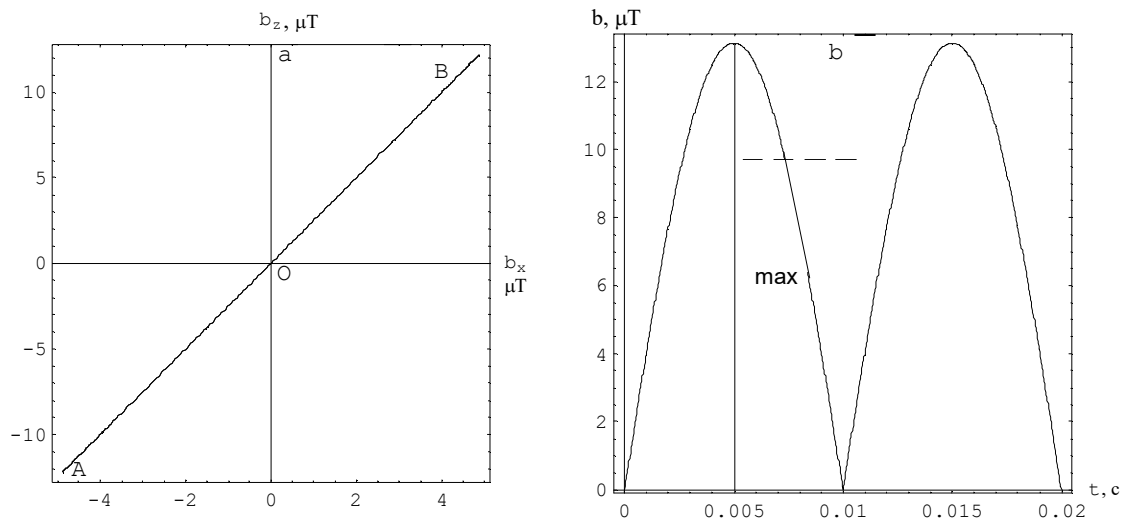


Рисунок 1.1 – Однофазна ЛЕП: а) траєкторія руху $\mathbf{b} = (b_x, b_z)$;

б) графік зміни $|\mathbf{b}|$ за період $T = 2\pi / \omega$

Розглянемо МП трифазної лінії. В цьому випадку, як показано на рисунку 1.2 а, вектор $\mathbf{b}$ у площини (b_x, b_z) рухається по еліпсу з центром на початку координат, проходячи весь еліпс за період $T = 2\pi / \omega$. На рисунку 1.2 б показана зміна $|\mathbf{b}(t)|$ за період часу T . Величина максимуму модуля індукції $\max|\mathbf{b}| = b_{max}$ тепер дорівнює довжині більшої півосі еліпса, а мінімальне значення $|\mathbf{b}|$ не дорівнює нулю [91].

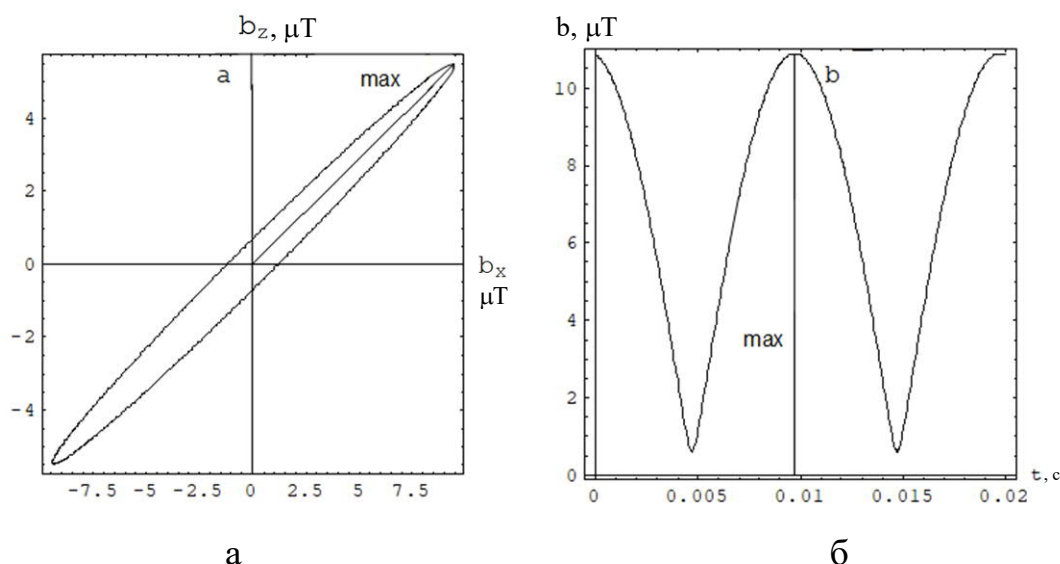


Рисунок 1.2 – Траєкторія вектору індукції МП трифазної ЛЕП: а) еліптичне поле – траєкторія руху $\mathbf{b} = (b_x, b_z)$; б) графік зміни $|\mathbf{b}|$ за період $T = 2\pi / \omega$.

Отже, згідно цій методиці, розрахунок контрольованої характеристики МП відбувається у наступний спосіб. Визначається максимальна за період величина $b_{\max}$. Далі у розгляд вводиться деяка уявна однофазна лінія, що створює магнітне поле з амплітудним значенням $b_{\max}$. Діюче значення індукції

$$B_k = b_{\max} / \sqrt{2} \quad (1.15)$$

приймається як контрольована характеристика при визначенні охоронної зони.

Слід зазначити, що наукові дані щодо біологічного впливу МП на живі організми, що свідчать про переваги того або іншого критерію, відсутні. Тому вибір між ними є конвенціональним. Проте, якщо розглянути граничний випадок обертового МП, в якому вектор індукції рухається по колу, залишаючись постійним по абсолютній величині b_0 , то контрольована характеристика, обчислена за формулою (1.14) дорівнює самій постійній величині b_0 , що є цілком природним; тоді як, застосовуючи формулу (1.15), ми отримуємо $b_0 / \sqrt{2}$, що важко обґрунтувати якими-небудь фізичними аргументами. Втім, як ми

побачимо далі, в багатьох практичних випадках різниця між (1.14) і (1.15) дуже мала і знаходиться в межах точності вимірювальних приладів.

Зупинимося на питанні порівняння розрахунків по формулах (1.14) і (1.15), тобто порівнюються два варіанти контрольованої величини. У табл. 1.5 представлені результати розрахунку характеристик магнітного поля трифазної лінії без розщеплювання фаз. Розглянуті наступні варіанти підвісу проводів:

- 1) з горизонтально розташованими провідниками;
- 2) з вертикальним розташуванням;
- 3) з розташуванням рівностороннім трикутником.

У всіх випадках відстань між провідниками 8 м. Висота підвісу нижнього проводу 8 м. Величина струму кожної фази 1000 А (діюче значення). Розрахунок проводився на рівні землі. У першій колонці кожного з варіантів поміщені дані розрахунку B_k , μT по формулі (1.14). У другій колонці представлена відносна різниця у відсотках $\Delta B_k, \%$ між даними розрахунку по формулі (1.14) і розрахунком з використанням більшої півосі еліпса (1.15).

Дані табл. 1.5 показують, що при горизонтальному і вертикальному розташуванні провідників величини МП, розраховані за обома методиками мало відрізняються один від одного і лежать в межах точності вимірювальних приладів. Еліпси, описувані вектором магнітної індукції, мають невелику малу піввісь і дуже відрізняються від кола.

Таблиця 1.5 – Результати розрахунку індукції МП трифазної ЛЕП

Відстань від проекції центру підвісу до точки спостереження	Варіанти підвісу проводів і індукція МП					
	Горизонтальний		Вертикальний		Рівносторонній трикутник	
х, м	$B_k, \mu T$	$\Delta B_k, \%$	$B_k, \mu T$	$\Delta B_k, \%$	$B_k, \mu T$	$\Delta B_k, \%$
1	2	3	4	5	6	7
0	25	13.4	15.0	0	18.5	6.5

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4	5	6	7
5	23.7	6.7	12	0.3	15.8	8.0
15	11.1	0.7	5.0	0.98	6.2	14.1
20	6.75	0.3	4.2	0.95	4.0	16.5
50	1.1	0.01	1.0	0.35	0.75	23.2
100	0.28	0	0.27	0.10	0.2	26.1

Мінімальне значення модуля вектора індукції близько до нуля. Приклад такої траєкторії вектора індукції показаний на рис. 1.2, який відповідає горизонтальному розташуванню провідників.

Абсолютно інша картина спостерігається при розташуванні проводів ЛЕП у вигляді рівностороннього трикутника (рис. 1.3).

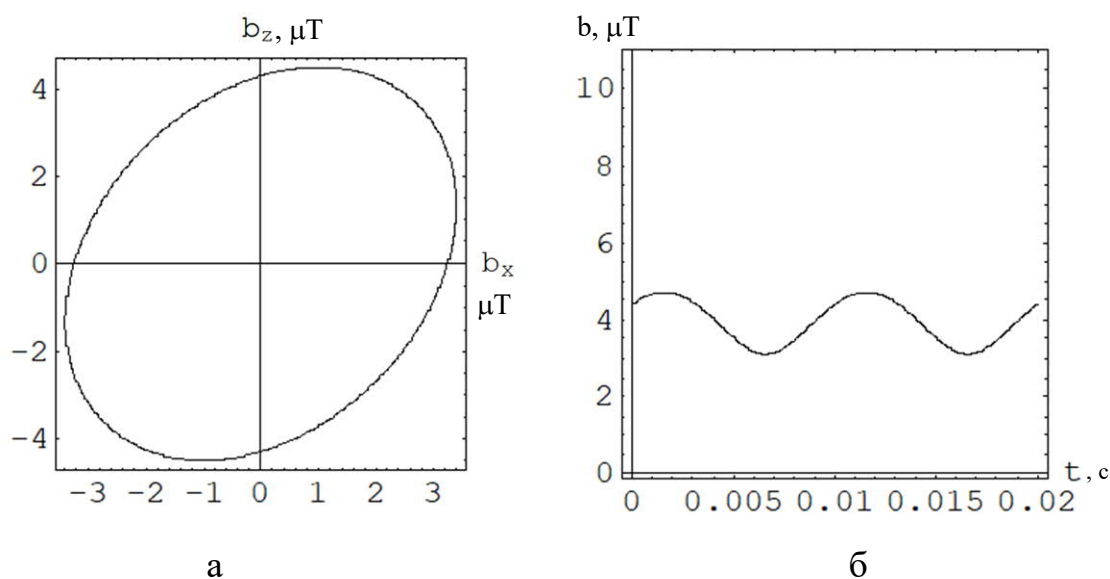


Рисунок 1.3 – Траєкторія вектору індукції МП трифазної ЛЕП при розташуванні проводів у вигляді трикутника: а) траєкторія вектора індукції $\mathbf{b}$ у площині (b_x, b_z) ; б) графік зміни $|\mathbf{b}|$ за період $T = 2\pi / \omega$

Тут різниця між величинами індукції, розрахованими за двома методами, дуже значна і не спадає при віддаленні від ЛЕП. При цьому максимальне відхилення 26,1% спостерігається на відстані 100 м від осі ЛЕП. Проте, слід

врахувати, що на такій відстані абсолютна величина модуля вектора індукції МП менше 0,5 мкТ, тому різниця в розрахунках неістотна.

На рисунку 1.3 показані а) траєкторія вектора індукції $\mathbf{b}$ у площини (b_x, b_z) і б) графік зміни $|\mathbf{b}|$ за період $T = 2\pi / \omega$. Точка, в якій проводився розрахунок, розташована на поверхні землі при $x=20$ м. Видно, що еліпс близький до кола, а як показано вище, в граничному наближенні до кола дві контрольовані величини поля відрізняються множителем $\sqrt{2}$.

Таким чином, врахування еліптичності МП при розрахунку та контролі індукції МП трифазних ЛЕП, є недоцільним [91] у зв'язку з суттєвим ускладненням розрахунку та вимірювання при незначному та неоднозначному зменшенні похибки розрахунку. Це підтверджується її світовою практикою переважної більшості країн світу, де в якості контрольованої і нормованої величини МП є діюче значення вектору його індукції.

Разом з тим, величина еліптичності МП ЛЕП з різною конфігурацією підвісу проводів успішно використовується в [92-97] для налаштування систем активного екранування МП ЛЕП.

1.3 Відомі методи математичного моделювання, розрахунку та визначення магнітного поля електромереж

Методам математичного моделювання, розрахунку та визначення МП ЕМ присвячені багаточисельні наукові дослідження [13, 53-60, 89, 90, 91, 98-158]. Розглянемо ці методи більш детально.

Як показує аналіз, виконаний у підрозділі 1.1 дисертації, розрахунок МП ЕМ найчастіше ведеться в однорідному середовищі $\mu = \mu_0 = \text{const}$ (повітря). Тому (1.11) можна представити у вигляді

$$\text{div} \mathbf{H} = 0. \quad (1.16)$$

Рівняння (1.10) свідчить, що МП є вихровим і тому не може описано потенціалом U_m у всьому просторі. Проте, там де відсутні струми, наприклад, за межами провідників ЛЕП, поле безвихрове, і використання потенціалу допустиме. У цій області можна ввести скалярний магнітний потенціал і записати вектор напруженості МП у вигляді градієнту:

$$\mathbf{H} = -\nabla U_m. \quad (1.17)$$

Або, використовуючи по компонентний запис в Декартовій системі:

$$H_x = -\frac{\partial U_m}{\partial x}, \quad H_y = -\frac{\partial U_m}{\partial y}, \quad H_z = -\frac{\partial U_m}{\partial z}. \quad (1.18)$$

При дослідженні плоскопаралельного поля, яке притаманне більшості ЕМ, ефективним є використання скалярного потенціалу. В цьому випадку можна використовувати апарат функцій комплексного змінного [106], розглядаючи U_m як дійсну частину повного комплексного потенціалу.

Рівнянню (1.10) також можна надати вигляду, зручнішому для розрахунку зовнішнього МП ЛЕП. Напруженість МП $d\mathbf{H}(t)$, яка викликана струмом $i(t)$, що протікає по лінійному відрізку провідника $d\mathbf{l}$, визначається законом Біо-Савара [53, 54]:

$$d\mathbf{H}(t) = \frac{i(t)}{4\pi R^3} (d\mathbf{l} \times \mathbf{R}). \quad (1.19)$$

Тут вектор $\mathbf{R}$ направлений від елементарного відрізка $d\mathbf{l}$ із струмом $i(t)$ до точки спостереження $P(x, y, z)$. Тоді, вектор напруженості магнітного поля від струму, що протікає по лінії L рівний:

$$\mathbf{H}(P, t) = \frac{i(t)}{4\pi} \int_L \frac{(d\mathbf{l} \times \mathbf{R})}{R^3}. \quad (1.20)$$

Рівняння (1.16) і (1.20), в більшості випадків, є основою при розрахунку МП ЛЕП за винятком тих випадків, коли розглядається поле поблизу струмопровідних провідників і перерозподіл густини струму по їх перетину. Це відноситься як до аналітичних, так і чисельних методів розрахунку.

Чисельні методи.

Більшість існуючих чисельних методів розрахунку зовнішнього МП ЕМ засновано на застосуванні закону Біо-Савара (1.19). Типовою в цьому класі робіт є схема розрахунку, викладена в [89, 90]. Провідники ЕМ замінюються ламаною лінією, що складається з прямолінійних відрізків (рис.1.4).

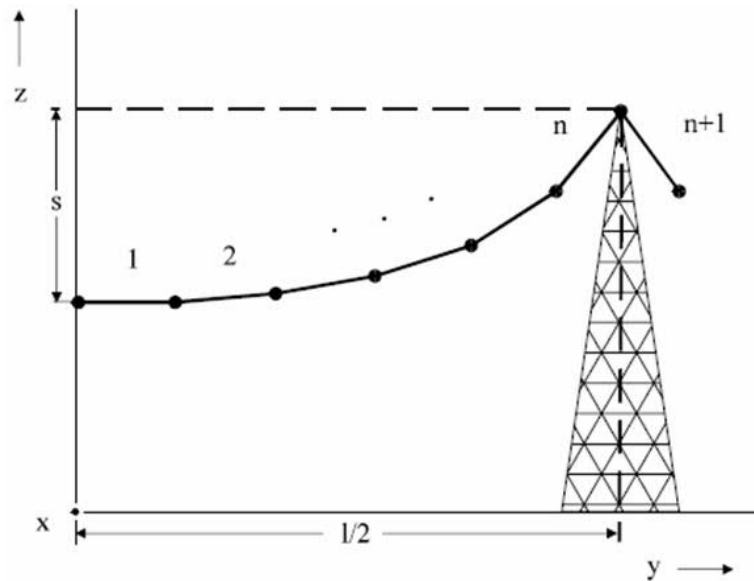


Рисунок 1.4 – Апроксимація криволінійного струмопроводу ЕМ ламаною лінією

По кожному нескінченно тонкому сегменту провідника завдовжки dl протікає струм $i(t)$. Згідно закону Біо-Савара (1.19) в точці з радіус-вектором $\mathbf{R}$ струм, що протікає по сегменту, генерує магнітне поле з індукцією

$$\mathbf{B}_k(t) = \frac{\mu_0 i(t)}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{(d\mathbf{l} \times \mathbf{R})}{R^3} = \frac{\mu_0 i(t)}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{(\mathbf{l} \times \mathbf{R})}{R^3} d\zeta, \quad (1.21)$$

де мається на увазі, що інтегрування проводиться по прямолінійному відрізку $[-L, +L]$, уздовж якого направлений одиничний вектор $\mathbf{l}$.

Для обчислення повного МП ЕМ досить підсумувати вектори індукції від всіх сегментів

$$\mathbf{B}(t) = \sum_{k=1}^N \mathbf{B}_k(t). \quad (1.22)$$

Тут N – число сегментів, що апроксимують провідник.

Слід зазначити, що вектори $\mathbf{B}_k(t)$ можуть бути обчислені в явному вигляді. Наприклад, розглянемо МП відрізка $-L < y < +L$ зі струмом $i(t)$, що проходить через початок координат в площині xOz . Вектор-диференціал уздовж відрізка рівний $d\mathbf{l} = d\zeta \mathbf{e}_y$. Радіус-вектор від джерела струму з координатами $(0, \zeta, 0)$ до точки спостереження $P = (x, y, z)$ має компоненти $\mathbf{R} = (x, y - \zeta, z)$. Векторний добуток рівний:

$$d\mathbf{l} \times \mathbf{R} = z d\zeta \mathbf{e}_x - x d\zeta \mathbf{e}_z; \quad R^3 = (x^2 + z^2 + (y - \zeta)^2)^{3/2}.$$

Тоді вектор індукції МП має компоненти:

$$B_x = \frac{\mu_0 i(t)}{4\pi} z \int_{-L}^L \frac{d\zeta}{[x^2 + z^2 + (y - \zeta)^2]^{3/2}}; \quad (1.23)$$

$$B_z = -\frac{\mu_0 i(t)}{4\pi} x \int_{-L}^L \frac{d\zeta}{[x^2 + z^2 + (y - \zeta)^2]^{3/2}}. \quad (1.24)$$

Інтеграл, у виразах (1.23) і (1.24) може бути записаний в явному вигляді:

$$\int_{-L}^{+L} \frac{d\zeta}{[x^2 + z^2 + (y - \zeta)^2]^{3/2}} = \left[-\frac{y - \zeta}{(x^2 + z^2)(x^2 + z^2 + (y - \zeta)^2)^2} \right]_{-L}^{+L}.$$

Тоді компоненти вектора індукції запишуться у вигляді:

$$B_x = -\frac{\mu_0 i(t)}{2\pi} \frac{z}{x^2 + z^2} \frac{1}{2} F(x, y, z, L) = B_x^\infty \frac{1}{2} F(x, y, z, L): \quad (1.25)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi} \frac{x}{x^2 + z^2} \frac{1}{2} F(x, y, z, L) = B_z^\infty \frac{1}{2} F(x, y, z, L), \quad (1.26)$$

$$\text{де } F(x, y, z, L) = \frac{y + L}{[x^2 + z^2 + (y + L)^2]^2} - \frac{y - L}{[x^2 + z^2 + (y - L)^2]^2};$$

B_x^∞ , B_z^∞ дорівнюють компонентам вектора індукції поблизу нескінченного провідника.

Таким чином $F(x, y, z, L)$ є поправочним коефіцієнтом, що враховує кінцеву довжину проводу. Так само можуть бути записані вектори індукції від кожного сегменту, а потім підсумовані для обчислення повного поля ЛЕП. Легко показати, що при $L \rightarrow \infty$ $F(x, y, z, L) \rightarrow 2$ і приведені вище формули збігаються з аналогічними виразами для МП ЛЕП з нескінченно довгими провідниками. Аналогічні чисельні методи розрахунку використані також в роботах [13, 100, 103].

Розрахунок зовнішнього МП ЕМ з урахуванням перерозподілу щільності струму по перетину.

Як було відмічено вище, більшість методів розрахунку зовнішнього МП ЕМ заснована на використанні закону Біо-Савара і не розглядає перерозподіл струму в перетині провідників. Проте, існує ряд робіт, в яких досліджується розподіл поля в безпосередній близькості від струмопроводів. Характерним прикладом цього класу робіт є [105], де використовується метод кінцевих

елементів для розрахунку розподілу поля навколо проводів ЛЕП. Індукція МП залежить від двох просторових змінних і змінюється в часі гармонійно з частотою ω так, що задовольняє еліптичному рівнянню другого порядку

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial B}{\partial y} \right) - (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)B = 0.$$

У цьому рівнянні σ провідність середовища, а ε її діелектрична проникність. Дане рівняння описує розподіл МП як в повітряному середовищі, так і в перетині провідників.

Для розрахунків використовувалася сітка кінцевих елементів, яка показана на рис. 1.5. Показана концентрація вузлів сітки навколо трифазних провідників і двох заземлювачів (охоронних провідників). Результати розрахунків, відповідні сітці на рис. 1.5, показані на рис. 1.6. Добре видно збільшення індукції МП поблизу провідників.

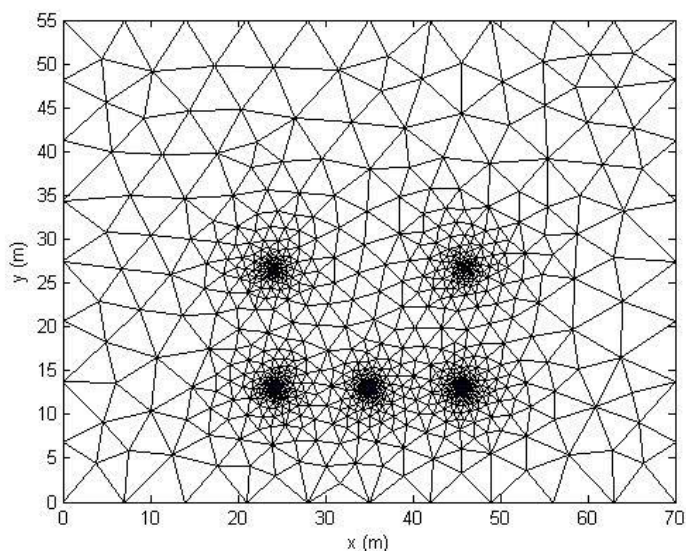


Рисунок 1.5 – Сітка кінцевих елементів навколо струмопровідних і охоронних провідників

Подібний підхід був застосований в роботі [105] при дослідженні конструкції опори на розподіл МП ЛЕП в безпосередній близькості від опори. У

цій роботі було використано те ж саме рівняння для напруженості поля. Разом з цим проводився розрахунок щільності струму, що індукується в макеті людського тіла, розташованого поблизу ЛЕП [158].

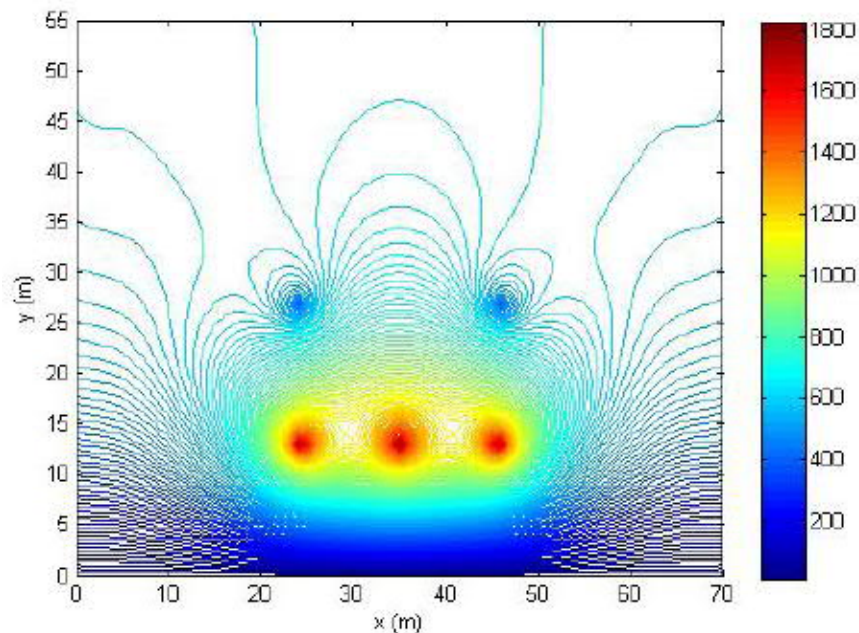


Рисунок 1.6 – Результат розрахунку розподілу модуля індукції (мкТл) поблизу провідників ЛЕП 500 кВт

Разом з тим, слід підкреслити, що розрахунки МП ЛЕП, що засновані на дискретизації області рішення поблизу провідників, відносно рідкісні і більшість методів заснована на застосуванні закону Біо-Савара. Сіткові методи має сенс використовувати тільки в тих випадках, коли обчислюється власна або взаємна індуктивність провідників ЛЕП, вивчаються теплові процеси, пов'язані з джоулевим нагрівом провідників або коли досліджується таке специфічне явище, як коронний розряд навколо провідників.

Метод комплексних амплітуд (метод фазорів) для розрахунку МП ЕМ.

Методи розрахунку характеристик МП, що описані в попередніх розділах, оперують лише фізично вимірюваними величинами в якості основних параметрів. Первинними параметрами, одержуваними при вимірюванні МП ЛЕП, є діючі значення просторових компонент вектору індукції, на застосуванні

яких і засновані розглянуті вище методи.

Метод комплексних амплітуд, або фазорів [106], використовується для опису гармонійного в часі процесу. Фазор (phasor) – це вектор, який обертається на комплексній площині та має модуль A і швидкість обертання ω радіан/сек. У будь-який момент часу сигнал може бути представлений у вигляді $x(t) = a + jb$, де a – дійсна частина сигналу і b – уявна частина сигналу [106] в прямокутній системі координат. Сигнал можна також представити у полярних координатах (із зазначенням амплітуди сигналу та напрямку фазової швидкості сигналу) $x(t) = Ae^{j(\omega t)}$.

Використання методу комплексних амплітуд зводить аналітичні розрахунки МП до звичайних алгебраїчних маніпуляцій з геометричними (звичайними) векторами (сума, різниця, проекція). Таким чином, формалізм комплексних векторів (фазорів) може бути застосований в електромагнітних розрахунках у тих випадках, коли досліджуються гармонічні за часом процеси. Векторне поле $\mathbf{F}(t)$ або т.зв. «синусоїдальне» поле, яке гармонічно змінюється у часі, – це дійсна векторна функція часу t , яка задовольняє рівнянню [106]:

$$\frac{d^2}{dt^2} \mathbf{F}(t) + \omega^2 \mathbf{F}(t) = 0.$$

Його загальне розв'язання можна записати, використовуючи дві довільні постійні $\mathbf{F}_1$ і $\mathbf{F}_2$ у вигляді:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{F}_1 \cos \omega t + \mathbf{F}_2 \sin \omega t. \quad (1.27)$$

Комплексний вектор $\dot{\mathbf{f}}$ визначається як комбінація двох дійсних векторів:

$$\dot{\mathbf{f}} = \mathbf{f}_{re} + j\mathbf{f}_{im}. \quad (1.28)$$

де $\mathbf{f}_{re}$ – дійсна частина;

$\mathbf{f}_{im}$ – уявна частина.

Суттєва властивість формалізму комплексних векторів полягає у взаємно однозначній відповідності між комплексними і гармонічними за часом векторами:

$$\dot{\mathbf{f}} \leftrightarrow \mathbf{F}(t).$$

Фактично, існують два відображення, які дають єдиний гармонічний вектор для будь-якого комплексного вектору і навпаки. Ці відображення такі:

$$\dot{\mathbf{f}} \rightarrow \mathbf{F}(t): \mathbf{F}(t) = \operatorname{Re}\{\dot{\mathbf{f}} e^{j\omega t}\} = \mathbf{f}_{re} \cos \omega t - \mathbf{f}_{im} \sin \omega t. \quad (1.29)$$

$$\mathbf{F}(t) \rightarrow \dot{\mathbf{f}}: \dot{\mathbf{f}} = \mathbf{F}(0) - j\mathbf{F}\left(\frac{\pi}{2\omega}\right) = \mathbf{F}_1 - j\mathbf{F}_2. \quad (1.30)$$

Відображення (1.29) і (1.30) є взаємно зворотними, в чому неважко переконатися, наприклад, підставивши (1.29) в (1.30):

$$\dot{\mathbf{f}} = \operatorname{Re}\{\dot{\mathbf{f}} e^0\} - j \operatorname{Re}\{\dot{\mathbf{f}} e^{j\pi/2}\} = \mathbf{f}_{re} + j\mathbf{f}_{im} = \dot{\mathbf{f}}.$$

Подальші відомості про використання комплексних векторів при розрахунку гармонійних процесів описані в монографії [106].

Для розрахунку МП поля ЕМ основний інтерес представляє наступна властивість фазорів. Нехай є N гармонійних джерел магнітного поля $F_i(\omega t + \gamma_i) = A_i \sin(\omega t + \gamma_i)$, $i = 1, \dots, N$, де A_i – амплітуда гармонічного процесу. Поставимо у відповідність кожній гармонічній функції комплексне число $\dot{f}_i = A_i e^{j\gamma_i}$. За правилами складання комплексних величин знайдемо суму:

$$\dot{f}_0 = \sum_{i=1}^N \dot{f}_i = \sum_{i=1}^N A_i e^{j\gamma_i}.$$

Тоді величина

$$\frac{|\dot{f}_0|}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{(\dot{f}_0 \dot{f}_0^*)}{2}} \quad (1.31)$$

дорівнює діючому значенню суми джерел.

Перевіримо формулу (1.31), обчислюючи діюче значення однофазної величини

$$d(t) = a \sin \omega t + b \cos \omega t = \sqrt{(a^2 + b^2)} \sin(\omega t + \psi).$$

Відповідний фазор дорівнює:

$$\dot{d} = a + b e^{j\pi/2} = a + jb.$$

Згідно (1.31) діюче значення дорівнює:

$$\tilde{d} = \sqrt{\frac{1}{2}(a + jb)(a - jb)} = \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)}.$$

Якщо визначити модуль комплексного вектору формулою:

$$\dot{\mathbf{f}} = (\dot{f}_1, \dot{f}_2, \dot{f}_3), |\dot{\mathbf{f}}|^2 = \dot{f}_1 \dot{f}_1^* + \dot{f}_2 \dot{f}_2^* + \dot{f}_3 \dot{f}_3^*,$$

то діюче значення векторної величини можна обчислювати, використовуючи формулу

$$\mathbf{F}(t) \rightarrow \dot{\mathbf{f}} : \tilde{F}_d = \sqrt{\frac{1}{2} |\dot{\mathbf{f}}|^2}. \quad (1.32)$$

Особливо корисна формула (1.32) при обчисленні діючого значення в багатофазній системі із часовими зсувами між фазними струмами. Наприклад, розрахунок діючого значення вектору індукції МП багатоланцюгової лінії, виглядає наступним чином.

1. Обчислюється комплексний вектор-фазор першої ЛЕП:

$$\dot{\mathbf{B}}^{(1)} = \mathbf{B}_A^{(1)} + \mathbf{B}_B^{(1)} \exp\left(j \frac{2\pi}{3}\right) + \mathbf{B}_C^{(1)} \exp\left(j \frac{4\pi}{3}\right).$$

2. Обчислюється комплексний вектор-фазор другої ЛЕП:

$$\dot{\mathbf{B}}^{(2)} = \mathbf{B}_A^{(2)} \exp(j\varphi_0) + \mathbf{B}_B^{(1)} \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{3} + \varphi_0\right)\right) + \mathbf{B}_C^{(1)} \exp\left(j\left(\frac{4\pi}{3} + \varphi_0\right)\right).$$

3. Обчислюється комплексний вектор усієї лінії:

$$\dot{\mathbf{B}} = \dot{\mathbf{B}}^{(1)} + \dot{\mathbf{B}}^{(2)}.$$

4) За формулою (1.32) обчислюється діюче значення індукції магнітного поля багатоланцюгової ЛЕП.

Очевидно, що, використовуючи цей алгоритм, легко розрахувати діюче значення МП багатоланцюгової ЛЕП з будь-якою кількістю ланок.

Метод комплексних амплітуд широко прийнятий в Європі при визначенні діючого значення індукції МП багатофазних джерел [107, 108]. Однак, такий метод дієвий тільки при припущеннях про двовимірний характер МП довгої трьохпровідної ЛЕП, і непридатний для ЕМ зі складною конфігурацією розщеплених проводів фаз. Крім того, цей метод є абстрактним і не дозволяє

використовувати для розрахунку фізичні величини – діючі значення індукції МП ЕМ, що підлягають як нормуванню, так і фізичному вимірюванню.

Метод розрахунку МП ЕМ на основі діючих значень індукції МП.

Ключове значення при розробці методики розрахунку МП ЛЕП має прийнятий за її основу метод розрахунку МП, що повинен враховувати специфічні особливості визначення діючого значення вектору індукції МП від трифазних джерел, а також практичну можливість його експериментальної верифікації. Спроба створення такого методу розрахунку була здійснена в методиці Міненерговугілля «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання: СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 в редакції 2008 року, Наказ Мінпаливенерго України від 20.10.2008 № 512 [98]. Однак вказана методика характеризується значною похибкою розрахунку, що викликана недостатньо обґрунтованою її теоретичною основою.

Так, в цій методиці проігноровано загальновідомий метод комплексних просторових векторів для розрахунку сумарного магнітного (електричного) поля у заданій точці простору як векторної суми (суперпозиції) полів від різних джерел [14]. Натомість електричне (магнітне) поле ЛЕП, яке є просторовою векторною величиною, помилково визначається шляхом підсумовування (формули 5.1, 5.8, 5.10 з [14]) скалярних величин, якими є введені авторами комплексні діючі значення індукції (напруженості) електромагнітного поля, створювані проводами різних фаз ЛЕП.

Крім того, математична операція підсумовування (формули 5.1, 5.8, 5.10 з [14]), що застосовується в методиці, діючих (середньоквадратичних) величин, які є нелінійними, не є некоректною, оскільки до нелінійних величин не застосовується принцип суперпозиції.

Автором здійснено експериментальну перевірку методики [98]. Вона виконана на лабораторних макетах повітряної та кабельної ЛЕП магнітовимірювального стенду інституту [15]. Її результати представлені на рис. 1.7, рис. 1.8 , де точки – результати експерименту, пунктирна лінія –

розрахунок згідно з методикою СОУ–Н [98], суцільна лінія – розрахунок перевіреним методом комплексних амплітуд [14, 16].

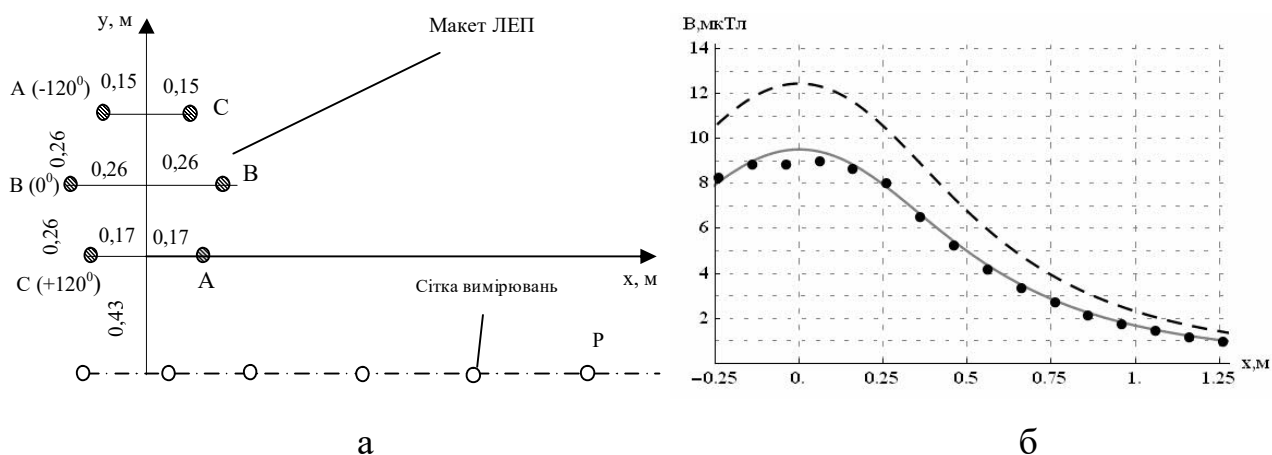


Рисунок 1.7 – Геометрія лабораторного макету досліджуваної повітряної ЛЕП (а) та порівняльні результати розрахунку індукції МП і експерименту (б) при струмі ЛЕП 39,5 А

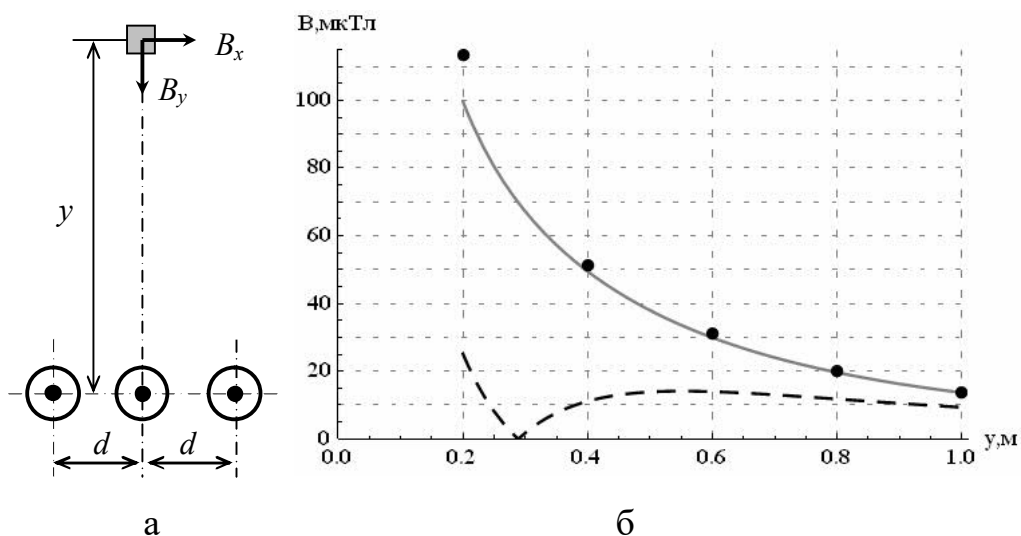


Рисунок 1.8 – Геометрія лабораторного макету досліджуваної кабельної ЛЕП (а) та порівняльні результати розрахунку індукції МП і експерименту (б) при струмі ЛЕП 95 А, $d=0,5$ м

Як впливає з наведених порівняльних результатів, похибка розрахунку за методикою [98] порівняно з результатами коректного розрахунку та експерименту є значною, і для повітряної ЛЕП перевищує 40%, що і зумовило у

2016 році виведення цієї методики із дії, та актуальність розробки нової, теоретично обґрунтованої і верифікованої, методики розрахунку МП ЛЕП.

Тому створення нових методів моделювання МП ЛЕП які, на відміну від відомих, дозволяють використовувати в якості розрахункових величин виключно діючі значення магнітної індукції, що підлягають як санітарно-гігієнічному нормуванню, так і фізичному вимірюванню високоточними однокомпонентними магнітометрами є актуальним. Такий підхід дозволить підвищити достовірність отриманого результату і на світовому рівні вирішувати соціально значимі проблеми захисту населення від негативної дії техногенного МП промислової частоти, що створюється високовольтними ЕМ.

Таким чином, подальший розвиток методів математичного моделювання та розрахунку МП електромереж доцільно спрямувати на створення коректних методів на основі діючих значень індукції МП.

1.4 Відомі методи та засоби зменшення магнітного поля електромереж

Зменшення МП ЕМ необхідно для його нормалізації. Під нормалізацією розуміємо зменшення діючого значення індукції МП промислової частоти, що створюється ЕМ у всьому просторі житлової зони (житлового приміщення), до гранично допустимого рівня санітарних норм для населення, який в Україні обмежений індукцією МП 0,5 мкТл [4, 7].

Методам та засобам зменшення МП електроустановок, до яких відносяться і ЕМ, та їх електрообладнання, присвячено значну кількість робіт [26, 102, 92-97, 99, 158-284]. Їхній аналіз дозволяє класифікувати методи нормалізації МП ЕУ відповідно до рис. 1.9.



Рисунок 1.9 – Основні методи нормалізації МП електроустановок

Для інженерної оцінки ефективності i -го методу нормалізації МП, що досліджується, використаємо коефіцієнт нормалізації K_{mi} ,

$$K_{mi} = \tilde{B}_{maxi} / \tilde{B}_{norm}, K_{mi} \in (1 \div n), \tilde{B}_{norm} = 0,5 \mu T, \quad (1.33)$$

який визначає необхідну величину зменшення максимального вихідного значення індукції $\tilde{B}_{maxi}$, що створюється ЕМ, до нормативного рівня 0,5 мкТл у всьому житловому просторі.

Розглянемо основні методи нормалізації МП ЕМ, що представлені на рис. 1.9.

Проектно-технологічні методи зменшення МП енергонасичених об'єктів (ЕНО) (рис. 1.9) [99, 162, 163, 164, 169, 206, 270] засновані на раціональному

проектуванні «магнітоактивних» конструктивних елементів електрообладнання (ЕО) та технологічних прийомах їх виготовлення, використання яких дозволяє мінімізувати МП за збереження функціональних характеристик ЕО та обмежений вплив на їх техніко-економічні показники. Конструктивно-технологічні методи не вимагають введення в структуру ЕО додаткових конструктивних елементів і по суті є переліком правил, якими необхідно керуватися при проектуванні та виготовленні ЕО зі зниженим рівнем МП.

Захист від МП відстанню. МП ЕО є потенційним (1.17), і спадає при віддаленні від джерела. Ця властивість МП ЕО широко використовується [99, 162] для зменшення МП ЕО шляхом введення певної дистанції між ЕО та житловою зоною, яка називається санітарно-захисною (охороною) зоною [11], за межами якої індукція МП повинна бути меншою від нормативного рівня.

Ширина санітарно-захисної (охороної) зони залежить від величини індукції МП та швидкості її спадання при віддаленні від джерела. Величина МП трифазних ЕМ [53] визначається величиною струму їх струмопроводів, та міжфазною відстанню між ними [99], а швидкість спадання залежить від гармонічного складу МП [99, 162].

Захист відстанню (введення охоронних зон навколо ЕО) довгий час був основним методом захисту [99, 162]. Однак в сучасних умовах подорожчання вартості земельних ділянок, цей метод, що потребує відчуження великих земельних ділянок [11], максимально обмежується.

Зменшення міжфазної відстані між струмопроводами ЕО. Як показано в [192], зменшення МП ЕО можливо при зменшенні відстані між струмопроводами фаз, коли ЕО виконується в компактному вигляді. Це стало можливим в зв'язку з появою якісної високовольтової ізоляції із зшитого поліетилену [17, 41, 192] і створення високовольтних кабельних ліній (КЛ) з меншою на порядок міжфазною відстанню у порівнянні з повітряними ЛЕП, і відповідного зменшення МП, що ілюструється рис. 1.10.

Як слідує з рис. 1.10, трансформація повітряної ЛЕП в сучасну КЛ з ізоляцією із зшитого поліетилену аналогічної потужності, дозволяє практично на

порядок зменшити ширину необхідної охоронної зони, і відповідно вартості відчужуваної земельної ділянки.

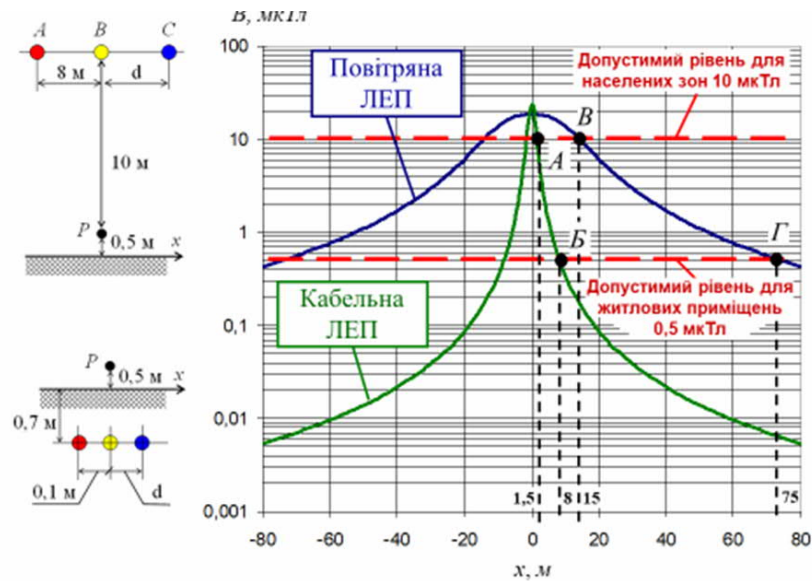


Рисунок 1.10 – Порівняння індукції МП повітряної ЛЕП 330 кВ (1 кА, $d=8\text{м}$) та МП еквівалентної за потужністю підземної КЛ 330 кВ (1 кА, $d=0,1\text{м}$)

Зменшення МП повітряних ЛЕП також досягається при їх виконанні із ізольованих проводів (СП) з ізоляцією із зшитого поліетилену (рис. 1.11), які виробляються на напругу 0,4-35 кВ [17, 41, 192].



Рисунок 1.11 – Повітряні ЛЕП на основі ізольованих проводів (Aerial Bundle Cable) для прокладання в житовій зоні

Істотне зменшення міжфазної відстані також можливо в ЕМ з плоскими струмопроводами, які прокладені в тунелях [18, 19]. Однак вартість розглянутих

компактних ЕМ істотно перевищує вартість стандартних повітряних ЛЕП, що обмежує їх практичну реалізацію [285].

Структурні методи зменшення МП. Як показано в роботах проф. Розова В.Ю. [99, 143, 155, 162, 163, 183, 270, 277], рівень і інтенсивність спадання МП залежить від величини несиметрії просторового розташування їх магнітоактивних елементів і рівня власної просторової гармоніки їх МП. Чим більш симетричною є структура ЕО, тим меншим є їх зовнішнє МП. Чим вищим є порядок власної основної гармоніки МП ЕО, тим меншим є їх зовнішнє МП, так як воно більш інтенсивно спадає в функції відстані.

Так, при дипольному характері МП ($p = 1$), воно спадає з інтенсивністю в 3 ступені від відстані, при $p = 2$ – квадруполь, при $p = 3$ – октуполь з інтенсивністю спадання МП в 5 ступені від відстані. Тому зменшення МП на певній відстані від ЕО може бути досягнуто шляхом симетрування геометрії струмопроводів [99, 164] та підвищенням порядку основної просторової гармоніки МП ЕМ [99, 163]. Прикладом симетрування геометрії струмопроводів ЕМ є перехід від горизонтального розташування трифазного струмопроводу до струмопроводу, фази якого розміщені у вершинах симетричного трикутника, коли МП при однакових міжфазних відстанях зменшується приблизно на 25% [20].

Тому, для створення ЕО зі зменшеним МП в доцільно використовувати запропонований в [99, 101, 162, 183, 270] загальний принцип структурування джерел МП в обсязі узагальненого енергонасиченого об'єкта, який полягає у формуванні такої просторової геометрії джерел магнітного поля в об'ємі об'єкта, забезпечує осьову (порядку $k = p$) і площині (щодо площини, перпендикулярної до цієї осі) симетрій.

Реалізація цього принципу для ЕМ можлива за виконання наступних умов: існує вісь симетрії підвісу проводів порядку $k > 1$, при повороті навколо якої на кут $2\pi/k$ розподіл векторів щільності струму $\vec{\delta}(t)$ ЕМ залишається незмінним; розподіл векторів щільності струму $\vec{\delta}(t)$ ЛЕП має дзеркальну симетрію щодо площини, перпендикулярної осі симетрії.

При цьому забезпечується зменшення рівня просторових гармонік МП ЕМ порядку $k < p$, у тому числі й дипольної гармоніки, що найбільш повільно затухає, а рівень МП в далекій області простору визначається власною гармонікою p ЕМ, яка визначається порядком осьової симетрії геометрії підвісу її проводів. Тут важливо зазначити, що порушення площинної симетрії призводить до появи невластних парних гармонік додатково до власних непарних і навпаки. Порушення осьової симетрії викликає появу невластних додаткових гармонік, порядок яких нижчий від основної власної.

З викладеного випливає, що підвищення порядку власної просторової гармоніки для ЛЕП можливе шляхом розщеплення проводів її фаз та удосконалення їх просторового розташування. Однак наукові засади структурних методів зменшення МП ЛЕП на основі удосконалення геометрії підвісу їх проводів, що не потребують додаткових засобів та відчуження земельних ділянок, на сьогодні відсутні і потребують першочергового розвитку.

Зменшення МП ЕМ шляхом його екранування. Екранування є найбільш поширеним методом захисту заданого простору від дії як ЕМП [195, 196], так і його магнітної складової.

Припустимо, що в точці простору P діє джерело змінного магнітного поля з індукцією $\mathbf{B}_u$ (рис. 1.12) та є область простору V_p , яку треба захистити від дії МП з допомогою екрану, який характеризується коефіцієнтом екранування K_E як відношення модуля індукції вихідного МП $|\mathbf{B}_u|$ до модуля індукції результуючого МП $|\mathbf{B}_{рез}|$,

$$K_E = \frac{|\mathbf{B}_{рез}|}{|\mathbf{B}_u|}. \quad (1.34)$$

Захист простору V_p може бути здійснений (рис. 1.12) або екрануванням цього простору (а), або екрануванням джерела МП (б). В залежності від матеріалу, екрани поділяються на електропровідні та магнітостатичні.

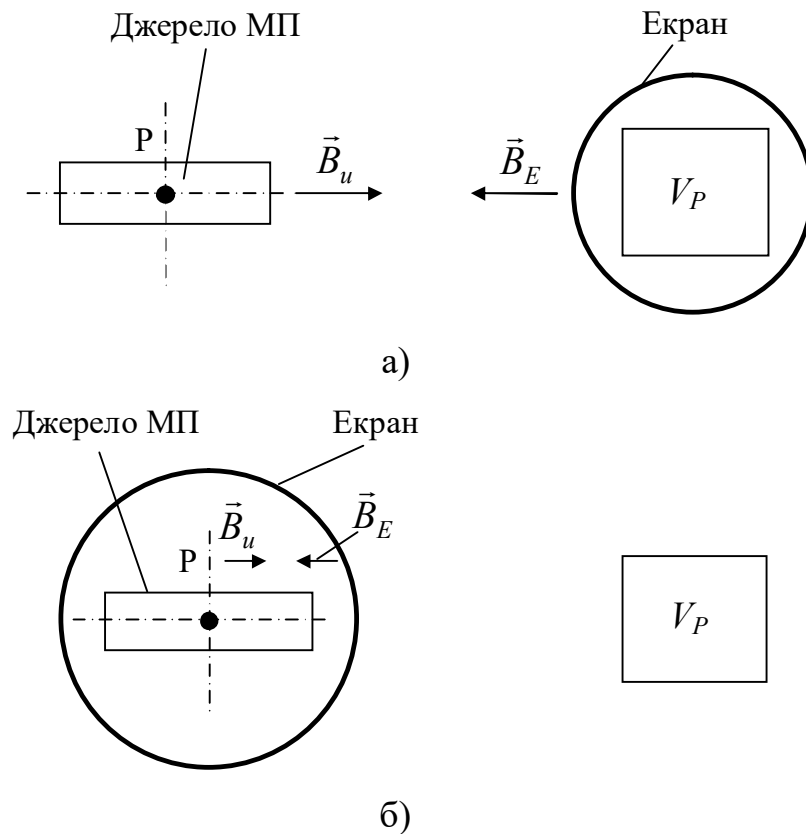


Рисунок 1.12 – Екранування простору V_P від джерела МП (а), та екранування джерела МП (б)

Електропровідні екрани виконуються у вигляді оболонок, що виготовляються з металу з високою електропровідністю (мідь, алюміній). Ефект екранування в них виникає внаслідок індукування в екрані під дією змінного МП мікроконтурних струмів, що створюють магнітне поле $\mathbf{B}_E$, вектор якого відповідно до закону Лоренца [195] в ідеальному випадку (активний опір екрану рівний нулю) спрямований назустріч МП $\mathbf{B}_u$ джерела.

Магнітостатичні екрани виготовляються у вигляді оболонок з ферромагнітного металу з високою магнітною проникністю. Ефект екранування в них досягається за рахунок замикання магнітного потоку джерела через поверхню екрану, що характеризується малим магнітним опором у порівнянні з магнітним опором середовища (μ екрана істотно більше μ_0). Дія електропровідного та магнітостатичного екранів ілюструється на рис. 1.13.

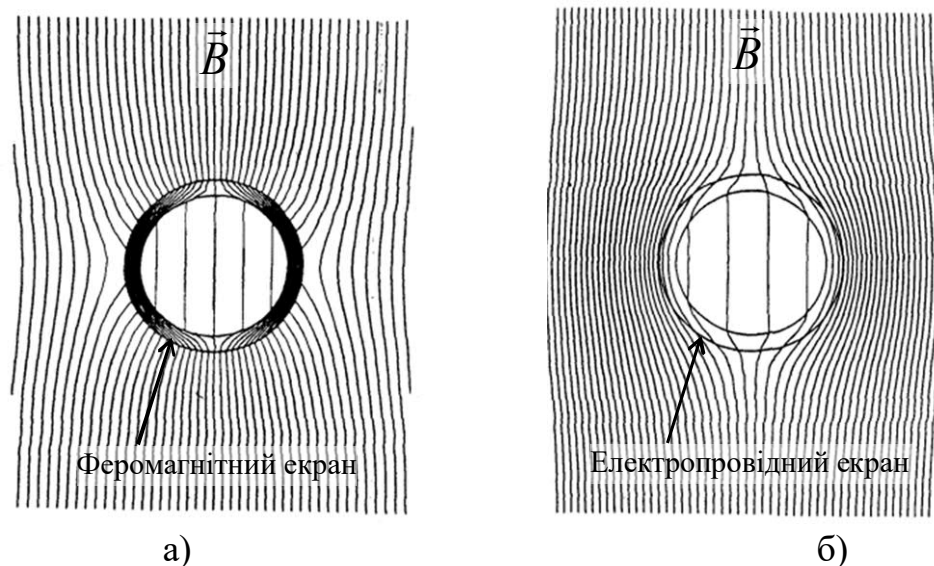


Рисунок 1.13 – До пояснення ефекту електромагнітного екранування МП з допомогою феромагнітного (магнітостатичного) (а) та електропровідного (б) екрану

Значення коефіцієнта екранування K_E безкінечного циліндричного екрану із сталі для поперечного МП може бути визначено аналітично як [197]:

$$K_E = \frac{1}{ch(k_1 d) + \frac{1}{2} \left(K_1 + \frac{1}{K_1} \right) sh(k_1 d)}, \quad (1.35)$$

де d – товщина стінки екрану; $k_1 = \sqrt{K^2 + 1/R^2}$; $K^2 = j2\pi f \mu \sigma$; $K_1 = k_1 R_1 \mu_0 / \mu$; R – зовнішній радіус екрану; j – уявна одиниця; f – частота МП; μ – магнітна проникливість матеріалу; σ – питома електропровідність матеріалу.

Як свідчить співвідношення (1.12), збільшення ефективності екрану можливе при збільшенні товщини d екрану та його електропровідності σ , та його магнітної проникності μ в робочому діапазоні індукції МП. Ефективність електропровідного екрану спадає при зниженні частоти МП. На частоті 50 Гц забезпечити коефіцієнт екранування електромагнітного екрану більше 5 є складною задачею.

Для магнітостатичного екрану (рис. 1.13 б), його ефективність практично не залежить від частоти МП і визначається магнітною проникністю його матеріалу. Коефіцієнт екранування такого екрану з μ -металлу може досягати 10 і більше [195, 197].

Товщину стінки електропровідного екрану недоцільно збільшувати більше половини глибини проникнення (δ) електромагнітної хвилі в товщу екрану (глибини скін-слою). Фізичні параметри матеріалів, з яких виготовляються екрани [195] представлені в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Фізичні параметри матеріалів, що використовуються для виготовлення електромагнітних екранів

№	Матеріал екрану	Хімічний елемент	Величина скін слою на частоті 50 Гц δ , (мм)	Магнітна проникливість μ	Питома електропровідність $\sigma, \left(\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} \right)$
1	Алюміній	<i>Al</i>	12,3	1	$33,3 \cdot 10^4$
2	Мідь	<i>Cu</i>	9,3	1	$52 \cdot 10^4$
3	Сталь конструкційна	<i>Fe</i>	1,29	200	$1,5 \cdot 10^4$
4	Латунь	(<i>Cu, Zn</i>)	19,4	1	$13,3 \cdot 10^4$
5	Електротехнічна сталь	<i>Fe</i>	-	1000	-
6	μ -метал	(<i>Fe, Ni</i>)	-	$120 \cdot 10^3$ $-500 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$

Для екранування струмопроводів широкого застосування [187, 198] набули плоскі та U-подібні електромагнітні екрани (рис. 1.14). Ці екрани є розімкненими і їх коефіцієнт екранування нижчий, ніж в замкнених (рис. 1.12) екранах, але при цьому використовується менше металу та зменшуються втрати енергії, що важливо при екрануванні магнітного поля 50 Гц ЕО. Аналітичне визначення

коефіцієнту екранування плоских екранів кінчених розмірів ускладнено. В цьому випадку застосовуються чисельні методи [187, 191, 198, 267], або емпіричні формули, визначені для конкретної конструкції екрану на основі експерименту [199].

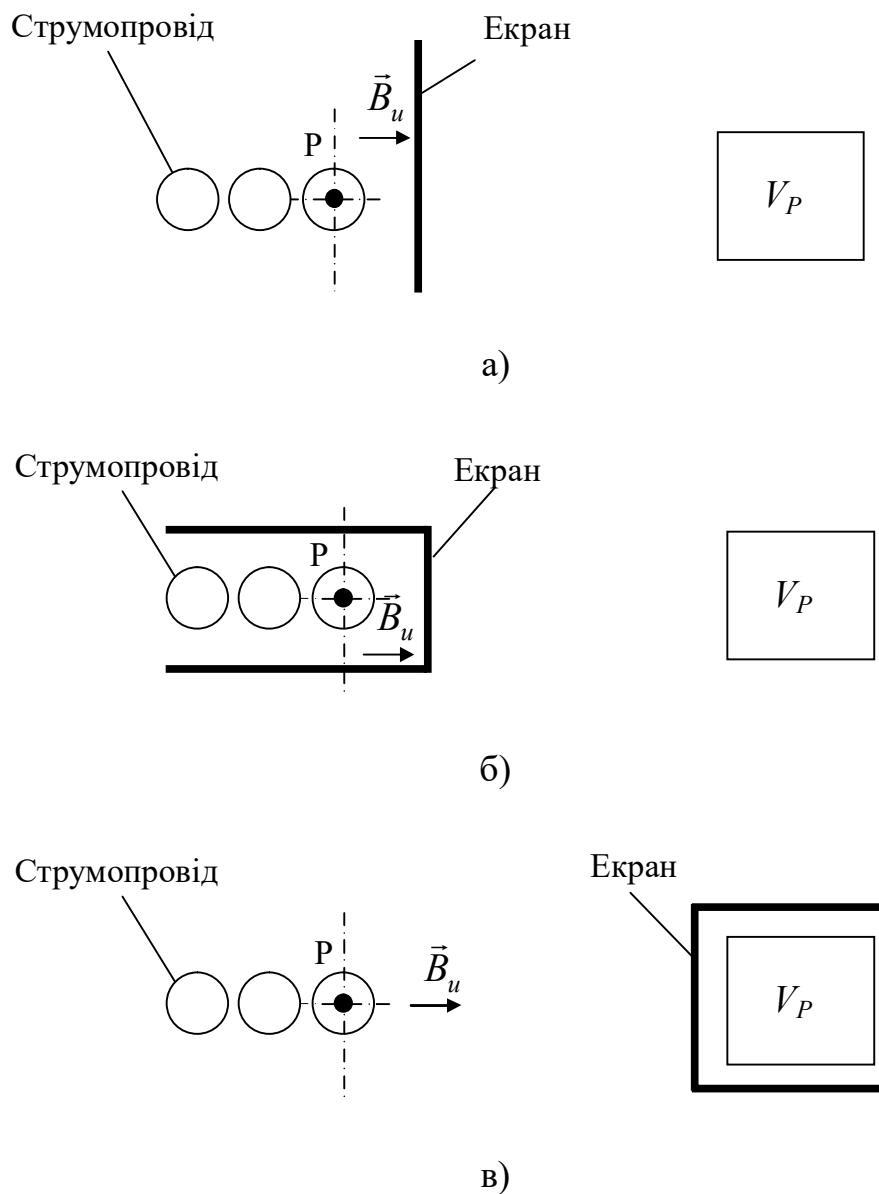


Рисунок 1.14 – Плоскі (а) та U-подібні (б),(в) електромагнітні екрани струмопроводів

Окремого розгляду потребують контурні електромагнітні екрани [192], представлені на рис. 1.15. Пасивний контурний екран (рис. 1.15 а) є модифікацією електропровідного екрану (рис. 1.15 а), в якому замість плоскої

електропровідної оболонки використовується короткозамкнений електропровідний контур максимальної площі з максимальною комплексною електропровідністю, індукований МП струм в якому і створює компенсуюче магнітне поле.

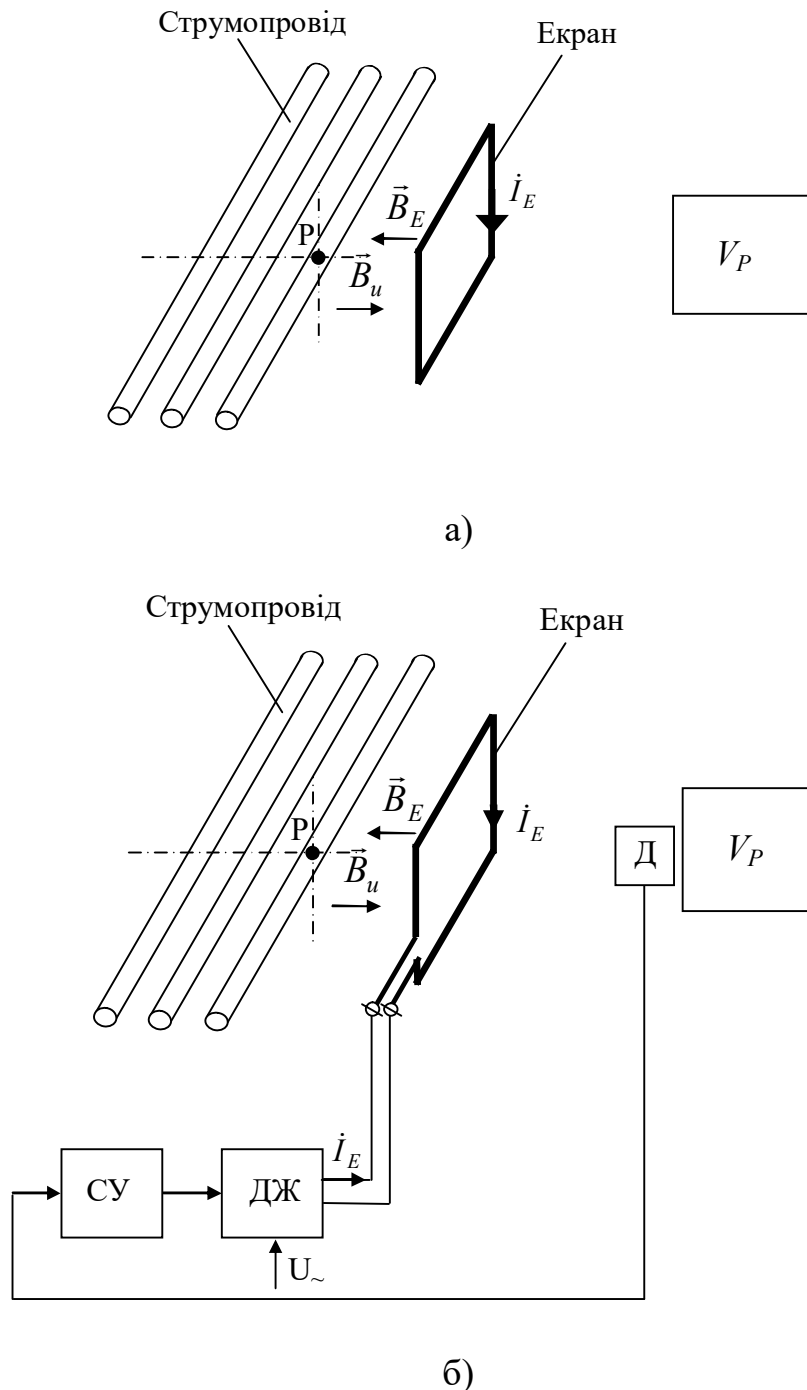


Рисунок 1.15 – Пасивні (а) та активні (б) контурні електромагнітні екрани

Подальшим розвитком контурних екранів є активні контурні екрани (рис. 1.15 б) в яких компенсаційний струм формується не за законом

електромагнітної індукції, а за рахунок зовнішньої енергії спеціальним регульованим напівпровідниковим джерелом живлення (ДЖ) [185, 186, 189, 192]. Формування струму I_E , як правило, здійснюється в замкненій або розімкненій структурі спеціальною системою управління (СУ) в функції сигналу з датчика магнітного поля (ДМП) або датчика струму. Це дозволяє радикально підвищити коефіцієнт екранування активних екранів в порівнянні з пасивними контурними екранами. Але активні екрани для струмопроводів ЕО досліджені недостатньо і потребують подальшого розвитку.

Схема класифікації розглянутих методів екранування струмопроводів ЕО представлена на рис. 1.16.

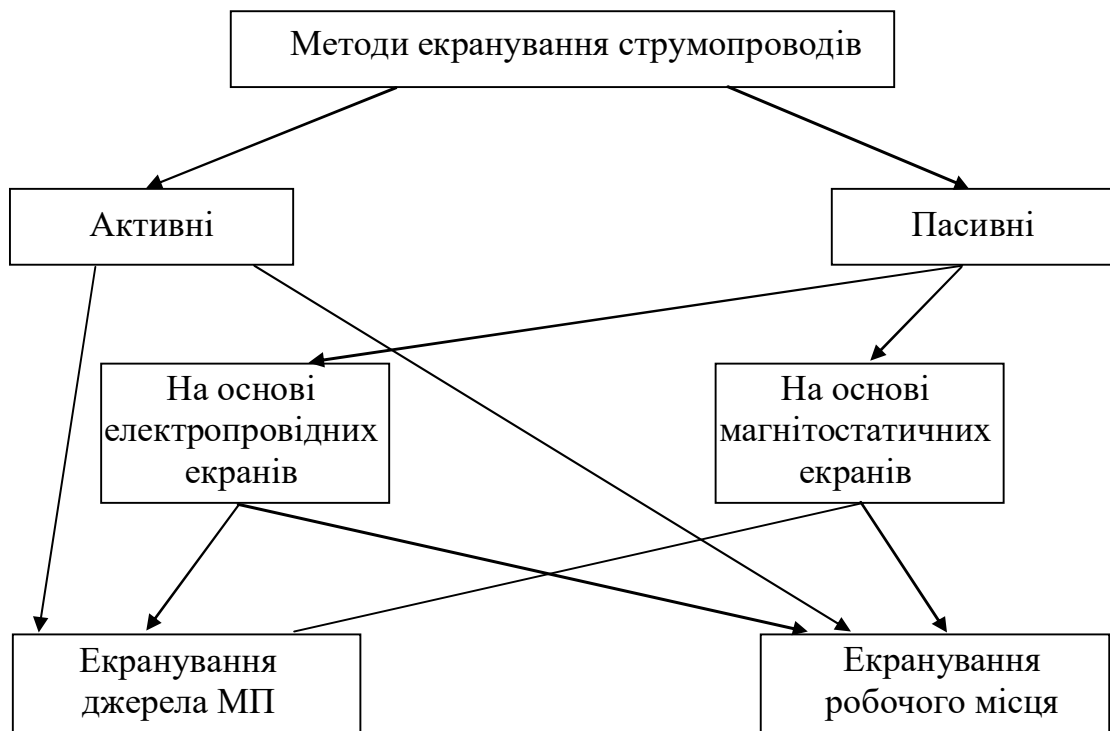


Рисунок 1.16 – Схема класифікації методів екранування МП від струмопроводів ЕО

Пасивне екранування МП повітряних електромереж. Практично всі ЕМ, і особливо ЛЕП, є протяжними, і тому безпосереднє екранування їх МП є раціональним тільки в разі наявності протяжної житлової зони по трасах ЛЕП

(наприклад, в парковій зоні). Для цього використовуються контурні електромагнітні екрани (рис. 1.17) [192]. Але їх ефективність є обмеженою (1,5-1,8 од.), а капіталосміність великою, що обмежує їх практичне застосування.

Контурне екранування МП може бути використано для екранування житлових будинків в разі використання прозорих для світла ґратчастих електромагнітних екранів [264], що дозволяють екранувати житлові будинки без затемнення. Але їх ефективність також є невеликою (до 2 од.) , що робить їх практичне використання раціональним як додаткового засобу в комбінації з більш ефективним засобом екранування, наприклад активного екранування [94].

Пасивне контурне екранування є перспективним для кабельних ЕМ [94], але такі електромережі в дисертації не розглядаються.



Рисунок 1.17 – Пасивні контурні екрани для
безпосереднього зменшення МП ЛЕП

Екранування МП повітряних ЕМ в житловій зоні методами активного екранування. Для екранування МП від ЕМ в локальній житловій зоні (житловому

приміщенні будинку) найбільш ефективним є використання САЕ їх МП, так як вони можуть реалізувати високий коефіцієнт екранування (більш 10 од.) при невеликій металоємності і вартості. Перевагою методів активного екранування у порівнянні з пасивними методами екранування також є універсальність та потенційно висока ефективність зменшення ЗМП при обмеженому впливі на основні функціональні параметри ЕО.

Сутність методу активного екранування (автоматичної компенсації) МП ЕНО, до якого відноситься ЕО, визначена проф. Розовим В.Ю. [99, 101, 162, 268, 270-277, 279-282] і полягає у автоматичному формуванні компенсуючого МП визначеної просторово-часової структури, суперпозиція якого зовнішнє МП ТО мінімізується в нормованій області оточуючого ЕНО простору і може бути виражена узагальненим рівнянням автоматичної компенсації, що описує узагальнений алгоритм автоматичної компенсації:

$$\mathbf{H}(x_i, t) + \mathbf{H}_k(x_i, t) + \delta(x_i, t) \mathbf{H}(x_i, t) = 0, \quad 0 \leq \delta(x_i, t) \leq 1 \quad x_i \in V_H \quad (1.36)$$

де $\mathbf{H}(x_i, t)$ – напруженість ЗМП ЕНО; $\mathbf{H}_k(x_i, t)$ – напруженість ЗМП; $\delta \mathbf{H}(x_i, t)$ – похибка компенсації; $\delta(x_i, t)$ – відносна похибка компенсації.

Узагальнена структура системи активного компенсації (екранування) МП ЕНО [162] представлена на рис. 1.18.

Датчики параметрів об'єкту виділяють сигнал $\vec{s}_{ENO}(x_i, t)$, що є параметром регулювання. Ним може бути або МП ЕО (замкнена структура), або струми ЕО (розімкнена структура). У функції цього сигналу на виході електромагнітний компенсатор (ЕМК), який являє собою компенсаційні обмотки зі струмом, формується компенсуюче МП.

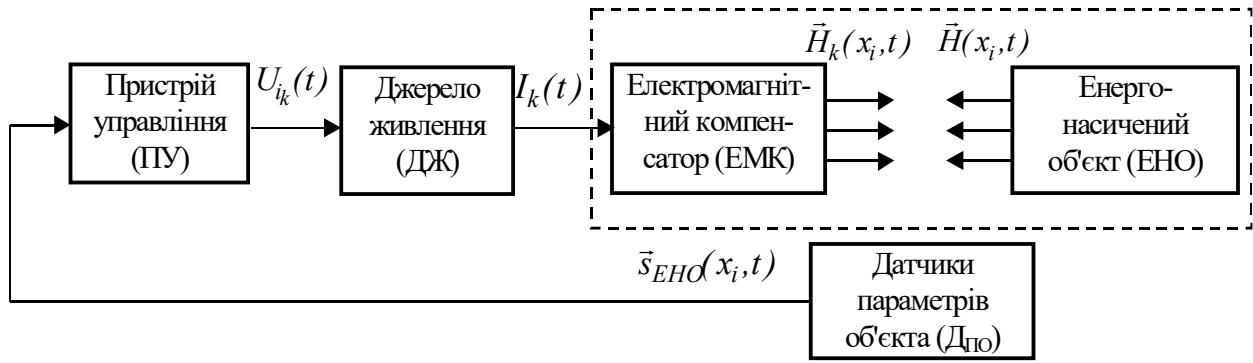


Рисунок 1.18 – Узагальнена структура системи активного екранування МП енергонасиченого об'єкту

Компенсуюче МП синтезується САЕ (рис. 1.18), причому його параметри повинні задовольняти узагальненому рівнянню компенсації (1.36). Рівняння (1.36) дозволяє визначити відносну похибку компенсації:

$$\delta(x_i, t) = \frac{|\mathbf{H}(x_i, t) + \mathbf{H}_k(x_i, t)|}{|\mathbf{H}(x_i, t)|}, \quad (1.37)$$

та ефективність (E) компенсації, яка визначена як безрозмірна величина, обернено пропорційна відносній похибці компенсації:

$$E(x_i, t) = \frac{1}{\delta(x_i, t)} = \frac{|\mathbf{H}(x_i, t)|}{|\mathbf{H}(x_i, t) + \mathbf{H}_k(x_i, t)|}. \quad (1.38)$$

Ефективність, яка описується співвідношенням (1.38), є основним параметром, що характеризує компенсацію як метод зниження ЗМП ЕО і може бути використана для оцінки якості реальних САЕ. Виходячи з прийнятого раніше припущення про квазістаціонарний характер ЗМП, таку оцінку доцільно виконувати для статичних режимів роботи САЕ за допомогою співвідношень:

$$E_{SAE}^H(P, q) = \frac{|\mathbf{H}_{ENO}(P, q)|}{|\mathbf{H}_{ENO}(P, q) + \mathbf{H}_{SAE}(P, q)|}, \quad P \in (V_H, S_H), \quad q \in (q_1 \dots q_n), \quad (1.39)$$

де E_{CAE}^H – ефективність САК по зниженню рівня напруженості ЗМП ЕНО;

$H_{ЕНО}$ – початкова напруженість ЗМП ЕНО;

H_{CAE} – напруженість компенсуючого МП, що формується САЕ;

P – координати точки спостереження, розташованої в області простору V_n або на поверхні S_n , де нормується ЗМП ЕНО; q – поточний режим роботи ЕНО.

Подальшим розвитком робіт проф. Розова В. Ю. зі створення систем автоматичної компенсації ЗМП автономних об'єктів та силового електрообладнання [99, 162], є розроблені проф. Кузнецовим Б.І наукові основи оптимального синтезу ефективних САЕ високовольтних повітряних ЛЕП [92-97, 169-179]. Типова структура таких САЕ представлена на рис. 1.19.

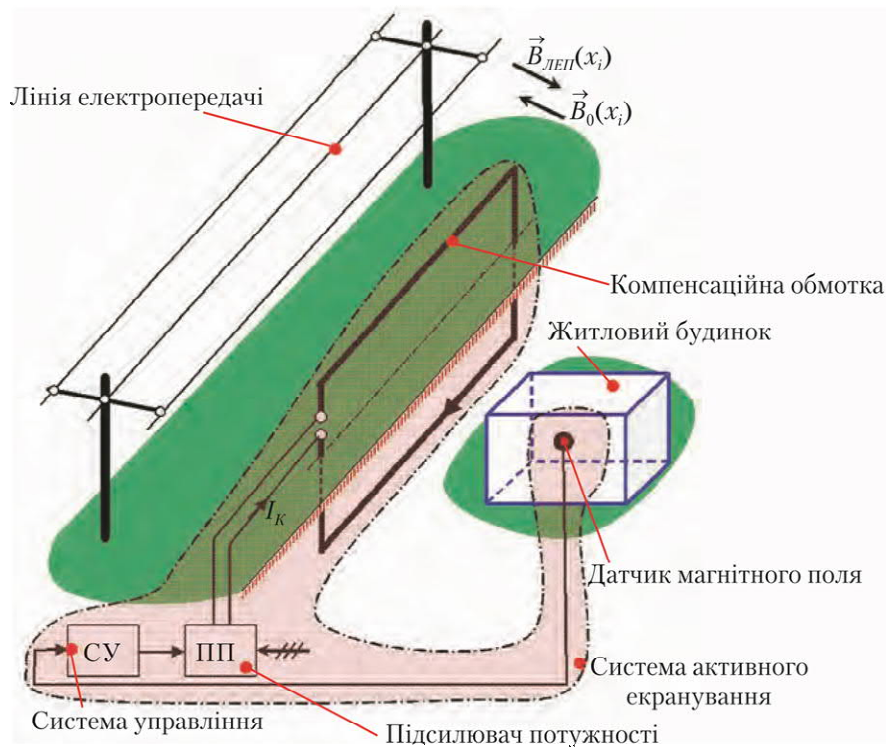


Рисунок 1.19 – Система активного екранування МП від ЛЕП в житловому будинку

Така САЕ має своє джерело живлення і складається з компенсуючих обмоток, системи управління і датчика магнітного поля і автоматично формує з допомогою компенсуючих обмоток компенсуюче МП у функції сигналу зворотного зв'язку з датчика МП, розміщеного в зоні захисту.

Основна задача оптимального синтезу САЕ є нелінійною і зводиться до мінімізації функціоналу виду:

$$\Psi(x_1, x_2, y_1, y_2) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} B(x, y) dx dy, \quad (1.40)$$

де $B(x, y) = \sqrt{B_x^2(x, y) + B_y^2(x, y)}$ – модуль вектора індукції МП, який нелінійно залежить від відстані.

Тому вирішення цієї нелінійної задачі здійснюється [181] на основі генетичних алгоритмів і евристичних методів відповідно до розроблених математичних моделей процесу оптимального синтезу САЕ МП ЛЕП [94, 96, 97, 169-171, 173, 174, 178, 179]. В результаті синтезовані і експериментально верифіковані САЕ, які самостійно, або комбінації з пасивними електромагнітними екранами дозволяють нормалізувати МП в житлових будинках, що розташовані поряд з високовольтними ЛЕП.

Подальший розвиток теоретичних основ синтезу САЕ для ТП набув в [159], де вперше розроблена та експериментально обґрунтована методика синтезу САЕ МП вбудованих ТП потужністю 100–1260 кВА для зменшення МП в сусідніх житлових приміщеннях. Методика ґрунтується на удосконаленій двофазній мультидипольній математичній моделі МП струмопроводу, законі Біо-Савара, а також методі оптимізації елементів системи мультироєм частинок і дозволяє синтезувати системи із теоретичною ефективністю 6–16 одиниць, які зменшують магнітне поле в наближених до ТП житлових приміщеннях до рівня санітарних норм. Однак в цій роботі не вирішена проблема ефективного екранування МП в житлових приміщеннях від вбудованих ТП 6(10) кВ при малих (на рівні 1 м) відстанях між струмопроводом ТП і житловим приміщенням.

Таким чином, подальший розвиток методів та засобів нормалізації МП електромереж доцільно спрямувати на створення структурних методів

зменшення МП високовольтних ЛЕП та удосконалення методів та засобів активного екранування МП над вбудованими ТП.

1.5 Визначення основних джерел магнітного поля, що можуть створювати небезпеку за магнітним полем для населення житлових будинків

Проведений вище аналіз, та результати виконаних досліджень [21, 26, 73, 104, 159, 192, 193] показують, що найбільш інтенсивне МП, індукція якого може істотно перевищити нормативний рівень 0,5 мкТл в житлових приміщеннях, створюють: високовольтні повітряні ЛЕП (до 10 мкТл) (рис. 1.20); вбудовані у житлові будинки міські ТП 6(10)/0,4 кВ (рис. 1.21) до 30 мкТл у приміщеннях над вбудованою ТП потужністю до 800 кВА в двохтрансформаторному виконанні [159] (рис. 1.22) СКЕ житлових приміщень до 10 мкТл [26] на підлозі приміщень.



Рисунок 1.20 – Приклади розміщення трас ЛЕП 110 кВ поряд з житловими будинками у м. Харкові із порушенням санітарних норм

Крім того потенційно небезпечними за МП є прокладені у стінах ВЕЖ житлових приміщень [193], та розташоване у квартирах побутове електрообладнання [21, 73, 104] (ПЕО).



Рисунок 1.21 – Вбудовані у житлові будинки міські ТП

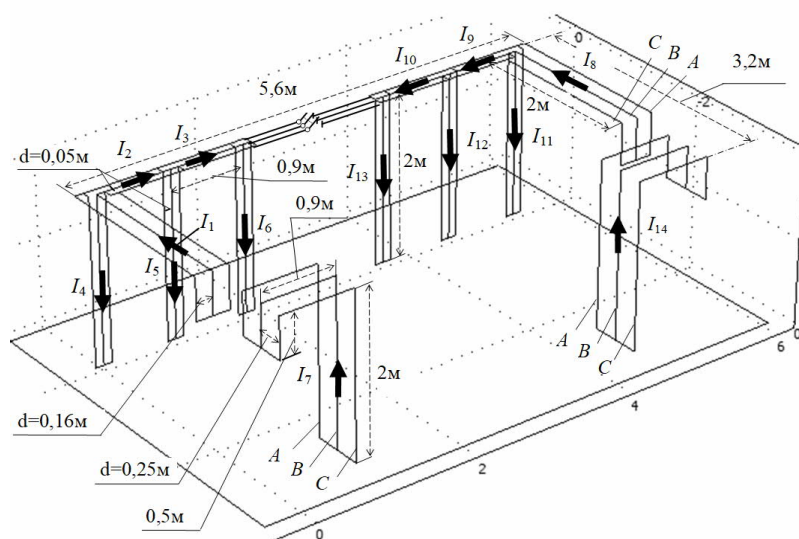


Рисунок 1.22 – Струмопровід типової двотрансформаторної вбудованої ТП підвищеної потужності (2x400 кВА)

Житловий будинок із вбудованою ТП в подальшому будемо розглядати як електротехнічний комплекс, що складається із зовнішніх (ЛЕП) і внутрішніх (СТП, СКЕ, ВЕЖ, ПЕО) джерел МП (рис. 1.23).

Із згаданих джерел МП найбільш дослідженим є ПЕО [21, 73, 104, 193]. ПЕО може мати значну потужність (до 5 кВт) і струм біля 20 А і є вагомим джерелом МП промислової частоти в квартирах житлових будинків [193, 194].

Таблиця 1.7 – Індукція МП електроприладів побутового призначення виготовлених в Німеччині, в мкТл

Електроприлад	Відстань від поверхні,		
	3 см	30 см	100 см
Фен	6 – 2000	0,01 – 7	0,01 – 0,03
Електробритва	15 – 1500	0,08 – 9	0,01 – 0,03
Пилосос	200 – 800	2 – 20	0,13 – 0,2
Мікрохвильова піч	73 – 200	4 – 8	0,25 – 0,6
Електрична піч	1 – 50	0,15 – 0,5	0,01 – 0,04
Пральна машина	0,8 – 50	0,15 – 3	0,01 – 0,15
Посудомийна машина	3,5 – 20	0,6 – 3	0,07 – 0,3
Комп'ютер	0,5 – 30	<0.01	-
Холодильник	0,5 – 1,7	0,01 – 0,25	<0.01
Телевізор	2,5 – 50	0,04 – 2	0,01 – 0,15

Аналогічний розподіл МП має ПЕО інших країн [194].

З рис. 1.24 та табл. 1.7, табл. 1.8 слідує, що МП ПЕО гарантовано спадає до нормативного рівня при віддаленні від їх корпусу на відстань більш 1 м. Враховуючи те, що найбільш потужне ЕО для приготування та збереження їжі (холодильники, електроплити,) розташоване в нежитлових приміщеннях і віддалене від житлових зон на значну відстань, воно при подальшому аналізі може не враховуватися.

Таблиця 1.8 – Індукція зовнішнього МП частотою 50 Гц на відстані R від поверхні ПЕО

№	Найменування електрообладнання	Відстань R від поверхні	
		0,1 м	0,5 м
		B , мкТл	B , мкТл
1	Мікрохвильові печі	25	1
2	Фен	4	0,5
3	Електричні кухонні плити	5,0	0,3
4	Пилососи	20–90	0,3
5	Пральні машини	5	0,2
6	Телевізори	1	0,15
7	Побутові електрообігрівачі	4,0–8,0	0,03
8	Електроміксери	2,2	0,02
9	Холодильники	0,3	0,01
10	«Тепла підлога» (нагрівальний елемент – одножильний кабель)	8	1,5
11	«Тепла підлога» (нагрівальний елемент – фірмовий дво жильний кабель DEVI, Швеція)	1	0,21

Тому найбільш потужним ПЕО, що може впливати на житлову зону, є переносні електрообігрівачі. Але вплив переносних електрообігрівачів за МП легко мінімізувати, віддаливши їх від зон довгострокового перебування людей на відстань більш 1 м. При цьому вплив за МП стаціонарних СКЕ необхідно розглядати окремо.

Основними елементами СКЕ (рис. 1.25), типова конструкція яких представлена на рис. 1.25, є резистивні НК, які монтуються під поверхнею підлоги на глибині h_k від неї, та терморегулятор з вбудованим термодатчиком [286]. НК живляться від квартирної електромережі і розраховані на номінальний струм, який може досягати 15 А [287].

Аналіз конструктивного виконання НК [286, 288-297] показує, що вони розподіляються на одножильні та двожильні (рис. 1.26). Такі НК мають різні схеми підключення до електромережі (рис. 1.26), та створюють різний рівень МП. Так, відповідно до [26, 298, 299], індукція МП одножильних НК істотно (більш ніж на порядок) перевищує МП двожильних НК. Це обмежує використання одножильних НК нежитловими приміщеннями.

Для рівномірного прогріву підлоги НК укладаються у вигляді «змійки» із кроком 0,08-0,12 м [286]. Це робить розподіл МП СКЕ відмінним від МП одиночних НК, що обумовлює необхідність окремого аналізу. При цьому «змійка» представляється у вигляді меандру (рис. 1.26).

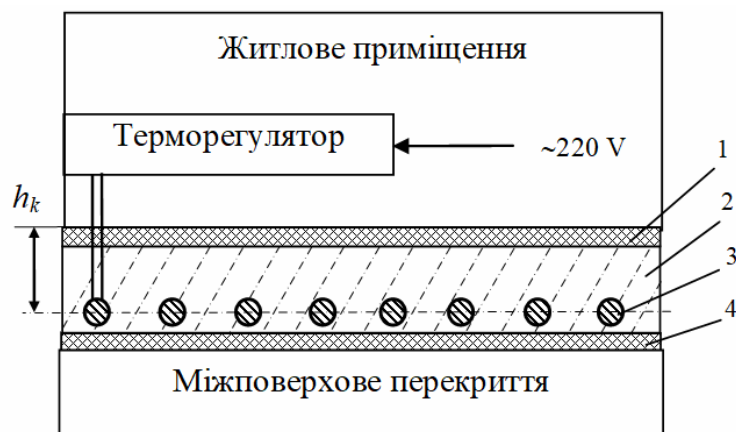


Рисунок 1.25 – Типова конструкція СКЕ:

1 – покриття підлоги, 2 – бетонна (клеюва) стяжка, 3 – НК, 4 – теплоізоляція

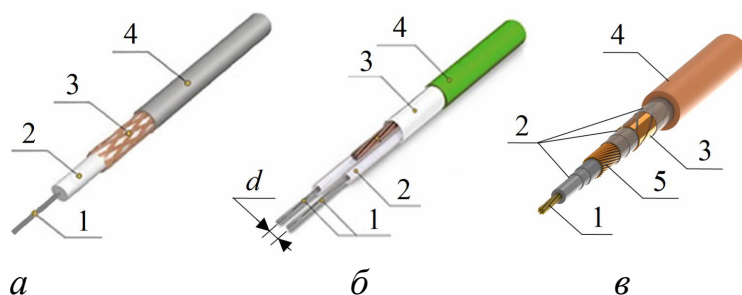


Рисунок 1.26. – Конструктивне виконання НК різних типів:

одножильний (а), двожильний планарний (б), двожильний коаксіальний (в);

(1, 5 – нагрівальні (струмопровідні) жили, 2 – електроізоляція, 3 – електропровідний заземлювальний екран; 4 – зовнішня електроізоляція)

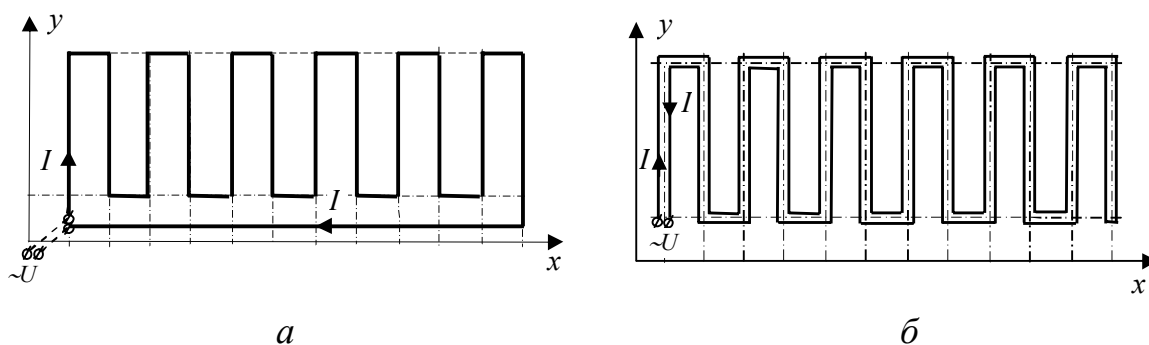


Рисунок 1.27 – Геометрія прокладання одножильного (а) та двојильного (б) НК СКЕ в горизонтальній площині XY під підлогою та схеми підключення до квартирної електромережі

Відомо, що індукція МП двојильних НК, як і будь-якої електричної мережі, залежить від відстані d між осями проводів, та струму I в них [20, 26]. Тому двојильні плоскі (планарні) НК (рис. 1.26 б) виробляються з технологічно мінімально можливою відстанню між його жилами d (1,4 – 2,5 мм). Однак, як буде показано нижче, використання таких НК при стандартній глибині їх прокладання $h_k = 0,03\text{--}0,05$ м (рис. 1.26) і струмі живлення 10 А, призводить до суттєвого перевищення індукції МП над нормативним рівнем 0,5 мкТл.

Нормалізація МП СКЕ можлива при використанні коаксіальних [295] НК (рис. 1.26, в), але їх МП на сьогодні досліджено недостатньо. Також у відомих публікаціях, наприклад [26, 287, 297, 300-302], недостатньо розглянуте МП саме СКЕ з різними НК, відсутні верифіковані методики розрахунку МП СКЕ на основі аналітичних математичних моделей, не виконана коректна оцінка відповідності індукції їх МП діючим нормативам України та авторитетним міжнародним рекомендаціям.

Внутрішні електромережі житлових приміщень (ВЕЖ) виконані із прокладених в стінах двојильних планарних кабелів (рис. 1.28) із d біля 5 мм і струмом до 30 А.

Розподіл індукції МП ВЕЖ був досліджений в [193], де показано, що МП ВЕЖ також, як для кабелів СКЕ, залежить від параметрів кабелю (відстані d між осями жил, та струму I в них), схеми трасування кабелю в житловому приміщенні, а також може залежати від прийнятої в будинку системи

заземлення. Вплив цих чинників на рівень МП в житлових приміщеннях розглянутий в [193].

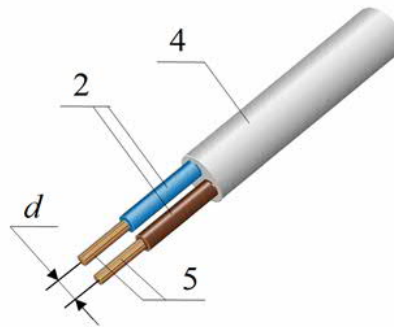


Рисунок 1.28 – Конструкція типового двожильного кабелю ВЕЖ (2 – електроізоляція жил, 4 – зовнішня електроізоляція, 5 – струмопровідні жили)

Індукція МП кабелів ВЕЖ визначена в [193] на основі закону Біо-Савара (1.20) для одножильного кабелю і мультидипольної моделі для двожильного кабелю. Результати розрахунку представлені на рис. 1.29.

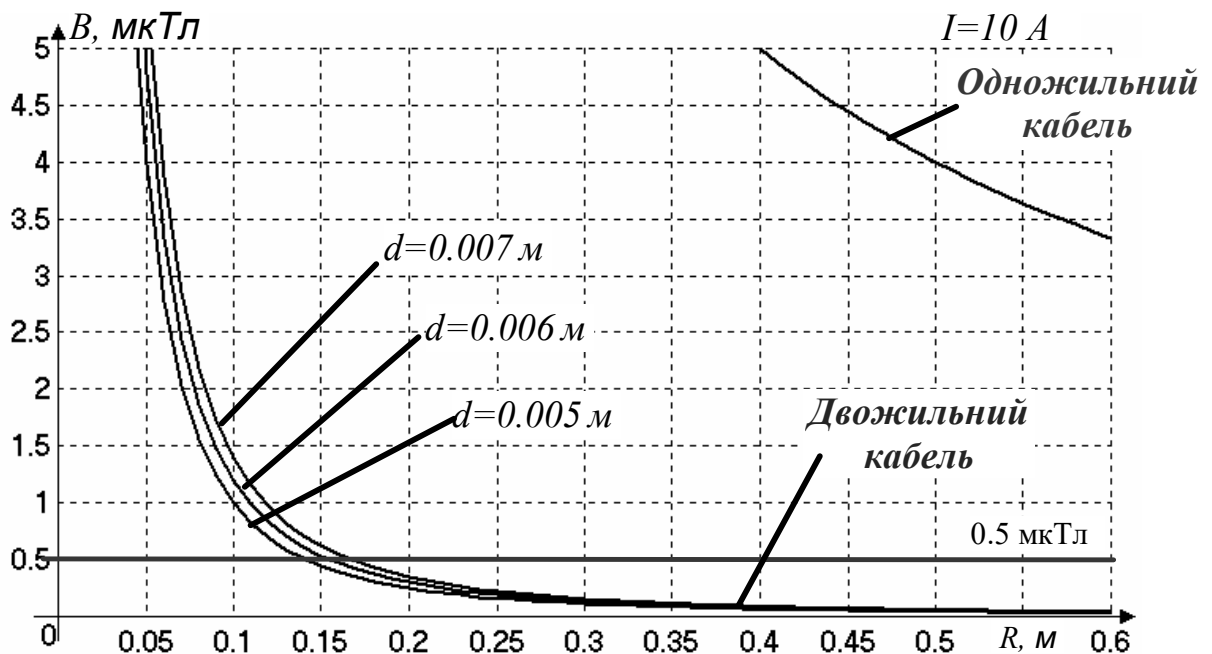


Рисунок 1.29 – Розрахунок індукції магнітного поля кабелю ВЕЖ при віддаленні від нього на відстань R та відстанню між жилами кабелю d

З рис. 1.29 слідує, що індукція МП від кабелів електропроводки пропорційна відстані між прямими і зворотним проводами відповідних контурів зі струмом. Тому МП типового двожильного кабелю (рис. 1.28) при професійному монтажі не повинно перевищувати 0,5 мкТл на відстані 0,5 м і відповідати нормативному рівню для житлових приміщень (0,5 мкТл, табл. 1.3) на відстанях R від кабелю більш 0,5 м.

Необхідно відмітити, що отримані в [193] результати дослідження МП ВЕЖ засновані на використанні складних комп'ютерних розрахунків, не мають експериментального обґрунтування і тому потребують подальшого розвитку.

Вплив схеми трасування електропроводки ВЕЖ на МП в житловому приміщенні розглянутий в [193, 303, 304]. Трасування може бути виконано трьома різними методами: кільцевим, променевим і довільним.

Кільцеве трасування електропроводки є найбільш економним щодо витрат проводу і умовно представлено на рис. 1.30.

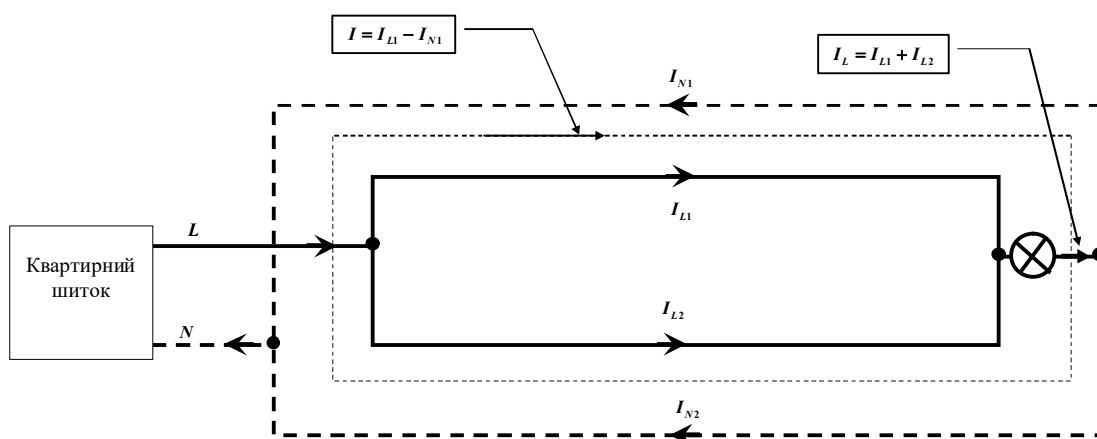


Рисунок 1.30 – Струм I_L споживача електроенергії напругою 220 В при кільцевому трасуванні електропроводки

Суть методу кільцевого трасування електропроводки полягає в тому, що «нульовий» та фазний проводи утворюють два кільця, які підключаються до відповідних клем квартирного щитка, або магістральної лінії, що проходить біля квартири. Така система трасування є найбільш економною щодо витрат проводу

на її реалізацію. При підключенні споживача електроенергії, його струм I_L буде поступати до нього по двом гілкам кільцевої електропроводки. По першій гілці – I_{L1} , а по другій – I_{L2} . Відповідно з цим і струм «нульового» проводу, що повертається до клем квартирної щитки також буде складатися із двох частин - I_{N1} та I_{N2} . При виконанні «нульового» та фазного проводів в одному кабелі, та при умові $I_{L1} = I_{N1}$ та $I_{L2} = I_{N2}$, від такої проводки не слід очікувати значимих величин МП. На будь-якій ділянці кабелю МП токів фазного та «нульового» проводів будуть взаємно компенсуватись. В той же час виконання умови $I_{L1} = I_{N1}$ та $I_{L2} = I_{N2}$, при реальній експлуатації кільцевої електропроводки, не завжди забезпечуються. Причиною тут є, наприклад, різні опори контактних з'єднань проводів різних гілок контурів, тощо. Невиконання вказаних вище умов призводить до протіканню по кільцю незбалансованого струму:

$$I = I_{L1} - I_{N1}. \quad (1.41)$$

Саме цей струм I і буде визначати індукцію МП такої електропроводки.

Променеве трасування електропроводки умовно представлено на рис. 1.31.

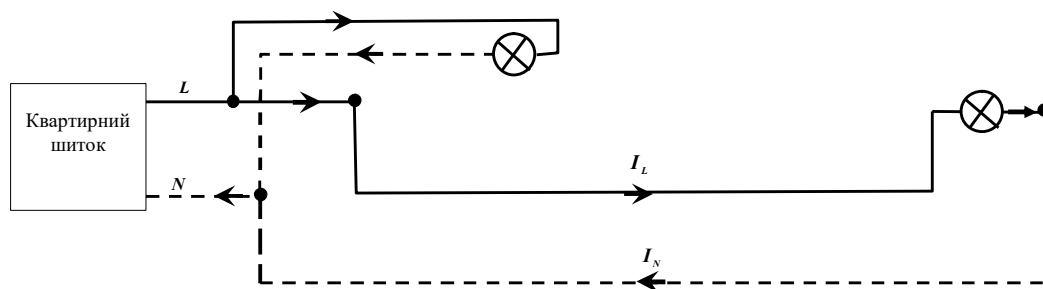


Рисунок 1.31 – Струм I_L споживача електроенергії при променевому трасуванні електропроводки

При променевому трасуванні на будь-якій ділянці кабелю МП струмів фазного та «нульового» проводів компенсують одне одного. Така електропроводка є ідеальною з точки зору її магнітної індукції, а також організації захисту від

коротких замикань окремих споживачів ВЕЖ, що знаходяться на кожному промені.

Тут також слід відзначити, що витрати проводу при променевому трасуванні, збільшуються до 80% в порівнянні з кільцевим трасуванням.

Довільне трасування електропроводки може мати місце в сучасній практиці будівництва. Особливо це стосується сучасних будинків, які здаються в експлуатацію без внутрішньої квартирної електропроводки. Будівники обмежуються лише установкою квартирної щитка на сходовій клітці, або в самій квартирі, а трасування електропроводки виконується власниками квартири, що робиться не завжди професійно. Основним джерелом МП тут може бути не скомпенсований контур зі струмом (рис. 1.32), що створюється при просторовому розкиді фазного та «нульового» проводів.

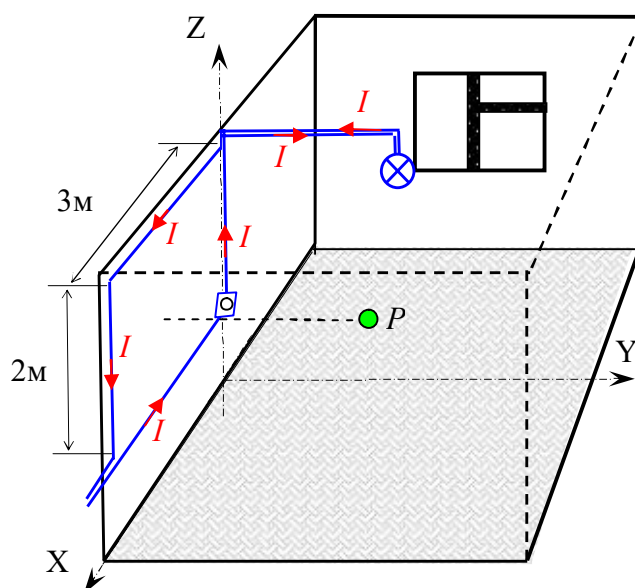


Рисунок 1.32 – Виникнення незбалансованих струмових контурів (джерел МП в житловому приміщенні) при довільному трасуванні електропроводки

Мотиви утворення такого розкиду – економія проводу, технологічне спрощення, тощо. Проводка виконується «за місцем», без попередньої підготовки вихідної документації. Звісно, що відсутній і контроль за її виконанням згідно з чинними нормативними документами.

В цілому можна констатувати, що згідно (рис. 1.32), професійно виконана електропроводка не буде істотним джерелом МП, коли фазний та «нульовий» струми, що протікають по різних жилам одного двожильного кабелю, мають однакову величину. При цьому їх МП на відстанях 0,5 м від стін житлового приміщення не перевищує нормативний рівень (0,5 мкТл). На доцільність виконання цієї вимоги в опосередковано вказують [4], які прийняті в Україні. В той же час сучасна організація монтажу електропроводки в житлових приміщеннях не передбачає будь якого контролю за виконанням цих опосередкованих вимог.

Таким чином, професійне використання методу променевого трасування кабелів ВЕЖ дозволяє мінімізувати їх МП в житлових приміщеннях.

Влив типу системи заземлення ВЕЖ будинків на рівень МП у житлових будинках досліджений у [193]. Відповідно до [193], використовуються наступні системи заземлення: TN-S, TN-C, TN-C-S.

Система заземлення TN-S

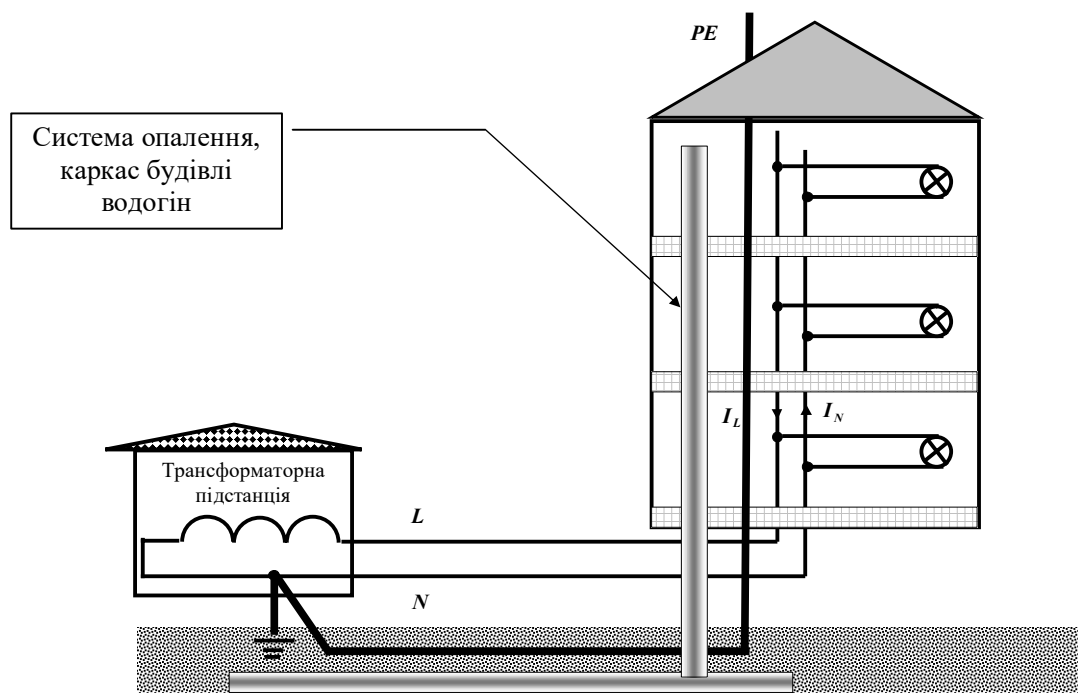


Рисунок 1.33 – Схема системи заземлення TN-S

У цій системи заземлення (рис. 1.33) «нульовий» (N) та захисний провід заземлення (PE) працюють роздільно (S – separated) в межах всього житлового будинку. Вони (N та PE) об'єднуються лише в одному місці – в точці заземлення «нульового» проводу на вторинних обмотках ТП. По цій причині реалізація схеми заземлення TN–S потребує прокладки проводу заземлення від ТП до споживачів і використання для ВЕЖ: п'ятижильного кабелю в трифазній системі; трижильного кабелю в однофазній системі.

Ця обставина призводить до суттєвого збільшення грошових витрат на практичну реалізацію системи заземлення TN–S. Але, з позиції формування магнітного поля, система заземлення TN–S є ідеальною. Вона забезпечує протікання однакової величини струму по фазному (I_L) та «нульовому» (I_N) проводах, які об'єднані в одному кабелі. А захисний провід заземлення PE на баланс токів I_L та I_N не впливає.

Система заземлення TN–C.

Ця система заземлення (рис. 1.34) передбачає поєднання захисного проводу заземлення PE та «нульового» проводу N . Поєднання їх з проводом N надає останньому статус PEN – проводу.

Система заземлення TN–C розповсюджена в старому жилому фонді. Вона проста та економічна в виконанні. Характерним при побудові таких систем заземлення є бажання забезпечити зв'язок PEN – провідника якомога в більших місцях будівлі. При цьому роль захисного проводу PE тут практично починають відігравати металеві конструкції будівлі, його водогін, система опалення тощо.

Зупинимось на питанні впливу системи заземлення TN–C на магнітне поле електропроводки будівлі. При такій схемі заземлення частина струму I_u «нульового» проводу протікає по металевим конструкціям будинку та його інженерним комунікаціям. Величину цього струму «витоку» визначає різниця потенціалів між точками підключення заземлення до «нульового» проводу. Струм «витоку» I_u при протіканні по металевим конструкціям будинку створює МП.

Індукція B_u цього МП визначається окрім величини струму «витоку» багатьма факторами, які притаманні будівлі – конфігурації системи водопостачання та опалення, архітектурі укладки металевих конструкцій, тощо.

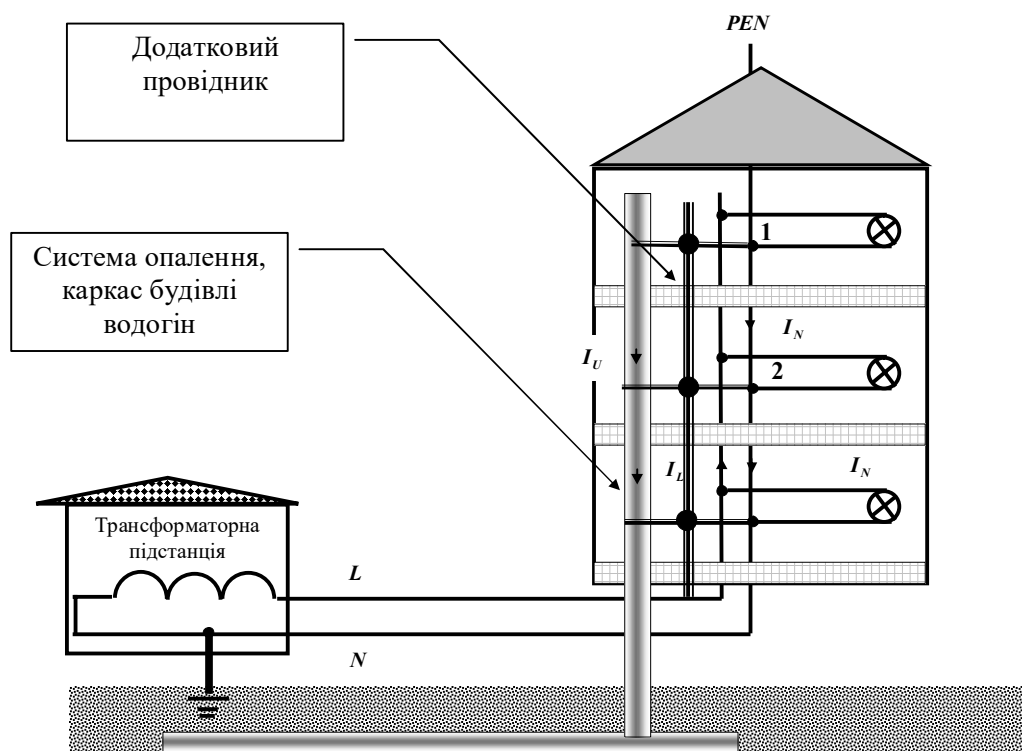


Рисунок 1.34 – Схема системи заземлення TN–C

Окрім цього, тут важливу роль відіграють контактні опори з'єднань металевих конструкцій між собою та з «нульовим» проводом. Свою долю вносять і постійні зміни в систему водопостачання, пов'язані з використанням пластикових труб тощо.

Система заземлення TN–C–S.

Ця система заземлення (рис. 1.35) поєднує в собі властивості систем заземлення TN–C та TN–S. Таке поєднання досягається за рахунок розщеплення PEN – провідника на «нульовий» N та захисний PE проводи на ділянці «вхід в будівлю» – «квартирні щитки приміщень поверху». Іншими словами, в самій будівлі мається система TN–S, яка за межами будівлі трансформується в систему TN–C. При такій системі заземлення величина струмів «витоку» по конструкціям будівлі може бути суттєво зменшена.

В той же час, як показує практика, реалізація такої системи може бути практично порушена за рахунок несанкціонованих контактів між «нульовим» проводом N , захисним проводом PE та металевими конструктивними елементами будівлі. При цьому слід зауважити, що такий контакт, якщо він існує, практично не відображається на роботі енергетичної системи. Такі несанкціоновані контакти перетворюють систему заземлення $TN-C-S$ в варіант системи $TN-C$.

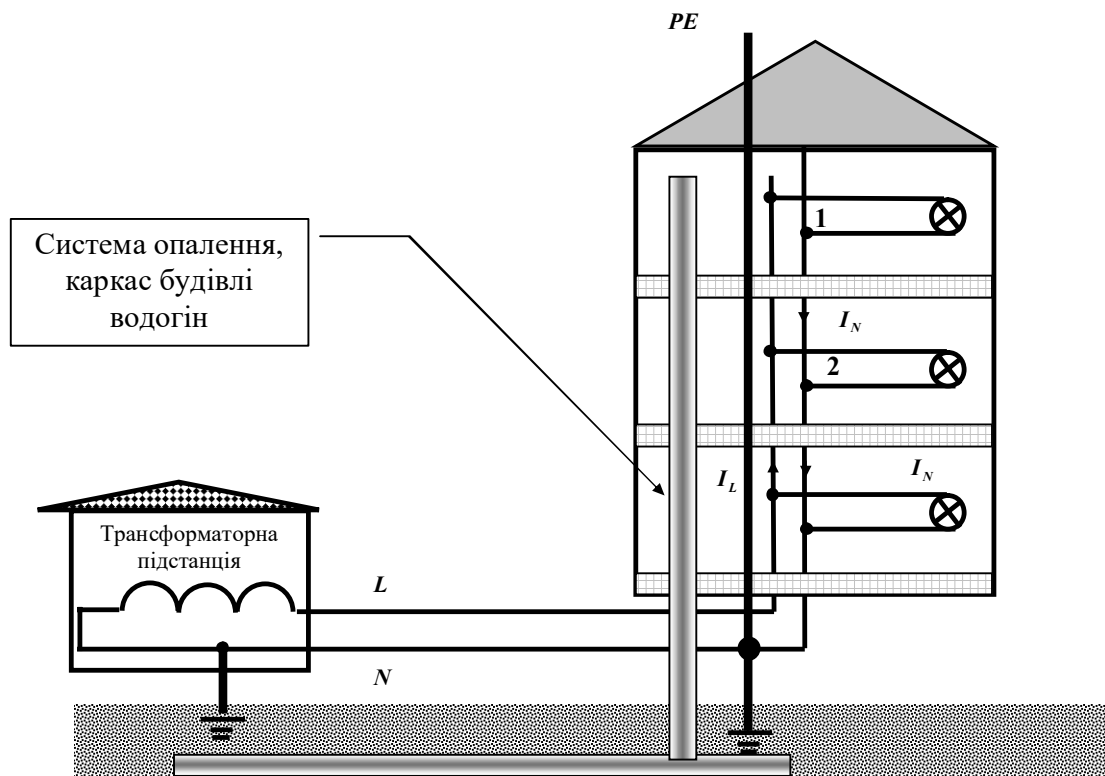


Рисунок 1.35 – Схема системи заземлення $TN-C-S$

Розглянуті системи заземлення є найбільш розповсюдженими при організації електропостачання в сучасній будівельній індустрії. Їх ранжування – від кращої до гіршої – по критерію впливу на рівень МП в житлових будинках, є таким: $TN-S$, $TN-C-S$, $TN-C$.

Таке ранжування систем заземлень справедливо при умові відсутності несанкціонованих гальванічних зав'язків PE та N провідників з металевими конструкціями будівлі. Забезпечення цієї умови потребує постійного моніторингу систем заземлення житлових будівель та контролю за проведенням

в них електромонтажних монтажних робіт.

Експериментальні дослідження впливу системи заземлення на МП в будинках проведені в [193]. Дослідження включали в себе виміри модуля магнітної індукції в житлових будинках. В результаті цих досліджень було встановлено, що:

- в приміщеннях котеджів, цегляних житлових будинків забудівлі 1950-1965 років, рівень МП в основному відповідає «Тимчасовим гранично допустимим рівням магнітного поля промислової частоти» ПУЕ [4];

- в частині господарських приміщень панельних будинків забудівлі 1970-1990 років, та сучасних багатоповерхових будинків із армованого залізобетону, має місце перевищення рівня 0,5 мкТл, основним джерелом якого є струми витоку системи заземлення ВЕЖ.

Дія струмів витоку системи заземлення на МП в господарських приміщеннях будинку ілюструється результатами експериментальних досліджень, приведених в табл. 1.9 та на рис. 1.36.

На рис. 1.36 умовно показана траса проходження цих струмів. Проведений аналіз підтвердив, що причиною появи суттєвих величин магнітної індукції в приміщеннях побутового господарського призначення є струми витоку I_g , які протікають по трубах постачання холодної та гарячої води.

Тому одним із основних чинників, який визначає рівень МП в житлових будинках, є наявність в системі їх електропостачання і заземлення струмів витоку, які проходять через металеві інженерні комунікації, та металеві конструкції каркасу будинку. Але струми витоку відповідно до рис. 1.36 збільшують магнітне поле тільки в господарських приміщеннях будинків (кухня, тамбур, сходові клітки та ін.), де ГДР МП складає 10 мкТл відповідно до табл. 1.3 і збільшений в 20 разів у порівнянні з ГДР в житлових приміщеннях.

Тому системи заземлення ВЕЖ не впливають на рівень МП в житлових приміщеннях будинків, і при подальших дослідженнях можуть не враховуватися як джерело МП.

Таким чином, залишається не достатньо дослідженим вплив МП

електромереж ЛЕП, ТП, СКЕ і ВЕЖ на розподіл МП в житлових приміщеннях.

Таблиця 1.9 – Результати експериментальних досліджень індукції МП частотою 50 Гц у приміщеннях панельного будинку забудови 1970 по вул. Державінська 2, м. Харків

Характеристика приміщення	Середнє значення магнітної індукції B_c в приміщеннях, в мкТл	Примітки
Харків, вул. Державінська 2, 8 під'їзд дев'ятиповерхового будинку Приміщення побутового- господарського призначення (кухня, ванна кімната, тамбур сходові клітки)	1,2 – 2 на робочому місці кухні та ванних кімнатах 1-8 поверху до 3 в приміщенні тамбуру 1-8 поверхів 0,5 – 1 На сходовій клітці від першого до восьмого поверху. 0,15 – 0,3 В приміщеннях побутового призначення на дев'ятому поверсі.	При включеному побутовому приладі, а саме електронагрівальному баку води, в квартирі на восьмому поверсі. В квартирах інших поверхів потужні побутові електроприлади були відключені.
	0,4 – 0,7 В приміщенні побутового призначення на восьмому поверсі	При вимкненому електронагрівальному баку води та загрузці інших квартир поверху.

Відсутні коректні математичні моделі та верифіковані методики розрахунку МП двожильних планарних та коаксіальних кабелів та внутрішніх електромереж житлових приміщень на їх основі (ВЕЖ та СКЕ), не розроблені

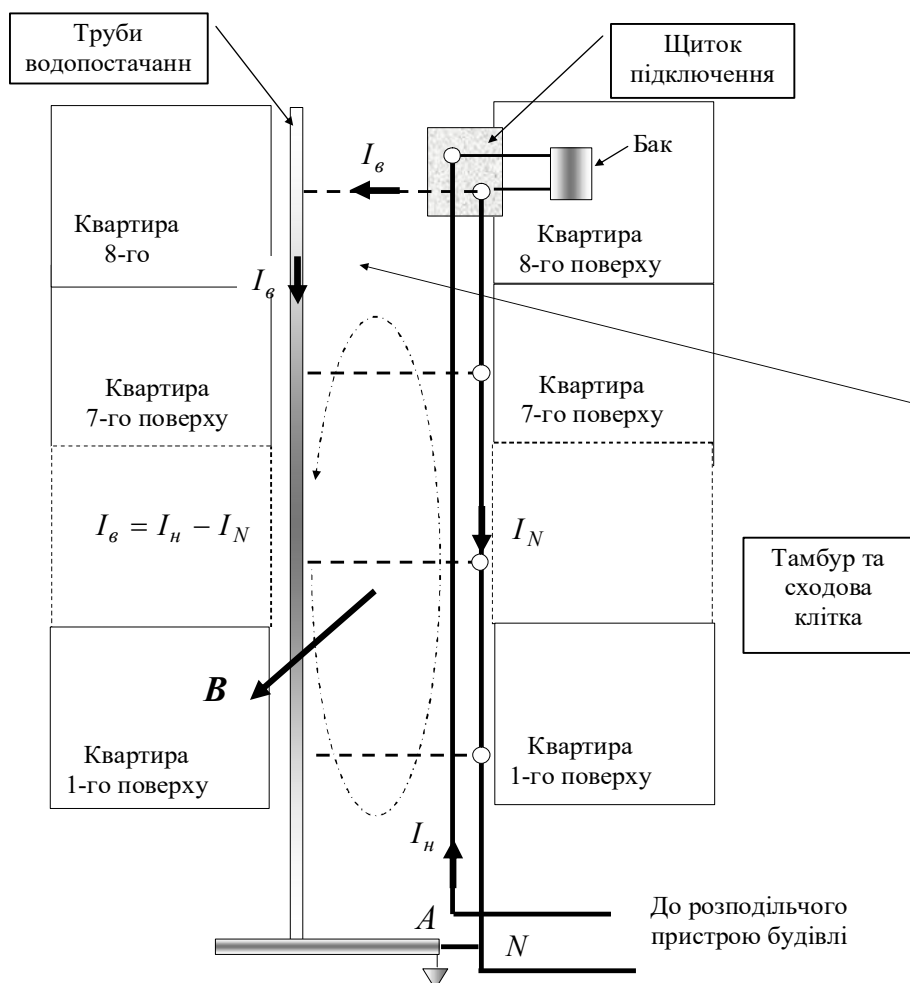


Рисунок 1.36 – Траса проходження струмів витоку I_{ϵ} в восьмому під'їзді будинку за адресою на вул. Державінська 2

Також залишається не дослідженою ефективність екранування МП промислової частоти ЛЕП стінами та міжповерховими перекриттями житлових будинків, відсутня коректна та верифікована методика розрахунку діючого значення індукції МП ЛЕП, не досліджений комплексний вплив групи ЕМ на МП приміщень. Не оцінена коректність законодавчого визначення розміру охоронних зон ЛЕП тільки за ЕП без урахування МП, підлягає дослідженню розподіл МП в житлових приміщеннях будинків від ЛЕП, ТП, СКЕ і ВЕЖ як

індивідуально, так і комплексно, та розробка методів його зменшення до безпечного для населення рівня.

1.6 Аналіз проблем забезпечення електромагнітної сумісності зовнішніх та внутрішніх електромереж з житловим середовищем за магнітним полем, та визначення шляхів їх вирішення. Постановка задач досліджень

Виконаний вище аналіз показує наявність наступних невирішених проблем із забезпеченням електромагнітної сумісності електромереж з житловим середовищем шляхом зменшення їх МП до нормативного рівня.

1. Відсутність верифікованих методів математичного моделювання МП повітряних ЛЕП 0,4–330 кВ та методик розрахунку їх МП, що визначають діюче значення індукції, яке підлягає санітарно-гігієнічному нормуванню, та доступне для вимірювання стандартними магнітометрами.

2. Невизначеність рівня індукції МП ЛЕП на границях законодавчо визначених охоронних зон і її відповідності санітарним нормам для населення.

3. Невизначеність ефекту екранування МП ЛЕП промислової частоти будівельними конструкціями типових житлових будинків.

4. Відсутність наукових засад структурних методів нормалізації МП ЛЕП та шляхів удосконалення геометрії підвісу проводів ЛЕП на їх основі.

5. Відсутність математичних моделей МП ЛЕП, що дозволяють розвивати структурні методи нормалізації їх МП та створювати магніточисті ЛЕП.

6. Недостатню визначеність розподілу МП над міськими ТП 100-800 кВА, та відсутність коректних математичних моделей МП при малих (від 1 м) відстанях між вбудованими ТП та житловими приміщеннями.

7. Відсутність верифікованих методів синтезу САЕ МП вбудованих ТП для нормалізації МП в житлових приміщеннях, що розташовані на малій (біля 1 м) висоті над вбудованими ТП.

8. Відсутність математичних моделей та верифікованих методик розрахунку МП двожильних планарних та коаксіальних кабелів та внутрішніх

електромереж житлових приміщень на їх основі (ВЕЖ та СКЕ).

9. Відсутність рекомендацій з проектування СКЕ підлог житлових приміщень з безпечним рівнем МП.

10. Недостатність вивчення комплексного впливу зовнішніх та внутрішніх електромереж на рівень МП в житлових приміщеннях будинків та відсутність методів визначення та нормалізації комплексного впливу групи електромереж на рівень МП в житлових приміщеннях будинків.

Тому метою дисертаційної роботи є дослідження МП промислової частоти, що створюється в житлових приміщеннях будинків зовнішніми та внутрішніми електромережами, та розроблення науково-методичних основ і засобів забезпечення електромагнітної сумісності електромереж з житловим середовищем шляхом зменшення індукції їх МП до безпечного для населення рівня. Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

- Виявити основні джерела МП промислової частоти, що створюють МП в житлових приміщеннях будинків.

- Визначити ефективність екранування МП промислової частоти будівельними конструкціями житлових будинків із типових будівельних матеріалів.

- Розробити аналітичний метод математичного моделювання МП повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ та наукові засади верифікованої методики розрахунку їх МП, що визначає діюче значення індукції, яке підлягає санітарно-гігієнічному нормуванню, та доступне для вимірювання високоточними однокомпонентними магнітометрами.

- Визначити рівень індукції МП повітряних ЛЕП за межами їх чинних охоронних зон і його відповідність санітарним нормам для населення.

- Розробити нову математичну модель МП ЛЕП, яка прийнятна для моделювання індукції МП поблизу межі їх охоронних зон, та має чітку фізичну інтерпретацію для удосконалення геометрії підвісу проводів ЛЕП на її основі.

- Запропонувати новий метод зменшення МП ЛЕП, що не потребує відчуження додаткових земельних ділянок і реалізується шляхом симетрування

системи розщеплених проводів фаз для досягнення осьової симетрії більш високого порядку.

- Розробити метод та методику синтезу ЛЕП зі зменшеним МП, та удосконалити схеми підвісу розщеплених проводів їх фаз.
- Визначити умови удосконалення геометрії підвісу проводів двоколових ЛЕП для зменшення їх МП.
- Розробити математичну модель та методику розрахунку МП над міськими ТП 100–2х400 кВА при малих (біля 1 м) відстанях до житлових приміщень.
- Забезпечити подальший розвиток методу синтезу САЕ МП вбудованих ТП для зменшення МП в житлових приміщеннях, що розташовані на малій (біля 1 м) висоті над ними.
- Розробити математичні моделі та верифіковані методики розрахунку МП двожильних планарних та коаксіальних кабелів, що використовуються для СКЕ і ВЕЖ житлових приміщень.
- Дослідити МП СКЕ, що побудовані на основі сучасних двожильних планарних НК з мінімальною відстанню між жилами 1,4 мм, та визначити умови їх безпечного використання в житлових приміщеннях.
- Дослідити МП СКЕ, що побудовані на основі сучасних коаксіальних НК, та визначити доцільність їх використання в житлових приміщеннях.
- Дослідити МП ВЕЖ і визначити необхідність його зменшення.
- Розробити методи визначення комплексного впливу зовнішніх та внутрішніх електромереж на рівень МП в житлових приміщеннях будинків.
- Розробити науково-методичні основи забезпечення електромагнітної сумісності зовнішніх і внутрішніх електромереж з житловим середовищем при їх індивідуальному, або груповому впливі.

1.7 Висновки до першого розділу

1. Показано, що теоретичною основою для моделювання та розрахунку квазістаціонарного ЕМП ЕМ промислової частоти, є спрощена система рівнянь

Максвелла, що обумовлює окремий розгляд їх МП і ЕП.

2. Доведено, що рівень індукції МП частотою 50 Гц при його довготривалій дії на населення має властивості канцерогену класу «В» і повинен бути обмежений у житлових приміщеннях до рівня 0,2-0,5 мкТл. Показана недоцільність урахування еліптичності МП при нормуванні індукції МП трифазних ЛЕП.

3. Обґрунтована необхідність створення нових методів моделювання МП ЛЕП, та верифікованої методики розрахунку МП на їх основі, які, на відміну від відомих, дозволяють використовувати в якості розрахункових величин виключно діючі значення магнітної індукції, що підлягають як санітарно-гігієнічному нормуванню, так і фізичному вимірюванню високоточними магнітometрами.

4. Обґрунтована актуальність розвитку структурних методів зменшення МП ЛЕП, а також методів та засобів активного екранування МП вбудованих ТП.

5. Визначено основні джерела МП, що можуть створювати небезпеку за МП для населення житлових будинків, до яких відносяться зовнішні високовольтні ЛЕП, вбудовані в житлові будинки ТП, а також системи кабельного електрообігріву (СКЕ) підлог житлових приміщень та їх внутрішні електромережі живлення (ВЕЖ). Показано, що впливом на житлові приміщення МП побутового електрообладнання (ПЕО) та впливом МП струмів витоку систем заземлення ВЕЖ можна знехтувати.

6. Сформульовані основні завдання дисертаційних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ЖИТЛОВІ ПРИМІЩЕННЯ БУДИНКІВ

2.1 Математична модель магнітного поля ліній електропередачі

Математичну модель МП ЛЕП побудуємо на основі теорії скалярного магнітного потенціалу (1.17) і закону Біо-Савара (1.20) з поєднанням із принципом суперпозиції [53, 54], та методах верифікації результатів математичного моделювання за даними фізичного експерименту.

2.1.1 Моделювання діючого значення індукції магнітного поля ліній електропередачі

В загальному випадку квазістаціонарне МП ЛЕП безкінечної довжини з паралельними поверхні землі проводами може розглядатися як плоскопаралельне [16, 53, 54, 98, 305]. При цьому можна обмежитися двовимірною моделлю, в якій вектор індукції МП має тільки дві просторові компоненти, наприклад, уздовж осей x , z (рис. 2.1), і не залежить від координати y , уздовж якої спрямована вісь ЛЕП:

$$\mathbf{b}(x, z, t) = b_x(x, z, t) + b_z(x, z, t). \quad (2.1)$$

Таку структуру має МП системи нескінченних провідників, перпендикулярних площині XOZ (рис. 2.1), що моделює МП ЛЕП.

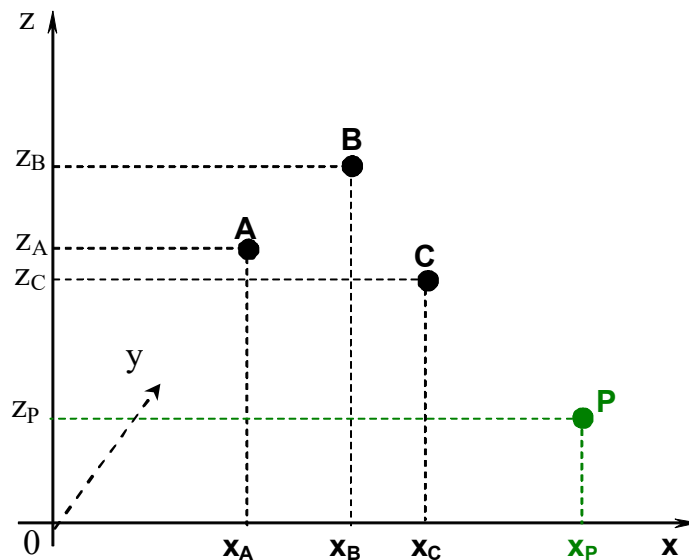


Рисунок 2.1 – Координати проводів фаз А, В, С однофазової ЛЕП та точка спостереження P

З урахуванням викладеного прийmemo наступні припущення:

- 1) проводи ЛЕП (рис. 2.1) є нескінченими лінійними провідниками у вигляді струмових ниток, що розташовані паралельно осі y ;
- 2) струми в проводах різних фаз ЛЕП симетричні, гармонійні і зміщені на 120 ел. градусів;
- 3) взаємний вплив струмів в різних проводах через їх МП відсутній;
- 4) МП системи струмів ЛЕП має дві просторові компоненти x і z :

$$\mathbf{b}(x, z, t) = \mathbf{b}(P, t) = b_x(x, z, t) \mathbf{e}_x + b_z(x, z, t) \mathbf{e}_z, \quad (2.2)$$

де x – горизонтальна вісь;

y – горизонтальна вісь, паралельна осям проводів ЛЕП;

z – вертикальна вісь, перпендикулярна осям проводів ЛЕП;

- 5) у зовнішньому середовищі, що оточує ЛЕП (в тому числі в будівельних конструкціях житлових будинків), відсутні феромагнітні елементи;

$$b(P, t) = b_m(P) \sin(\omega t), \quad b_m(P) > 0. \quad (2.3)$$

Співвідношення (2.3) є загальноприйнятою контрольованою характеристикою, що вживається при розрахунку ГДР МП. Тоді діюче значення індукції МП в заданій точці простору P [10]:

$$B_k(P) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [b(P, t)]^2 dt} = \frac{b_m(P)}{\sqrt{2}} = \frac{|\mathbf{b}(P)|_{max}}{\sqrt{2}}, \quad (2.4)$$

де $T = 2\pi / \omega$ – період коливань;

$|\mathbf{b}|_{max}$ – максимальне значення модуля вектору індукції, яке у разі однофазної лінії збігається з амплітудним значенням.

У разі трифазної ЛЕП природним аналогом цієї формули буде наступний вираз для діючого значення модуля індукції $|\mathbf{b}|$:

$$B(P) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T |\mathbf{b}(P, t)|^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{[b_x(P, t)]^2 + [b_z(P, t)]^2\} dt}, \quad (2.5)$$

де $b_x(P, t), b_z(P, t)$ – компоненти вектору індукції $\mathbf{b}(P, t)$ $P(x, z)$.

Миттєві значення компонент вектору індукції МП, що створюється в навколишньому просторі струмом фази А, можуть бути записані у вигляді [306, 307]:

$$b_{A,x}(x, z, t) = -\frac{\mu_0 i_A(t)}{2\pi} \frac{z - z_A}{r_A^2} = -\frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{z - z_A}{r_A^2} \sin(\omega t) \equiv B_{A,x}(x, z) \sin(\omega t), \quad (2.6)$$

$$b_{A,z}(x, z, t) = \frac{\mu_0 i_A(t)}{2\pi} \frac{x - x_A}{r_A^2} = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{x - x_A}{r_A^2} \sin(\omega t) \equiv B_{A,z}(x, z) \sin(\omega t), \quad (2.7)$$

де $i_A(t) = I_m \sin(\omega t)$ – миттєве значення струму фази А;

(x_A, z_A) – координати лінійного струму фази А в площині, перпендикулярній напрямку проводів;

$r_A^2 = (x - x_A)^2 + (z - z_A)^2$, а $B_{A,x}(x, z)$ і $B_{A,z}(x, z)$ – просторові амплітуди.

Аналогічні вирази записуються і для фаз В і С, замінюючи (x_A, z_A) на (x_B, z_B) і (x_C, z_C) відповідно і використовуючи наступні вирази для фазних струмів.

$$i_A(t) = I_m \sin(\omega t), i_B(t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), i_C(t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right). \quad (2.8)$$

Тоді просторові компоненти МП, викликаного струмами фаз В і С, набувають вигляду, аналогічному (2.6–2.7):

$$b_{B,x}(x, z, t) = -\frac{\mu_0 i_B(t)}{2\pi} \frac{z - z_B}{r_B^2} = -\frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{z - z_B}{r_B^2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \equiv B_{B,x}(x, z) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$b_{B,z}(x, z, t) = \frac{\mu_0 i_B(t)}{2\pi} \frac{x - x_B}{r_B^2} = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{x - x_B}{r_B^2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \equiv B_{B,z}(x, z) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$b_{C,x}(x, z, t) = -\frac{\mu_0 i_C(t)}{2\pi} \frac{z - z_C}{r_C^2} = -\frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{z - z_C}{r_C^2} \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \equiv B_{C,x}(x, z) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$b_{C,z}(x, z, t) = \frac{\mu_0 i_C(t)}{2\pi} \frac{x - x_C}{r_C^2} = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{x - x_C}{r_C^2} \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) \equiv B_{C,z}(x, z) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right).$$

З урахуванням фаз А, В, С проводів, компоненти результуючого вектору індукції МП в точці спостереження $P(x, z)$ можна записати у вигляді суми доданків, викликаних струмом кожної фази:

$$b_x(x, z, t) = B_{A,x}(x, z) \sin(\omega t) + B_{B,x}(x, z) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + B_{C,x}(x, z) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right); \quad (2.9)$$

$$b_z(x, z, t) = B_{A,z}(x, z) \sin(\omega t) + B_{B,z}(x, z) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + B_{C,z}(x, z) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right). \quad (2.10)$$

Розкриваючи дужки, отримуємо:

$$\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\omega t),$$

$$\sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} \sin(\omega t) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\omega t).$$

Підставивши ці формули в (2.9, 2.10) після деяких перетворень визначимо компоненти вектору індукції МП ЛЕП :

$$b_x(P, t) = \left(B_{A,x}(P) - \frac{1}{2} B_{B,x}(P) - \frac{1}{2} B_{C,x}(P) \right) \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} (B_{B,x}(P) - B_{C,x}(P)) \cos(\omega t); \quad (2.11)$$

$$b_z(P, t) = \left(B_{A,z}(P) - \frac{1}{2} B_{B,z}(P) - \frac{1}{2} B_{C,z}(P) \right) \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} (B_{B,z}(P) - B_{C,z}(P)) \cos(\omega t). \quad (2.12)$$

У цих формулах проведено розділення просторово залежних і тимчасових функцій.

Застосовуючи до цих виразів операцію усереднення відповідно до (2.4), отримуємо шукані діючі значення компонент індукції МП ЛЕП [305, 306]:

$$\tilde{B}_x(P) = \sqrt{\frac{1}{2} [B_{A,x}^2 + B_{B,x}^2 + B_{C,x}^2 - B_{A,x}B_{B,x} - B_{A,x}B_{C,x} - B_{B,x}B_{C,x}]}; \quad (2.13)$$

$$\tilde{B}_z(P) = \sqrt{\frac{1}{2} [B_{A,z}^2 + B_{B,z}^2 + B_{C,z}^2 - B_{A,z}B_{B,z} - B_{A,z}B_{C,z} - B_{B,z}B_{C,z}]}. \quad (2.14)$$

Діюче значення модуля індукції МП ЛЕП визначимо як

$$\tilde{B}(P) = \sqrt{[\tilde{B}_x(P)]^2 + [\tilde{B}_z(P)]^2}. \quad (2.15)$$

У цих формулах прийняті наступні позначення:

$$B_{A,x}(x,z) = -\frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{z - z_A}{r_A^2}, \quad B_{A,z}(x,z) = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{x - x_A}{r_A^2};$$

$$B_{B,x}(x,z) = -\frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{z - z_B}{r_B^2}, \quad B_{B,z}(x,z) = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{x - x_B}{r_B^2};$$

$$B_{C,x}(x,z) = -\frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{z - z_C}{r_C^2}, \quad B_{C,z}(x,z) = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi} \frac{x - x_C}{r_C^2};$$

$$r_A^2 = (x - x_A)^2 + (z - z_A)^2, \quad r_B^2 = (x - x_B)^2 + (z - z_B)^2, \quad r_C^2 = (x - x_C)^2 + (z - z_C)^2.$$

Тут доцільно відмітити, що співвідношення (2.13–2.15) справедливі для загального випадку тривимірного МП при довільному числі трифазних джерел.

Розрахунок індукції МП, викликаного декількома, поряд прокладеними (багатоколовими) трифазними ЛЕП, виконуємо наступним чином. Для кожної з ліній з номерами $n=1, \dots, N$ обчислюються індукція $B_{x,n}^A(x,y)$ $B_{x,n}^B(x,y)$ [192, 306]:

$$B_x^A(x,y) = \sum_{n=1}^N B_{x,n}^A(x,y); \quad B_x^B(x,y) = \sum_{n=1}^N B_{x,n}^B(x,y); \quad B_x^C(x,y) = \sum_{n=1}^N B_{x,n}^C(x,y); \quad (2.16)$$

$$B_z^A(x,y) = \sum_{n=1}^N B_{z,n}^A(x,y); \quad B_z^B(x,y) = \sum_{n=1}^N B_{z,n}^B(x,y); \quad B_z^C(x,y) = \sum_{n=1}^N B_{z,n}^C(x,y). \quad (2.17)$$

Значення індукції сумарного МП, що діє, знаходимо за формулами (2.13–2.15).

Запропонована автором математична модель МП ЛЕП [192, 305-308], що описується співвідношеннями (2.1–2.15), на відміну від відомих [89, 90, 98] є універсальною і дозволяє коректно моделювати тривимірне МП ЛЕП з розщепленими проводами фаз, а також МП багатоколових ЛЕП, а також підлягає загальнодоступній верифікації шляхом вимірювання діючого значення індукції МП ЛЕП стандартними магнітометрами.

Оцінімо похибку запропонованої математичної моделі МП ЛЕП, що може бути викликана прийнятими вище припущеннями.

У разі, якщо моделюється МП в дальній зоні ЛЕП, коли відстань від крайнього проводу ЛЕП до точки спостереження перевищує міжфазну відстань D , то форма поперечного перетину провідників і його розміри практично не впливають на величину МП ЛЕП.

При побудові математичної моделі ми знехтували таким явищем, як провис проводів ЛЕП [309, 310]. Точна форма проводу, закріпленого між двома опорами рівної висоти h_m , що знаходяться на відстані L один від одного задається формулою [309, 310]:

$$y = h + 2\alpha \sin h^2 \left(\frac{z}{2\alpha} \right), \quad (2.18)$$

де h – мінімальна висота підвісу проводів.

Таким чином, $S = h_m - h$ – є провис, тобто максимальна величина відхилення проводів від горизонталі. Для симетричного підвісу проводів між опорами рівної висоти максимальна величина відхилення розташована в центрі. Параметр α є вирішенням трансцендентного рівняння:

$$\frac{2(h_m - h)}{L} p = \sin h^2(p), \quad p = \frac{L}{4\alpha}. \quad (2.19)$$

Параметр α також асоціюється з механічним розтягуванням проводів [309, 310]:

$$\alpha = T_h / w, \quad (2.20)$$

де T_h – механічна напруга в центрі провідника;

w – вага дроту на одиницю довжини.

Як слідує з [309, 310], провис впливає на розподіл МП в зоні, розташованій безпосередньо під проводами. Тут, за даними роботи [309], різниця між точним рішенням, що враховує провис і рішенням, що використовує модель прямолінійних проводів, може досягати 40%. Проте, ця різниця швидко зменшується із збільшенням відстані від ЛЕП і біля межі санітарної зони стає біля 2%, що є несуттєвим для інженерних розрахунків.

У запропонованому методі розрахунку МП ЛЕП ми також нехтуємо впливом на розподіл МП ЛЕП вторинного МП, викликаного індукованими струмами в провідному напівпросторі, розташованим нижче за рівень поверхні землі. У роботах [310, 311] розглянутий метод обліку МП від індукованих струмів у вигляді МП фіктивних провідників, розташованих в нижній напівплощині. У розглянутій моделі глибина розташування ζ цих фіктивних джерел визначається формулою:

$$\zeta = \sqrt{2}\delta \exp\left(-\frac{j\pi}{4}\right). \quad (2.21)$$

Тут δ глибина скін-шару ґрунту, на якому розташована ЛЕП:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (2.22)$$

де ρ [Ом·М] – питомий опір ґрунту;

f – частота джерела, Гц. Для ЛЕП $f = 50$ Гц.

Питомий опір ρ залежить від складу ґрунту (пісок, щебінь, глина, підзол, чорнозем тощо) і його вологості. Характерні величини лежать в межах $10 < \rho < 1000$ Ом·м. Очевидно, що в цьому випадку фіктивні джерела, що моделюють вторинне МП ЛЕП, лежать на глибині декількох сотень метрів і не можуть зробити істотний вплив на розподіл МП. Це підтверджують дані, приведені в [310], для різних значень питомого опору ґрунту.

Таблиця 2.1 – Вплив вторинного МП на розподіл МП ЛЕП

Відстань центрального провідника	Вплив вторинного МП, мкТл			
	Без урахування впливу землі	$\rho = 10$ Ом·м	$\rho = 100$ Ом·м	$\rho = 1000$ Ом·м
10 м	23.619	23.642	23.621	23.619
20 м	15.218	15.22	15.218	15.218
30 м	7.957	7.949	7.957	7.957
40 м	4.584	4.575	4.583	4.584

У табл. 2.1 приведені дані про вплив струмів, що індукуються в землі, на розподіл МП ЛЕП. Дані відносяться до ЛЕП 500 кВ з висотою підвісу проводів близько 20 м. Не дивлячись на частинний характер даних, приведених в таблиці, можна зробити загальний висновок про незначний вплив індукованих струмів на розподіл МП ЛЕП.

Вплив феромагнітних елементів будівельних конструкцій житлових будинків на рівень МП в них буде розглянутий окремо в підрозділі 2.4.

Таким чином, запропонована автором математична модель індукції МП протяжної трифазної ЛЕП, що описується співвідношеннями (2.1)–(2.15), є достатньо обґрунтованою, а прийняті при її розробці припущення коректними.

2.1.2 Теоретичні положення методу та методики розрахунку магнітного поля ліній електропередачі

У цьому підрозділі на основі запропонованої математичної моделі МП ЛЕП (2.1–2.15) будуть виведені співвідношення для аналітичного розрахунку МП повітряних ЛЕП [192, 305]. Запишемо формули, що застосовуються для осереднення величин, які гармонійно змінюються в часі. Діюче значення величини $d(t)$, що змінюється в часі з частотою ω дорівнює:

$$\tilde{d} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T d^2(t) dt}, \quad T = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (2.23)$$

Однофазна величина:

$$d(t) = a \sin \omega t + b \cos \omega t = \sqrt{(a^2 + b^2)} \sin(\omega t + \psi). \quad (2.24)$$

Діюче (усереднене) значення:

$$\tilde{d} = \sqrt{\frac{1}{2}(a^2 + b^2)}. \quad (2.25)$$

Трифазна величина:

$$D(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r}) \sin(\omega t) + B(\mathbf{r}) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + C(\mathbf{r}) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right). \quad (2.26)$$

Використовуючи перетворення:

$$\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}\sin\omega t + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\omega t, \quad \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}\sin\omega t - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\omega t,$$

запишемо $D(\mathbf{r}, t)$ у вигляді, аналогічному (2.24):

$$D(\mathbf{r}, t) = \left[A(\mathbf{r}) - \frac{1}{2}B(\mathbf{r}) - \frac{1}{2}C(\mathbf{r}) \right] \sin\omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{1}{2}B(\mathbf{r}) - \frac{1}{2}C(\mathbf{r}) \right] \cos\omega t.$$

Застосовуючи формулу (2.25), отримуємо діюче значення трифазної величини:

$$\tilde{D}(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[A^2(\mathbf{r}) + B^2(\mathbf{r}) + C^2(\mathbf{r}) - A(\mathbf{r})B(\mathbf{r}) - A(\mathbf{r})C(\mathbf{r}) - B(\mathbf{r})C(\mathbf{r}) \right]}. \quad (2.27)$$

Нехай змінне МП ЛЕП створюється трифазною системою струмів

$$i_A(t) = I_m \sin(\omega t), i_B(t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), i_C(t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right). \quad (2.28)$$

в нескінченно довгих паралельних провідниках, як показано на рис. 2.1.

З урахуванням фаз струмів в проводах кожному з двох компонент вектору індукції МП ЛЕП в точці спостереження P можна записати у вигляді суми індукцій, викликаних струмом кожної фази.

$$b_x(P, t) = B_{x,A}(P) \sin(\omega t) + B_{x,B}(P) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + B_{x,C}(P) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right); \quad (2.29)$$

$$b_z(P, t) = B_{z,A}(P) \sin(\omega t) + B_{z,B}(P) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + B_{z,C}(P) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right), \quad (2.30)$$

де $B_{x,\xi}(P)$, $B_{z,\xi}(P)$, $\xi = A, B, C$ задані виразами (2.31, 2.32) [192, 305, 306].

$$B_{x,\xi}(P) = -\frac{\mu_0}{2\pi} I_m \frac{z_P - z_\xi}{(x_P - x_\xi)^2 + (z_P - z_\xi)^2}; \quad (2.31)$$

$$B_{z,\xi}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} I_m \frac{x_P - x_\xi}{(x_P - x_\xi)^2 + (z_P - z_\xi)^2}, \quad (2.32)$$

тут I_m [А] – амплітуда струму в кожній з фаз;

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ [Гн/м] – магнітна стала;

x_P, z_P [м] – координати точки спостереження в площині, перпендикулярній осі ЛЕП;

x_ξ, z_ξ [м] – координати перетину провідником фази $\xi \in A, B, C$ площини, перпендикулярної осі ЛЕП.

Застосовуючи формулу (2.27) отримаємо діюче значення кожної з компонент вектору індукції, що визначаються відповідно до (2.33, 2,34), а також діюче значення індукції МП ЛЕП відповідно до (2.35) як [192, 305, 306]:

$$\tilde{B}_x(P) = \sqrt{\frac{1}{2} [B_{x,A}^2 + B_{x,B}^2 + B_{x,C}^2 - B_{x,A}B_{x,B} - B_{x,A}B_{x,C} - B_{x,B}B_{x,C}]}; \quad (2.33)$$

$$\tilde{B}_z(P) = \sqrt{\frac{1}{2} [B_{z,A}^2 + B_{z,B}^2 + B_{z,C}^2 - B_{z,A}B_{z,B} - B_{z,A}B_{z,C} - B_{z,B}B_{z,C}]}; \quad (2.34)$$

$$\tilde{B}_d(P) = \sqrt{\tilde{B}_x^2(P) + \tilde{B}_z^2(P)}. \quad (2.35)$$

Зауважимо, що введені до розгляду функції $\tilde{B}_x(P)$, $\tilde{B}_z(P)$ можуть безпосередньо використовуватись для обробки даних вимірювань, оскільки відповідні їм значення індукції МП фіксуються датчиком магнітометру, який розміщений в точці спостереження P і орієнтується в напрямках координатних осей x або y .

У випадку трипровідної трифазної ЛЕП, отримані розрахункові співвідношення (2.33–2.35) можуть бути значно спрощені. Для цього введемо до розгляду вектори, спрямовані від кожного фазного проводу до точки спостереження

$$\mathbf{R}_A = (x - x_A)\mathbf{e}_x + (z - z_A)\mathbf{e}_z; \quad (2.36)$$

$$\mathbf{R}_B = (x - x_B)\mathbf{e}_x + (z - z_B)\mathbf{e}_z; \quad (2.37)$$

$$\mathbf{R}_C = (x - x_C)\mathbf{e}_x + (z - z_C)\mathbf{e}_z. \quad (2.38)$$

Використовуючи прийняті позначення, вираз для діючого значення індукції МП ЛЕП (2.5) можна записати у вигляді:

$$\tilde{B}(P) = \frac{\mu I_m}{2\sqrt{2}\pi} \sqrt{\frac{1}{R_A^2} + \frac{1}{R_B^2} + \frac{1}{R_C^2} - \frac{(\mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_B)}{R_A^2 R_B^2} - \frac{(\mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_C)}{R_A^2 R_C^2} - \frac{(\mathbf{R}_C \cdot \mathbf{R}_B)}{R_C^2 R_B^2}}. \quad (2.39)$$

Перепишемо цей вираз у вигляді

$$\tilde{B}(P) = \frac{\mu I_d}{2\sqrt{2}\pi} \sqrt{\frac{2}{R_A^2} + \frac{2}{R_B^2} + \frac{2}{R_C^2} - \frac{2(\mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_B)}{R_A^2 R_B^2} - \frac{2(\mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_C)}{R_A^2 R_C^2} - 2\frac{(\mathbf{R}_C \cdot \mathbf{R}_B)}{R_C^2 R_B^2}}, \quad (2.40)$$

$$\text{де } I_d = I_m / \sqrt{2}$$

і скористаємося формулами, що легко перевіряються:

$$2(\mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_B) = R_A^2 + R_B^2 - D_{AB}^2; \quad (2.41)$$

$$2(\mathbf{R}_C \cdot \mathbf{R}_B) = R_C^2 + R_B^2 - D_{CB}^2; \quad (2.42)$$

$$2(\mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_C) = R_A^2 + R_C^2 - D_{AC}^2, \quad (2.43)$$

де D_{AB} , D_{AC} , D_{CB} – відстані від фази A до B , від A до C та від B до C відповідно.

Тоді, остаточно точний вираз для діючого значення індукції МП трифазної одноколової ЛЕП може бути записано у спрощеному вигляді:

$$\tilde{B}(x, z) = \frac{\mu_0 I_d}{2\sqrt{2}\pi} \sqrt{\left(\frac{D_{AB}}{R_A R_B}\right)^2 + \left(\frac{D_{AC}}{R_A R_C}\right)^2 + \left(\frac{D_{BC}}{R_B R_C}\right)^2}. \quad (2.44)$$

Цей вираз збігається з формулою, отриманою в роботах [107, 108] іншим шляхом, використовуючи метод комплексних амплітуд.

Спрощуючи (2.44), отримуємо приблизне співвідношення для оцінки індукції МП трифазної ЛЕП:

$$B_k(x, z) \approx \frac{\sqrt{3}\mu_0 I_d D}{2\sqrt{2}\pi R^2}; \quad D = \sqrt{\frac{D_{AB}^2 + D_{AC}^2 + D_{BC}^2}{3}}, \quad (2.45)$$

де R – відстань від точки спостереження P до геометричного центру трикутника, утвореного точками перетину площини $хоу$ (рис. 2.1) з проводами фаз A , B , C ЛЕП.

Співвідношення (2.45) є приблизним (похибка біля 10 %) і може бути використане тільки для оціночного розрахунку МП ЛЕП на відстанях більш $2D$ від осі ЛЕП. Але воно дозволяє чітко визначити характер розподілу МП і виявити основні впливові параметри ЛЕП на її МП. Так, індукція МП ЛЕП пропорційна струму I та усередненій відповідно до (2.45) міжфазній відстані D . Вона спадає обернено пропорційно квадрату відстані R до точки спостереження. Величина D залежить від геометрії підвісу проводів ЛЕП і набуває мінімальних значень при їх симетричному розташуванні.

Розрахункові співвідношення для визначення магнітного поля ЛЕП з розщепленими проводами фаз. Обчислення діючого значення індукції МП ЛЕП з

розщепленими проводами фаз проводиться наступним чином [192, 305]. В точці спостереження P обчислюються амплітуди компонент вектору індукції МП, викликаного кожною з фаз $\xi \in A, B, C$. Ці компоненти обчислюються як суми компонент векторів індукції МП, викликаного струмом кожного розщеплення даної фази:

$$b_{x,A}(P,t) = B_{x,A}(P) \sin(\omega t), \quad B_{x,A}(P) = -\frac{\mu_0 I_m}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{z_P - z_{A,n}}{(x_P - x_{A,n})^2 + (z_P - z_{A,n})^2}; \quad (2.46)$$

$$b_{x,B}(P,t) = B_{x,B}(P) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \quad B_{x,B}(P) = -\frac{\mu_0 I_m}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{z_P - z_{B,n}}{(x_P - x_{B,n})^2 + (z_P - z_{B,n})^2}; \quad (2.47)$$

$$b_{x,C}(P,t) = B_{x,C}(P) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right), \quad B_{x,C}(P) = -\frac{\mu_0 I_m}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{z_P - z_{C,n}}{(x_P - x_{C,n})^2 + (z_P - z_{C,n})^2}; \quad (2.48)$$

$$b_{z,A}(P,t) = B_{y,A}(P) \sin(\omega t), \quad B_{z,A}(P) = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{x_P - x_{A,n}}{(x_P - x_{A,n})^2 + (z_P - z_{A,n})^2}; \quad (2.49)$$

$$b_{z,B}(P,t) = B_{z,B}(P) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \quad B_{z,B}(P) = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{x_P - x_{B,n}}{(x_P - x_{B,n})^2 + (z_P - z_{B,n})^2}; \quad (2.50)$$

$$b_{z,C}(P,t) = B_{z,C}(P) \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right), \quad B_{z,C}(P) = \frac{\mu_0 I_m}{2\pi N} \sum_{n=1}^N \frac{x_P - x_{C,n}}{(x_P - x_{C,n})^2 + (z_P - z_{C,n})^2}, \quad (2.51)$$

де N – кількість розщеплень провідника кожної фази ЛЕП;

I_m – амплітуда струму кожної з фаз;

I_m / N – амплітуда струму кожної розщепленої лінії;

$x_{\xi,n}, z_{\xi,n}$ [м] – координати перетину провідником розщеплення з номером n фази $\xi \in A, B, C$ площини, перпендикулярній осі ЛЕП.

Розрахункові співвідношення для інженерного розрахунку магнітного поля багатоколових ЛЕП. Весь попередній матеріал даного розділу передбачає, що розрахунок МП проводиться для єдиної, ізольованої в просторі ЛЕП. Однак, на практиці нерідкі випадки, коли область дослідження знаходиться під впливом

двох або рідше, трьох різних ЛЕП. Ми також будемо вважати, що між струмами різних синхронізованих ЛЕП можуть існувати часові зсуви, зумовлені різноманітними навантаженнями.

Розглянемо більш простий випадок, коли часовий зсув між фазними струмами двох близько розташованих ЛЕП відсутній. В цьому випадку x – компоненту вектору індукції МП для кожної з ЛЕП можна записати у вигляді [192, 305]:

$$\begin{aligned} b_x^i(P_i, t) &= \left(B_{A,x}^i(P) - \frac{1}{2} B_{B,x}^i(P) - \frac{1}{2} B_{C,x}^i(P) \right) \sin(\omega t) + \\ &+ \frac{\sqrt{3}}{2} (B_{B,x}^i(P) - B_{C,x}^i(P)) \cos(\omega t) = \\ &= S_x^i(P) \sin(\omega t) + C_x^i(P) \cos(\omega t), \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Аналогічні вирази можна записати і для решти компонент вектора індукції. Тоді сумарне МП матиме компоненти, що дорівнюють:

$$\begin{aligned} b_x(P, t) &= (S_x^1(P) + S_x^2(P)) \sin(\omega t) + (C_x^1(P) + C_x^2(P)) \cos(\omega t) = \\ &= S_x(P) \sin(\omega t) + C_x(P) \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (2.53)$$

Такі самі вирази записуються і для решти компонент вектора індукції. Тоді діючі значення компонент індукції запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{B}_x(P) &= \sqrt{\frac{1}{2} [(S_x(P))^2 + (C_x(P))^2]} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2} [B_{A,x}^2 + B_{B,x}^2 + B_{C,x}^2 - B_{A,x}B_{B,x} - B_{A,x}B_{C,x} - B_{B,x}B_{C,x}]}, \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}_z(P) &= \sqrt{\frac{1}{2} [(S_z(P))^2 + (C_z(P))^2]} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2} [B_{A,z}^2 + B_{B,z}^2 + B_{C,z}^2 - B_{A,z}B_{B,z} - B_{A,z}B_{C,z} - B_{B,z}B_{C,z}]}. \end{aligned} \quad (2.55)$$

Ці формули збігаються з аналогічними виразами для відокремленої ЛЕП, однак, кожна з компонент вектору індукції є сумою компонент векторів індукції двох ЛЕП. Таким чином, при розрахунку МП двох синхронізованих ЛЕП відповідні компоненти вектору індукції підсумовуються в кожній точці простору і подальший розрахунок ведеться за формулами для відокремленої ЛЕП.

Розглянемо загальний випадок, коли між фазними струмами двох ЛЕП існує постійний часовий зсув, еквівалентний кутовому зсуву в φ_0 градусів:

$$\begin{aligned} b_x^1(P_i, t) &= S_x^1(P) \sin(\omega t) + C_x^1(P) \cos(\omega t); \\ b_x^2(P_i, t) &= S_x^2(P) \sin(\omega t + \varphi_0) + C_x^2(P) \cos(\omega t + \varphi_0) = \\ &= [S_x^2(P) \cos(\varphi_0) - C_x^2(P) \sin(\varphi_0)] \sin(\omega t) + \\ &+ [S_x^2(P) \sin(\varphi_0) + C_x^2(P) \cos(\varphi_0)] \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (2.56)$$

В цьому випадку вектор індукції сумарного МП має x – компоненту у вигляді:

$$\begin{aligned} b_x(P_i, t) &= [S_x^1(P) + S_x^2(P) \cos(\varphi_0) - C_x^2(P) \sin(\varphi_0)] \sin(\omega t) + \\ &+ [C_x^1(P) + S_x^2(P) \sin(\varphi_0) + C_x^2(P) \cos(\varphi_0)] \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (2.57)$$

Тоді діюче значення x – компоненти сумарного МП запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{B}_x(P) &= \left\{ \frac{1}{2} [S_x^1(P) + S_x^2(P) \cos(\varphi_0) - C_x^2(P) \sin(\varphi_0)]^2 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} [C_x^1(P) + S_x^2(P) \sin(\varphi_0) + C_x^2(P) \cos(\varphi_0)]^2 \right\}^{1/2}. \end{aligned}$$

Або після деяких перетворень:

$$\begin{aligned}\tilde{B}_x(P) = & \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \left(S_x^1(P) + S_x^2(P) \right)^2 + \left(C_x^1(P) + C_x^2(P) \right)^2 + \right. \\ & + 2 \left[S_x^1(P) S_x^2(P) + C_x^1(P) C_x^2(P) \right] \left[\cos(\varphi_0) - 1 \right] + \\ & \left. + 2 \left[C_x^1(P) S_x^2(P) - S_x^1(P) C_x^2(P) \right] \sin(\varphi_0) \right\}^{1/2}.\end{aligned}\quad (2.58)$$

Легко побачити, що при $\varphi_0 = 0$ формула (2.58) переходить в (2.54) тому що в цьому випадку $[\cos(\varphi_0) - 1] = 0$, $\sin(\varphi_0) = 0$.

Однак, в загальному випадку розрахунок слід вести, використовуючи (2.58) та аналогічну формулу для y -компоненти вектору індукції.

Запропоновані автором теоретичні положення (2.23–2.58) використані для розробки методики розрахунку МП одноколових, багатоколових ЛЕП, та ЛЕП з розщепленими проводами фаз, яка предствлена в Додатку Б2, і стали основою для розробки методики Міненерго «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика [308], що є чинною в Україні з 2016 року.

2.2 Методика вимірювання діючого значення індукції магнітного поля ліній електропередачі

Методика вимірювання індукції МП високовольтних трифазних ЛЕП необхідна для коректної експериментальної перевірки проєктних розрахунків. Вона розроблена з урахуванням світового досвіду вимірювання МП ЛЕП [312, 313] із використанням в якості контрольованої характеристики діючого значення індукції змінного МП [192, 193, 305, 306].

Вимірювання МП необхідно проводити в умовах експлуатації ЛЕП для перевірки результатів розрахунку і санітарно-гігієнічної оцінки індукції їх МП. В якості контрольованої характеристики МП ЛЕП використовується діюче значення його індукції.

Вимірювання діючого значення індукції МП ЛЕП повинні проводитися приладами, які пройшли метрологічну атестацію та мають свідоцтво про

періодичну перевірку. Для цього в інституті використовується однокомпонентний феррозондовий магнітометр (рис. 2.2) типу Magnetoscop 1.069 фірми Foerster (діапазон вимірів індукції МП 1 нТл-600 мкТл, смуга пропускання 0-180 Гц, відносна похибка 2,5 %) з системою точного позиціонування датчика по координатним осям.



Рисунок 2.2 – Феррозондовий магнітометр Magnetoscop 1.069 фірми Foerster

Для вимірювання відстані рекомендується використовувати лазерні далекоміри або рулетки з діелектричного матеріалу довжиною більше 10 м з нанесеними сантиметровими поділками.

Вимірювання повинні проводитися на рівних ділянках, вільних від інших ЛЕП, будівель та інших споруд. Для повітряної ЛЕП траса розташування точок вимірювань повинна проходити через точку проекції найбільшого провисання проводу (середина між опорами), перпендикулярно до ЛЕП (рис. 2.3).

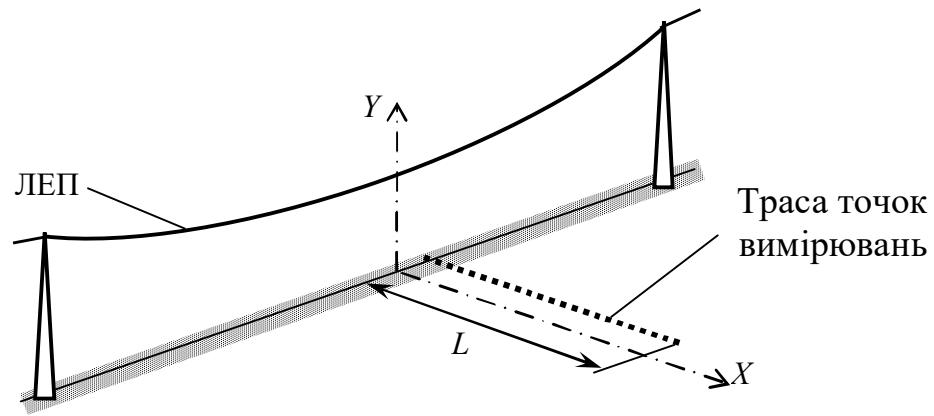


Рисунок 2.3 – Схема розташування ЛЕП і траси точок вимірювань

Відстань L (рис. 2.3) відраховується від проекції крайнього проводу, залежить від напруги ЛЕП і повинна складати не менше подвійної величини охоронної зони ЛЕП [11].

Інтервали між точками вимірювання повинні складати :

1. Під ЛЕП і на відстанях менше 10 м від проекції крайнього проводу – не більше 1 м;
2. На відстанях більше 10 м від проекції крайнього проводу до границі охоронної зони ЛЕП – не більше 2 м;
3. За межами охоронної зони ЛЕП – не більше 5 м;

МП в i -й точці вимірювання визначається за результатами вимірювання компонент індукції МП у двох ортогональних положеннях датчика магнітометра за формулою

$$B_i = \sqrt{B_{xi}^2 + B_{yi}^2}, \quad (2.59)$$

де B_{xi} , B_{yi} – виміряні значення компонент індукції магнітного поля в i -й точці вимірювань при положенні датчика магнітометра по осям X , Y .

Підготовка до проведення вимірювань МП ЛЕП:

– визначити параметри ЛЕП згідно технічної документації (кількість та положення проводів, для повітряної лінії висоту підвісу проводів у точці

найбільшого провисання, для кабельної лінії глибину прокладки кабелю, для багатоколових ЛЕП порядок чергування фаз);

- вибрати систему координат, до якої будуть прив'язані результати вимірювань згідно до рис. 2.3;

- скласти схему вимірювань МП ЛЕП, вибравши трасу точок вимірювань та інтервали між точками вимірювання;

- нанести розташування точок вимірювань на землю, позначивши вибрані точки вимірювання та проекції крайніх проводів ЛЕП;

- підготовку магнітометру проводити відповідно до інструкції з експлуатації приладу.

Проведення вимірювань МП ЛЕП.

Встановити датчик магнітометру у точці вимірювання (для ЛЕП на висоті 1,8 м, для КЛ на висоті 0,5 м над рівнем землі) і зорієнтувати його у одному з напрямків (X , Y) вибраної системи координат, наприклад по осі X . Відповідно магнітометр буде вимірювати одну компоненту діючого значення індукції магнітного поля B_{xi} .

Зафіксувати виміряне значення індукції МП B_{xi} та зафіксувати час у момент вимірювання для подальшої синхронізації виміряного МП зі струмом навантаження ЛЕП, що надається Обленерго. Повторюючи процедуру провести вимірювання компоненти індукції МП B_{yi} а також вимірювання компонент індукції МП B_{xi} , B_{yi} в усіх точках вимірювання.

За результатами вимірювань у кожній точці розрахувати індукцію МП B_i за формулою (2.59).

За результатами вимірювань складається протокол з зазначенням параметрів ЛЕП, схеми траси точок вимірювання і результатів вимірювань у цих точках діючого значення індукції МП B_{xi} , B_{yi} і B_i .

Запропонована автором методика вимірювань індукції МП ЛЕП використана Міненерго при розробці діючої методики [308] з розрахунку ЕМП трифазних високовольтних ЛЕП.

2.3 Експериментальна перевірка запропонованої математичної моделі магнітного поля ліній електропередачі та методики розрахунку індукції магнітного поля на її основі

2.3.1 Експериментальна перевірка в лабораторних умовах

Експериментальна перевірка розроблених математичної моделі та методики розрахунку індукції МП трифазних високовольтних ЛЕП, проведена на макеті трифазної лінії, змонтованій на магнітовимірювальному стенді ІЕМС НАН України [15, 192, 193] (рис. 2.4 а, 2.4 б) відповідно до методики 2.2.

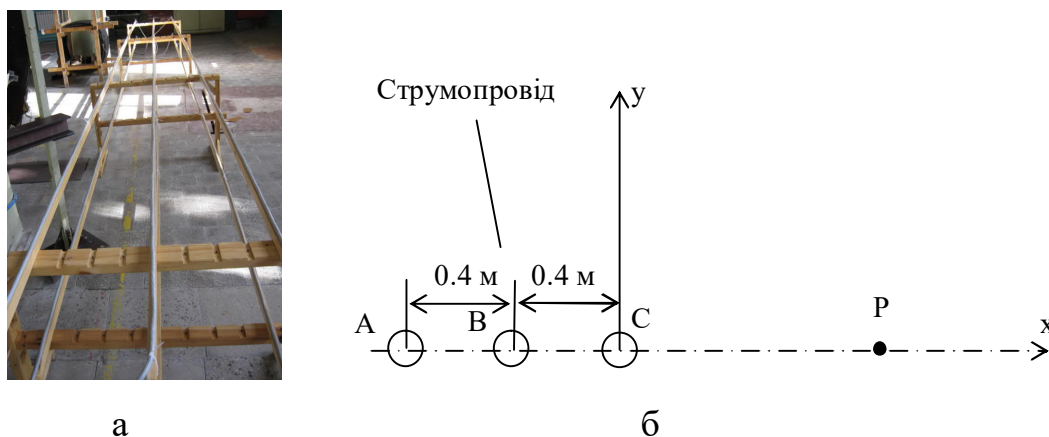


Рисунок 2.4 – Лабораторний макет трифазної одноколової ЛЕП
довжиною 9 м

У табл. 2.2 і на рис. 2.5 приведені результати вимірів (B_P) та розрахунку діючого значення індукції МП (B) трифазної ЛЕП (рис. 2.4 а) згідно розробленої методики при струмі $I = 56$ А. Вихідні дані для розрахунку визначалися відповідно до рис. 2.4 б. Розрахунок виконувався за співвідношеннями (2.31–2.35). Як слідує з табл. 2.2, відносна похибка результатів вимірів індукції МП на макеті не перевищує 5%, що є прийнятною. Монотонне збільшення похибки вимірювання при віддаленні точки спостереження від лабораторного макету ЛЕП по координаті x (рис. 2.5), пояснюється його обмеженою довжиною (9 м) і збільшенням впливу крайового ефекту на результати вимірів.

Таблиця 2.2 – Результати лабораторних досліджень індукції МП трифазної одноколової повітряної ЛЕП

Координата точки P x , м	Експеримент B_p , мкТл	Розрахунок B , мкТл	Відносна похибка δ , %
0,8	6,24	6,17	1,14
0,9	5,23	5,15	1,63
1,0	4,38	4,37	0,21
1,1	3,72	3,76	1,16
1,2	3,20	3,27	2,00
1,3	2,80	2,87	2,32
1,4	2,45	2,54	3,45
1,5	2,18	2,27	3,90
1,6	1,94	2,03	4,37
1,7	1,75	1,84	4,98

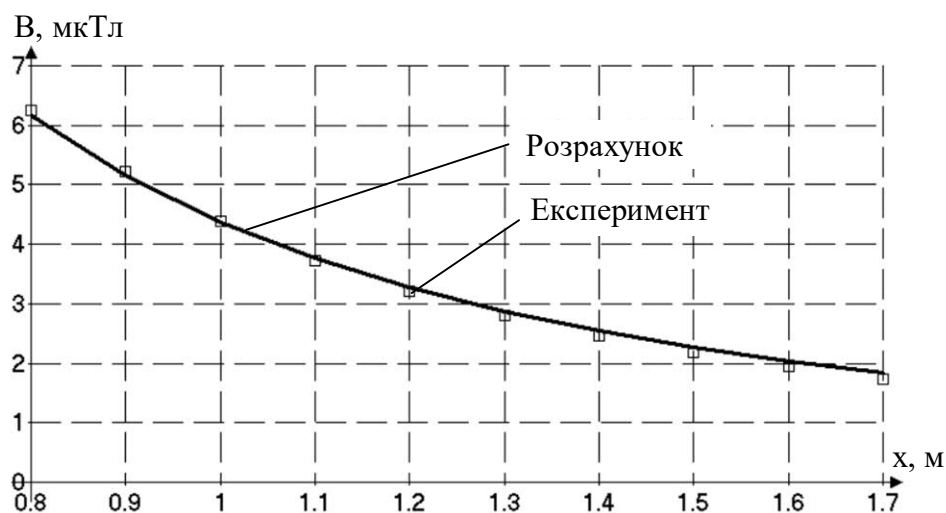
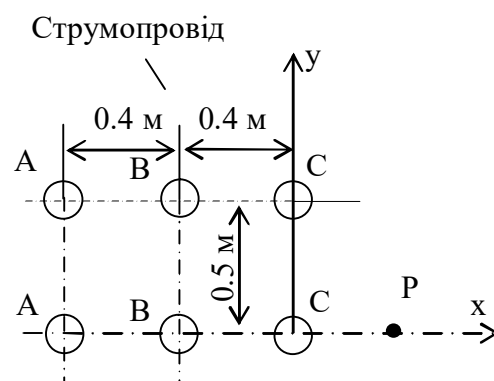


Рисунок 2.5 – Результати вимірювання та розрахунку індукції МП лабораторного макету трифазної одноколової ЛЕП

Достовірність розробленої методики також підтверджена експериментально для двоколової ЛЕП на її лабораторному макеті довжиною 9 м (рис. 2.6.), про що свідчать результати експерименту, представлені в табл. 2.3.



а



б

Рисунок 2.6 – Лабораторний макет трифазної двоколової ЛЕП

Таблиця 2.3 – Результати лабораторних досліджень індукції МП трифазної двоколової повітряної ЛЕП

Координата точки P x , м	Експеримент B_P , мкТл	Розрахунок B , мкТл	Відносна похибка δ , %
0,8	10,26	10,12	1,38
0,9	8,82	8,71	1,26
1,0	7,66	7,58	1,06
1,1	6,57	6,64	1,05
1,2	5,74	5,87	2,21
1,3	5,09	5,22	2,49
1,4	4,51	4,67	3,43
1,5	4,04	4,21	4,04
1,6	3,63	3,81	4,72
1,7	3,29	3,46	4,91

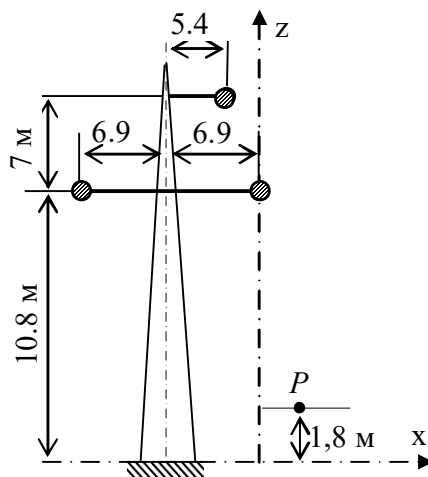
2.3.2 Експериментальна перевірка в польових умовах

Експериментальна перевірка методики розрахунку індукції МП трифазних високовольтних ЛЕП була проведена на 12 діючих ЛЕП [192, 193, 305, 314].

Повітряна ЛЕП 330 кВ «Залютіно-Артема». Нижче наведені результати вимірювань на діючій ЛЕП 330 кВ «Залютіно-Артема» (рис. 2.7). Під час вимірювань діюче значення струму складало $I=100$ А.



а



б

Рисунок 2.7 – Діюча ЛЕП 330 кВ «Залютіно-Артема»

У табл. 2.4 і на рис. 2.8 приведені результати вимірів (B_P) та розрахунку діючого значення індукції МП (B) трифазної ЛЕП (рис. 2.7 а) згідно розробленій методиці при струмі $I=100$ А.

Таблиця 2.4 – Результати досліджень індукції магнітного поля трифазної повітряної ЛЕП 330 кВ «Залютіно-Артема»

Координата х точки Р, м	Експеримент B_P , мкТл	Розрахунок B , мкТл	Відносна похибка δ , %	Координата х точки Р, м	Експеримент B_P , мкТл	Розрахунок B , мкТл	Відносна похибка δ , %
1	2	3	4	5	6	7	8
0,9	1,737	1,906	8,89	40,9	0,162	0,172	5,91
2,9	1,664	1,866	10,85	42,9	0,151	0,157	3,90

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8
4,9	1,664	1,793	7,20	44,9	0,136	0,144	5,51
6,9	1,629	1,671	2,54	46,9	0,131	0,132	0,98
8,9	1,442	1,502	4,00	48,9	0,116	0,122	4,92
10,9	1,211	1,307	7,34	50,9	0,105	0,113	6,96
12,9	1,035	1,114	7,05	52,9	0,097	0,105	7,34
14,9	0,9	0,940	4,30	54,9	0,088	0,097	9,61
16,9	0,777	0,794	2,13	56,9	0,083	0,091	8,55
18,9	0,658	0,673	2,25	58,9	0,095	0,085	12,01
20,9	0,537	0,575	6,54	60,9	0,075	0,079	5,57
22,9	0,497	0,494	0,56	62,9	0,071	0,075	4,74
24,9	0,433	0,428	1,07	64,9	0,069	0,070	1,53
26,9	0,343	0,374	8,32	66,9	0,068	0,066	3,03
28,9	0,302	0,329	8,23	68,9	0,058	0,062	6,86
30,9	0,272	0,291	6,64	70,9	0,066	0,059	12,16
32,9	0,237	0,260	8,68	72,9	0,063	0,056	13,12
34,9	0,211	0,233	9,25	74,9	0,05	0,053	5,28
36,9	0,187	0,209	10,69	76,9	0,049	0,050	2,20
38,9	0,181	0,189	4,46	78,9	0,048	0,048	0,81

Вихідні дані для розрахунку визначалися відповідно до рис. 2.7 б. Розрахунок проводився за розробленою методикою (співвідношеннями (2.31–2.35)) [192, 305, 306, 314].

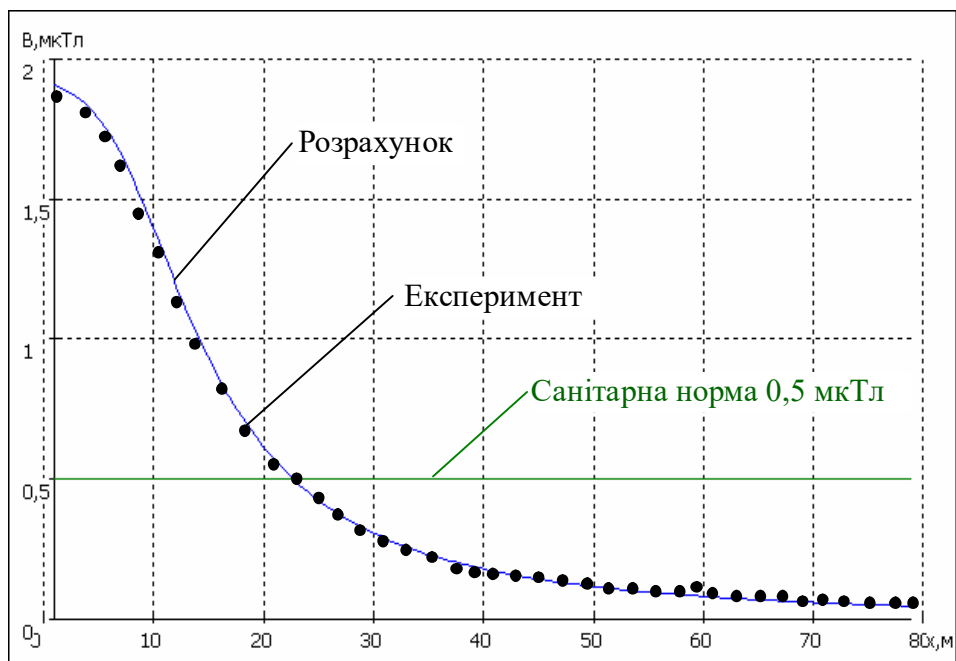


Рисунок 2.8 – Результати вимірювання та розрахунку МП трифазної повітряної ЛЕП 330 кВ «Залютіно-Артема»

2.3.3 Визначення похибки розрахунку магнітного поля ліній електропередачі

Визначимо похибку розробленої методики на основі аналізу результатів описаного вище експерименту, шляхом порівняння даних розрахунку та вимірювання, зведених до таблиць 2.2, 2.4. та рисунків 2.5 і 2.8 [192, 193, 305].

Похибка на основі даних лабораторного експерименту. Як слідує з табл. 2.2, відносна похибка розрахунку в порівнянні з результатами точного лабораторного експерименту не перевищує 5%, що відповідає максимальній похибці вимірювання індукції МП на магнітовимірювальному стенді ІЕМС НАН України [15] в порівнянні з точним розрахунком індукції МП.

Похибка на основі даних натурного експерименту. Відповідно до табл. 2.4, відносна похибка розрахунку у порівнянні з даними натурного експерименту не перевищує 10% при віддаленні від осі ЛЕП від 5 м до 71 м, що є припустимим при її інженерному використанні.

Таким чином, розкид даних розрахунку з результатами більш точного лабораторного експерименту не перевищує 5 %, що підтверджує коректність розробленої математичної моделі МП ЛЕП і методики його розрахунку, а також запропонованих розрахункових співвідношень.

Розкид даних розрахунку з результатами натурного експерименту на робочих відстанях від 5 м до 70 м від осі ЛЕП 330 кВ не перевищує 10 %. Це підтверджує можливість організації на основі розробленої методики вимірювання МП ЛЕП коректної експериментальної перевірки (верифікації) визначених на етапі проектування розрахункових значень індукції МП діючих ЛЕП з обмеженою похибкою 10 %, та для санітарно-гігієнічної оцінки фактичного рівня МП ЛЕП.

2.3.4 Верифікована методика розрахунку магнітного поля ліній електропередачі

Розроблений автором на основі розділів 2.1, 2.2 дисертації методика розрахунку МП ЛЕП передана «НЕК Укренерго» відповідно до договору на створення науково-технічної продукції з ДП «НЕК Укренерго» № 13-3/1516-42/06-2015 від 15.06.2015. Матеріали договору і розроблена методика розрахунку представлені в Додатку Б до дисертації і прийняті за основу «НЕК Укренерго» при розробці нової редакції методики Міненерговугілля «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання», яка була введена в дію наказом Міненерговугілля від 01.07.2016 № 423 і чинна на теперішній час [308].

2.4 Визначення впливу будівельних конструкцій на рівень магнітного поля від ліній електропередачі у житлових приміщеннях будинків

Як показано в розділі 1 дисертації, при визначенні рівня ЕМП частотою 50 Гц всередині житлових будинків, що створюється розташованими поблизу

ЛЕП, виникає питання урахування можливого ослаблення МП ЛЕП будівельними конструкціями житлових будинків, і особливо залізобетонними. Однак здатність будівельних конструкцій будинків екранувати МП частотою 50 Гц недостатньо вивчена, що не дозволяє адекватно визначати фактичний рівень МП всередині житлових будинків, розташованих поблизу ЛЕП. Тому актуальним є визначення ефективності екранування МП ЛЕП будівельними конструкціями сучасних житлових будинків. Розглянемо це питання на основі методів чисельного моделювання та фізичного експерименту [193, 315-317].

2.4.1 Чисельне моделювання індукції магнітного поля всередині житлового будинку від зовнішньої високовольтної повітряної лінії електропередачі

В якості об'єкту дослідження виберемо п'ятиповерховий житловий будинок із залізобетонних панелей і перекриттів з очікуваним максимальним екрануючим ефектом, що в подальшому дозволить поширити результати дослідження на всі типи сучасних житлових будинків [316, 317]. Для порівняння також визначимо екрануючий ефект як за МП, так і ЕП ЛЕП.

Стіни і міжповерхові перекриття досліджуваного будинку (рис. 2.9) виконані із залізобетону, сталевий каркас якого заземлений. Ширина будинку $a = 13$ м, висота $b = 15$ м, товщина стін і перекриттів $d = 0,26$ м. Будинок розташований на відстані $L = 15$ м від трифазної ЛЕП 110 кВ.

ЛЕП працює в симетричному режимі. Діюче значення струму ЛЕП $I_0 = 500$ А. Проводи ЛЕП будемо вважати нескінченно довгими прямими струмовими нитками, паралельними землі, що дозволяє вирішувати задачу в двовимірній постановці. Координати проводів ЛЕП: $x_1 = 0$, $y_1 = 10$ м; $x_2 = 1,5$ м, $y_2 = 14$ м; $x_3 = 0$, $y_3 = 18$ м. Радіус перерізу проводів ЛЕП $r = 0,015$ м. Поле ЛЕП є плоскопаралельним.

Для кількісної оцінки ефективності екранування МП і ЕП скористаємося коефіцієнтом екранування S :

$$S_B=B_0/B, \quad S_E=E_0/E, \quad (2.60)$$

де B і E – діючі значення, відповідно, індукції МП і напруженості ЕП всередині будинку,

B_0 і E_0 – діючі значення, відповідно, індукції МП і напруженості ЕП ЛЕП в цій же точці без урахування будинку.

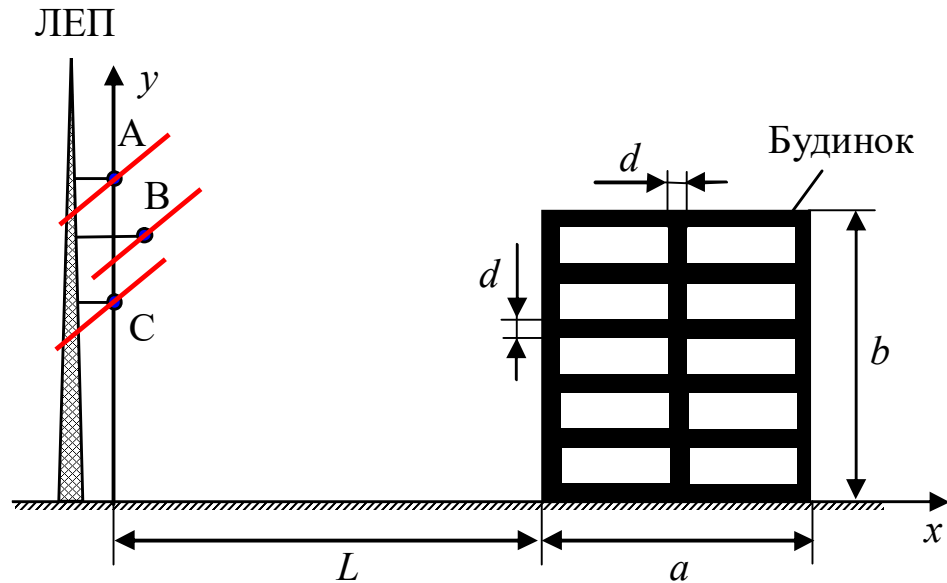


Рисунок 2.9 – Взаємне розташування ЛЕП і житлового будинку

При чисельному моделюванні враховуємо, що елементи залізобетонних будівельних конструкцій будинків, армовані сталевими стрижнями із конструкційної сталі, як це представлено на рис. 2.10 а. Заміщуємо ці елементи на еквівалентні із простою суцільною конструкцією і з тією-ж формою граничної поверхні (рис. 2.10 б) відповідно до [317]. Таку еквівалентну конструкцію можна характеризувати ефективною магнітною проникністю μ_e відповідно до методу Аркадьєва [317-319].

$$\mu_e = (\mu_m - 1)K_V + 1, \quad K_V = \frac{V_F}{V_k}. \quad (2.61)$$

Згідно з (2.61), введені еквівалентні конструктивні елементи характеризуються параметрами μ_m , μ_e , V_F , V_k , де μ_m – початкова магнітна

проникність феромагнітного матеріалу несучільного тіла, V_F , V_e – сумарний об'єм феромагнітних елементів несучільного феромагнітного тіла і об'єм еквівалентного суцільного феромагнітного тіла відповідно, K_V – коефіцієнт заповнення металом залізобетонної конструкції.

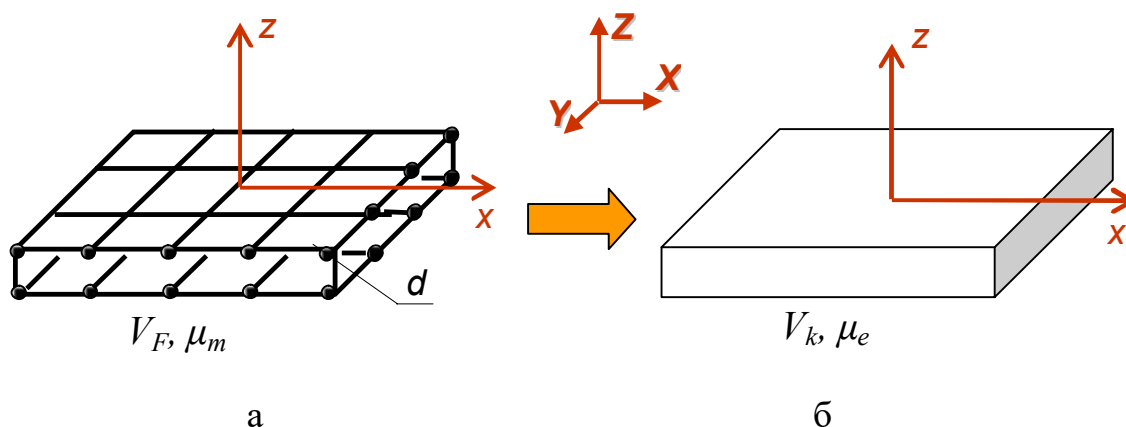


Рисунок 2.10 – Типовий елемент залізобетонної конструкції будинків (а) та його еквівалентний аналог з ефективною магнітною проникністю μ_e (б)

Моделювання виконуємо в рамках двовірної моделі МП з використанням програмного пакету *COMSOL Multiphysics*. Низька частота (50 Гц) МП ЛЕП дозволяє враховувати тільки магнітостатичне екранування. Тому можна скористатися магнітостатичною моделлю будинку [316, 320, 321]. Для реалізації цієї моделі будемо вважати, що залізобетонні панелі стін і перекриття (рис. 2.9) є однорідними і характеризуються ефективною магнітною проникністю μ_e (2.61).

Реальні залізобетонні панелі будинку армуються сталевую арматурою з відносною начальною магнітною проникністю μ_n , яка відповідно до [318] складає біля 100 в.о. Її частка в обсязі залізобетонної конструкції становить близько 0,07. Тому відповідно до (2.61) [318] значення ефективної магнітної проникності $\mu_e = 0,5 \cdot 100 \cdot 0,07 = 3,5$ в.о.

Розподіл МП визначимо на основі закону Ампера [16, 53, 316]:

$$\text{rot}(\mu_0^{-1} \mu^{-1} \text{rot} \dot{A}_z) = \dot{J}_z, \quad \dot{B}_z = \text{rot} \dot{A}_z, \quad (2.62)$$

де $\dot{A}_z$ и $\dot{J}_z$ – комплексні амплітуди векторного потенціалу і щільності струмів відповідно.

В об'ємі стін і перекриттів $\mu = \mu_e$, а в інших областях $\mu = 1$.

Умови на межі розділу середовищ з різними електротехнічними характеристиками:

$$\begin{cases} \dot{A}_{air} = \dot{A}_{wall} , \\ \frac{\partial \dot{A}_{air}}{\partial n} = \frac{1}{\mu_{eff}} \frac{\partial \dot{A}_{wall}}{\partial n} , \end{cases}$$

де $\vec{n}$ – одиничний вектор нормалі до границі поділу областей.

Для обмеження розрахункової області на її границях, використовувалася умова $\dot{A}_z = 0$. У всіх областях використовувалася трикутна сітка, причому в областях стін і перекриттів крок сітки на 1–2 порядки менше. Відповідно до рівняння (2.62) для вирішення задачі використовувався інтерфейс «*Magnetic Fields*», який входить в «*AC/DC Module*». Для опції «*Space Dimension*» задавався варіант «*2D*». Величини струмів, що протікають в проводах, задавалися за допомогою функціоналу «*Line Current (Out-of-Plane)*».

На рис. 2.11 показано отриманий розподіл індукції МП всередині і за межами будинку [316, 317]. Результати розрахунку ефективності екранування S_B МП ЛЕП конструкціями будинку, а також S_E , представлені в таблиці 2.5.

Верифікація результатів чисельного моделювання проводилася в три етапи.

По-перше, точність чисельного рішення перевірялась порівнянням з рішеннями, отриманими при подвійному збільшенні обчислювальної області і за допомогою більш щільної сітки.

По друге, було проведено моделювання для випадку відсутності будинку ($\mu_e = 1$), а результати розрахунку МП порівняні з розрахунком, виконаним відповідно до (2.31–2.35). Для цих випадків розбіжність розрахованих значень індукції МП не перевищила 1 %.

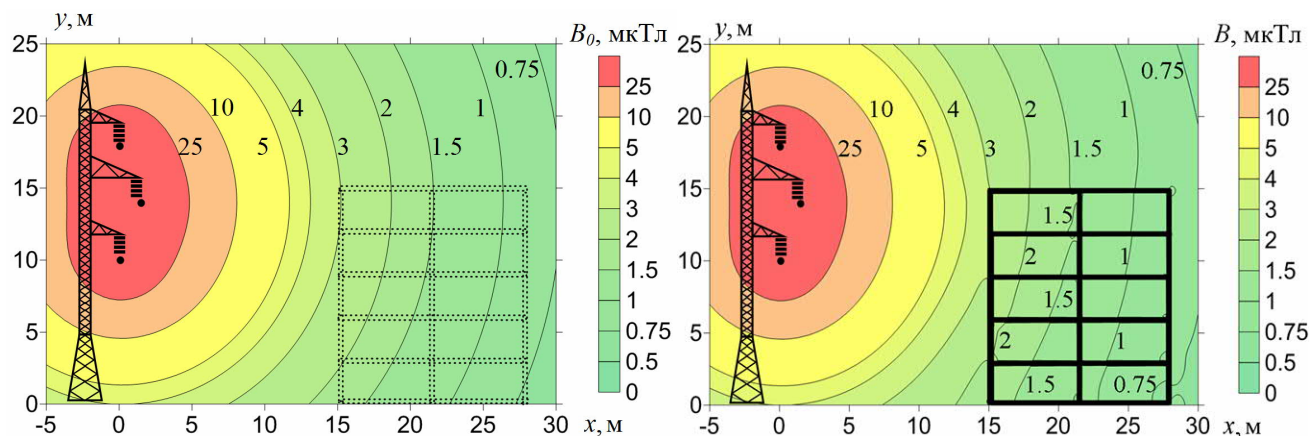


Рисунок 2.11 – Розрахований розподіл індукції МП ПЛ 110 кВ 500 А: а) без урахування будинку; б) з урахуванням будинку

По-третє, результати розрахунку коефіцієнта екранування порівнювалися з експериментальними результатами [315], наведеними нижче.

Таблиця 2.5 – Результати чисельного розрахунку розподілу МП та ЕП навколо ЛЕП з урахуванням будинку (B , E), та без урахування будинку (B_0 , E_0)

Кімната	Координати точки спостереж.	B_0 , мкТл	B , мкТл	S_B	E_0 , В/м	E , В/м	S_E
1	2	3	4	5	6	7	8
1 поверх/ліва	$x=18$ м, $y=1$ м	1,47	1,41	1,04	72,3	1,65	43,8
2 поверх/ліва	$x=18$ м, $y=4$ м	1,70	1,60	1,06	93,7	4,00	23,4
3 поверх/ліва	$x=18$ м, $y=7$ м	1,91	1,77	1,08	125	5,17	24,4
4 поверх/ліва	$x=18$ м, $y=10$ м	2,09	1,91	1,09	157	5,51	28,5
5 поверх/ліва	$x=18$ м, $y=13$ м	2,17	1,98	1,10	179	8,42	21,3

Продовження таблиці 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8
1 поверх /права	$x=24,5$ м, $y=1$ м	0,94	0,92	1,02	76,0	0,06	> 100
2 поверх /права	$x=24,5$ м, $y=4$ м	1,03	0,97	1,06	80,5	0,18	
3 поверх /права	$x=24,5$ м, $y=7$ м	1,10	1,03	1,08	88,7	0,33	
4 поверх /права	$x=24,5$ м, $y=10$ м	1,12	1,06	1,09	97,7	0,57	
5 поверх /права	$x=24,5$ м, $y=13$ м	1,19	1,09	1,09	105	1,11	94,3

Як видно з табл. 2.5, значення ефективності екранування МП в будинку становить не менше 1,02 і не більше 1,10. Вказані результати також експериментально підтверджені автором у [315].

Для порівняння було також досліджено ЕП ЛЕП [316], де при моделювання реальна конструкція будинку (рис. 2.9), замінювалося сталевим електропровідним каркасом (рис. 2.12).

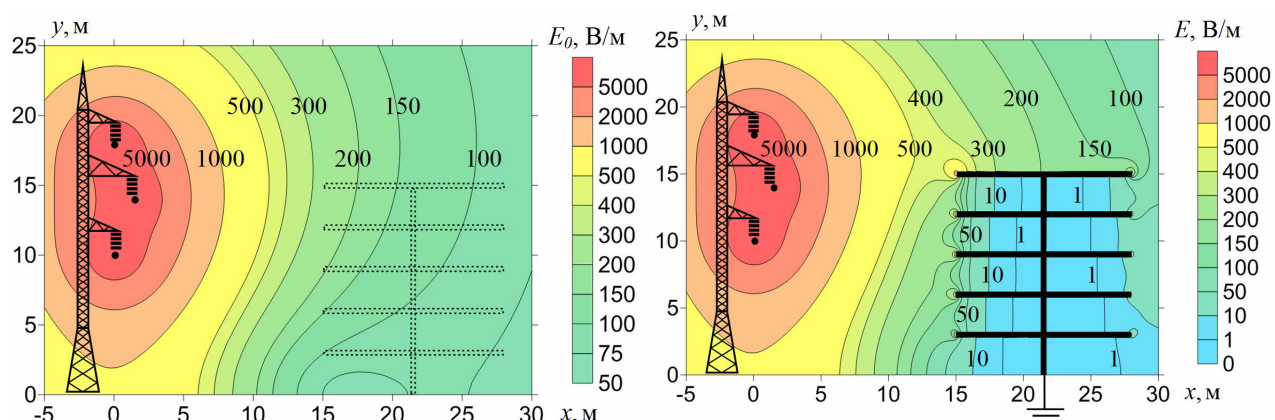


Рисунок 2.12 – Розподіл напруженості ЕП ПЛ 110 кВ: а) без урахування будинку;
б) з урахуванням будинку

Мінімальне значення ефективності S_E для ЕП становить 21,3 одиниці. У віддаленій від ЛЕП частини будівлі ефективність екранування ЕП перевищує 100 одиниць.

2.4.2 Експериментальні дослідження ефективності екранування магнітного поля ліній електропередачі стінами житлових будинків

Для верифікації розглянутого вище чисельного моделювання виконані експериментальні дослідження екрануючих властивостей будівельних конструкцій житлових будинків [315, 317]. Дослідження проводились як в лабораторних, та і в польових умовах. В якості джерела МП використовувалась котушка із струмом, що формувала МП частотою 50 Гц з індукцією 5 мкТл на відстані 1 м, або використовувалось МП діючої ЛЕП. Виміри проводилися векторним магнітометром Magnetoscop 1.069 (рис. 2.2) з системою точного позиціонування датчика по координатним осям. Відстані вимірювалась лазерним дальноміром типу «ProZone T-40».

Дослідження екрануючих властивостей залізобетонних стін при використанні локального джерела МП.

Дослідження проводилися в типових житлових будинках м. Харкова різної поверховості з панельними залізобетонними стінами [315]. Експеримент полягав в проведенні двох вимірі індукції МП – з урахуванням стіни і без неї. При першому вимірі (рис. 2.13 а) джерело 1 МП 50 Гц розташовувалося на зовнішній стороні стіни будинку 3. Датчик магнітометра 2 розташовувався всередині приміщення. Вимірювалась відстань між котушкою і стіною D, датчиком і стіною C і товщина стіни A і розраховувалась відстань L між котушкою 1 і датчиком 2. Проводився вимір діючого значення трьох компонент B_{dsx} , B_{dsy} , B_{dsz} вектору індукції МП. Другий вимір індукції МП проводилося без урахування стіни за схемою, приведеною на рис. 2.13 б. Коефіцієнт екранування S_B визначався по (2.60). Результати експериментальних досліджень зведені у табл. 2.6.

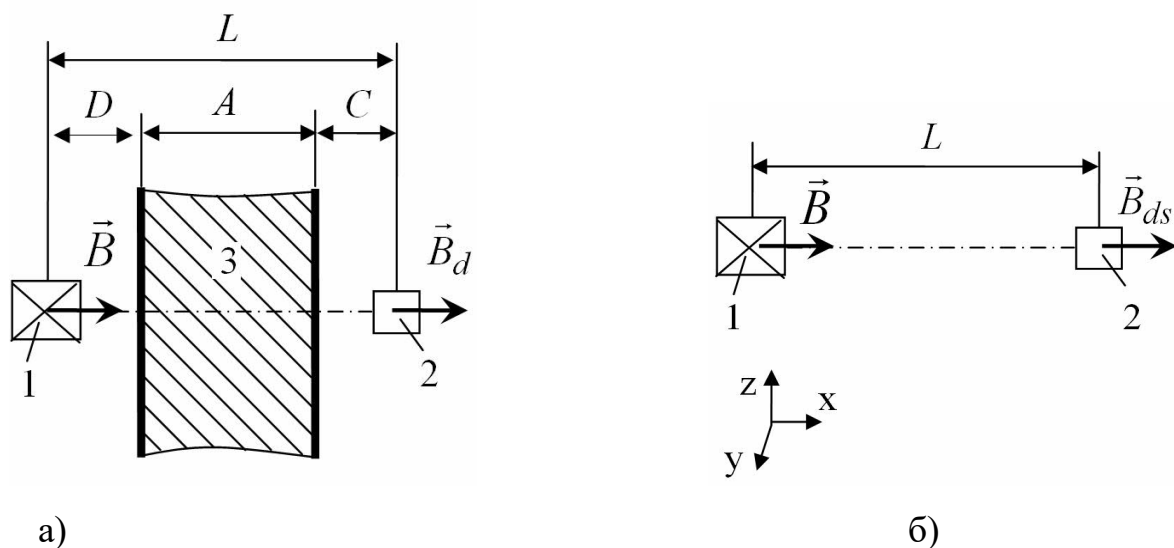


Рисунок 2.13 – Схема для визначення коефіцієнту екранування S_B стін будинків з допомогою локального джерела МП: 1 – джерело МП, 2 – датчик магнітometру, 3 – залізобетонна стіна

Таблиця 2.6 – Результати експериментальних досліджень екрануючих властивостей панельних будинків із збірного залізобетону з використанням локального джерела МП частотою 50 Гц.

Об'єкт дослідження	Коефіцієнт екранування S_B
Стіна 9-и поверхового будинку	1,03
Стіна 12-поверхового будинку	1,04
Стіна 16-и поверхового будинку	1,03
Стіна 5-и поверхового будинку	1,02

Результати досліджень (табл. 2.6) показують, що залізобетонні стіни панельних будинків практично не екранують МП частотою 50 Гц від локального джерела.

Експериментальні дослідження екрануючих властивостей панельних будинків із збірного залізобетону при дії МП реальних ЛЕП.

Дослідження проводилися в типових житлових панельних будинках м. Харкова різної поверховості, розташованих на відстанях 15–30 м від високовольтних ЛЕП 110 кВ. Для визначення коефіцієнту екранування

проводили два виміри індукції МП – всередині приміщення будинку і зовні, при віддаленні більш 30 м від будинку. Дослідження проводили за схемою, приведеною на рис. 2.14.

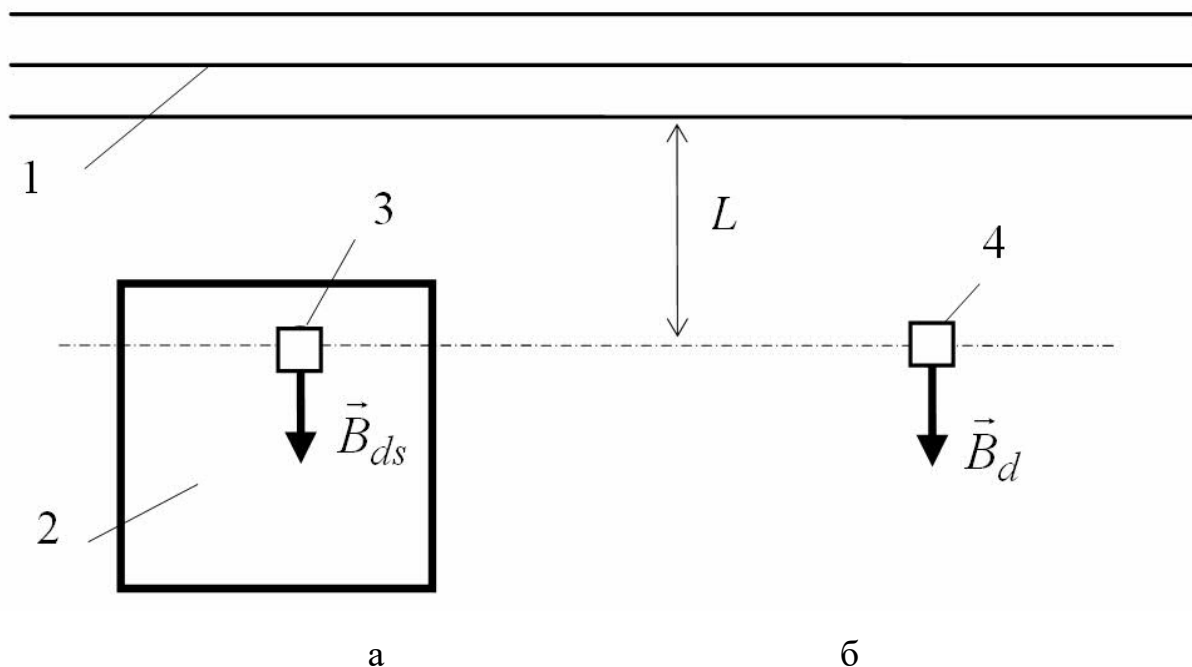


Рисунок 2.14 – Схема для визначення коефіцієнту екранування S_B МП реальних ЛЕП стінами будинків: 1 – ЛЕП, 2 – будинок, 3, 4 – датчик магнітометру

При першому вимірюванні (рис. 2.14 а) датчик магнітометру 3 розташовувався в приміщенні будинку 2. Визначалася відстань L від датчика до ЛЕП і проводилися виміри індукції МП B_{dsx} , B_{dsy} , B_{dsz} . При другому вимірюванні датчик магнітометру 4 розташовувався поза домом на відстані L від ЛЕП (рис. 2.14 б) Коефіцієнт екранування S_B визначався по (2.60). Результати експерименту наведені у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Результати експериментальних досліджень екрануючих властивостей панельних будинків із збірного залізобетону при дії МП реальних ЛЕП

Адреса та етажність будинку	Індукція магнітного поля, зовні (всередині) будинку мкТл				S_B
	B_x	B_y	B_z	B	
вул. Чугуївська 27, 9 поверхів	0,27 (0,22)	0,01 (0,26)	0,45 (0,37)	0,525 (0,503)	1,04
пров. Мозаїчний 21, 5 поверхів	0,07 (0,09)	0,02 (0,05)	0,16 (0,13)	0,176 (0,166)	1,06
вул. Франтішека Крала 65а 5 поверхів	0,28 (0,45)	0,05 (0,05)	0,5 (0,35)	0,61 (0,57)	1,07

Лабораторні дослідження екрануючих властивостей різних будівельних матеріалів. Результати виконаних дисертантом лабораторних досліджень коефіцієнту екранування S_B МП від локального джерела різними будівельними матеріалами, що описані в [315], представлені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Результати досліджень екрануючих властивостей зразків будівельних матеріалів

Досліджуваний матеріал	Коефіцієнт екранування S_B
Силікатна цегла	1,00
Червона цегла	1,00
Залізобетон	$\approx (1,00 \div 1,02)$

Результати досліджень (табл. 2.8) також показують, що основні будівельні матеріали (цегла, залізобетон) практично не екранують МП 50 Гц від локального джерела.

2.4.3 Визначення коефіцієнту екранування магнітного поля ліній електропередачі будівельними конструкціями житлових будинків

На основі результатів чисельного розрахунку коефіцієнту екранування МП S_B від ЛЕП конструкціями будинків (табл. 2.5) та результатів експериментального визначення коефіцієнту екранування МП S_B конструкціями будинків (табл. 2.6–2.8), визначено похибку δ_S чисельного розрахунку коефіцієнтів екранування S_B . Так, відповідно до табл. 2.9, максимальна похибка складає менше 3 %, що підтверджує коректність виконаного чисельного моделювання розподілу МП всередині житлових будинків з урахуванням впливу їх будівельних конструкцій на основі запропонованої магністатичної моделі.

Результати виконаних досліджень дозволяють констатувати наступне. МП ЛЕП промислової частоти слабо екранується конструкціями житлових будинків, в тому числі залізобетонними (коефіцієнт екранування S_B не перевищує 1,1) і практично без ослаблення проникає всередину житлових приміщень. Тому при інженерних розрахунках ефектом екранування МП від ЛЕП будівельними конструкціями будинків можна знехтувати.

Таблиця 2.9 – Похибка δ_S чисельного розрахунку коефіцієнтів екранування S_B МП ЛЕП будівельними залізобетонними конструкціями панельних будинків

Параметр	Величина S_B , в.о.		Похибка розрахунку δ_S , %
	Розрахунок	Експеримент	
Максимальне значення S_B	1,10	1,070	2,7
Мінімальне значення S_B	1,02	1,040	2,0
Середньоарифметичне значення S_B	1,06	1,055	0,5

Електричне поле ЛЕП ефективно екранується будівельними конструкціями (коефіцієнт екранування S_E становить не менше 20) і практично не проникає в житлові приміщення.

Отримані результати справедливі для більшості типів житлових будинків і повинні враховуватися при санітарно-гігієнічній оцінці рівня електромагнітного поля промислової частоти, що створюється ЛЕП всередині житлових приміщень.

2.5 Санітарно-гігієнічна оцінка магнітного поля ліній електропередачі на межі чинних охоронних зон

2.5.1 Визначення максимально можливих значень індукції магнітного поля на межі чинних охоронних зон ліній електропередачі 0,4-330 кВ

Реальні конструкції ЛЕП, що створюють максимальне МП. Як слідує з виконаного вище аналізу, мінімальне МП створюють ЛЕП з симетричним підвісом проводів фаз, розташованих у вершинах рівностороннього трикутника. Максимальне МП створюють ЛЕП з несиметричним розташуванням проводів, наприклад з горизонтальним, або вертикальним. Реальні конструкції таких ЛЕП 0,4-330 кВ [193, 305] представлені на рис. 2.15, де для: 0,4 кВ – $h=5$ м; 10 кВ – $h=5$ м; 110 кВ – $h=6$ м; 330 кВ – $h=10$ м.

З використанням розробленої методики (2.31–2.35), виконаємо розрахунок розподілу індукції МП ЛЕП (рис. 2.15) при номінальних режимах їх роботи (максимальному навантаженні).

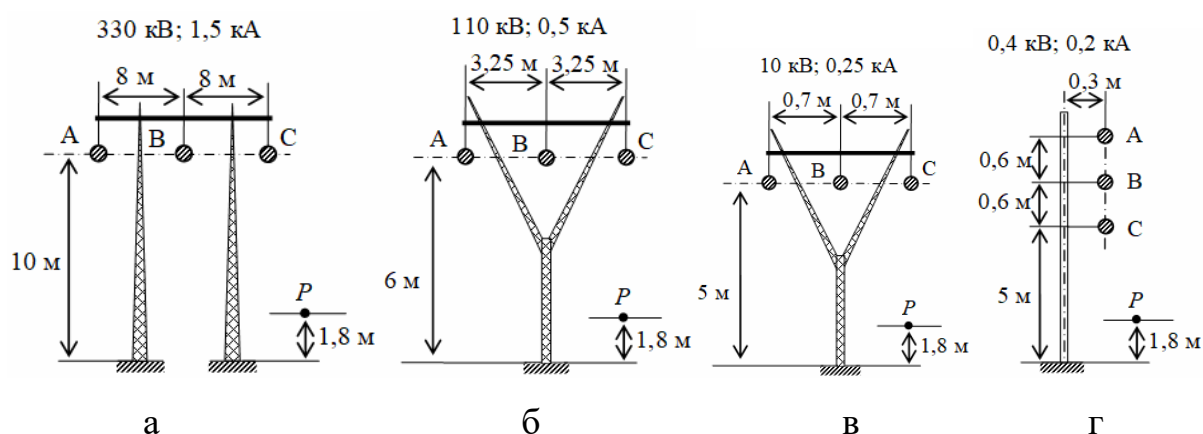


Рисунок 2.15 – Типові ЛЕП 0,4-330 кВ з несиметричним підвісом проводів, що характеризуються максимальною індукцією МП

Розрахунок МП ЛЕП 0,4-330 кВ з максимальним рівнем індукції.

Результати розрахунку розподілу МП ЛЕП (рис. 2.15) з максимально допустимим струмом ЛЕП (0,2 кА для ЛЕП 0,4 кВ; 0,25 кА для ЛЕП 10 кВ; 0,5 кА для ЛЕП 110 кВ, 1,5 кА для ЛЕП 330 кВ) [314], представлені на рис. 2.16. [322].

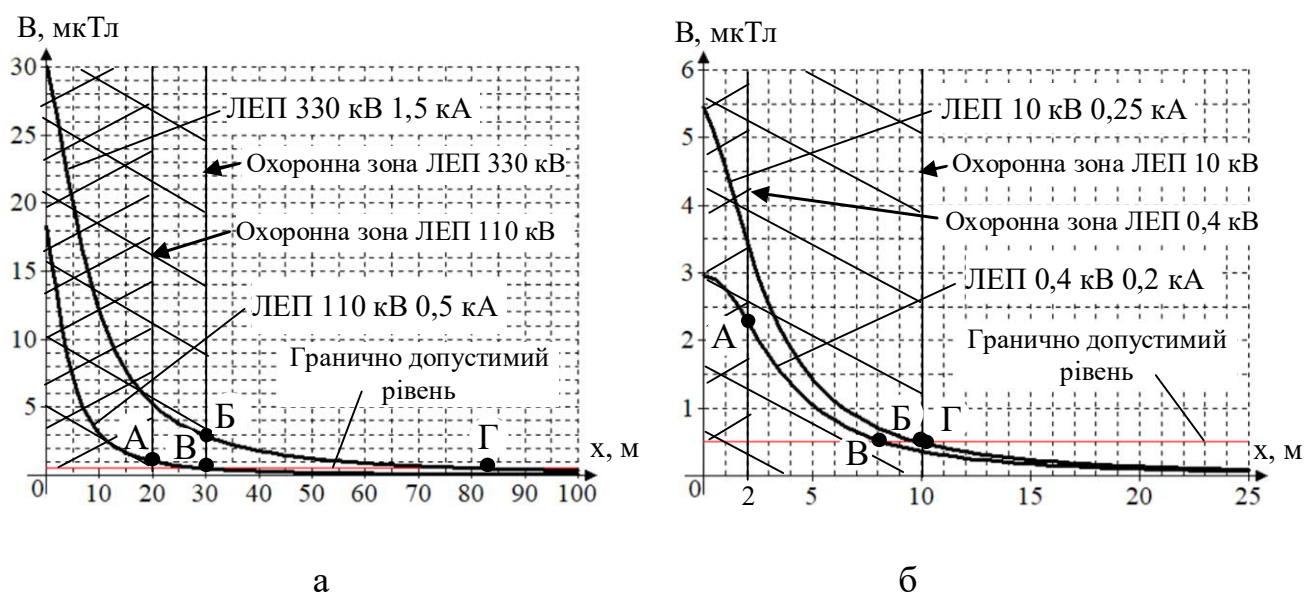


Рисунок 2.16 – Розрахований розподіл МП ЛЕП 0,4-330 кВ (рис. 2.15) з несиметричним підвісом проводів і підвищеним рівнем МП

Так, на межі існуючих охоронних зон (точки А, Б) рівень індукції МП розглянутих ЛЕП (рис. 2.16) перевищує небезпечний для населення рівень 0,5 мкТл.

Для нормалізації МП ЛЕП для розглянутого найгіршого випадку з несиметричним підвісом проводів (рис. 2.15), необхідне зменшення рівня МП на межі чинних охоронних зон: для ЛЕП 330 кВ – в 5,8 разів, для ЛЕП 110 кВ – в 1,5 разів, для ЛЕП 10 кВ – в 1,08 разів, для ЛЕП 0,4 кВ – в 4,6 разів.

Спадання індукції МП ЛЕП до рівня 0,5 мкТл відбувається тільки на відстанях (точки В, Г) 83 м для ЛЕП 330 кВ, 30 м для ЛЕП 110 кВ, 8 м для ЛЕП 0,4 кВ.

Враховуючи результати досліджень, отримані автором в підрозділах 2.4.1-2.4.3 дисертації, які показують, що МП ЛЕП практично не послаблюючись проникає через стіни будинків, у тому числі залізобетонні [315, 316], розподіл МП всередині житлових приміщень будинків також відповідає рис. 2.16. Наведені результати потребують експериментального підтвердження.

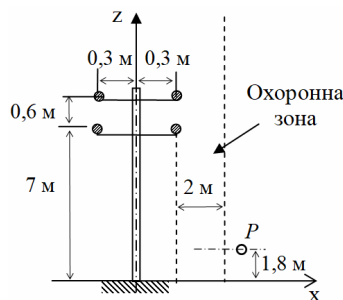
2.5.2 Експериментальні дослідження розподілу магнітного поля діючих повітряних ліній електропередачі 0,4-330 кВ на границях їх чинних охоронних зон

Експериментальні дослідження виконані для доступних для вимірювання ЛЕП 0,4 кВ, ЛЕП 10 кВ, ЛЕП 35 кВ, ЛЕП 110 кВ, ЛЕП 330 [193, 305, 314] з конструкціями опор, з яких не всі характеризуються максимальним МП відповідно до розділу 2.5.1. Вимірювання виконувались за наведеною вище методикою [193, 305, 306]. Основні параметри ЛЕП (робочий та максимальний струм (I_{max}), геометрія підвісу проводів, висота точки вимірювання, розмір охоронної зони) надані. Результати вимірювання індукції МП ЛЕП та її перерахунок для номінального режиму роботи занесені в табл. 2.10 – 2.15.

1. Дослідження МП ЛЕП 0,4 кВ, $I_{max} = 200$ А. ЛЕП 0,4 кВ (рис. 2.17 а) розташована в житловій зоні селища Рогань, вул. Харківська. Струм навантаження ЛЕП під час вимірювань $I = 30$ А ($K_n = 0,15$). Величина охоронної зони (рис. 2.17 б) 2 м.



а



б

Рисунок 2.17 – ЛЕП 0,4 кВ, с. Рогань, Харківська обл.

Результати вимірів приведені у табл. 2.10.

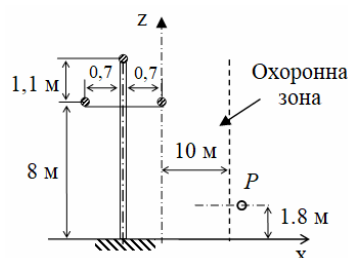
Таблиця 2.10 – Виміряна індукція МП ЛЕП 0,4 кВ, 30 А, вул. Харківська, с. Рогань, Харківська обл. ($I_{max} = 200$ А)

х, м	B_x , мкТл	B_z , мкТл	B , мкТл	Перерахунок при I_{max} B , мкТл	K_n
0	0,12	0,11	0,163	1,087	0,15
1	0,13	0,09	0,158	1,053	0,15
2	0,13	0,07	0,148	0,987	0,15
3	0,12	0,06	0,134	0,893	0,15
4	0,10	0,06	0,117	0,780	0,15
5	0,08	0,06	0,100	0,667	0,15
6	0,06	0,06	0,085	0,567	0,15
7	0,05	0,05	0,071	0,473	0,15
8	0,04	0,05	0,064	0,427	0,15
9	0,03	0,04	0,050	0,333	0,15
10	0,02	0,04	0,045	0,300	0,15

2. Дослідження МП ЛЕП 10 кВ. $I_{max} = 250$ А. ЛЕП 10 кВ (рис. 2.18). розташована в житловій зоні у селищі Рогань. вул. Жовтнева (рис. 2.18). Струм навантаження ЛЕП під час вимірювань $I = 53$ А ($K_n = 0,212$). Величина охоронної зони 10 м (рис. 2.18 б).



а



б

Рисунок 2.18 – ЛЕП 10 кВ, вул. Жовтнева, с. Рогань, Харківська обл.

Результати вимірів приведені у табл. 2.11.

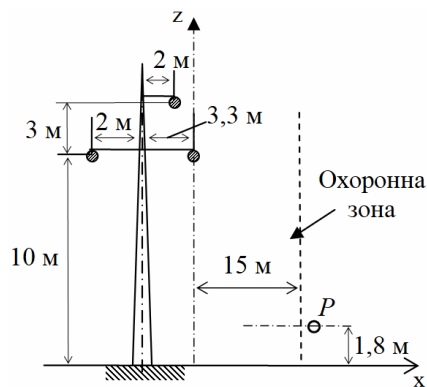
Таблиця 2.11 – Вимірюна індукція МП ЛЕП 10 кВ, 53 А, вул. Жовтнева, с. Рогань, Харківська обл.

х, м	B_x , мкТл	B_z , мкТл	B , мкТл	Перерахунок при I_{max} B , мкТл	K_n
0	0,23	0,32	0,394	1,858	0,212
2	0,24	0,24	0,339	1,599	0,212
4	0,2	0,16	0,256	1,208	0,212
6	0,15	0,12	0,192	0,906	0,212
8	0,1	0,1	0,141	0,665	0,212
9	0,09	0,09	0,127	0,599	0,212
10	0,08	0,07	0,11	0,519	0,212
11	0,07	0,06	0,092	0,434	0,212
12	0,05	0,06	0,078	0,368	0,212
14	0,04	0,05	0,064	0,302	0,212
15	0,04	0,04	0,056	0,264	0,212

3. Дослідження МП ЛЕП 35 кВ. $I_{max} = 280$ А ЛЕП 35кВ (рис. 2.19) розташована в житловій зоні у селищі Рогань. Струм навантаження ЛЕП під час вимірювань $I = 37$ А ($K_n = 0,132$). Величина охоронної зони 15 м (рис. 2.19 б).



а



б

Рисунок 2.19 – ЛЕП 35 кВ, с. Рогань, Харківська обл.

Результати вимірів приведені у табл. 2.12.

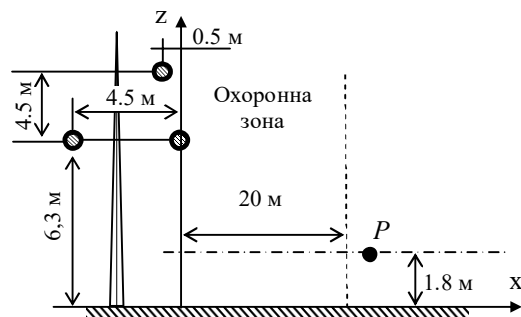
Таблиця 2.12 – Виміряна індукція МП ЛЕП 35 кВ, 37 А

$x, \text{м}$	$B_x, \text{мкТл}$	$B_z, \text{мкТл}$	$B, \text{мкТл}$	Перерахунок при $I_{\max}$ $B, \text{мкТл}$	K_n
0	0,25	0,36	0,438	3,318	0,132
2	0,31	0,25	0,398	3,015	0,132
6	0,23	0,13	0,264	2,000	0,132
8	0,19	0,12	0,225	1,705	0,132
10	0,15	0,1	0,18	1,364	0,132
12	0,12	0,09	0,15	1,136	0,132
14	0,09	0,07	0,114	0,864	0,132
15	0,08	0,07	0,106	0,803	0,132
16	0,08	0,06	0,1	0,758	0,132
18	0,07	0,06	0,092	0,697	0,132
20	0,05	0,05	0,071	0,538	0,132
22	0,05	0,04	0,064	0,485	0,132
26	0,03	0,04	0,05	0,379	0,132
30	0,02	0,03	0,036	0,273	0,132

4. Дослідження МП ЛЕП 110 кВ. $I_{\max} = 500$ А. ЛЕП «Залютино – тяга Шпаківка» (рис. 2.20 а) розташована в Харківській обл. Струм навантаження ЛЕП під час вимірювань $I = 84$ А ($K_n = 0,168$), висота точки вимірювання (рис. 2.20 б) 1,8 м, величина охоронної зони 20 м.



а



б

Рисунок 2.20 – ЛЕП 110 кВ «Залютино – тяга Шпаківка»

У табл. 2.13, приведені результати вимірів індукції магнітного поля ЛЕП 110 кВ (рис. 2.20) при струмі 84 А ($I_{max} = 500$ А).

Таблиця 2.13 – Виміряна індукція МП ЛЕП 110 кВ, 84 А

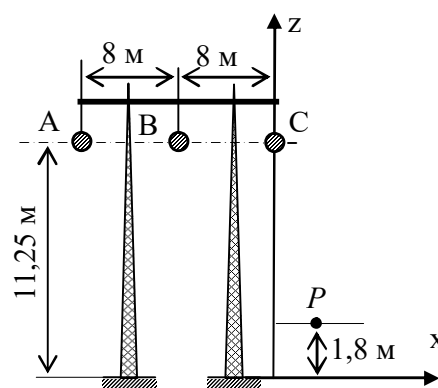
$x, \text{м}$	$B_x, \text{мкТл}$	$B_z, \text{мкТл}$	$B, \text{мкТл}$	Перерахунок при I_{max} $B, \text{мкТл}$	K_n
0	1,91	1,85	2,659	15,828	0,168
4	1,1	1,05	1,521	9,052	0,168
8	0,53	0,6	0,801	4,765	0,168
10	0,42	0,44	0,608	3,621	0,168
14	0,28	0,25	0,375	2,234	0,168
16	0,24	0,19	0,306	1,822	0,168
18	0,19	0,16	0,248	1,479	0,168
20	0,17	0,13	0,214	1,274	0,168
22	0,14	0,11	0,178	1,060	0,168
24	0,12	0,1	0,156	0,930	0,168
26	0,11	0,08	0,136	0,810	0,168
28	0,09	0,06	0,108	0,644	0,168
30	0,08	0,06	0,100	0,595	0,168

5. Дослідження МП ЛЕП 330 кВ, $I_{max} = 1500$ А. ЛЕП «Залютіно - Суми» (рис. 2.3) розташована в Харківській обл. Струм навантаження ЛЕП під час вимірювань $I = 141$ А ($K_n = 0,094$), висота точки вимірювання (рис. 2.21 б) 1,8 м, величина охоронної зони 30 м.

У табл. 2.14 приведені результати вимірів індукції МП ЛЕП 330 кВ (рис. 2.21) при струмі 141 А ($I_{max} = 1500$ А).



а



б

Рисунок 2.21 – ЛЕП 330 кВ «Залютіно-Суми»

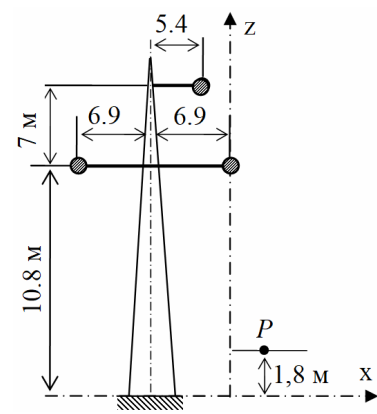
Таблиця 2.14 – Виміряна індукція МП ЛЕП 330 кВ, 141 А

x , м	B_x , мкТл	B_z , мкТл	B , мкТл	Перерахунок при I_{max} B , мкТл	K_n
0	0,95	2,57	2,74	29,15	0,094
6	0,83	1,27	1,52	16,17	0,094
12	0,64	0,48	0,80	8,51	0,094
18	0,47	0,21	0,51	5,43	0,094
24	0,32	0,12	0,34	3,62	0,094
30	0,23	0,08	0,24	2,55	0,094
36	0,17	0,06	0,18	1,91	0,094
42	0,14	0,04	0,14	1,49	0,094
48	0,11	0,02	0,11	1,17	0,094
54	0,09	0,01	0,09	0,96	0,094
60	0,08	0,01	0,08	0,85	0,094
72	0,06	0,00	0,06	0,64	0,094
80	0,05	0,00	0,05	0,53	0,094

6. Дослідження МП ЛЕП 330 кВ. $I_{max} = 1500$ А. ЛЕП «Залютіно - Артема» (рис. 2.22) розташована в Харківській обл. Струм навантаження ЛЕП під час вимірювань $I = 100$ А ($K_n = 0,067$), висота точки вимірювання (рис. 2.22 б) 1,8 м, величина охоронної зони 30 м.



а



б

Рисунок 2.22 – ЛЕП 330 кВ «Залютіно-Артема»

У табл. 2.15 приведені результати вимірів (B_p) та розрахунку діючого значення індукції МП ЛЕП (рис. 2.22 а) при струмі $I = 100$ А. Вихідні дані для розрахунку визначалися відповідно до рис. 2.22 б.

Таблиця 2.15 – Виміряна індукція МП ЛЕП 330 кВ «Залютіно - Артема», 100 А

$x, \text{м}$	$B_x, \text{мкТл}$	$B_z, \text{мкТл}$	$B, \text{мкТл}$	Перерахунок при $I_{\max} B, \text{мкТл}$	K_n
1	2	3	4	5	6
0	1,33	0,94	1,62	24,18	0,067
6	0,93	0,45	1,03	15,37	0,067
12	0,52	0,41	0,66	9,85	0,067
18	0,32	0,3	0,44	6,57	0,067
24	0,19	0,19	0,27	4,03	0,067
30	0,13	0,14	0,19	2,84	0,067
36	0,1	0,11	0,15	2,24	0,067
42	0,08	0,09	0,12	1,79	0,067
48	0,06	0,07	0,092	1,37	0,067
54	0,05	0,06	0,078	1,16	0,067

Продовження таблиці 2.15

1	2	3	4	5	6
60	0,04	0,05	0,064	0,96	0,067
72	0,03	0,04	0,05	0,75	0,067
86	0,02	0,03	0,036	0,54	0,067
90	0,02	0,02	0,028	0,42	0,067

Санітарно-гігієнічна оцінка електромагнітного поля ЛЕП. ГДР індукції МП 50 Гц для населення, що створюється електроустановками, регламентований в [4] і становить 10 мкТл на території житлової забудови і 0,5 мкТл всередині житлових приміщень.

На основі узагальнення результатів експериментальних досліджень, представлених вище в табл. 2.10–2.15 і приведених до максимального струму ЛЕП, на рис. 2.23 побудовані графіки розподілу індукції МП ЛЕП 0,4-330 кВ.

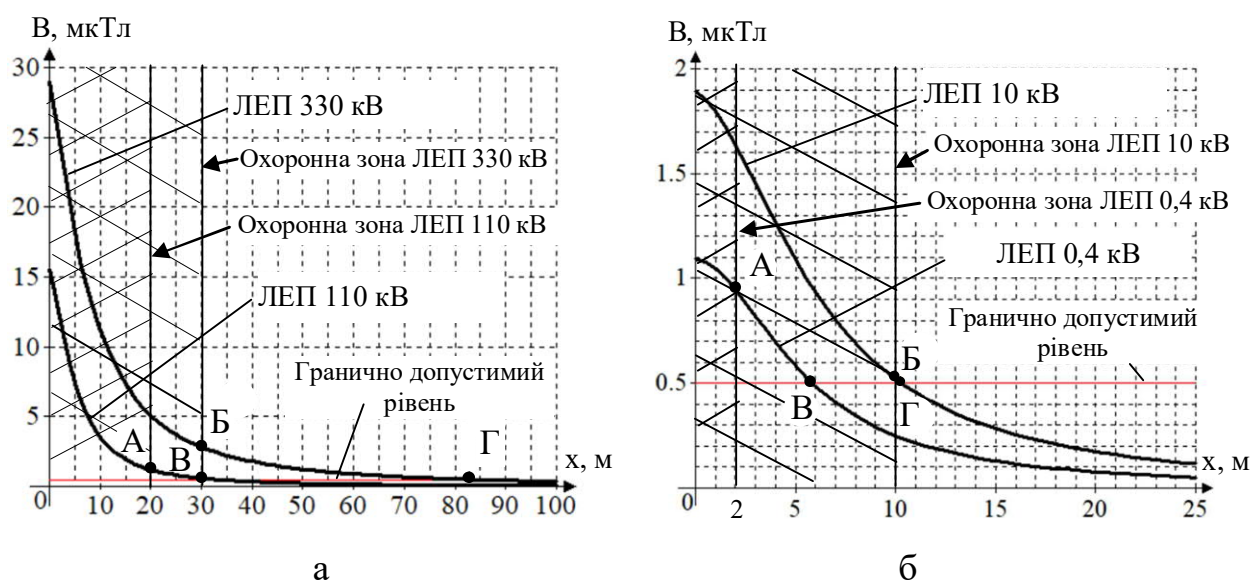


Рисунок 2.23 – Узагальнені результати експериментальних досліджень розподілу індукції МП діючих повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ, приведених до максимально допустимих струмів ЛЕП

Результати виконаних експериментальних досліджень індукції МП реальних ЛЕП 0,4-330 кВ (рис. 2.23) в цілому підтверджують коректність

результатів виконаного розрахунку максимальних значень індукції МП ЛЕП (рис. 2.16) і можливість суттєвого перевищення ГДР індукції МП реальних ЛЕП на границі їх чинних охоронних зон [11], що визначені за ЕП без урахування МП.

Отримані експериментальні результати показують необхідність збільшення величини чинних охоронних зон для ЛЕП 330 кВ – в 2,8 разів (з 30 м до 83 м), ЛЕП 110 кВ – в 1,5 рази (з 20 м до 30 м) , ЛЕП 0.4 кВ – в 3-4 рази (з 2 м до 6-8 м).

Найбільш гостро проблема зменшення негативного впливу МП на населення шляхом збільшення величини охоронних (санітарно-захисних) зон стоїть для ЛЕП 330 кВ, та ЛЕП 110 кВ і повинна бути вирішена на законодавчому рівні.

Для ЛЕП 0,4 кВ проблема захисту населення від їх МП може бути радикально вирішена шляхом більш широкого використання в них ізольованих проводів (СПП) з ізоляцією із зшитого поліетилену (рис. 1.11), коли їх МП буде зменшено на порядок за рахунок зменшення міжфазної відстані між проводами ЛЕП з 0,6 м (повітряна ізоляція) до 0,03–0,06 м (СПП).

Для ЛЕП середньої напруги 10 кВ-35 кВ проблема захисту населення від їх МП може бути раціонально вирішена шляхом більш широкого використання в них сучасних ізольованих проводів з ізоляцією із зшитого поліетилену.

2.5.3 Розрахунок безпечного розміру санітарно-захисних зон ліній електропередачі 0,4-330 кВ за магнітним полем та його верифікація

Проведений вище аналіз обґрунтовує необхідність введення для повітряних ЛЕП 110-330 кВ не тільки охоронних зон, а і санітарно-захисних зон [11], які будуть обмежувати індукцію МП до безпечного для населення рівня (0,5 мкТл) на їх межах. Однак розглянуті вище методи розрахунку МП, що засновані на вирішенні рівняння Лапласа в декартовій системі координат [306], не дозволяють виконувати безпосередній аналітичний розрахунок необхідного розміру санітарно-захисної зони X_s , для конкретних ЛЕП.

Вирішення цієї задачі можливо в циліндричній системі координат. Для цього розглянемо математичну модель МП ЛЕП на основі циліндричних просторових гармонік і розрахунок МП ЛЕП на її основі [323].

Як показано вище, одним із актуальних завдань, що вирішуються при створенні та експлуатації повітряних ЛЕП, є визначення розміру $\pm X_s$ (рис. 2.24) їх санітарно-захисної зони [11], на межі якої МП спадає до безпечного для населення рівня, визначеного нормативними документами [4]. Основним фактором, що визначає ширину цих зон, є нормативні обмеження [4] величини діючого значення індукції B_l МП, що створюється ЛЕП на висоті h_0 від поверхні землі.

Відповідно до нормативних обмежень, величина B_l на віддалені $-X_s \geq x \geq X_s$ від ЛЕП повинна бути меншою за ГДР B_s . Як правило, межі $(-X_s; +X_s)$ санітарної зони, її ширину визначають за параметром B_s та розрахунковими залежностями B_l від відстані (координати x , рис. 2.24) графічно, як це виконано на рис. 2.16. Відсутність аналітичного рішення ускладнює практичне визначення необхідної величини $\pm X_s$ для конкретних ЛЕП.

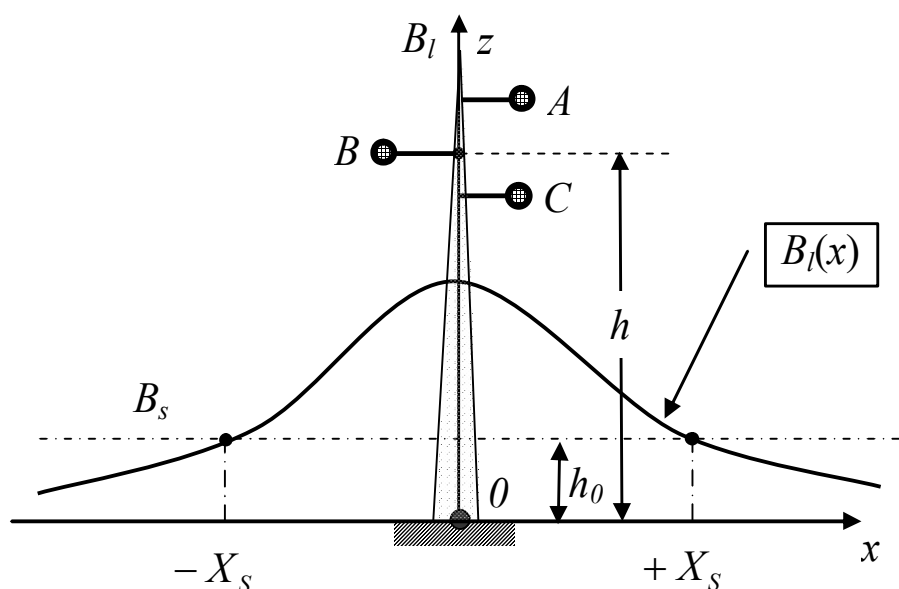


Рисунок 2.24 – Типовий розподіл індукції МП ЛЕП

Розрахунок величини X_s виконаємо на основі математичної моделі МП ЛЕП, побудованої з використанням циліндричних просторових гармонік індукції МП, при яких визначається функціональна залежність $X_s = f(B_l)$.

Математична модель МП ЛЕП на основі просторових циліндричних гармонік. При описі МП ЛЕП на основі циліндричних просторових гармонік припустимо [323], що:

- провідники фаз лінії – це паралельні струмові нитки нескінченної протяжності.
- струми лінії I_A, I_B, I_C , утворюють симетричну систему:

$$I_A = I, I_B = \alpha^2 I, I_C = \alpha I, \quad (2.63)$$

де $\alpha = e^{j4\pi/3}$.

При таких припущеннях просторовий гармонійний аналіз МП ЛЕП може бути виконаний в циліндричній системі координат (r, φ, Y) , вісь Y , якої проходить через центр кола мінімального радіусу $r_{\min}$, куди вписуються всі струмові нитки (рис. 2.26).

Співвідношення (2.63) дозволяє представити діюче значення індукції МП $B(x)$ трифазної ЛЕП у довільній точці простору P , як модуль суми індукцій $\mathbf{B}_{A-0}(P)$, $\mathbf{B}_{B-0}(P)$, $\mathbf{B}_{C-0}(P)$, відповідно, трьох незалежних замкнутих протяжних кіл $A-0$, $B-0$ и $C-0$ (см. рис. 2.26).

$$B_s(P) = |\mathbf{B}_{A-0}(P) + \mathbf{B}_{B-0}(P) + \mathbf{B}_{C-0}(P)|. \quad (2.64)$$

При обраній трасі (вздовж осі Y) проходження зворотних проводів з струмами $-I_A, -I_B, -I_C$, і положення кожного з трьох кіл визначають, відповідно, координати проводів фаз A, B, C .

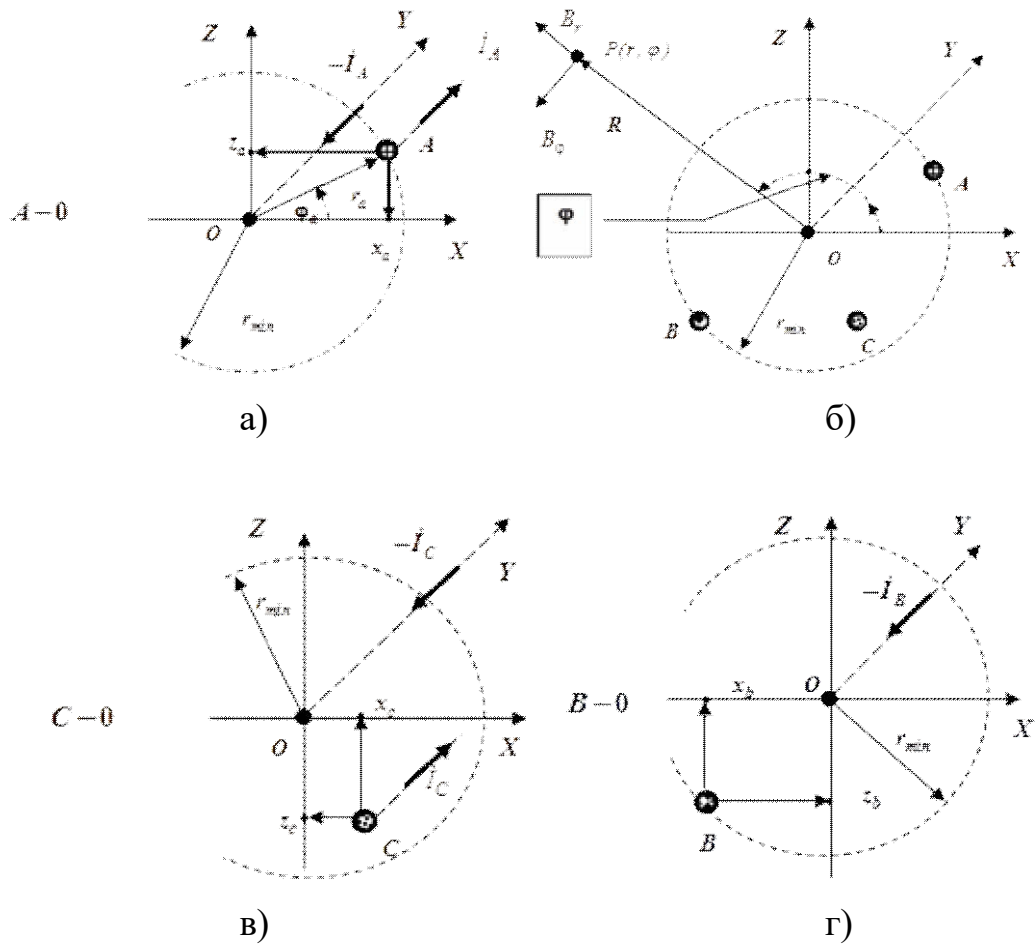


Рисунок 2.25 – Представлення трифазної лінії у вигляді трьох незалежних кіл

Просторовий гармонійний аналіз МП замкнутого струмового кола. Є струмове замкнуте коло, наприклад, $A - 0$ (рис. 2.25 б). Векторний потенціал $A_{(A-0)Y}$ МП такого кола в довільній точці простору $P(r, \varphi, Y)$, визначається як сума відповідних векторних потенціалів A_{ay} , A_{oy} – струму фази A і зворотного струму i з урахуванням [324] може бути описана співвідношенням:

$$A_{(A-0)y} = A_{oy} + A_{ay} = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln r - \mu_0 \frac{I}{2\pi} \ln \sqrt{(r^2 + (r_a)^2 - 2rr_a \cos(\varphi - \varphi_a))}. \quad (2.65)$$

Співвідношення (2.65) можна представити у вигляді ряду Фур'є, після чого для зовнішньої області ($r \geq r_{\min}$) воно прийме відомий вигляд [325]

$$A_{(A-0)Y} = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{r} \right)^n \left(\frac{a_{an} \cos n\varphi + b_{an} \sin n\varphi}{n} \right), \quad (2.66)$$

де a_{an} , b_{an} – амплітуди n -го порядку гармонік векторного потенціалу МП струмового кола $A-0$

$$a_{an} = (r_a)^n \cos n\varphi_a, b_{an} = (r_a)^n \sin n\varphi_a. \quad (2.67)$$

Гармоніки векторного потенціалу (2.66), визначають і відповідні гармоніки компонент її індукції МП B_{ar} і $B_{a\varphi}$:

$$B_{ar} = \frac{\mu_0}{r} \frac{dA_{(A-0)Y}}{d\varphi} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[a_{an} \sin n\varphi + b_{an} \cos n\varphi]}{r^{n+1}}, \quad (2.68)$$

$$B_{a\varphi} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{dA_{(A-0)Y}}{dr} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(a_{an} \cos n\varphi + b_{an} \sin n\varphi)}{r^{n+1}}. \quad (2.69)$$

Модуль індукції B_{an} МП n гармоніки у точці $P(r, \varphi, Y)$ при цьому залежатиме від координати r

$$B_{an} = \mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot r^{n+1}} \sqrt{(a_{an})^2 + (b_{an})^2}. \quad (2.70)$$

У табл. 2.16 наведено значення амплітуд a_{an} , b_{an} двох перших гармонік для кола $A-0$ у системі координат X, Y, Z (рис. 2.25).

Такий формат подання амплітуд a_{an} , b_{an} добре гармонізується з конструкторською документацією на опори ЛЕП, яка регламентує координати точок підвісу її проводів щодо земної поверхні.

Таблиця 2.16 – Амплітуди гармонік магнітної індукції струмового кола $A - 0$

Амплітуда гармонік	Співвідношення для кола з координатами x_a, z_a
a_{a1}	x_a
b_{a1}	z_a
a_{a2}	$(x_a)^2 - (z_a)^2$
b_{a2}	$2x_a \cdot z_a$

За аналогією з (2.67), визначаються амплітуди гармонік a_{bn}, b_{bn}, a_{cn} , кіл $B - 0$ і $C - 0$, відповідно:

$$\begin{aligned} a_{bn} &= \alpha^2 \cdot (r_b)^n \cos n\varphi_b, \quad b_{bn} = \alpha^2 \cdot (r_b)^n \sin n\varphi_b, \\ a_{cn} &= \alpha^2 \cdot (r_c)^n \sin n\varphi_c, \quad b_{cn} = \alpha^2 \cdot (r_c)^n \sin n\varphi_c. \end{aligned} \quad (2.71)$$

Структура ряду (2.68, 2.69) така, що зі зростанням r вклад гармонік високих порядків у компоненти індукції МП B_r і B_φ знижується.

Розрахунок МП ЛЕП на основі просторових циліндричних гармонік.
Індукція МП двопровідної лінії на видаленні $x \geq 2r_{\min}$ може бути з певною похибкою описано її першою ($n = 1$) гармонікою, коли $2r_{\min}$ перевищує подвійну міжфазну відстань ($2d_f$) між проводами. Це ілюструють побудовані за співвідношенням (2.70) магнітограми на рис. 2.26 [323]. Тут же для порівняння наведено результати розрахунку за законом Біо-Савара відповідно до (2.31–2.35) [192, 305, 306].

Як показано рис. 2.26, при віддаленні від осі ЛЕП на відстань більше $2,5 d_f$, похибка запропонованого методу в порівнянні з точним методом [192, 305, 306] не перевищує 10 %, що підтверджує можливість використання першої циліндричної просторової зони для розрахунку $X_s > 2,5d_f$.

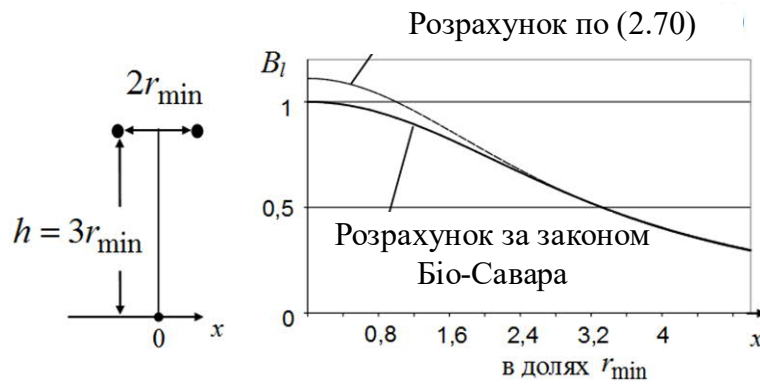


Рисунок 2.26 – Розподіл діючого значення індукції МП ЛЕП B_l для двопровідної лінії при одиничному струмі I

Магнітне поле трифазних одноколових ЛЕП.

Одноколові лінії мають один комплект фазних проводів. Їх взаємне розташування один щодо одного і земної поверхні визначає конструктивне виконання (профіль) опори ЛЕП.

Відповідно до поданої на рис. 2.25 «магнітної» інтерпретації ЛЕП, амплітуди a_{ln} і b_{ln} гармонік її МП, з урахуванням (2.63) і (2.64), представляють у вигляді суми відповідних амплітуд її незалежних кіл $A-0$, $B-0$, $C-0$:

$$a_{ln} = a_{an} + \alpha^2 a_{bn} + \alpha a_{cn}, b_{ln} = b_{an} + \alpha^2 b_{bn} + \alpha b_{cn}. \quad (2.72)$$

Першою значущою гармонікою одноколових ЛЕП є гармоніка порядку ($n = 1$). Її амплітуди a_{l1} і b_{l1} з урахуванням (2.67, 2.72) будуть рівними:

$$a_{l1} = x_a + \alpha^2 \cdot x_b + \alpha \cdot x_c, b_{l1} = z_a + \alpha^2 \cdot z_b + \alpha \cdot z_c. \quad (2.73)$$

Тут слід звернути увагу, що величини амплітуд a_{l1} і b_{l1} першої гармоніки ($n = 1$) не залежать від початку обраної системи координат X, Y, Z .

Знання амплітуд a_{l1} і b_{l1} першої гармоніки МП ЛЕП дозволяє, по співвідношенню (2.69) побудувати її магнітограми

$$B_l(x) \approx B_{l1}(x) = \mu_0 I \frac{\left| \sqrt{(a_{l1})^2 + (b_{l1})^2} \right|}{2\pi \cdot \left((h - h_0)^2 + x^2 \right)}, \quad (2.74)$$

де h – відстань від рівня земної поверхні (рис. 2.23) до центру кола $r_{\min}$, в яку вписуються всі струмові лінії ЛЕП.

Для зручності розрахунків відстань h можна покласти рівним середній висоті h_a, h_b, h_c підвісу відповідно проводів фаз А, В, С

$$h \approx 1/3(h_a + h_b + h_c). \quad (2.75)$$

Після нескладних, але громіздких перетворень співвідношення (2.74) можна привести до виду:

$$B_l(x) \approx \mu_0 I \frac{d_{rms}}{2\sqrt{2}\pi \cdot \left((h - h_0)^2 + x^2 \right)}, \quad d_{rms} = \sqrt{(d_{AB})^2 + (d_{BC})^2 + (d_{CA})^2} \quad (2.76)$$

де d_{rms} – середня квадратична відстань між проводами ЛЕП ;

d_{AB}, d_{BC}, d_{CA} – відстань між точками підвісу на опорі проводів фаз А і В, В і С, С і А, відповідно.

Рішення (2.76) відносно x дозволяє аналітично визначити розмір $\pm X_s$ смуги відчуження при заданому параметрі B_l .

$$\pm X_s = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot I \cdot d_{rms}}{2\sqrt{2} \cdot \pi \cdot B_l} - (h - h_0)^2}. \quad (2.77)$$

Таким чином, співвідношення (2.77) дозволяє проводити розрахунок необхідної величини $\pm X_s$ санітарної зони ЛЕП в залежності від її струмового (I) навантаження, ГДР індукції МП B_l і конструктивного виконання (профілем) її

опор (мінімальною висотою h підвісу проводів і середньоквадратичною відстанню d_{rms} між ними).

Верифікацію отриманого базового розрахункового співвідношення (2.76) здійснимо шляхом порівняння результатів розрахунку індукції МП лабораторного макета ЛЕП (рис. 2.4), виконаних за співвідношенням (2.76) з результатами точного верифікованого розрахунку (табл. 2.2) виконаного у відповідності до (2.13–2.15). При цьому $K = P_x / d_f$. Результати порівняння наведено в табл. 2.17, з яких випливає, що при $K \geq 2,5$ похибка співвідношення (2.76), а також співвідношення (2.77) не перевищує 10%.

Таблиця 2.17 – Відносна похибка приблизного розрахунку індукції МП ЛЕП на основі циліндричних просторових гармонік за співвідношенням (2.76)

Координата x точки спостереження P_x , (рис. 2.4 б), м	K	Точний розрахунок індукції МП B_i за розробленою методикою (2.13- 2.15), мкТл	Приблизний розрахунок B_i за отриманим співвідношенням (2.76), мкТл	Відносна похибка отриманого співвідношення, %
0,8	2,0	6,17	5,39	12,71
0,9	2,25	5,15	4,59	10,86
1,0	2,5	4,37	3,96	9,38
1,1	2,75	3,76	3,45	8,19
1,2	3,0	3,27	3,03	7,21
1,3	3,25	2,87	2,68	6,39
1,4	3,5	2,54	2,39	5,71
1,5	3,75	2,27	2,15	5,13
1,6	4,0	2,03	1,94	4,63
1,7	4,25	1,84	1,76	4,20

Виконана верифікація підтверджує можливість використання співвідношення (2.77) для інженерного розрахунку необхідного розміру X_s санітарно-захисної зони повітряних ЛЕП. Результати розрахунку необхідного розміру санітарно-захисної зони ЛЕП (2.77) при $B_l = 0,5$ мкТл і вихідних даних для найгіршого випадку (відповідно до рис. 2.25) представлені на рис. 2.27 і співпадають з результатами, представленими на рис. 2.16.

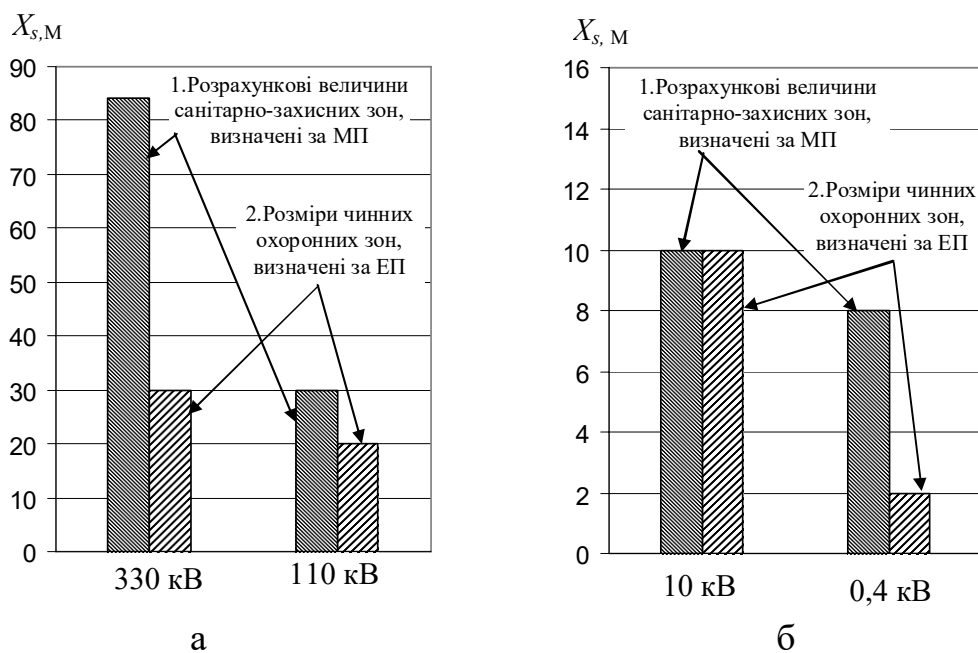


Рисунок 2.27 – Розраховані величини санітарно-захисних зон ЛЕП 0,4-330 кВ при їх визначенні за МП (1), та розмір чинних охоронних зон X_s ЛЕП (2), які визначені за ЕП

Таким чином, запропоноване автором розрахункове співвідношення (2.77) є коректним і дозволяє аналітично розраховувати необхідну величину охоронної (санітарно-захисної зони) для повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ за МП і не потребує графічних побудов відповідно до рис. 2.16.

Як слідує з рис. 2.27, за межами чинних охоронних зон можливе перевищення гранично допустимого для населення рівня індукції МП ЛЕП (0,5 мкТл) в 1,5–5,6 рази, що складає небезпеку для здоров'я людей, які проживають в будинках, розташованих поблизу ЛЕП. Це обумовлює необхідність збільшення розміру чинних охоронних зон для ЛЕП 330 кВ – в 2,8

рази (з 30 м до 83 м), для ЛЕП 110 кВ – в 1,5 рази (з 20 м до 30 м), що повинно бути вирішено на законодавчому рівні.

Проблему захисту населення від МП ЛЕП 0,4-10 кВ пропонується вирішити шляхом обов'язкового використання в них ізольованих проводів з ізоляцією із зшитого поліетилену (СП), що дозволить на порядок зменшити їх МП.

2.6 Висновки до другого розділу

1. Запропоновано та експериментально обґрунтовано в лабораторних умовах та на основі натурного експерименту нову математичну модель МП, новий метод моделювання МП та нову верифіковану методику розрахунку МП трифазних ЛЕП на їх основі, яка на відміну від відомих, дозволяє використовувати в якості розрахункових величин виключно діючі значення магнітної індукції, що підлягають як санітарно-гігієнічному нормуванню, так і фізичному вимірюванню стандартними приладами, що дозволяє підвищити достовірність отриманого результату. Запропонована нова методика розрахунку МП ЛЕП склала основу для розробки чинного нормативного документу Міненерговугілля «СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання» в редакції 2016 року», співавтором якого є здобувач.

2. Отримане та експериментально верифіковане просте аналітичне розрахункове співвідношення для приблизного (похибка до 10 %) розрахунку розподілу індукції МП повітряних одноколових ЛЕП, яке чітко визначає пропорційну залежність рівня МП ЛЕП від міжфазної відстані між проводами D , а також обернено пропорційну залежність МП від квадрату відстані R від проводів ЛЕП до точки спостереження.

3. Вперше запропонована і експериментально обґрунтована методика вимірювання діючого значення індукції МП ЛЕП, яка дозволяє здійснювати коректну санітарно-гігієнічну оцінку МП діючих ЛЕП.

4. Вперше експериментально встановлено низьку ефективність екранування (менш 10%) МП промислової частоти від ЛЕП стінами і міжповерховими перекриттями житлових будинків із типових будівельних матеріалів (красна та силікатна цегла, збірний залізобетон), яка теоретично підтверджена методами чисельного моделювання для будинків зі збірного залізобетону. Доведено, що МП електромереж, на відміну від ЕП, практично безперешкодно проникає всередину житлових приміщень основних типів будинків, що є визначальним чинником для визначення індукції МП у житлових приміщеннях від зовнішніх і внутрішніх електромереж.

5. Запропоновано нову математичну модель МП ЛЕП на основі просторових циліндричних гармонік МП, та розроблено на її основі верифіковану аналітичну методику розрахунку необхідної величини охоронних (санітарно-захисних) зон для повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ, яка не потребує графічних побудов і дозволяє визначати необхідну величину охоронних зон для зменшення індукції МП на їх границях до безпечного для населення рівня 0,5 мкТл.

6. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що за межами законодавчо визначених за ЕП чинних охоронних зон повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ, може мати місце перевищення гранично допустимого для населення рівня індукції МП ЛЕП (0,5 мкТл) в 1,5–5,6 рази, що складає небезпеку для здоров'я людей, які проживають в будинках, розташованих поблизу ЛЕП. Це обумовлює необхідність збільшення на законодавчому рівні величини чинних охоронних зон для ЛЕП 330 кВ – в 2,8 разів (з 30 м до 83 м), ЛЕП 110 кВ – в 1,5 рази (з 20 м до 30 м). Для ЛЕП малої та середньої напруги 0,4 кВ-35 кВ проблема захисту населення від їх МП може бути раціонально вирішена шляхом обов'язкового використання в них ізольованих проводів з ізоляцією із зшитого поліетилену(СПП), що дозволить на порядок зменшити їх МП.

7. Результати досліджень у цьому розділі опубліковані у роботах здобувача [306, 307, 314-316, 320-323] і впроваджені відповідно до додатків Б1, Б2 та В1, В2, В5, В6 дисертації.

РОЗДІЛ 3

СТРУКТУРНІ МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

3.1 Загальні положення

Як слідує з [99] та розділу 1.4 дисертації, зменшення МП як узагальненого технічного об'єкту [162], так і трифазних ЛЕП на їх основі, може бути досягнуто при удосконаленні просторової структури їх магнітоактивних конструктивних елементів (струмопроводів) шляхом симетрування геометрії конструкції ЛЕП та підвищення порядку основної просторової гармоніки [99, 162] їх МП. Такі структурні методи зменшення МП ЛЕП [99, 162] на відміну від систем екранування, не потребують використання додаткових функціональних елементів, що робить їх економічно привабливими.

Однак наукові основи реалізації структурних методів зменшення МП ЛЕП на сьогодні досліджені недостатньо. Ці методи можуть бути побудовані на основі моделювання МП трифазних ЛЕП з допомогою просторових гармонік МП, які можуть бути визначені тільки на основі просторового гармонічного аналізу МП ЛЕП, наприклад, в сферичній системі координат [326]. При цьому МП може бути представлено у вигляді просторового гармонічного ряду у вигляді суми просторових гармонік різних порядків (першої просторової гармоніки – диполя з інтенсивністю затухання у 3 степені від відстані, а також вищих просторових гармонік: квадруполь з інтенсивністю затухання у 4 степені від відстані, октуполь з інтенсивністю затухання у 5 степені від відстані та ін.).

Однак визначення амплітуд вищих просторових гармонік МП для ЛЕП різного конструктивного виконання відомими методами представляє собою досить складну задачу.

Для визначення просторових гармонік МП ЛЕП та удосконалення просторової структури ЛЕП на їх основі, автором запропоновано [327, 328] мультидипольну математичну модель їх МП, що характеризується

елементарними магнітними диполями контурів зі струмом ЛЕП та їх комбінаціями. Така мультидипольна модель дозволяє з обмеженою похибкою (10%) визначати як МП ЛЕП, так і його просторово-часову структуру на основі векторів ММ контурів зі струмом ЛЕП. При цьому дипольні ММ ЛЕП мають чітку фізичну інтерпретацію, так як визначаються геометрією фазних струмопроводів (проводів) ЛЕП і їх струмами. Крім того, використовуючи декілька дипольних ММ можна змодельовати і побудувати квадрупольні та октупольні джерела МП з заданими параметрами [328] і на цій основі удосконалити просторову структуру підвісу проводів ЛЕП для зменшення рівня їх МП.

3.2 Мультидипольна математична модель магнітного поля ліній електропередачі

Одним з найпоширеніших прийомів інженерного проектування є представлення складного об'єкту у вигляді сукупності елементарних. Елементарним джерелом МП є магнітний диполь [329] і, отже, природним підходом до вивчення і нормалізації МП ЛЕП є його мультидипольне уявлення [162]. Відмітимо, що необхідність використання мультидипольного уявлення МП викликане не прямим завданням розрахунку МП ЛЕП, що вже розглянуто в розділі 2 дисертації, а необхідністю рішення оберненої задачі – проектування ЛЕП із зменшеним МП, що відповідає санітарним нормам для населення.

Для виявлення суті мультидипольного моделювання розглянемо його застосування для простішої однофазної (двопровідної) ЛЕП (див. рис. 3.1) із струмом I , що містить джерело електричної енергії (Д) з напругою U і навантаження (Н) [305].

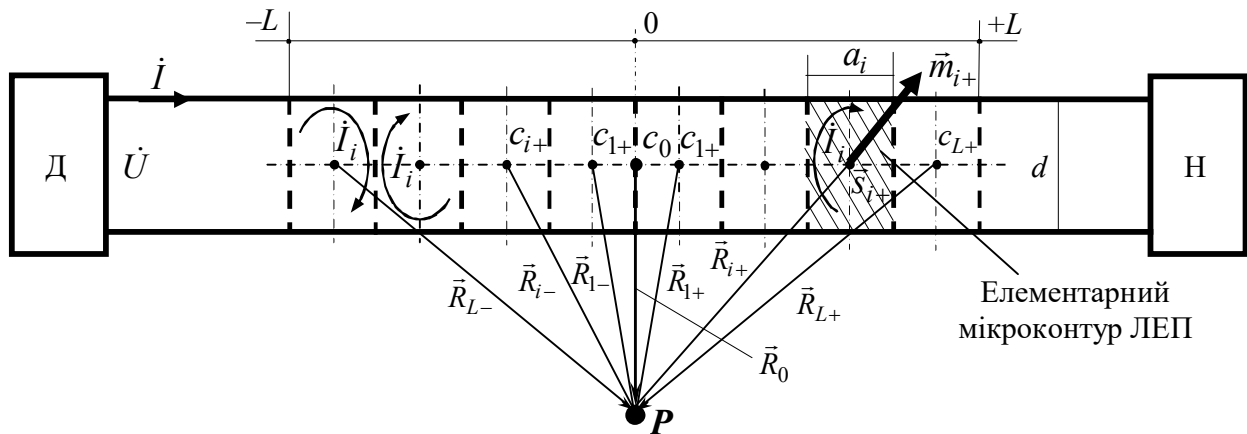


Рисунок 3.1 – Однофазна ЛЕП та її елементарні мікроконттури, що характеризуються дипольними магнітними моментами

При аналізі використовуємо наступні припущення: проводи ЛЕП мають форму нескінченних лінійних паралельних один одному провідників у вигляді струмових ниток; струми і напруга в колах строго гармонійні; взаємний електромагнітний вплив проводів ЛЕП і зовнішнього середовища не враховується; площі струмових контурів джерела електричної енергії Д і навантаження Н дорівнюють нулю і не створюють МП.

Мультидипольна модель (рис. 3.1) містить систему дипольних джерел МП $\vec{H}(P)$, що характеризуються дипольними ММ $\vec{m}_i$, розташованими в геометричних центрах незалежних прямокутних мікроконтурів $d_i \times a$ з міжфазним струмом I_α і площею $\vec{S}_i$, на яких з кроком a умовно розбиваються всі контури струму, що утворюються проводами різних фаз на досліджуваній ділянці ЛЕП протяжністю $2L$.

Тоді, відповідно до [328], мультидипольна математична модель МП однофазної ЛЕП (рис. 3.1), яка представляє собою векторну суму МП від ММ елементарних мікроконтурів, може бути виражена співвідношенням:

$$\dot{H}_{ЛЕП}(P) = \sum_{i=-L}^{+L} \dot{H}_{mi}(P) = - \sum_{i=-L}^{+L} \nabla \left[\frac{(\dot{m}_i, \vec{R}_i)}{4\pi R_i^3} \right] \quad (3.1)$$

де $\dot{H}_m(P)$ – МП елементарного мікроконтурі ЛЕП, виділеного штрихуванням на рис. 3.1.

Для загального випадку багатофазної ЛЕП з урахуванням розщеплених проводів фаз та (3.1), її МП:

$$\dot{H}(P) = - \sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \sum_c \sum_{i=1}^N \nabla \left[\frac{(\dot{m}_{l\alpha ci}, \vec{R}_{l\alpha ci})}{4\pi R_{l\alpha ci}^3} \right] \quad (3.2)$$

де $\dot{m}_{l\alpha ci} = I_{l\alpha} \cdot \vec{S}_{l\alpha ci} = I_{l\alpha} \cdot e^{-j\varphi_{l\alpha}} \cdot a \cdot d_{l\alpha ci} \cdot \vec{n}_{l\alpha ci}$;

N – кількість мікроконтурів в кожному контурі ЛЕП;

$\vec{S}_i$ – вектор площі i -го мікроконтурі;

$\vec{n}_i$ – одиничний вектор, нормальний до S_i ;

$\vec{R}_i$ – радіус вектор від геометричного центру i -го мікроконтурі в точку спостереження P ;

c – ліва (л) або права (п) частина досліджуваною ЛЕП щодо точки P ;

α – кількість фаз ЛЕП;

G – кількість розщеплених проводів кожної з фаз;

$d_{l\alpha ci}$ – поточна відстань між проводами різних фаз.

З проведеного вище аналізу виходить, що при мультидипольному моделюванні окремі елементарні мікроконтурі реальної ЛЕП можуть бути заміщені лінійкою відповідних ММ, розміщених в геометричних центрах цих елементарних мікроконтурів (рис. 3.2). Тоді МП трифазної трипровідної ЛЕП ($G = 1$) формується системою ММ, утворюваних контурами міжфазних струмів I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} , по яких передається електрична енергія.

В разі, якщо фази трифазної ЛЕП ($\alpha = 3$) розщеплені і виконані із G проводів, рознесених у просторі ($G > 1$), то система її дипольних ММ містить

збільшене в G разів кількість лінійок ММ. Тоді її математична модель з урахуванням (3.2) може бути описана співвідношеннями

$$\dot{\vec{B}}_{cm}(P) = -\mu_0 \sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \nabla \left[\frac{(\dot{\vec{m}}_{l\alpha}, \vec{R}_{l\alpha})}{4\pi R_{l\alpha}^3} \right]; \quad (3.3)$$

$$\dot{\vec{B}}_{ЛЕП}(P) = \sum_{i=-L}^{+L} \dot{\vec{B}}_{cm}(P) = -\mu_0 \sum_{i=-L}^{+L} \sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \nabla \left[\frac{(\dot{\vec{m}}_{l\alpha i}, \vec{R}_{l\alpha i})}{4\pi R_{l\alpha i}^3} \right], \quad (3.4)$$

де $\dot{\vec{B}}_{cm}(P)$ – МП елементарної системи міжфазних мікроконтурів.

Для ілюстрації, на рис. 3.2 представлена лінійка ММ трифазної ЛЕП (рис. 3.2 а) при двох розщеплених проводах у фазі ($G = 2$), аналогом якої є двоколова ЛЕП з ідентичними струмами в її колах. Штрихуванням (рис. 3.2 б) виділені ММ, що належать одній з її елементарних систем міжфазних мікроконтурів. МП ЛЕП (рис. 3.3 а) описується співвідношенням (3.4) з урахуванням (3.1) і $G = 2$.

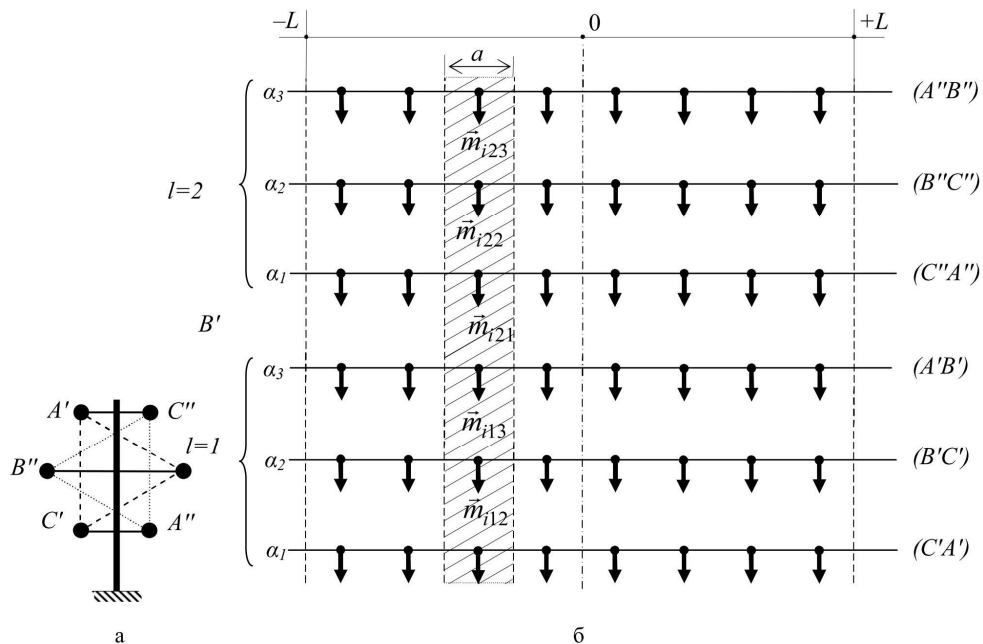


Рисунок 3.2 – Лінійка дипольних ММ міжфазних мікроконтурів трифазної двоколової ЛЕП

На рис. 3.3 представлені результати розрахунку МП реальної одноколової ЛЕП 330 кВ на основі запропонованої мультидипольної моделі (3.4), та результати розрахунку за верифікованою методикою (2.13–2.17), а також результати експерименту на діючій ЛЕП 330 кВ.

У таблиці 3.1 приведені результати лабораторних досліджень індукції МП макету ЛЕП (рис. 3.4) при струмі $I_d = 100$ А та розрахунку макету ЛЕП по (3.4).

Порівняння цих результатів підтверджує правильність виконаного аналізу і адекватність запропонованої мультидипольної моделі ЛЕП при віддаленні точки спостереження P за горизонтальну проекцію її проводів (більше 8 м в розглянутому випадку).

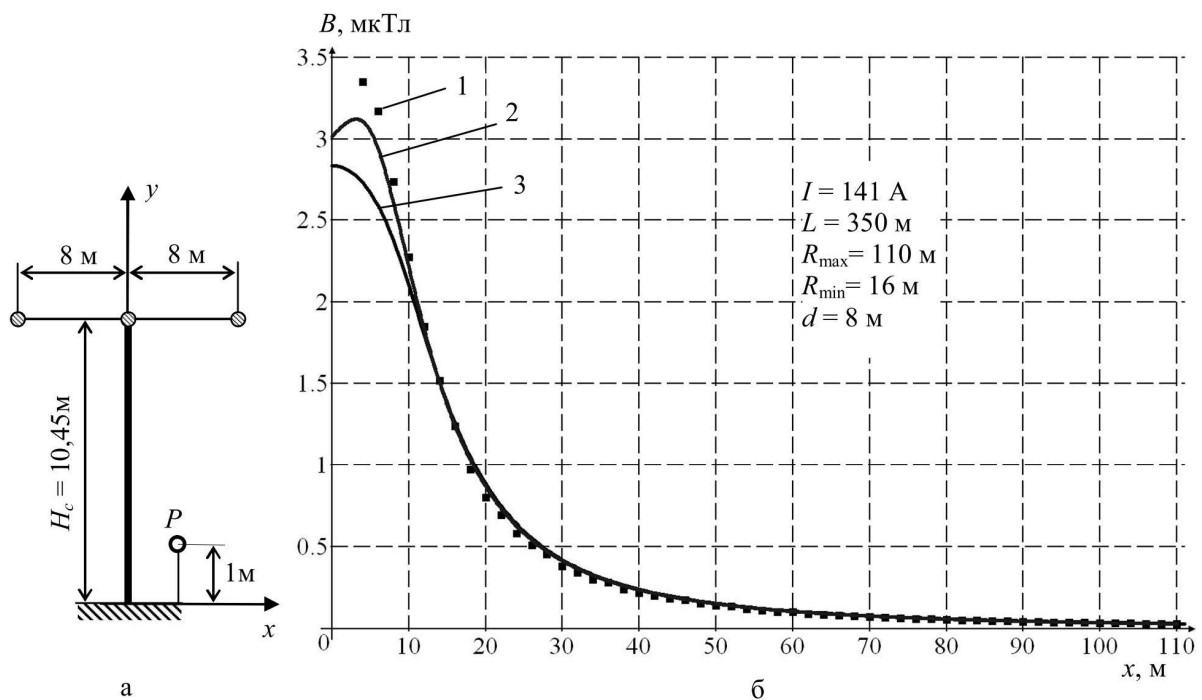
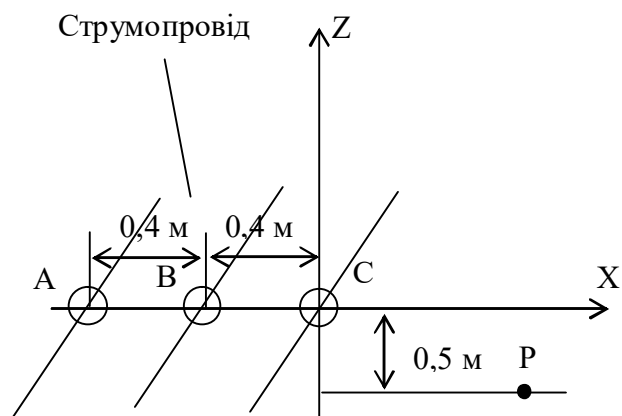


Рисунок 3.3 – Розподіл індукції МП реальної ЛЕП 330 кВ з використанням мультидипольної моделі:

- 1 – експеримент; 2 – розрахунок на основі мультидипольної моделі;
- 3 – розрахунок за верифікованою методикою на основі Біо-Савара



а



б

Рисунок 3.4 – Лабораторний макет трифазної одноколової ЛЕП довжиною 9 м

Таблиця 3.1 – Результати лабораторних досліджень МП трифазної одноколової повітряної ЛЕП та розрахунку на основі мультидипольної моделі МП

Координата точки P x , м	Експеримент B_P , мкТл	Розрахунок B , мкТл	Відносна похибка δ , %
0,8	8,94	8,313	7,5
0,9	7,76	7,203	7,7
1,0	6,69	6,289	6,4
1,1	5,82	5,528	5,3
1,2	5,09	4,891	4,1
1,3	4,52	4,352	3,9
1,4	4,01	3,893	3,0
1,5	3,60	3,5	2,9
1,6	3,20	3,16	1,3
1,7	2,93	2,865	2,3

Результати викладених вище досліджень можуть бути проілюстровані на прикладі системи передачі енергії в трифазному електричному колі обмеженої довжини (рис. 3.5) [329]. Коли відстань від джерел МП до житлових або робочих зон в 3 рази перевищує протяжність їх струмових контурів, стає доцільним використання дипольного уявлення МП [270], що дозволяє при обмеженій

похибці спростити як моделювання МП, так і інженерні розрахунки на його основі.

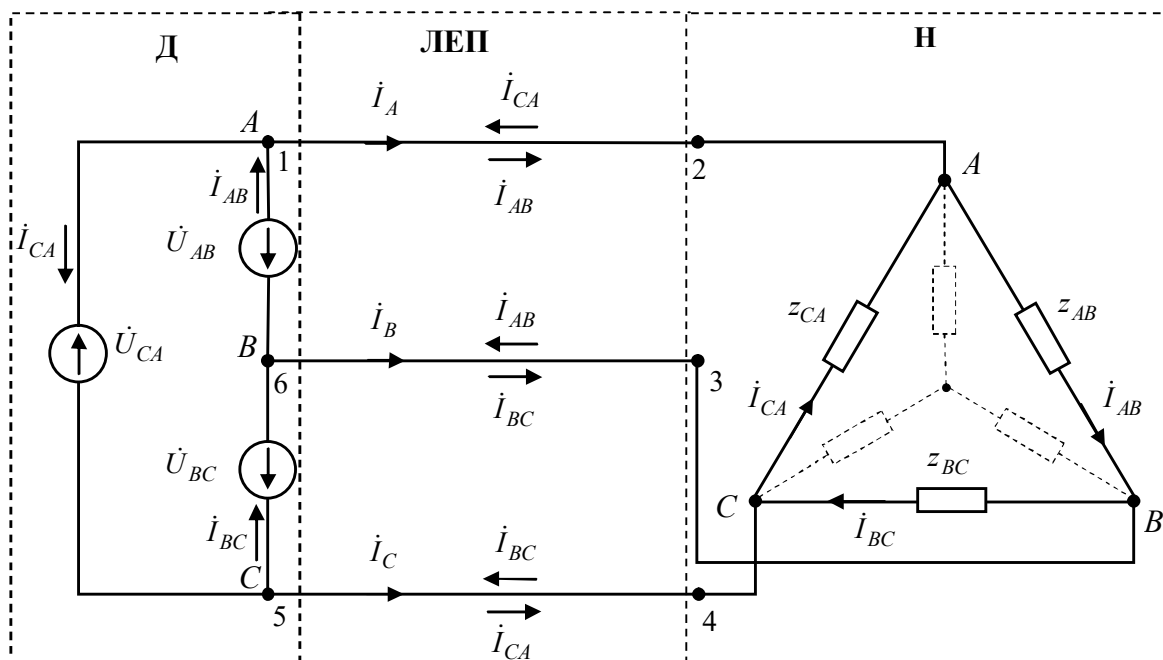


Рисунок 3.5 – Електрична схема типового трифазного електричного кола

Тому використання дипольної моделі джерел МП може бути також доцільно у разі моделювання зовнішнього МП і трифазних струмопроводів обмеженої протяжності [328], які розташовані на певному віддаленні від робочих зон. При дипольному моделюванні, МП електричного кола може бути отримане як суперпозиція дипольного МП її незалежних струмових контурів відповідно до (3.3). Кожен з контурів трифазного електричного кола (рис. 3.5) як джерело МП характеризуємо дипольним ММ $\vec{m}_i$, який визначається величиною контурного струму I_i і пов'язаною з ним площею контуру $\vec{s}_i$. Тоді дипольна математична модель електричного кола (рис. 3.5) описується співвідношенням [327]:

$$\vec{B}(P) = \mu_0 \sum_{i=1}^N \left(- \text{grad} \left(\frac{\vec{m}_i \cdot \vec{R}_i}{4\pi R_i^3} \right) \right); \quad (3.5)$$

$$\vec{m}_i = I_i \vec{s}_i, \quad (3.6)$$

де $\vec{R}_i$ – радіус-вектор, направлений з геометричного центру i -го контуру в точку спостереження P ;

N – кількість контурів струму кола, що беруть участь у формуванні її МП, які надалі називатимемо робочими контурами кола.

Для дипольного моделювання МП необхідно визначити параметри (3.6) робочих контурів струму кола. Виходячи із загальних міркувань, можна припустити, що для моделювання МП трифазного трипровідного електричного кола відповідно до (3.5), кількість незалежних робочих контурів струму α повинно відповідати кількості фаз кола і дорівнювати трьом. Проте, теоретичне обґрунтування принципу визначення робочих контурів струму, що формують МП трифазного електричного кола, в даний час відсутнє. На практиці ж використовується спрощена двоконтурна математична модель джерел МП трифазного трипровідного електричного кола [328], яка не має коректного теоретичного обґрунтування і сформульованих умов її застосування.

Метод визначення дипольної моделі МП електричного кола.

Визначимо параметри дипольної математичної моделі МП трифазного трипровідного електричного кола і умови її застосування з урахуванням особливостей режиму роботи електричного кола.

Розглянемо електричне коло, що складається з елементарного плоского контуру змінного струму $\dot{I}_i$ площею $\vec{S}_i$, джерела з напругою $\dot{U}_i$ частотою 50 Гц і навантаження (рис. 3.5). Протікання струму в цьому контурі супроводжується передачею електричної енергії від джерела до навантаження, швидкість передачі якої характеризується електричною потужністю $\dot{S}_i$ контуру [329]:

$$\dot{S}_i = \dot{U}_i \dot{I}_i. \quad (3.7)$$

При цьому величина ММ (3.6) даного елементарного контуру може бути виражена через його електричну потужність (3.7):

$$\dot{\vec{m}}_i = \frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_i} \vec{s}_i. \quad (3.8)$$

З цього співвідношення виходить, що величина ММ $\dot{\vec{m}}_i$ елементарного контуру із струмом, яка визначає його магнетизм, пропорційна електричній потужності цього контуру $\dot{S}_i$, що дозволяє визначати параметри (3.6) контуру за параметрами його електричної потужності (3.7).

Перейдемо тепер від елементарного контуру струму до багатоконтурного електричного кола і припустимо, що воно містить N незалежних контурів струму. Охарактеризуємо потужність цього електричного кола значенням $\dot{S}_\Sigma$, що є сумою потужності окремих незалежних замкнутих контурів струму цього кола:

$$\dot{S}_\Sigma = \sum_{i=1}^N \dot{S}_i = \sum_{i=1}^N (\dot{I}_i \dot{U}_i). \quad (3.9)$$

Тоді, з урахуванням проведеного вище аналізу, можна стверджувати, що всі незалежні контури струму багатоконтурного кола, що входять в рівняння потужності (3.9), є робочими контурами цього кола і створюють МП відповідно до (3.5, 3.6). При цьому визначення параметрів робочих контурів струму електричного кола (3.6), що беруть участь у формуванні її МП (3.5), зводиться до виявлення всіх контурів струму, що входять в рівняння потужності (3.9) цього кола.

Таким чином, метод визначення параметрів дипольної моделі МП електричного кола полягає у виборі тих параметрів моделі МП, які входять в рівняння потужності цього кола. Реалізація методу повинна здійснюватися на основі аналізу рівняння потужності електричного кола, при якому напруга $\dot{U}_i$ з (3.9) визначає відповідний i -й робочий контур з площею $\vec{s}_i$ для (3.6), а струм $\dot{I}_i$ з (3.9) робочий струм $\dot{I}_i$ в рівнянні (3.6).

Дипольна модель магнітного поля трифазного трипровідного електричного кола.

Проведемо аналіз моделі МП простого трифазного трипровідного електричного кола (рис. 3.5) для загального випадку, що включає несиметричний режим її роботи.

Електричне коло (рис. 3.5) містить джерело електричної енергії (Д), що характеризується лінійною напругою $\dot{U}_L$. При цьому воно характеризується лінійними ($\dot{I}_L$) і фазними ($\dot{I}_\phi$) струмами і навантаженням (Н), причому

$$\begin{aligned}\dot{U}_L &\in (\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}); \dot{I}_L \in (\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C); \\ \dot{I}_\phi &\in (\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}); \dot{I}_L = \dot{I}_\phi / \sqrt{3}\end{aligned}\quad (3.10)$$

Подальший аналіз проводимо при наступних допущеннях: струми і напруга в колі строго гармонійні; проводи ЛЕП взаємно паралельні і утворюють плоскі контури струму; взаємний електромагнітний вплив проводів ЛЕП і зовнішнього середовища не враховується; площі струмових контурів джерела електричної енергії Д і навантаження Н (рис. 3.5) дорівнюють нулю; при визначенні потужності і магнітних моментів окремих фаз кола передбачається, що кожна з фаз містить незалежний контур струму.

Відзначимо також, що приведені на рис. 3.5 конкретні схеми з'єднання Д та Н («трикутник» або «зірка») не є істотними для подальшого аналізу, оскільки при необхідності вони можуть бути перетворені [330] в інші еквівалентні для режиму струмів кіл схеми з'єднання Д та Н.

З урахуванням прийнятих вище допущень запишемо рівняння потужності (3.9) для електричного кола (рис. 3.5), враховуючи, що електрична енергія в ній передається струмами $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$:

$$\dot{S}_\Sigma = \dot{S}_{AB} + \dot{S}_{BC} + \dot{S}_{CA} = \dot{U}_{AB}\dot{I}_{AB} + \dot{U}_{BC}\dot{I}_{BC} + \dot{U}_{CA}\dot{I}_{CA}. \quad (3.11)$$

На підставі запропонованого методу визначимо параметри дипольної моделі МП даного електричного кола (рис. 3.5). Відповідно до (3.11) модель повинна містити три незалежних робочих контури, які характеризуються площею $\vec{s}_{AB}$ (контур 1-2-3-6-1) і струмом $\dot{I}_{AB}$; площею $\vec{s}_{BC}$ (контур 6-3-4-5-6) і струмом $\dot{I}_{BC}$; площею $\vec{s}_{CA}$ (контур 1-5-4-2-1-5) і струмом $\dot{I}_{CA}$. Тоді на підставі (3.11) дипольна математична модель МП простого трифазного трипровідного електричного кола (рис. 3.5) для даного загального випадку визначається співвідношенням:

$$\dot{\vec{B}}(P) = \mu_0 \left(-grad \frac{([\dot{I}_{AB} \vec{s}_{AB}], \vec{R}_{AB})}{4\pi R_{AB}^3} - grad \frac{([\dot{I}_{BC} \vec{s}_{BC}], \vec{R}_{BC})}{4\pi R_{BC}^3} - grad \frac{([\dot{I}_{CA} \vec{s}_{CA}], \vec{R}_{CA})}{4\pi R_{CA}^3} \right) \quad (3.12)$$

або з урахуванням (3.6) співвідношенням:

$$\dot{\vec{B}}(P) = \mu_0 \left(-grad \frac{(\dot{\vec{m}}_{AB}, \vec{R}_{AB})}{4\pi R_{AB}^3} - grad \frac{(\dot{\vec{m}}_{BC}, \vec{R}_{BC})}{4\pi R_{BC}^3} - grad \frac{(\dot{\vec{m}}_{CA}, \vec{R}_{CA})}{4\pi R_{CA}^3} \right), \quad (3.13)$$

яке моделює схему розташування магнітних моментів $\dot{\vec{m}}_{AB}$, $\dot{\vec{m}}_{BC}$, $\dot{\vec{m}}_{CA}$ електричного кола (рис. 3.6).

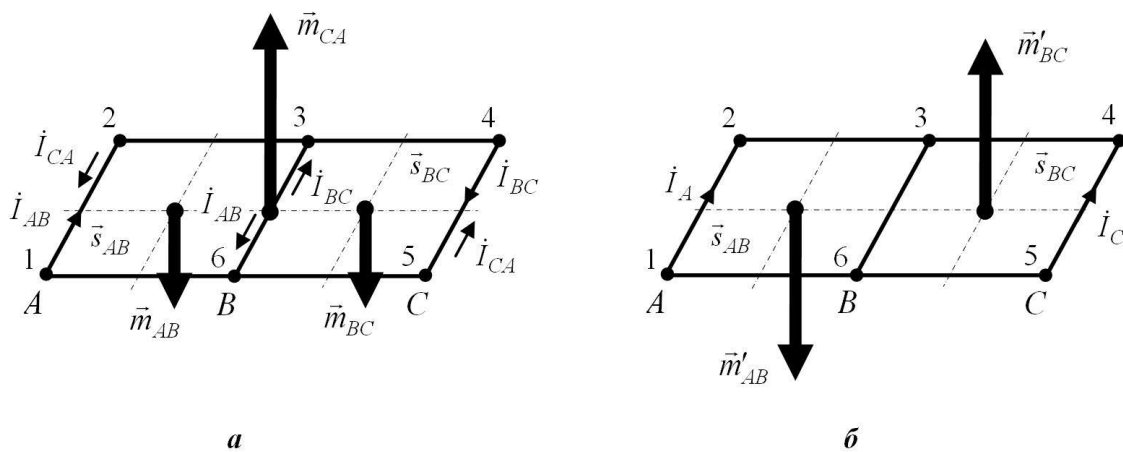


Рисунок 3.6 – Схема розташування магнітних моментів трифазного електричного кола

Схема розташування магнітних моментів розглянутої трифазної моделі при розміщенні всіх робочих контурів кола в одній горизонтальній площині, представлена на рис. 3.6 а.

Дипольна модель магнітного поля при симетрії живлячої напруги.

Для електричних кіл реальних об'єктів, зокрема ЛЕП загального призначення, як правило виконується умова

$$\dot{S}_I > \dot{S}_H, \quad (3.14)$$

де $\dot{S}_I$ – встановлена потужність джерела Д (рис. 3.5);

$\dot{S}_H$ – потужність навантаження ЛЕП.

При виконанні умови (3.14) живлячі напруги $\dot{U}_L$ утворюють симетричну систему:

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0. \quad (3.15)$$

Визначимо параметри дипольної моделі МП електричного кола (рис. 3.5) при виконанні умови (3.15). Аналіз проведемо з урахуванням наступних

співвідношень між лінійними і фазними струмами електричного кола (рис. 3.5), визначеними на основі 1-го закону Кірхгофа для її вузлів 1,5,6:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \quad (3.16)$$

Перетворюючи (3.11) з урахуванням (3.15) і (3.16) отримаємо рівняння потужності кола (рис. 3.5) для випадку симетрії живлячої напруги:

$$\dot{S}_\Sigma = \dot{I}_{AB}\dot{U}_{AB} + \dot{I}_{BC}\dot{U}_{BC} + \dot{I}_{CA}(-\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{BC}) = \dot{U}_{AB}\dot{I}_A + \dot{U}_{BC}(-\dot{I}_C). \quad (3.17)$$

Тоді відповідно до запропонованого методу і на підставі отриманого рівняння потужності (3.17) кола, модель дипольних джерел МП для кола (рис. 3.5) у разі симетрії живлячої напруги може бути побудована на основі двох струмових контурів ($N = 2$). Ці контури характеризуються площею $\vec{s}_{AB}$ (контур 1-2-3-6-1) із струмом $\dot{I}_A$ і площею $\vec{s}_{BC}$ (контур 6-3-4-5-6) із струмом $-\dot{I}_C$, які для даного випадку є робочими і можуть використовуватися як параметри математичної моделі МП.

На підставі проведеного вище аналізу і відповідно до (3.12), дипольна математична модель МП трифазного трипровідного електричного кола для випадку симетрії живлячої напруги може бути виражена співвідношенням:

$$\dot{\vec{B}}(P) = \mu_0 \left(-grad \frac{([\dot{I}_A \vec{s}_{AB}], \vec{R}_{AB})}{4\pi R_{AB}^3} - grad \frac{([\dot{I}_C \vec{s}_{BC}], \vec{R}_{BC})}{4\pi R_{BC}^3} \right). \quad (3.18)$$

або з урахуванням (3.6) співвідношенням:

$$\dot{\vec{B}}(P) = \mu_0 \left(-grad \frac{(\dot{\vec{m}}'_{AB}, \vec{R}_{AB})}{4\pi R_{AB}^3} - grad \frac{(\dot{\vec{m}}'_{BC}, \vec{R}_{BC})}{4\pi R_{BC}^3} \right);$$

$$\dot{\vec{m}}'_{AB} = \dot{I}_A \vec{s}_{AB}; \dot{\vec{m}}'_{BC} = -\dot{I}_C \vec{s}_{BC}, \quad (3.19)$$

яке моделює схему розташування магнітних моментів $\dot{\vec{m}}'_{AB}$ і $\dot{\vec{m}}'_{BC}$ в електричному колі (рис. 3.5).

Схема розташування ММ розглянутої двохфазної моделі трифазного електричного кола для випадку розміщення всіх робочих контурів кола в одній площині, представлена на рис. 3.6 б.

Таким чином, за умови симетрії живлячої напруги, в якості параметрів дипольної математичної моделі МП трифазного трипровідного електричного кола можуть бути використані тільки два контури передачі електричної енергії, що істотно спрощує моделювання МП (3.18, 3.19) порівняно з базовою моделлю (3.12, 3.13), що використовує три струмові контури.

Спрощена двохфазна мультидипольна модель трифазної ЛЕП.
Використовуючи двофазне уявлення МП трифазної ЛЕП відповідно до (3.19) та (3.4) і переходячи до індукції МП отримаємо спрощену двофазну мультидипольну модель трифазної ЛЕП, яка може бути використана при симетрії напруг живлення ЛЕП:

$$\dot{\vec{B}}_{ЛЕП} = -\mu_0 \sum_{l=1}^G \sum_{i=1}^N \left[\nabla \frac{(\dot{\vec{m}}'_{ABli}, \vec{R}_{ABli})}{4\pi R_{ABli}^3} + \nabla \frac{(\dot{\vec{m}}'_{BCli}, \vec{R}_{BCli})}{4\pi R_{BCli}^3} \right] \quad (3.20)$$

$$\dot{\vec{m}}'_{ABli} = \dot{I}_{Ali} \vec{s}_{ABli}; \dot{\vec{m}}'_{BCli} = -\dot{I}_{Cli} \vec{s}_{BCli}$$

Співвідношення (3.20) дозволяє на третину зменшити кількість математичних операцій при обчисленні індукції МП, а також, як це показано автором в [331], зменшити похибку розрахунку на малих відстанях до проводів ЛЕП при їх несиметричному розташуванні.

3.3 Похибка мультидипольної моделі магнітного поля ліній електропередачі та умови її коректного використання

З проведеного вище аналізу витікає, що основна похибка мультидипольної моделі МП ЛЕП залежить від похибки заміщення МП реального струмового контуру ЛЕП на сумарне МП, що створюється ММ їх елементарних мікроконтурів. Очевидно, що ця похибка визначається похибкою заміщення реального прямокутного мікроконтура зі струмом дипольним джерелом МП і залежить від геометрії мікроконтуру і відстані до точки спостереження [192]. Тому для визначення похибки мультидипольної моделі МП ЛЕП необхідно визначити похибку дипольного уявлення прямокутного плоского контура із струмом як джерела МП.

Похибка дипольного уявлення прямокутного контуру зі струмом як джерела магнітного поля. Розглянемо плоский прямокутний (квадратний) контур із струмом у декартовій системі координат. Магнітний диполь розміщується в центрі координат таким чином, щоб його момент мав лише одну позитивну Z -складову. Плоский прямокутний контур розташовується в координатній площині XOY так, щоб його геометричний центр знаходився на початку координат, а дипольний магнітний момент був також направлений уздовж осі Z .

Значення ММ двох різних джерел МП, характери просторових розподілів індукції яких підлягають порівнянню, вибираються рівними. ММ плоского прямокутного контуру M :

$$M = M_z = I \cdot S = I \cdot 2a \cdot 2b, \quad (3.21)$$

де I – струм у контурі, $2a, 2b$ – довжини сторін прямокутного контуру. Вводимо коефіцієнт співвідношення сторін контуру k :

$$k = \frac{b}{a}, \quad (3.22)$$

отримуємо вираз для залежності дипольного моменту контуру від габаритного розміру контуру:

$$M = 4I \cdot k \cdot a^2. \quad (3.23)$$

При цьому вводимо поняття габаритного розміру прямокутного контуру l_g , що дорівнює максимальному розміру його сторони.

Так як ми розглядаємо контур зі струмом в області простору з нульовою щільністю струму, то можливе введення скалярного магнітного потенціалу U_m та уявлення $\vec{H}$ [54]:

$$\vec{H} = -\text{grad}U_m, \quad (3.24)$$

у декартовій системі координат:

$$H_x = -\frac{\partial U_m}{\partial x}, \quad H_y = -\frac{\partial U_m}{\partial y}, \quad H_z = -\frac{\partial U_m}{\partial z}. \quad (3.25)$$

Вираз для потенціалу МП прямокутного контуру зі струмом, що лежить у площині, паралельній площині XOY , зі сторонами $2a$ і $2b$, паралельними осям X , Y , і центром мас на осі Z :

$$\begin{aligned} U_m = & -\frac{I}{4\pi} \left\{ \arctg \frac{z-c}{(x-a) \cdot (y-b)} \left[(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \right. \\ & - \arctg \frac{z-c}{(x+a) \cdot (y-b)} \left[(x+a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \\ & \left. - \arctg \frac{z-c}{(x-a) \cdot (y+b)} \left[(x-a)^2 + (y+b)^2 + (z-c)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \right. \end{aligned}$$

$$+ \arctg \frac{z - c}{(x + a) \cdot (y + b)} \left[(x + a)^2 + (y + b)^2 + (z - c)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Bigg\}. \quad (3.26)$$

Тут I – струм у контурі;

c – відстань від початку координат до площини контуру (рис. 3.7);

x, y, z – координати точки спостереження поля P .

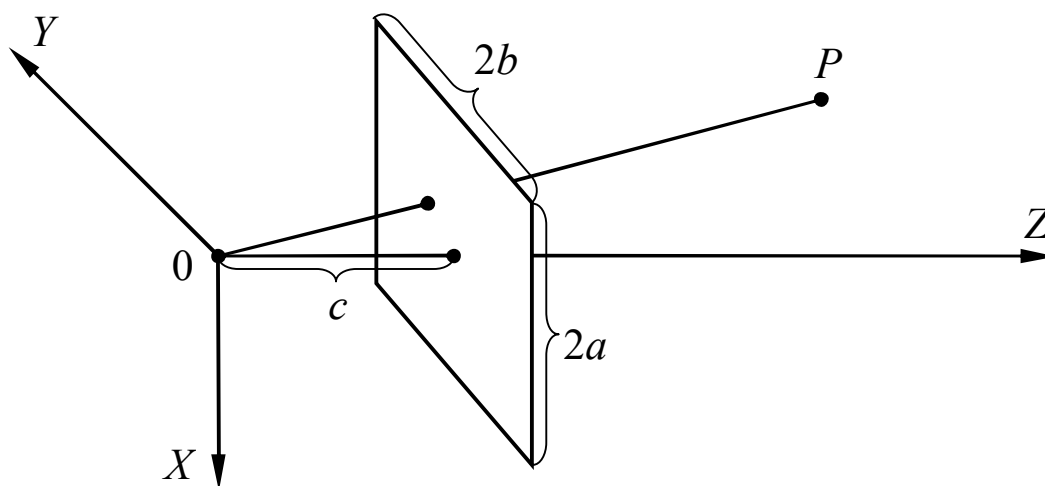


Рисунок 3.7 – Геометричні параметри полеутворюючої системи - прямокутного контуру зі струмом у декартовій системі координат

Отримаємо вираз для індукції B_a поля на лінії, що виходить із центру тяжіння суцільного прямокутника та перпендикулярної його площині (далі – на осі контуру), рис. 3.8.

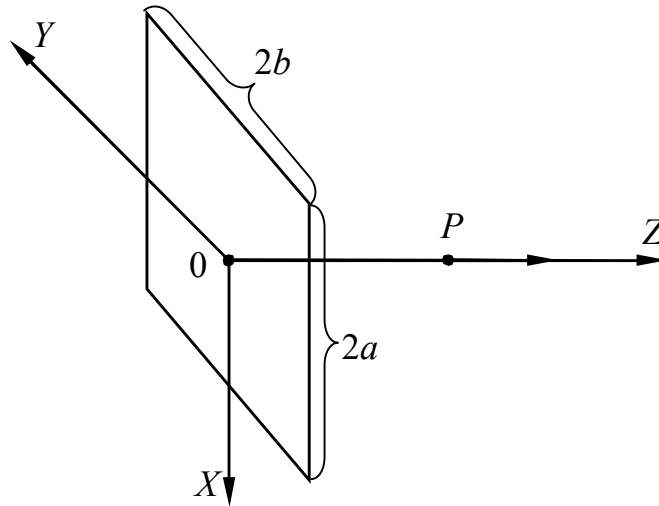


Рисунок 3.8 – Геометричні параметри полеутворюючої системи – прямокутного контуру зі струмом, точка спостереження знаходиться на осі контуру

З урахуванням (3.25 – 3.26), а також матеріального рівняння $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ (вважаємо, що навколишнє середовище – повітря), для випадку, коли $c = 0$ (контур лежить у площині $X0Y$) отримуємо:

$$B_a = B_z = \frac{\mu_0 I}{\pi} \cdot \frac{a \cdot b (a^2 + b^2 + 2z^2)}{a^2 \cdot b^2 (a^2 + b^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} + z^2 (a^2 + b^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (3.27)$$

Використовуємо введений раніше (3.22) параметр k , рівний відношенню сторін контуру. Перетворюючи (3.27), маємо остаточний вираз для індукції поля на осі контуру:

$$B_a = \frac{\mu_0 I}{\pi} \cdot \frac{k \cdot a^2 [a^2 (1 + k^2) + 2z^2]}{k^2 \cdot a^4 [a^2 (1 + k^2) + z^2]^{\frac{1}{2}} + z^2 [a^2 (1 + k^2) + z^2]^{\frac{3}{2}}}. \quad (3.28)$$

Знайдемо індукцію поля в точці спостереження на осі точкового джерела - магнітного диполя.

Потенціал МП диполя визначається:

$$U_m = \frac{(\vec{M}, \vec{R}_0)}{4\pi \cdot R_0^3}, \quad (3.29)$$

де $\vec{M}$ – вектор магнітного моменту;

$\vec{R}_0$ – вектор, проведений з точки, де знаходиться диполь, в точку спостереження поля.

Переходячи до декартової системи координат, використовуючи формули (3.25) та рівняння $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, знаходимо вирази для складових вектора індукції МП диполя:

$$B_{dip_x} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{3(x_P - x_M) [M_x(x_P - x_M) + M_y(y_P - y_M) + M_z(z_P - z_M)]}{[(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]^{\frac{5}{2}}} - \frac{M_x [(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]}{[(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]^{\frac{5}{2}}} \right\}, \quad (3.30)$$

$$B_{dip_y} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{3(y_P - y_M) [M_x(x_P - x_M) + M_y(y_P - y_M) + M_z(z_P - z_M)]}{[(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]^{\frac{5}{2}}} - \frac{M_y [(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]}{[(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]^{\frac{5}{2}}} \right\}, \quad (3.31)$$

$$B_{dip_z} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{3(z_P - z_M) [M_x(x_P - x_M) + M_y(y_P - y_M) + M_z(z_P - z_M)]}{[(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]^{\frac{5}{2}}} - \frac{M_z [(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]}{[(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2]^{\frac{5}{2}}} \right\}, \quad (3.32)$$

де M_x, M_y, M_z – компоненти вектора магнітного моменту;

x_M, y_M, z_M – координати джерела поля (магнітного диполя);

x_P, y_P, z_P – координати точки спостереження поля.

Формули (3.30–3.32) застосовні для розрахунків, проте наочнішим є такий вираз для індукції поля:

$$\begin{bmatrix} B_{dip_x} \\ B_{dip_y} \\ B_{dip_z} \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi \cdot r'^5} \cdot \begin{bmatrix} 2x'^2 - y'^2 - z'^2 & 3x'y' & 3x'z' \\ 3x'y' & 2y'^2 - x'^2 - z'^2 & 3y'z' \\ 3x'z' & 3y'z' & 2z'^2 - x'^2 - y'^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}, \quad (3.33)$$

де

$$x' = x_P - x_M, \quad y' = y_P - y_M, \quad z' = z_P - z_M; \quad (3.34)$$

$$r' = \left((x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.35)$$

Маємо джерело поля на початку координат так, що $M = M_z$ (рис. 3.9 а). Розглядаємо поле лише з осі магнітного диполя (рис. 3.9 б).

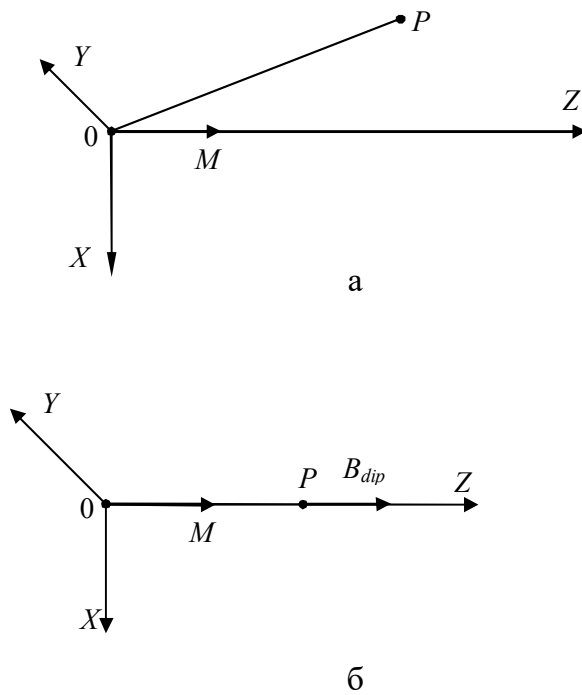


Рисунок 3.9 – Розташування магнітного диполя в декартовій системі координат

Спростуємо вираз (3.33), отримуємо:

$$B_{dip} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{M}{z^3}, \quad (3.36)$$

де z – відстань від магнітного диполя вздовж його осі до точки спостереження.

Прирівняємо ММ диполя до ММ розглянутого раніше прямокутного контуру, отримаємо:

$$B_{dipa} = \frac{2\mu_0 I}{\pi} \cdot \frac{k \cdot a^2}{z^3}. \quad (3.37)$$

Отриманий таким чином вираз (3.37) описує індукцію дипольної складової МП на осі прямокутного контуру зі струмом I і габаритом a .

Перетворюємо вирази (3.28) и (3.37) у відносний вигляд. Перейдемо від змінних B, I, k, a, z до величин B^*, z^* , при цьому:

$$z^* = \frac{z}{2 \cdot k \cdot a}, \quad (3.38)$$

$$B^* = \frac{B}{B_{\delta az}},$$

$$B_{\delta az} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot k \cdot a}. \quad (3.39)$$

З урахуванням (3.38 – 3.39) формули (3.28) та (3.37) набувають вигляду:

$$B_k^* = \frac{2 \cdot \left[1 + k^2 + 8k^2 \cdot z^{*2} \right]}{\left[1 + k^2 + 4k^2 \cdot z^{*2} \right]^{\frac{1}{2}} + 4z^{*2} \left[1 + k^2 + 4k^2 \cdot z^{*2} \right]^{\frac{3}{2}}}, \quad (3.40)$$

$$B_d^* = \frac{1}{2k \cdot z^{*3}}. \quad (3.41)$$

Результати табулювання функцій (3.40–3.41) при $k = 1$ и $k = 2$ представлені у вигляді графіків на рисунках 3.10, 3.11.

Для оцінки похибки дипольного уявлення МП плоского контуру зі струмом введена величина відносної похибки δ . Для прямокутного контуру:

$$\delta = \frac{B_d^* - B_k^*}{B_k^*} \cdot 100\%. \quad (3.42)$$

Як слідє з рис. 3.10, 3.11, на відстані від прямокутного контуру по осі Z , ортогональній його площі, яка перевищує три габаритні розміри контуру,

величина створюваного контуром МП відрізняється від величини поля еквівалентного диполя менш ніж на 10 %.

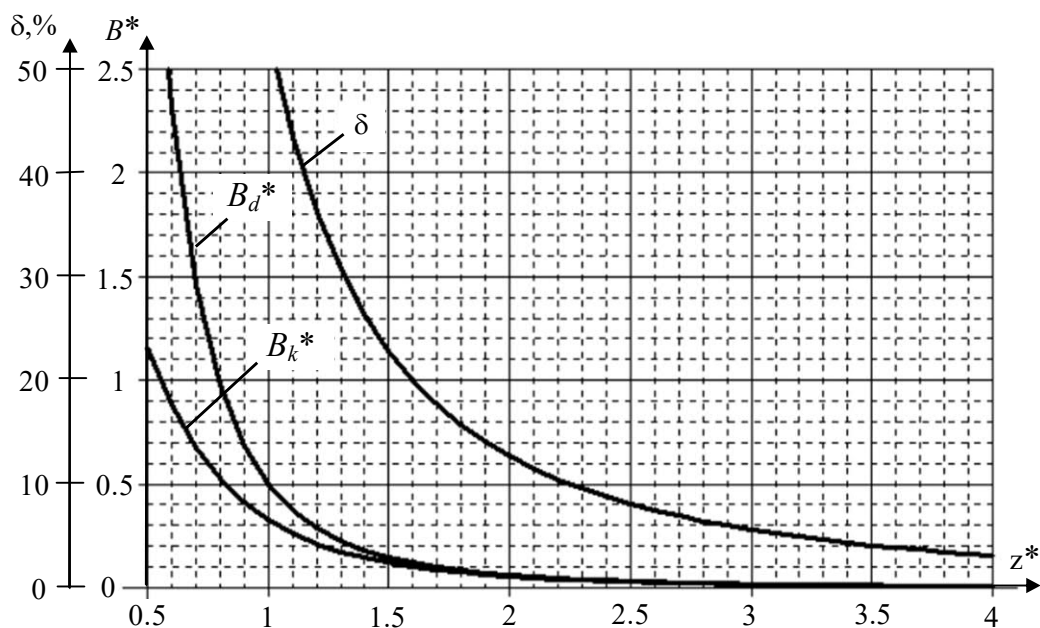


Рисунок 3.10 – Індукція МП та його дипольної складової на осі квадратного контуру (відношенні сторін контуру $k = 1$ ($l_g = 1$)), та похибка δ дипольного уявлення МП

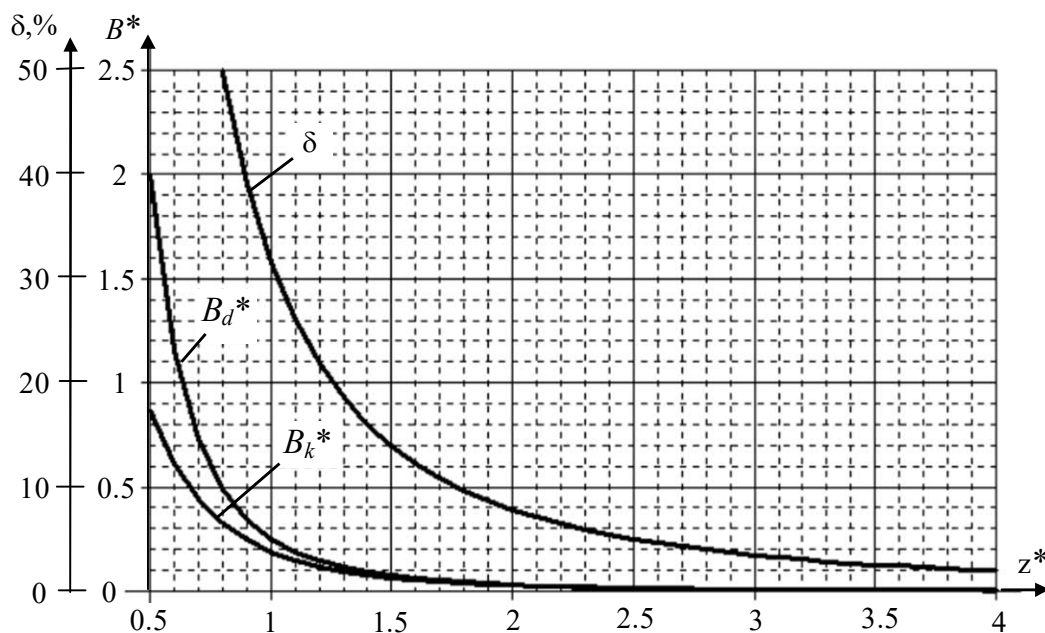


Рисунок 3.11 – Індукція МП на осі прямокутного контуру при співвідношенні сторін $k = 2$ ($l_g = 2$), та похибка δ дипольного уявлення МП

Результати інших досліджень [192, 329, 331] також підтверджують цей результат.

Умови коректного використання мультидипольної моделі. Максимальний габаритний розмір прямокутного мікроконтуру, на який розбиваються контури струму для трифазної моделі (рис. 3.6) становить $2D$, а для двофазної моделі – D [329, 331]. Тому використання запропонованої мультидипольної математичної моделі МП коректне тільки при відстанях від проводів ЛЕП до точки спостереження, що перевищують шестикратну міжфазну відстань D для трифазної моделі (1.32) та потрійну міжфазну відстань D для двофазної (1.48) моделі [329, 331].

3.4 Удосконалення геометрії підвісу проводів ліній електропередачі на основі мультидипольної моделі для зменшення її магнітного поля

Теоретичною основою для удосконалення геометрії підвісу проводів ЛЕП є визначений у [101, 162, 270] загальний принцип структурування джерел МП в обсязі узагальненого технічного об'єкта, що забезпечує зниження його зовнішнього МП, який полягає у формуванні такої просторової геометрії джерел магнітного поля в об'ємі об'єкта, яка забезпечує осьову (порядку $k = p$) та площинну (відносно площини, перпендикулярної до цієї осі) симетрію їхньої просторової структури.

Реалізація цього принципу для ЛЕП можлива за таких умов: існує вісь симетрії підвісу проводів порядку $p > 1$, при повороті навколо якої на кут $\psi = 2\pi/p$ розподіл векторів щільності струму $\vec{\delta}(t)$ ЛЕП залишається незмінним (для ЛЕП незмінність розподілу векторів щільності струму відповідає наявності одного з розщеплених проводів тієї ж фази); розподіл векторів щільності струму $\vec{\delta}(t)$ ЛЕП має дзеркальну симетрію відносно площини, перпендикулярної осі симетрії.

При цьому забезпечується зниження рівня просторових гармонік МП ЛЕП порядку p , у тому числі й дипольної гармоніки, що найбільш повільно спадає, а рівень МП у дальній області простору визначається власною гармонікою p ЛЕП, що обумовлена осьовою симетрією геометрії підвісу її проводів. Тут доцільно також відзначити [101, 162, 270], що порушення площинної симетрії призводить до появи невластних парних гармонік додатково до власних непарних і навпаки. Порушення осьової симетрії викликає появу невластних додаткових гармонік, порядок яких нижчий від основної власної.

3.4.1 Метод векторної компенсації магнітного поля ліній електропередачі

Фізичне зменшення МП ЛЕП, при застосуванні методу удосконалення структури ЛЕП шляхом її симетрування, досягається за рахунок забезпечення взаємної векторної компенсації однойменних ММ ЛЕП, та підвищення інтенсивності затухання її МП при збільшенні порядку симетрії системи p , що визначає значення її власної просторової гармоніки p [101].

При $p = 1$ – це диполь з інтенсивністю затухання у 3 степені від відстані,, при $p = 2$ – квадруполь з інтенсивністю затухання МП у 4 степені від відстані, при $p = 3$ – октуполь з інтенсивністю затухання МП у 5 степені від відстані.

На основі мультидипольної моделі автором запропонований метод структурування (симетрування) проводів МП ЛЕП [192, 328], що забезпечує максимальне зменшення МП. При застосуванні цього методу реалізується така геометрія підвісу проводів ЛЕП, при якій забезпечується взаємна векторна компенсація МП її полеутворюючих конструктивних елементів, та збільшення порядку її осьової симетрії p і відповідної власної просторової гармоніки, що підвищує інтенсивність затухання МП при збільшенні відстані. При цьому реалізується запропонований автором [192, 328] метод векторної компенсації МП ЛЕП, що ілюструється рис. 3.12.

Симетрична геометрія підвісу проводів ЛЕП (рис. 3.12 б-г) реалізується в разі розміщення проводів ЛЕП у вершинах симетричних багатокутників

(рис. 3.12 б), або у комбінації з розміщенням проводів однієї з фаз в центрі симетрії багатокутника (рис. 3.12 г).

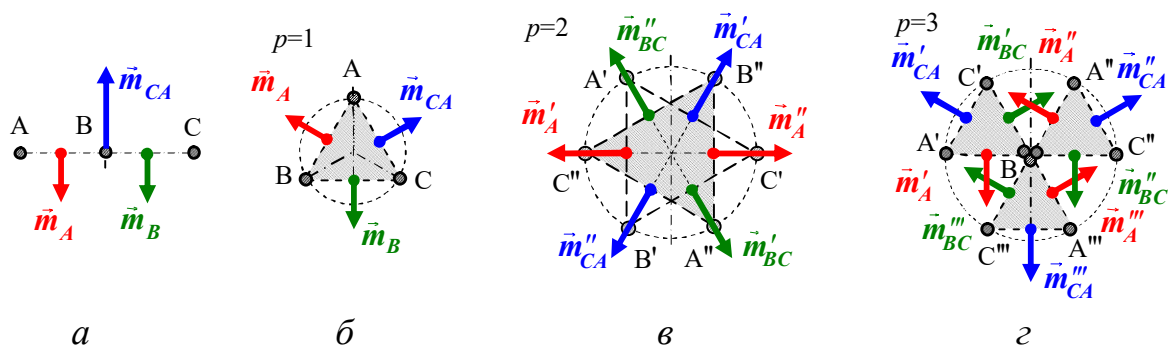


Рисунок 3.12 – Розподіл магнітних моментів $\vec{m}$ контурів зі струмом трифазної одноколової ЛЕП при підвищенні порядку p осьової симетрії підвісу її розщеплених проводів фаз, що ілюструє метод векторної компенсації МП

Ефективність застосування методу симетрування підвісу проводів та методу векторної компенсації її ММ ілюструється на рис. 3.13.

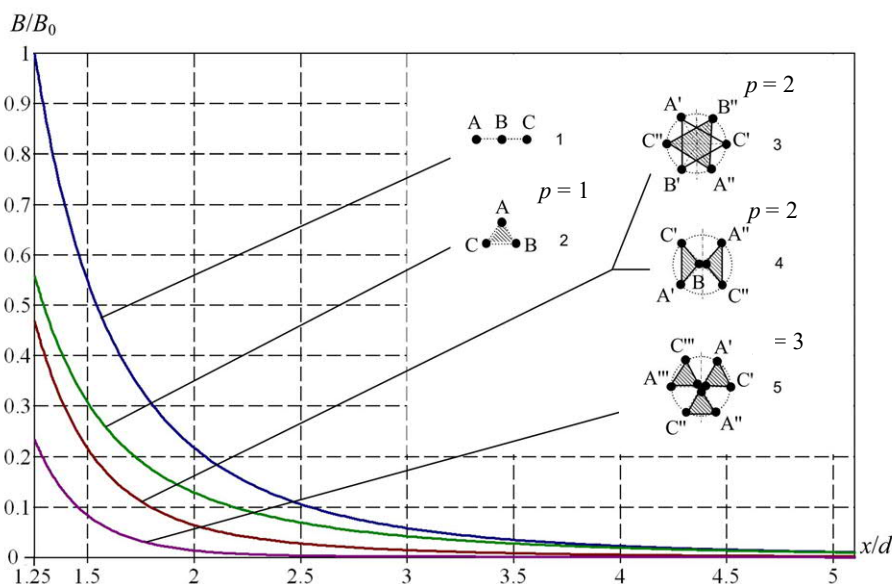


Рисунок 3.13 – Відносні значення розподілу індукції МП ЛЕП (рис. 3.12) з різним порядком осьової симетрії p в функції відносної відстані до точки спостереження

Тут представлені відносні значення індукції МП як функції відносної відстані, отримані при мультидипольному моделюванні МП відповідно (3.3) – без розщеплення 1, 2 і з розщепленням, симетруванням і векторною компенсацією 3, 4, 5. При цьому індукція B_0 відповідає ЛЕП1 (рис. 3.12 а).

Результати використання методу векторної компенсації (рис. 3.13) показують, що збільшення порядку симетрії підвісу проводів p із 1 (рис. 3.12 в) до 3 (рис. 3.12 г), дозволяє зменшити індукцію МП B_0 при $x/d = 2$ від 1,7 до 10 разів, що робить цей метод практично привабливим.

3.4.2 Метод проектування ліній електропередачі з підвищеним порядком симетрії підвісу проводів для зменшення їх магнітного поля

Як показано вище, необхідною умовою реалізації методу векторної компенсації МП ЛЕП шляхом симетрування, необхідно забезпечення симетрії підвісу проводів з порядком $p > 1$ (рис. 3.12 в, г.). Розглянемо методику синтезу ЛЕП зі зменшеним МП шляхом забезпечення симетрії p підвісу їх проводів та підвищенні її порядку. При цьому зауважимо, що умовою для синтезу ЛЕП з порядком симетрії $p > 1$, є виконання розщеплення кожного фазного проводу ЛЕП на $G = p$ проводів.

Симетрування підвісу проводів ЛЕП може бути виконано двома способами (рис. 3.13):

1 – шляхом розподілу всіх G проводів ЛЕП у вершинах симетричного багатокутника (2, 3, на рис. 3.13), кількість кутів $n = 3p$ якого відповідає загальній кількості проводів ЛЕП, що представлено на рис. 3.14 а;

2 – шляхом розподілу розщеплених проводів однієї із фаз в центрі симетрії багатокутника з $n = 3p$, а розщеплених проводів інших двох фаз – у вершинах цього багатокутника із взаємним зрушенням між розщепленими проводами однойменних фаз на кут $\psi = 2\pi/p$ (4, 5, на рис. 3.14 б), що представлено на рис. 3.14 б.

При цьому параметри симетричного n -кутника (рис. 3.14) можуть бути визначені як [326]:

$$R = \frac{l}{2 \sin(\pi/n)}, \quad a = 2l \sin(\pi(n-2)/2n) \quad (3.43)$$

де l – сторона n -кутника;

R – радіус описаного кола;

a – відстань між нижнім та верхнім проводами.

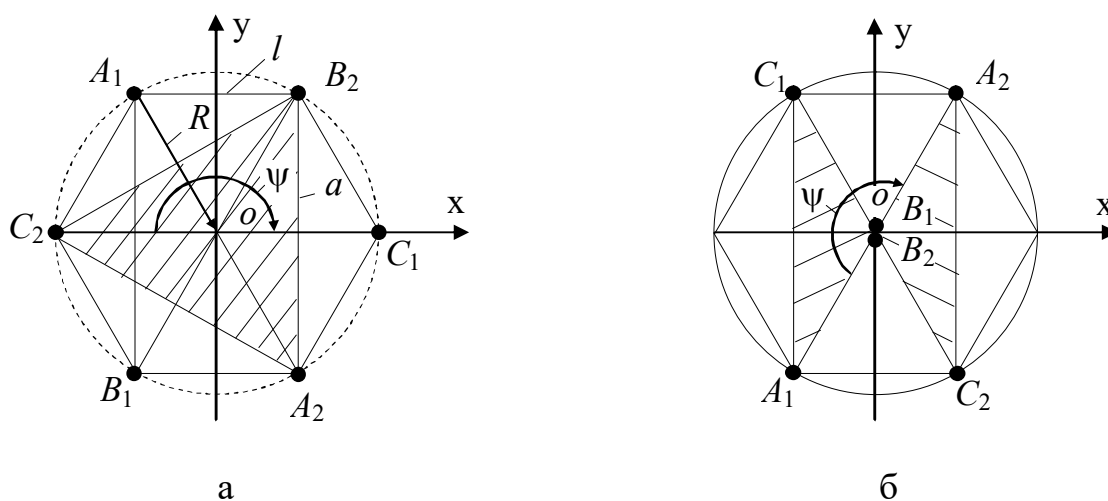


Рисунок 3.14 – Приклад симетричного підвісу проводів ЛЕП з $p = 2$ у вершинах симетричного багатокутника (а), та комбінованого підвісу проводів у центрі симетрії багатокутника та у його вершинах (б)

Проектування ЛЕП з порядком симетрії $p = 2$ (рис. 3.4 в). Для синтезу ЛЕП з $p = 2$ здійснюється розщеплення фазних проводів на два ($G = 2$) з їх підвісом у вершинах симетричного шестикутника відповідно до рис. 3.14 а. Для реалізації взаємної векторної компенсації МП розщеплених проводів однойменних фаз ЛЕП, їх ММ (рис. 3.12 в) відповідно до визначеного принципу симетрування підвісу проводів ЛЕП, повинні бути зрушені на кут $\psi = 2\pi/p$ в вертикальній площині, ортогональній осі ЛЕП. При $p = 2$ (рис. 3.25) $\psi = \pi$.

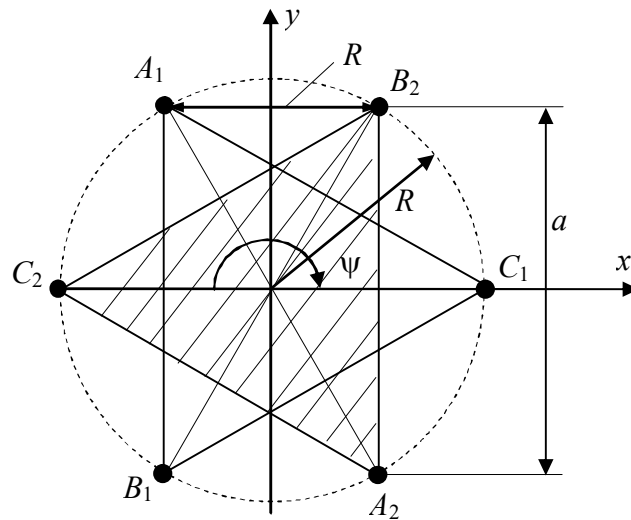


Рисунок 3.15 – Удосконалена геометрія підвісу проводів трифазної ЛЕП у вершинах симетричного шестикутника з розщепленими проводами фаз ($G = 2$) і порядком симетрії $p = 2$

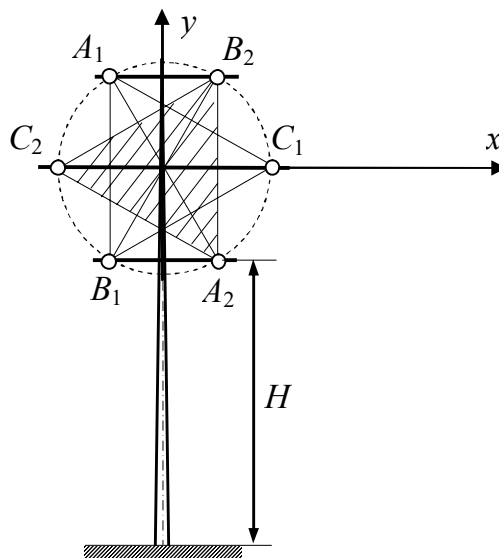


Рисунок 3.16 – Розроблена схема підвісу проводів ЛЕП з підвищеним порядком симетрії ($p = 2$), проводи якої розміщені у вершинах симетричного шестикутника

Для симетричного шестикутника (рис. 3.15) відповідно до (3.43), його сторона дорівнює радіусу описаного кола R , а відстань a між проводами A_1 і B_1 (B_2 і A_2) дорівнює $1,73 R$ ($0,5a = 0,865R$). Тому мінімальна міжфазна відстань l

між горизонтальними проводами ЛЕП складає R , що повинно враховуватися при синтезі ЛЕП високої напруги.

На основі викладеного, визначимо координати x , y проводів для забезпечення ідеальної симетрії ЛЕП з порядком $p = 2$. Ці координати визначені з рис. 3.15 та занесені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Рекомендації з визначеного розташування проводів ЛЕП з $G=2$ і порядком симетрії $p=2$

№	Позначення проводу	Координата проводу x	Координата проводу y
1	A1	$-0,5 R$	$0,865 R$
2	B2	$0,5 R$	$0,865 R$
3	C2	$-R$	0
4	C1	R	0
5	B1	$-0,5 R$	$-0,865 R$
6	A2	$0,5 R$	$-0,865 R$

Для проектування реальної ЛЕП з $p = 2$ необхідно визначити мінімальний радіус R_{min} ЛЕП (рис. 3.16) з урахуванням співвідношення:

$$R_{min} \geq l_{min}, \quad (3.44)$$

де l_{min} – мінімальна відстань між сусідніми проводами ЛЕП різної напруги відповідно до [4].

Крім того, висота підвісу нижнього проводу ЛЕП H (рис. 3.16) також визначається відповідно до [4].

На основі даних табл. 3.2, співвідношення (3.44) та рис. 3.16 може бути виконане проектування ЛЕП різної напруги з порядком симетрії $p = 2$. Практична реалізація таких ЛЕП може бути виконана з використанням стандартних опор ЛЕП, що застосовуються для двоколових ЛЕП [332] при незначній зміні довжини

їх траверс і відстані між ними для удосконалення геометрії підвісу проводів відповідно до табл. 3.2.

Порядок симетрії $p = 3$. Для синтезу ЛЕП з $p = 3$ необхідне розщеплення фазних проводів на три ($G = 3$). Їх симетрування можливо при розміщені 9 розщеплених проводів ЛЕП у вершинах симетричного дев'ятикутника. Але аналіз показує, що при синтезі такої ЛЕП з $n = 3$ в порівнянні з ЛЕП (рис. 3.16) з $n = 2$, необхідно практично на 50 % збільшувати радіус підвісу R для стабілізації міжфазної відстані l на мінімально припустимому значенні відповідно до робочої напруги ЛЕП, що ілюструє табл. 3.3.

Як слідує з табл. 3.3, збільшення радіусу R ЛЕП при $n = 3$ призводить до істотного (до 50 %) зростання габаритних розмірів ЛЕП, що робить використання такого методу симетрування для ЛЕП з $n > 2$ практично недоцільним.

Тому для ЛЕП з $n > 2$ більш доцільне використання запропонованого вище комбінованого підвісу проводів ЛЕП (рис. 3.14 б), який передбачає розташування проводів як у центрі симетрії багатокутника так і у його вершинах відповідно до рис. 3.17.

Таблиця 3.3 – Отримані відповідно до (3.43) співвідношення між величиною сторін l та описаним радіусом кола R симетричних багатокутників різного порядку n .

№	n од.	R од.	l од.	l/R в.о	R/l в.о
1	3	$0,58 l$	$1,73 R$	1,73	0,58
2	6	l	R	1,0	1,0
3	9	$1,46 l$	$0,68 R$	0,68	1,46
4	12	$1,93 l$	$0,52 R$	0.52	1,93

При використанні комбінованого підвісу для ЛЕП з $p = 3$ (рис. 3.15), розщеплені проводи двох її фаз ($C1, C2, C3; A1, A2, A3$) розміщені в кутах

симетричного шестикутника із зрушенням однойменних проводів на $2\pi/p = \pi$ радіан $= 2\pi/3$ радіан (рис. 3.12 г), а всі три розщеплені проводи третьої фази В (В1, В2, В3) розташовані в геометричному центрі шестикутника. Мінімальна міжфазна відстань l між проводами в даному випадку теж складає R .

Визначимо координати x, y проводів ЛЕП з $p = 3$ відповідно до рис. 3.17.

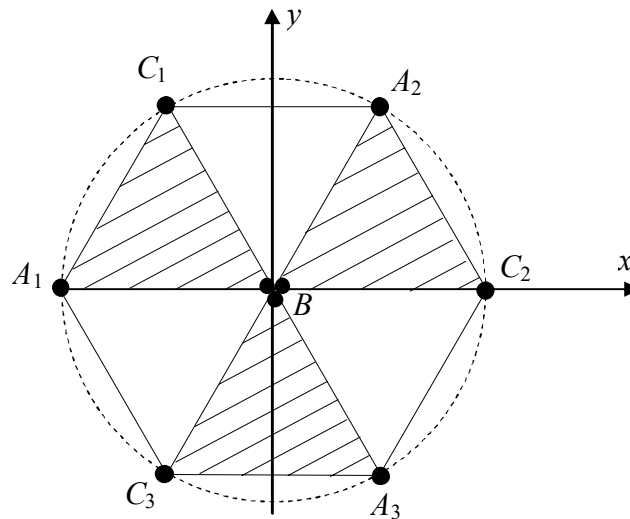


Рисунок 3.17 – Рекомендована геометрія підвісу проводів трифазної ЛЕП з розщепленими проводами фаз ($G = 3$) і підвищеним порядком симетрії $p = 3$

Радіус R ЛЕП (рис. 3.17) визначимо відповідно до (3.44). Висоту H між поверхнею землі і нижнім проводом ЛЕП (рис. 3.18) визначимо відповідно до [4]. На основі даних табл. 3.4, співвідношення (3.44) та рис. 3.18 може бути виконано проектування симетричної ЛЕП з $p = 3$, що характеризується зменшеним МП. При цьому необхідно відмітити, що практична реалізація ЛЕП з $p = 3$ потребує створення спеціальної конструкції її опор, наприклад, відповідно до рис. 3.18.

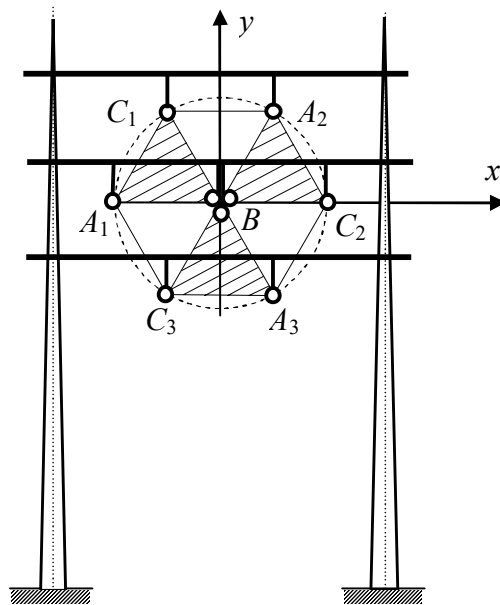


Рисунок 3.18 – Можливе конструктивне виконання ЛЕП з підвищеним порядком симетрії ($p = 3$) підвісу проводів

Таблиця 3.4 – Рекомендації з удосконаленого розташування проводів ЛЕП з $G = 3$ і порядком симетрії $p = 3$

№	Позначення проводу	Координата x	Координата y
1	A1	$-R$	0
2	A2	$0,5 R$	$0,865 R$
3	A3	$0,5 R$	$-0,865 R$
4	C1	$-0,5 R$	$0,865 R$
5	C2	R	0
6	C3	$-0,5 R$	$- 0,865 R$
7	B1, B2, B3	0	0

Для реалізації ЛЕП з $p > 3$ також доцільно використання комбінованого підвісу проводів ЛЕП (рис. 3.14 б), як це представлено на рис. 3.13 для ЛЕП з $p = 4$ ($G = 4$).

3.4.3 Ефективність методу векторної компенсації магнітного поля ліній електропередачі

Визначення ефективності зменшення МП при підвищенні порядку симетрії підвісу проводів для реальних ЛЕП 110-330 кВ. Для цього визначимо розподіл індукції МП 4-х синтезованих ЛЕП з $p = 0, p = 1, p = 2, p = 3$ (рис. 3.12) при однакових струмах (0,5 кА), однаковій міжфазній відстані (4 м) і висоті підвісу нижнього проводу (7 м). Розрахунок виконаємо відповідно до (2.31–2.35).

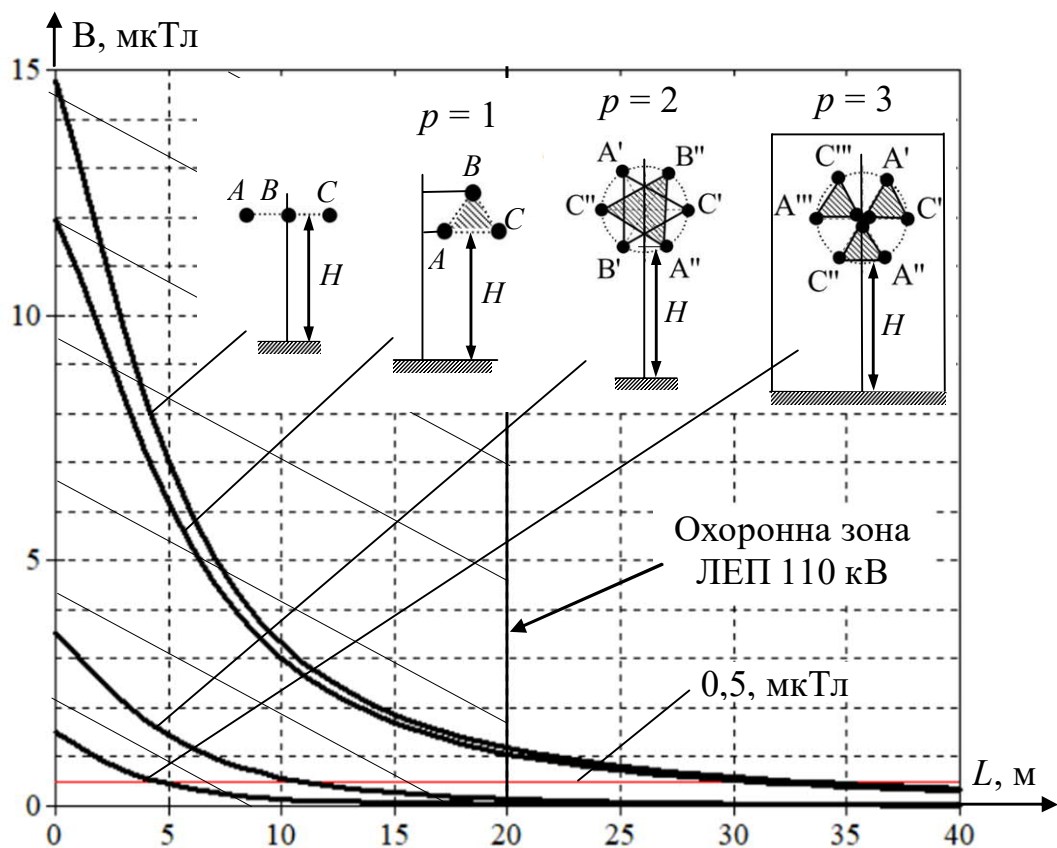


Рисунок 3.19 – Розподіл індукції МП ЛЕП 110 кВ, 0,5 кА, $D = 4$ м на висоті 1,8 м з різною конструкцією підвісу проводів ($p = 0, 1, 2, 3$)

Результати розрахунку представлені на рис. 3.19. Їх аналіз показує, що підвищення порядку симетрії ЛЕП 110 кВ з $p = 0$ до $p = 3$ дозволяє зменшити індукцію МП на границі охоронної зони ЛЕП на порядок і гарантовано досягти її безпечного рівня 0,5 мкТл.

На рис. 3.20 представлені результати синтезу ЛЕП 330 кВ при струмі 1,0 кА і міжфазній відстані 8 м при $p = 0, 1, 2, 3$, а також $p = 4$ ($G = 1, 2, 3, 4$), які також підтверджують високу ефективність методу векторної компенсації.

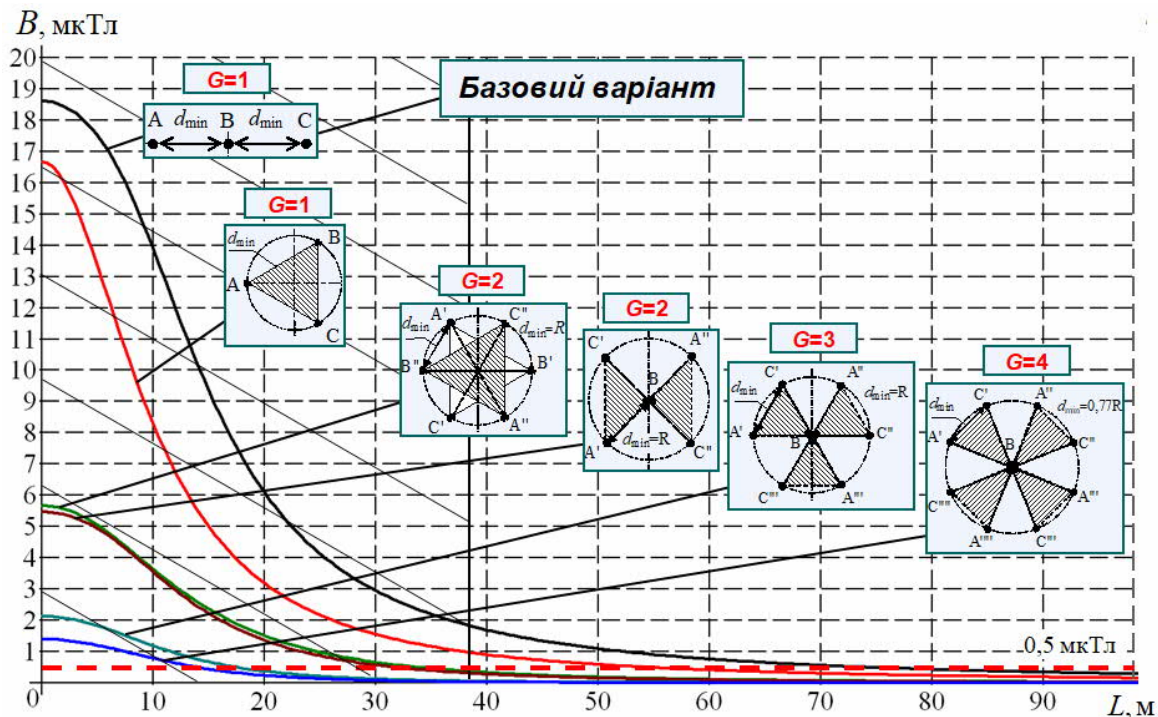


Рисунок 3.20 – Розподіл індукції МП ЛЕП 330 кВ, 1,0 кА, $D = 8$ м на висоті 1,8 м з різною конструкцією підвісу проводів ($p = 0, 1, 2, 3, 4$).

Таким чином, використання запропонованого методу удосконалення геометрії підвісу проводів ЛЕП, заснованого на симетруванні системи розщеплених проводів її фаз і підвищення порядку її осової симетрії, дозволяє суттєво, більш чим на порядок, зменшити МП ЛЕП, у тому числі на межі їх охоронних зон. Зазначений ефект при використанні методу досягається за рахунок забезпечення взаємної векторної компенсації ММ ЛЕП та більшої інтенсивності згасання МП при підвищенні порядку власної просторової гармоніки МП ЛЕП з $p = 1$ до $p = 2, p = 3$.

Проведений аналіз також показує, що при подальшому збільшенні порядку симетрії ЛЕП (до $p > 3$ і $G > 3$, рис. 3.20,) досягається незначне зростання ефективності зменшення МП, однак це потребує більш значного, чим на

рис. 3.18, ускладнення конструкції опор ЛЕП для його реалізації. Тому синтез ЛЕП з $p > 3$, практична реалізація яких потребує значного ускладнення конструкції їх опор при незначному зменшенні МП, в подальшому не розглядаємо.

3.5 Удосконалення підвісу проводів двоколових ліній електропередачі на основі методу векторної компенсації

Двоколові ЛЕП, які представляють собою розміщені на одній опорі дві одноколові ЛЕП (рис. 3.21), широко застосовуються на напруги 110-330 кВ, так як мають ряд таких переваг над одноколовими [192, 332], як підвищена надійність електроживлення, більша передавальна здатність, менша відносна вартість і компактність та ін.

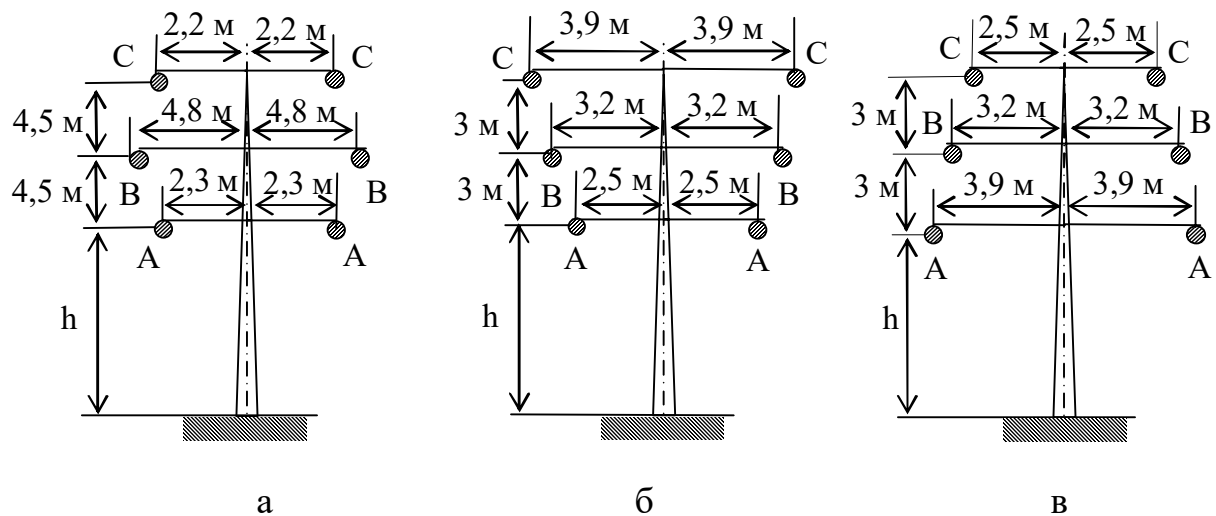


Рисунок 3.21 – Стандартні схеми підвісу проводів двоколових ЛЕП 110 кВ

Індукція МП двоколової ЛЕП визначається відповідно до (2.46–2.58) і представляє собою суперпозицію МП від двох одноколових ЛЕП. Вона залежить від параметрів окремих ЛЕП та загальної просторової структури підвісу її проводів.

Найчастіше двоколові ЛЕП виконуються на основі двох ідентичних і симетрично розташованих одноколових ЛЕП. Розглянемо розподіл індукції МП таких ЛЕП, виконаних на стандартних опорах із стандартним фазуванням проводів [4, 332]. Також виконаємо дослідження можливості зменшення МП цих ЛЕП за рахунок удосконалення підвісу їх проводів шляхом їх перефазування, яке можливо виконати без зміни типу опор і може бути практично реалізоване при модернізації діючих ЛЕП, а також шляхом удосконалення конструкції опор двоколових ЛЕП.

Також відмітимо, що МП двоколових ЛЕП, з урахуванням прийнятих вище припущень про ідентичність миттєвих значень струмів в їх одноіменних проводах, буде мінімальним, тоді, коли просторова структура їх МП є симетричною з порядком симетрії $p = 2$, а схема підвісу їх проводів відповідає вимогам табл. 3.2. При цьому невідповідність геометрії підвісу проводів двоколових ЛЕП рекомендаціям табл. 3.2 може відповідно до (2.46–2.58) призвести до збільшення їх МП в порівнянні з МП окремих одноколових ЛЕП, індукція МП яких в даному випадку буде не взаємно компенсуватися, а підсумовуватися.

3.5.1 Індукція магнітного поля типових двоколових ліній електропередачі на стандартних опорах

Дослідження виконаємо для двоколових ЛЕП 110 кВ [4, 332], які складаються з двох ідентичних одноколових ЛЕП (рис. 3.21), симетрично розташованих по обидві сторони опори (рис. 3.21). Такі ЛЕП можуть виконуватися з різною конструкцією підвісу проводів відповідно до рис. 3.21, де а) – «бочка», б) – «зворотна ялинка», г) – «ялинка».

Величина охоронної зони X_s ЛЕП 110 кВ складає 20 м [11] і відрховується від крайнього проводу ЛЕП (рис. 3.21), який віддалений від осі ЛЕП 110 кВ на 2,4–4,8 м. Тому величина охоронної зони ЛЕП X_s складає від 22,4 до 24,8 м. Розрахунок індукції МП ЛЕП виконуємо для найгіршого випадку при $X_s = 22$ м.

Розподіл індукції МП двоколових ЛЕП 110 кВ (рис. 3.21) визначимо при максимальному струмі 0,5 кА та висоті спостереження 1,8 м, використовуючи розроблену методику розрахунку МП [308]. При дослідженні двоколових ЛЕП припускаємо, що миттєві значення струмів однойменних фаз кожної з їх кіл збігаються по амплітуді та фазі.

Дослідження проведемо відповідно до співвідношень (2.46–2.58) для діючих стандартних ЛЕП з робочим фазуванням (рис. 3.21), а також для модернізованих ЛЕП, фазування яких змінено з максимальним наближенням геометрії підвісу їх проводів до рекомендацій табл. 3.2 щодо забезпечення симетрії підвісу її проводів порядку $p = 2$. Параметри досліджуваних ЛЕП представлені в табл. 3.4.

Узагальнені результати досліджень стандартних двоколових ЛЕП 110 кВ з прийнятим робочим фазуванням «ABC – ABC» (рис. 3.21) приведено на рис. 3.22, та у табл. 3.5.

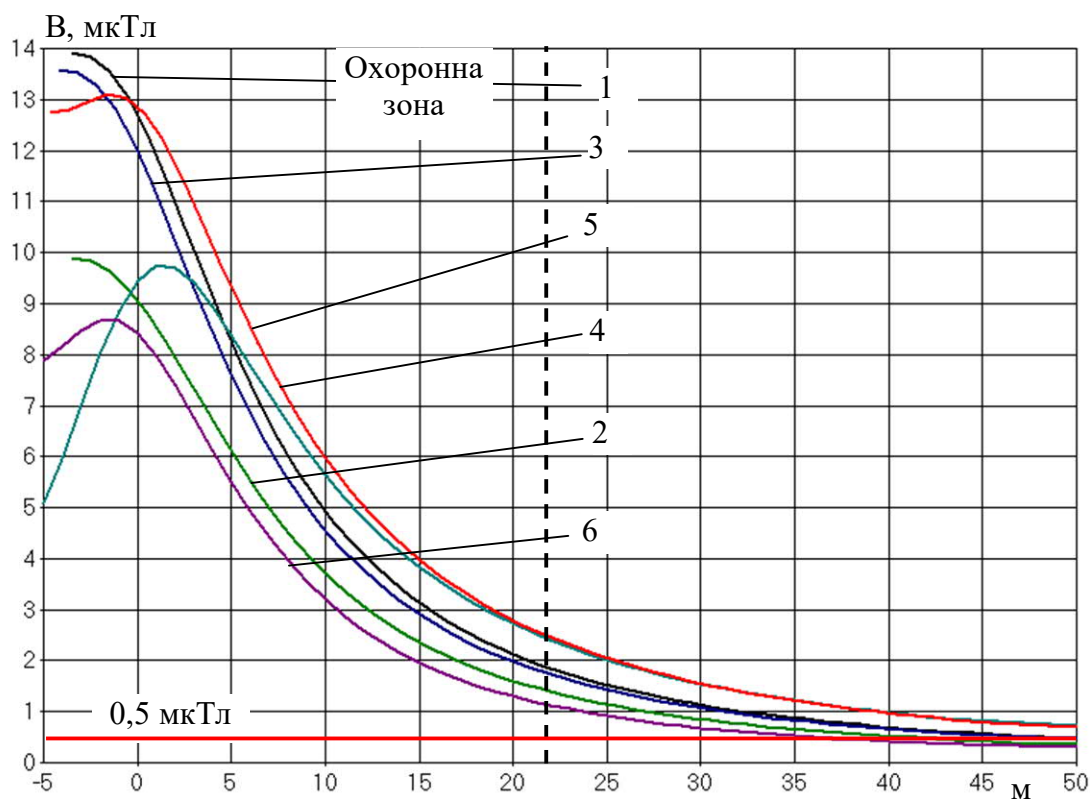


Рисунок 3.22 – Розподіл індукції МП стандартних двоколових ЛЕП 110 кВ зі стандартним фазуванням «ABC-ABC» при різних конструкціях опор

Таблиця 3.5 – Параметри досліджуваних стандартних двоколових ЛЕП 110 кВ з прийнятим робочим фазуванням «АВС-АВС» та величина індукції їх МП

№ ЛЕП	Тип опори ЛЕП	Координати підвісу проводів ЛЕП (x;z), м	Індукція МП		Точка спадання МП до 0,5 мкТл, м
			Під ЛЕП, мкТл	На границі охоронної зони, мкТл	
1	ПБ110-8 «бочка»	A1(2;8) B1(3,5;12) C1(2;16), A2(-2;8) B2(-3,5;12) C2(-2;16)	13,9	2,4	52
2	ПБ110-4 «бочка»	A1(2; 9) B1(3,5; 12) C1(2; 15), A2(-2;9) B2(-3,5;12) C2(-2;15)	10,2	1,9	46
3	П110-4 «бочка»	A1(2,1;8) B1(4,2;11,5) C1(2,1;15,8) A2(-2,1;8) B2(-4,2;11,5) C2(-2,1;15,8)	13,6	2,3	51
4	П110 «ялинка»	A1(7;8) B1(6,6;14,5) C1(6,4; 21), A2(-7; 8) B2(-6,6; 14,5) C2(-6,4; 21)	9,8	3,8	66
5	ПМ110 «бочка»	A1(3,4; 8) B1(4,6; 14) C1(3,4; 20), A2(-3,4; 8) B2(-4,6; 14) C2(-3,4; 20)	13	2,8	58
6	П110 «зворотна ялинка»	A1(4; 8) B1(5; 10,5) C1(6; 13), A2(-4; 8) B2(-5; 10,5) C2(-6; 13)	8,7	1,8	42

Як впливає з рис. 3.22 та табл. 3.5, індукція МП всіх досліджених ЛЕП 110 кВ зі стандартним фазуванням на межі охоронної зони з $X_s = 22$ м у 2–4 рази перевищує безпечний для населення рівень 0,5 мкТл. Найкращий варіант з досліджених ЛЕП з мінімальним МП – це ЛЕП № 2 «бочка» и ЛЕП № 6 «обернена ялинка». Найгірший варіант – ЛЕП № 4, «ялинка».

3.5.2 Зменшення магнітного поля стандартних діючих двоколових ліній електропередачі шляхом перефазування їх проводів на основі методу векторної компенсації

Виконаємо дослідження можливості зменшення МП типових двоколових ЛЕП шляхом перефазування їх проводів на основі методу векторної компенсації. Таке перефазування не потребує зміни типу опор і може бути легко виконана при модернізації діючих двоколових ЛЕП, і тому має широку перспективу практичного застосування [258]. Узагальнені результати досліджень розподілу індукції МП стандартних двоколових ЛЕП 110 кВ з опорами типу «бочка» (рис. 3.21 а) при перефазуванні її проводів з «АВС-АВС» на нове «АВС-СВА» наведено на рис. 3.23 и в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Параметри досліджуваних стандартних двоколових ЛЕП 110 кВ з рекомендуємим фазуванням «АВС-СВА» та величина індукції їх МП

№ ЛЕП	Тип опори ЛЕП	Координати підвісу проводів ЛЕП (x;z), м	Індукція МП		Точка спадання МП до 0,5 мкТл, м
			Під ЛЕП, мкТл	На границі охоронної зони, мкТл	
1	2	3	4	5	6
1	ПБ110-8 «бочка»	A1(2;8) B1(3,5;12) C1(2;16), C2(-2;8) B2(-3,5;12) A2(-2;16)	7,6	0,51	22,5
2	ПБ110-4 «бочка»	A1(2; 9) B1(3,5; 12) C1(2; 15), C2(-2;9) B2(-3,5;12) A2(-2;15)	5,1	0,3	18
3	П110-4 «бочка»	A1(2,1;8) B1(4,2;11,5) C1(2,1;15,8) C2(-2,1;8) B2(-4,2;11,5) A2(-2,1;15,8)	7,8	0,43	19

Продовження таблиці 3.6

1	2	3	4	5	6
4	П110 «ялинка»	A1(7;8) B1(6,6;14,5) C1(6,4; 21), C2(-7; 8) B2(-6,6; 14,5) A2(-6,4; 21)	11,5	2,05	38
5	ПМ110 «бочка»	A1(3,4; 8) B1(4,6; 14) C1(3,4; 20), C2(-3,4; 8) B2(-4,6; 14) A2(-3,4; 20)	10,6	1,03	29,5
6	П110 «зворотна ялинка»	A1(4; 8) B1(5; 10,5) C1(6; 13), C2(-4; 8) B2(-5; 10,5) A2(- 6; 13)	6,4	0,78	27

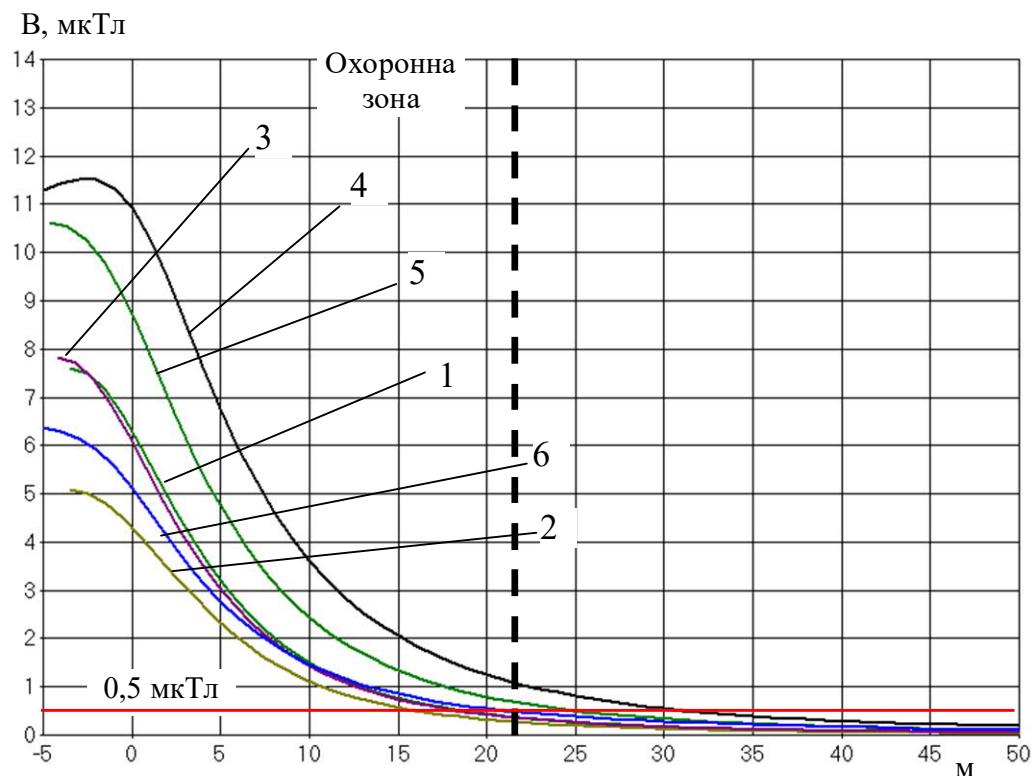


Рисунок 3.23 – Розподіл індукції МП стандартних двоколових ЛЕП 110 кВ з перефазуванням проводів «АВС-СВА»

Як впливає з рис. 3.23 та табл. 3.6, індукція МП всіх досліджених ЛЕП 110 кВ із перефазуванням проводів «АВС-СВА» на межі охоронної зони з $X_s = 22$ м становить від 0,43 мкТл до 1,25 мкТл. Найменшу індукцію МП, яка не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл, мають ЛЕП № 1-3 з типом опори

«бочка».

Узагальнені результати досліджень розподілу індукції МП двоколових ЛЕП 110 кВ при перефазуванні проводів з «ABC-ABC» на «ABC-СВА» представлені в табл. 3.7. Ефективність запропонованого методу перефазування проводів ЛЕП «ABC-СВА» щодо зменшення їх МП становить від 1,9 до 6,3 в.о., та найбільша для опор типу «бочка».

Таблиця 3.7 – Узагальнені результати досліджень МП двоколових ЛЕП 110 кВ на стандартних опорах при використанні запропонованого методу перефазування їх проводів з «ABC-ABC» на «ABC- СВА»

№	Тип опори ЛЕП	Фазування	Індукція МП		Точка спадання МП до 0,5 мкТл, м	Ефективність зниження МП ЛЕП на границі охоронної зони
			Під ЛЕП, мкТл	На границі охоронної зони, мкТл		
1	ПБ110-8 «бочка»	ABC-ABC	13,9	2,4	52	4,7
		ABC-СВА	7,6	0,51	22,5	
2	ПБ110-4 «бочка»	ABC-ABC	10,2	1,9	46	6,3
		ABC-СВА	5,1	0,3	18	
3	П110-4 «бочка»	ABC-ABC	13,6	2,3	51	5,3
		ABC-СВА	7,8	0,43	19	
4	П110 «ялинка»	ABC-ABC	9,8	3,8	66	1,9
		ABC-СВА	11,5	2,05	38	
5	ПМ110 «бочка»	ABC-ABC	13	2,8	58	2,7
		ABC-СВА	10,3	1,03	29.5	
6	П110 «зворотна ялинка»	ABC-ABC	8,7	1,8	42	2,3
		ABC-СВА	6,4	0,78	27	

Таким чином, перефазування проводів з «ABC-ABC» на «ABC-CBA» для двоколових ЛЕП 110 кВ з опорами типу «бочка» (рис. 3.21 а), що вимагає перемикання тільки двох з шести проводів трифазних дволанцюгових ЛЕП, дозволяє зменшити рівень індукції МП на межі охоронної зони ЛЕП в 2,7-6,3 разів і в деяких випадках досягти нормативного рівня 0,5 мкТл.

Близький результат отримано при перефазуванні за запропонованим вище методом проводів на опорах типу «бочка» для ЛЕП 330 кВ, 1,0 кА результати досліджень якої представлені на рис. 3.24. Перефазування дозволяє зменшити індукцію МП ЛЕП на межі охоронної зони цієї ЛЕП в 3 рази (з 3 мкТл до 1 мкТл).

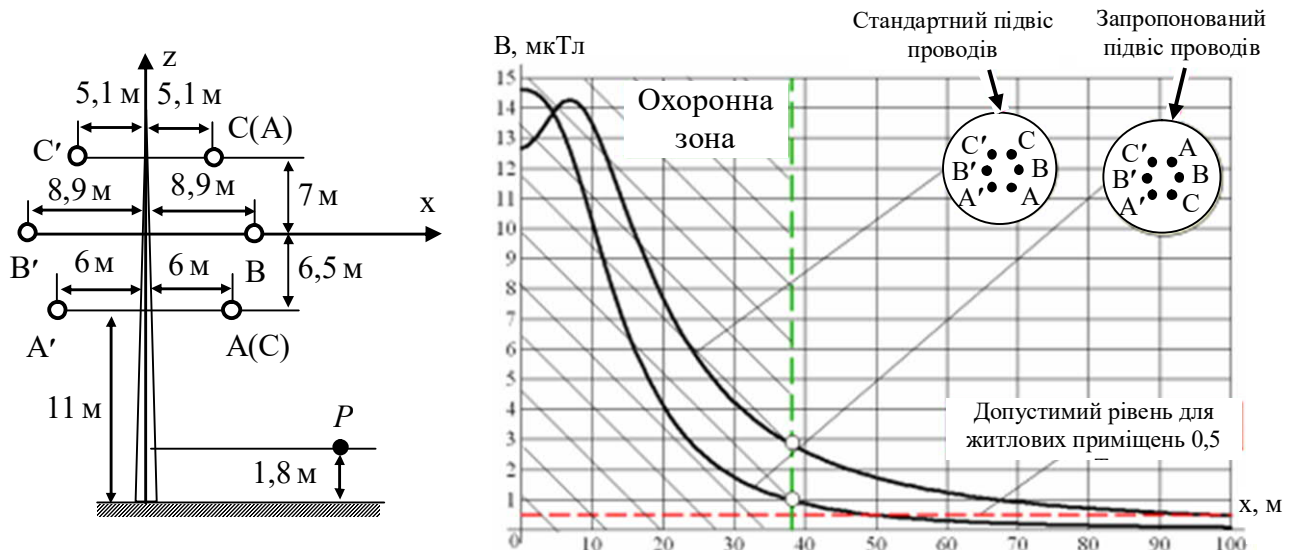


Рисунок 3.24 – Розподіл індукції МП двоколових ЛЕП 330 кВ на стандартних опорах типу «бочка» при стандартному фазуванні їх проводів «ABC-ABC» та зміні фазування на «ABC-CBA»

В табл. 3.8 наведені результати розрахунку відповідно до (2.46–2.58) індукції МП реальних двоколових ЛЕП 110 кВ та ЛЕП 330 кВ на границі їх чинних охоронних зон при стандартному фазуванні їх проводів, та перефазуванні за запропонованим методом.

Як слідує з табл. 3.7-3.8, використання запропонованого методу перефазування проводів стандартних ЛЕП 110-330 кВ на опорах типу «бочка», дозволяє ефективно зменшити рівень індукції їх МП більш чим у 3 рази у

порівнянні із стандартним фазуванням і потребує незначної зміни констирукції ЛЕП при їх модернізації. Це робить використання цього методу [328] економічно привабливим.

Таблиця 3.8 – Координати підвісу проводів діючих двоколових ЛЕП 110 – 330 кВ із перефазуванням проводів фаз А та С та індукція їх МП на межі охоронних зон.

№	Тип ЛЕП	Координати підвісу проводів стандартних ЛЕП (x;z), м	Індукція МП ЛЕП на границі охоронних зон, мкТл: до перефазування/після перефазування
1	110 кВ, «бочка», рис. 3.25а	A1(-2,3;-4,5),B1(- 4,8;0),C1(-2,2;4,5) A2(2,3;-4,5), B2(4,8; 0), C2(2,2; 4,5)	2,22 / 0,55
2	330 кВ, «бочка», рис. 3.25 б	A1(-6;-6,5), B1(-8,9; 0), C1 (-5,1; 7) A2(5,1;7), B2(8,9; 0), C2 (6;- 6,5)	2,79 / 0,95

3.6 Висновки за третім розділом

1. Запропоновано та експериментально обґрунтовано нову мультидипольну математичну модель МП високовольтних повітряних ЛЕП, яка дозволяє моделювати МП поблизу меж їх охоронних зон, та має чітку фізичну інтерпретацію, що спрощує синтез структурних методів зменшення МП ЛЕП на її основі.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що похибка при використанні запропонованої мультидипольної моделі МП ЛЕП може бути обмежена на рівні менш 10% при віддаленні точки спостереження за

проекцію крайнього проводу ЛЕП на поверхню землі.

3. Виконано експериментальну перевірку мультидипольної математичної моделі МП на лабораторній моделі ЛЕП та на діючих ЛЕП 330 кВ, яка підтвердила прийнятну для інженерних розрахунків похибку моделі, що не перевищує 10%.

4. Із застосуванням розробленої мультидипольної моделі МП ЛЕП запропоновано новий метод зменшення МП ЛЕП – структурний метод векторної компенсації МП, який заснований на симетруванні системи розщеплених проводів фаз ЛЕП для досягнення їх осьової симетрії більш високого порядку, що дозволяє збільшити інтенсивність затухання МП ЛЕП при взаємній компенсації магнітних моментів більш високого порядку.

5. Вперше запропоновано метод проектування ЛЕП з удосконаленням підвісом її розщеплених проводів фаз для зменшення МП, та розроблено нові схеми підвісу ЛЕП 110-330 кВ з підвищеним порядком їх симетрії ($p = 2, p = 3$), практична реалізація яких дозволяє структурними методами зменшити на порядок індукцію МП границях охоронних зон ЛЕП.

6. Вперше показано, що при практичному застосуванні методу векторної компенсації та методики проектування ЛЕП на її основі, доцільно обмежитись порядком осьової симетрії підвісу проводів ЛЕП з $p=1-3$, так як при $p>3$ значно ускладняється конструкція підвісу проводів ЛЕП при незначному зменшенні їх МП.

7. Вперше визначені умови удосконалення геометрії підвісу проводів двоколових повітряних ЛЕП 110-330 кВ для зменшення їх МП на основі методу векторної компенсації, що дозволило запропонувати метод «перефазування» проводів А2 і С2 (А1, В1, С1-С2, В2, А2) ЛЕП, який дозволяє зменшити індукцію їх МП ЛЕП до 3–6 разів шляхом модернізації діючих ЛЕП, виконаних на стандартних опорах типу «бочка».

8. Результати досліджень у цьому розділі опубліковані у роботах здобувача [327-329, 331] і впроваджені відповідно до додатків В5, В6 дисертації.

РОЗДІЛ 4

МАГНІТНЕ ПОЛЕ В ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ, РОЗТАШОВАНИХ НАД ВБУДОВАНИМИ ТРАНСФОРМАТОРНИМИ ПІДСТАНЦІЯМИ, ТА МЕТОДИ ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ ДО БЕЗПЕЧНОГО РІВНЯ

4.1 Загальні положення

Як показано в розділі 1 дисертації та [30, 33, 112, 127, 333-335] найбільший вплив вбудованих ТП за МП здійснюється на приміщення, що розташовані над ними (рис. 1.21, 1.23), коли індукція МП може досягати 10-30 мкТл і багатократно перевищувати гранично допустимий для населення рівень 0,5 мкТл, що діє в Україні [4].

Величина індукції МП над ТП збільшується при збільшенні робочого струму (потужності) ТП, та при зменшенні відстані від струмопроводу ТП до підлоги приміщення. Як показано в [336], потужність вбудованих ТП складає 100-400 кВА в однотрансформаторному виконанні і 400-800 кВА для ТП в двохтрансформаторному виконанні з двома симетричними секціями потужністю по 100-400 кВА кожна, взаємним впливом яких за МП можна знехтувати [336]. Тому в подальшому достатньо розглянути однотрансформаторні вбудовані ТП потужністю 100-400 кВА, що дозволяє розповсюдити результати аналізу і на ТП 400-800 кВА (400-2х 400 кВА) в двохтрансформаторному виконанні.

Для розробки методів зменшення МП вбудованих ТП, в першу чергу необхідний коректний метод розрахунку та необтяжлива аналітична методика інженерного розрахунку індукції МП, яке створюється над ТП (рис. 4.2). Такий підхід, на відміну від чисельних методів [27, 120], не вимагає використання складних комп'ютерних програм та їх професійної реалізації.

Метод розрахунку МП над вбудованими ТП запропонований в [159]. Він заснована на представленні ТП як джерела МП його низьковольтним струмопроводом, та виконанні розрахунку індукції МП на основі мультидипольної математичної моделі цього струмопроводу. Але вказаний

метод має значну похибку при малих (0,8 м–1,6 м) відстанях h_f між струмопроводом ТП і підлогою розташованого над ТП житлового приміщення.

Значення h_f в реальних умовах може зменшуватися до 1,0 м [337], що потребує використання іншої математичної моделі, яка інваріантна до відстані h_f між струмопроводом ТП та точкою спостереження, та удосконалення на цій основі існуючого [159] аналітичного методу розрахунку індукції МП струмопроводу вбудованих ТП.

Нижче представлені результати досліджень автора з моделювання МП над ТП, які базуються на законі Біо-Савара, та синтезі САЕ ТП на цій основі. Їх похибка, на відміну від мультидипольної моделі [159], не залежить від відстані h_f від струмопроводу МП до точки спостереження [337], що дозволяє виконувати дослідження на малих (1,0–1,6 м) відстанях від ТП.

В цьому розділі досліджується розподіл МП над реальними вбудованими ТП 100–800 кВА, та виконується санітарно-гігієнічна оцінка його рівня, здійснюється математичне моделювання МП над вбудованими ТП на основі закону Біо-Савара та експериментальна перевірка отриманого результату, виконується синтез систем екранування МП ТП та їх верифікація на основі фізичного експерименту, пропонуються рекомендації щодо зменшення засобами екранування МП в житлових приміщеннях, розташованих над ТП, до безпечного для населення рівня.

4.2 Дослідження розподілу магнітного поля над вбудованими трансформаторними підстанціями та його санітарно-гігієнічна оцінка

Дослідження реального рівня МП над вбудованими ТП 100-800 кВА виконано здобувачем на основі експерименту [317, 333, 334, 336, 338].

Об'єктом дослідження є діючі вбудовані ТП 10(6)/0,4 кВ м. Харкова потужністю 100-800 кВА, типова конструкція яких представлена на рис. 4.1. Всього досліджено 18 ТП, в тому числі: 4 ТП – 100-250 кВА; 4 ТП – 320-400 кВА; 5 ТП – 500-650 кВА; 5 ТП – 700-800 кВА

Визначення МП ТП базується на вимірах діючого значення індукції МП частотою 50 Гц у заданих точках P житлового приміщення однокомпонентними векторними магнітометрами [312, 313]. Для вимірів використано магнітометр Magnetoscor 1.069 (діапазон вимірів індукції МП 1,0 нТл-600 мкТл, відносна похибка 2,5 %).



Рисунок 4.1 – Типова вбудована трансформаторна підстанція

Діюче значення індукції МП $(\tilde{B}_{xk}, \tilde{B}_{yk}, \tilde{B}_{zk})$ у k -й точці вимірювання визначається по вимірам трьох ортогональних положеннях датчика магнітометру, та визначається за формулою

$$\tilde{B}_k = \sqrt{\tilde{B}_{xk}^2 + \tilde{B}_{yk}^2 + \tilde{B}_{zk}^2} . \quad (4.1)$$

Вимірювання проводиться на площинах D (рис. 4.2), паралельних стелі приміщення ТП, на відстанях h_f від струмопроводу ТП з фіксацією фактичних струмів у струмопроводах ТП і визначенні максимального значення МП. Результуюче МП приводилося до номінальної потужності ТП.

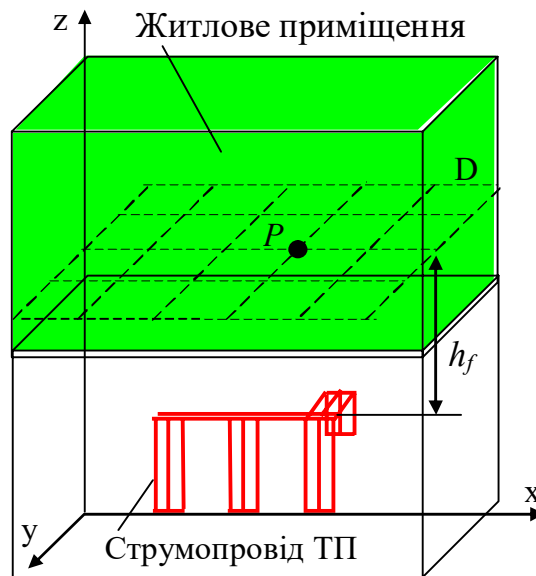


Рисунок 4.2 – Положення струмопроводу ТП та сітки вимірів індукції МП

Узагальнені результати вимірювання максимальних значень індукції МП ТП на площині D при $h_f \in [0,5-3]$ м, що проведені на 18 діючих ТП, представлені на рис. 4.3.

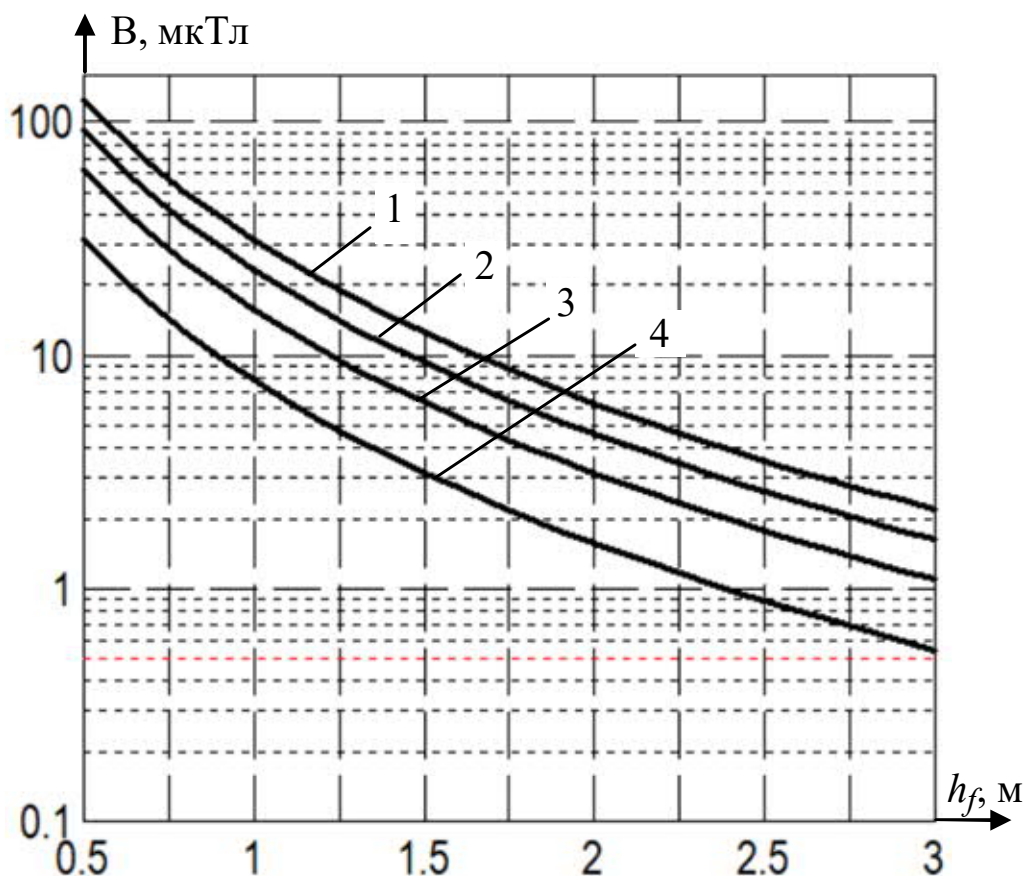


Рисунок 4.3 – Експериментально визначена максимальна індукція зовнішнього МП ТП різної потужності в залежності від висоти h_f : 1 – 400 кВА, 2 – 300 кВА, 3 – 200 кВА, 4 – 100 кВА

Результати експерименту (рис. 4.3) показують, що максимальна індукція МП над вбудованими ТП різної потужності, на висоті від 1,0 до 3 м над їх струмопроводом, де можуть розташовуватися житлові приміщення, становить від 8,0 до 30,0 мкТл, що добре узгоджується з результатами досліджень інших авторів [120, 159]. Отримані результати істотно перевищують ГДР санітарних норм для житлових приміщень [4] (0,5 мкТл), що обумовлює необхідність істотного зменшення МП вбудованих ТП.

4.3 Моделювання та розрахунок магнітного поля над вбудованою трансформаторною підстанцією

4.3.1 Математична модель магнітного поля над вбудованою трансформаторною підстанцією

При побудові математичної моделі МП ТП приймемо наступні припущення [335, 339]. МП над вбудованими ТП створюється тільки їх низьковольтними трифазними струмопроводами 0,4 кВ. При цьому інші джерела МП ТП (рис. 4.4) – кабелі та струмопроводи напругою 10(6) кВ, трансформатор ТМ, кабелі 0,4 кВ, вносять незначний влад у сумарне МП над вбудованими ТП і при подальшому аналізі не враховуються.

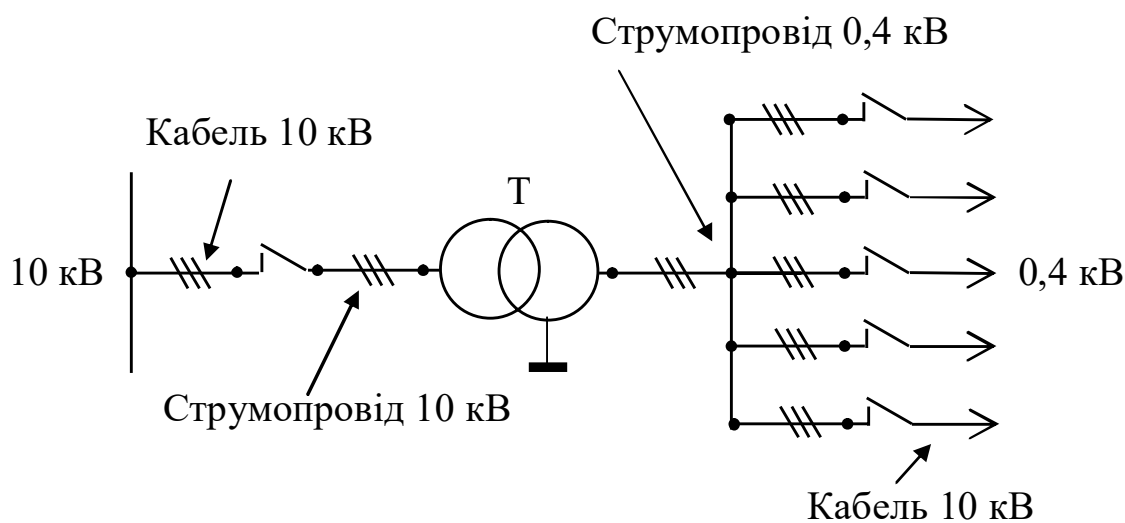


Рисунок 4.4 – Спрощена електрична схема ТП 10/0,4 кВ

Дослідження розподілу МП ТП виконуємо для типового низьковольтного струмопроводу ТП 6(10)/0,4 кВ [337], представленого на (рис. 4.5). Моделювання виконаємо з використанням закону Біо-Савара (1.21), що не обмежує відстань до розрахункової зони, а також принципу суперпозиції [53, 54]. При цьому МП у точці спостереження $P(x,y,z)$ визначається векторною сумою індукції МП від кожної з прямолінійних ділянок струмопроводу (рис. 4.5) [333, 340-342].

При побудові математичної моделі МП ТП також вважаємо, що всі прямолінійні ділянки трифазного струмопроводу ТП зорієнтовані паралельно координатним осям (рис. 4.5) і моделюються струмовими нитками; струми фаз струмопроводу симетричні і синусоїдальні з частотою 50 Гц, квазістаціонарне МП струмопроводу є тривимірним; впливом зовнішніх феромагнітних (електропровідних) елементів та джерел МП нехтуємо [337].

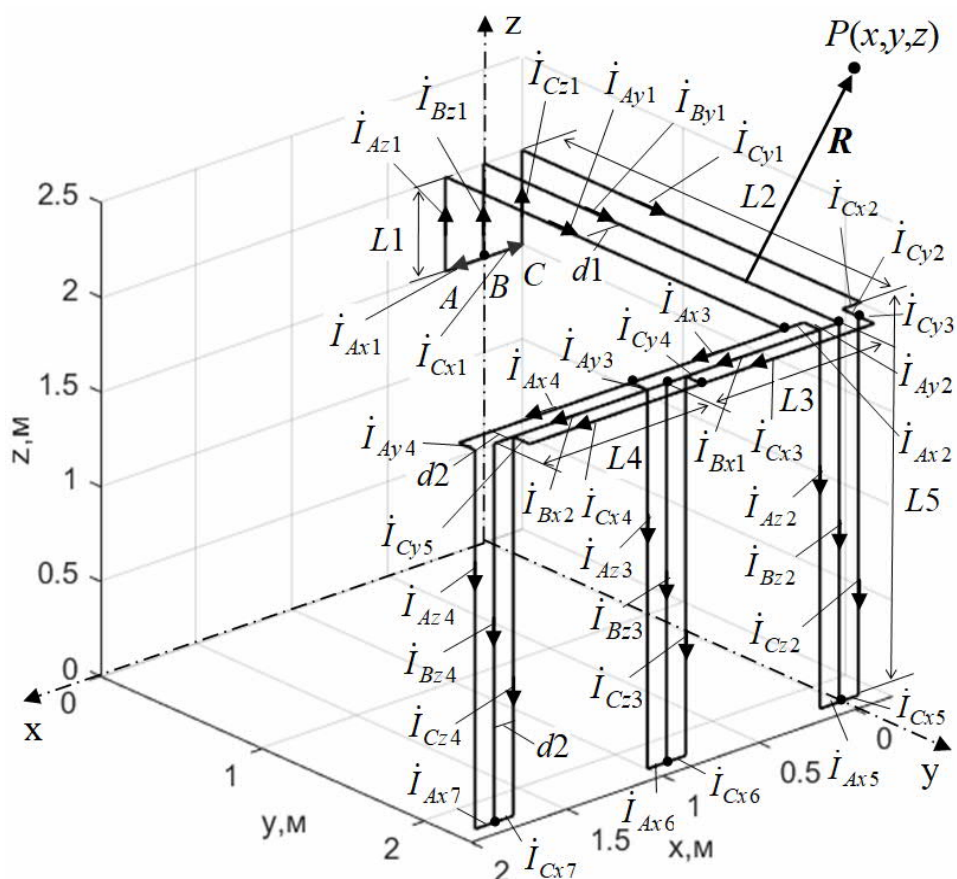


Рисунок 4.5 – Типовий трифазний низьковольтний струмопровід однотрансформаторної ТП 6(10)/0,4 кВ: $d1, d2$ – міжфазні відстані; $L1-L5$ – довжина прямолінійних ділянок; $i_{Ax(1-7)}, i_{Bx(1,2)}, i_{Cx(1-7)}, i_{Ay(1-4)}, i_{By1}, i_{Cy(1-5)}, i_{Az(1-4)}, i_{Bz(1-4)}, i_{Cz(1-4)}$ – струм у прямолінійних ділянках

Для побудови загальної математичної моделі МП струмопроводу ТП необхідно окремо визначити просторові компоненти індукції МП, які

створюються кожною з прямолінійних ділянок $L1-L5$ струмопроводу (рис. 4.5). Визначимо просторові компоненти індукції МП для ділянок струмопроводу, що зорієнтовані паралельно окремим координатним осям X, Y, Z .

Індукція МП ділянки струмопроводу, що паралельна осі Z .

Визначимо МП прямолінійної ділянки струмопроводу між точками $A_n(x_0, y_0, Z_2)$ і $A_k(x_0, y_0, Z_2)$, що представлена на рис. 4.6.

Елемент контуру $d\mathbf{l}$ з координатами (x_0, y_0, η) визначається як [337]:

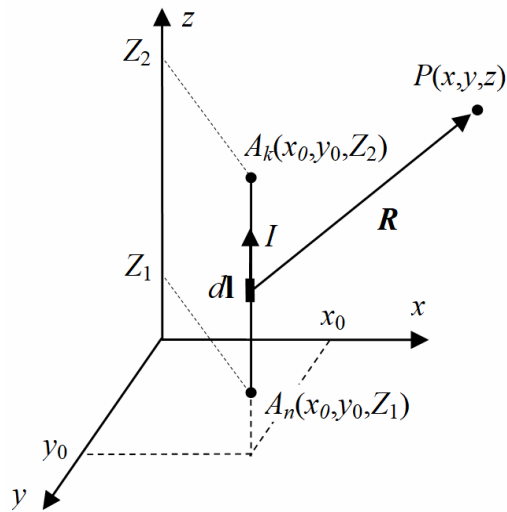


Рисунок 4.6 – До визначення просторових компонент індукції МП від ділянок струмопроводу, що паралельні осі Z

$$d\mathbf{l} = d\eta \mathbf{e}_z, Z_1 \leq \eta \leq Z_2. \quad (4.2)$$

Векторний добуток:

$$[d\mathbf{l} \times \mathbf{R}] = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ 0 & 0 & d\eta \\ x - x_0 & y - y_0 & z - \eta \end{vmatrix} = -(y - y_0) d\eta \mathbf{e}_x + (x - x_0) d\eta \mathbf{e}_y; \quad (4.3)$$

де $\mathbf{R} = (x - x_0, y - y_0, z - \eta)$.

Відповідно до (4.3) компоненти індукції МП визначаються як [342]:

$$B_{z_x} = \frac{-\mu_0 I}{4\pi} (y - y_0) \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{d\eta}{R^3}; B_{z_y} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - x_0) \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{d\eta}{R^3}; B_{z_z} = 0. \quad (4.4)$$

Тут

$$R^3 = \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - \eta)^2 \right]^{3/2},$$

а інтеграл в (4.4) вичислюється як [343]:

$$\int_{Z_1}^{Z_2} \frac{d\eta}{R^3} = \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{d\eta}{\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - \eta)^2 \right]^{3/2}} = \frac{1}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \times$$

$$\times \left[\frac{Z_2 - z}{\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - Z_2)^2 \right]^{1/2}} - \frac{Z_1 - z}{\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - Z_1)^2 \right]^{1/2}} \right]. \quad (4.5)$$

Позначимо:

$$Q(x_0, y_0, Z_i) = \frac{Z_i - z}{\left((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right)} \times \frac{1}{\left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (Z_i - z)^2 \right]^{1/2}}; \quad (4.6)$$

де $i = 1, 2$.

Тоді просторові компоненти індукції МП всіх прямолінійних ділянок струмопроводу (рис. 4.5), паралельних осі Z , можуть бути визначені співвідношеннями [337]:

$$B_{z_x}(I, x_0, y_0, Z_{1,2}) = \frac{-\mu_0 I}{4\pi} (y - y_0) \times [Q(x_0, y_0, Z_2) - Q(x_0, y_0, Z_1)], \quad (4.7)$$

$$B_{z_y}(I, x_0, y_0, Z_{1,2}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - x_0) \times [Q(x_0, y_0, Z_2) - Q(x_0, y_0, Z_1)]. \quad (4.8)$$

Індукція МП ділянки струмопроводу, що паралельна осі X.

МП прямолінійної ділянки струмопроводу паралельній осі X (рис. 4.7) між точками $C_n(X_1, y_0, z_0)$ і $C_k(X_2, y_0, z_0)$ визначимо по аналогії з (4.2–4.8).

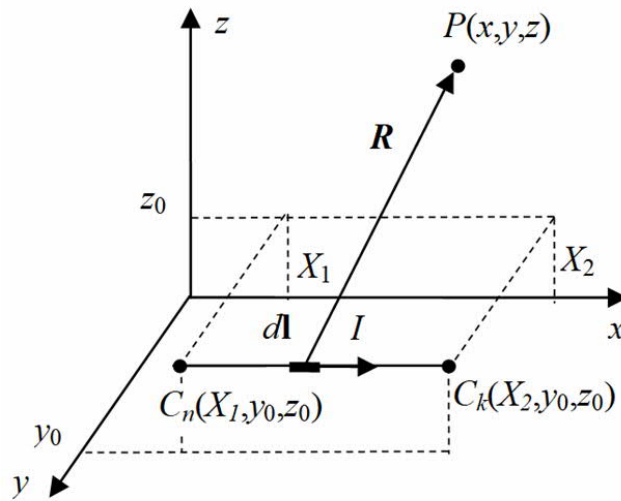


Рисунок 4.7 – До визначення просторових компонент індукції МП від ділянок струмопроводу, паралельних осі X

Тоді просторові компоненти індукції МП всіх прямолінійних ділянок струмопроводу (рис. 4.5), паралельних осі X , можуть бути визначені співвідношеннями [337]:

$$B_{x_y}(I, X_{1,2}, y_0, z_0) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} (z - z_0) \times [F_x(X_2, y_0, z_0) - F_x(X_1, y_0, z_0)]; \quad (4.9)$$

$$B_{x_z}(I, X_{1,2}, y_0, z_0) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (y - y_0) \times [F_x(X_2, y_0, z_0) - F_x(X_1, y_0, z_0)]. \quad (4.10)$$

Тут

$$F_x(X_i, y_0, z_0) = \frac{X_i - x}{((y - y_0)^2 + (z - z_0)^2)} \times \frac{1}{[(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 + (X_i - x)^2]^{1/2}}; \quad i=1,2.$$

Індукція МП ділянки струмопроводу, що паралельна осі Y .

МП прямолінійної ділянки струмопроводу, паралельній осі Y (рис. 4.8) між точками $D_n(x_0, Y_1, z_0)$ і $D_k(x_0, Y_2, z_0)$, також визначимо по аналогії з (4.2–4.8) [337].

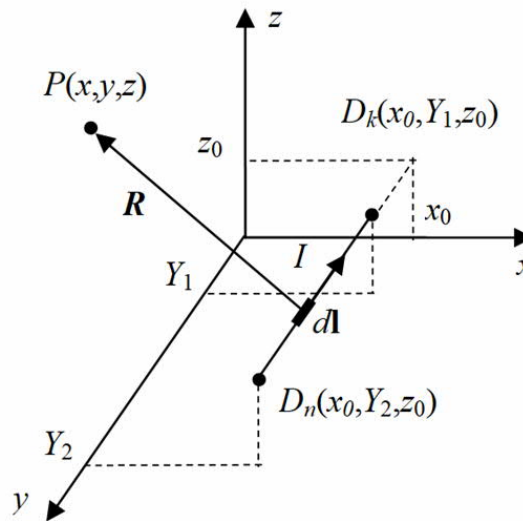


Рисунок 4.8 – До визначення просторових компонент індукції МП від ділянок струмопроводу, паралельних осі Y

$$B_{y_x}(I, x_0, Y_{1,2}, z_0) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (z - z_0) \times [F_y(x_0, Y_2, z_0) - F_y(x_0, Y_1, z_0)]; \quad (4.11)$$

$$B_{y_z}(I, x_0, Y_{1,2}, z_0) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - x_0) \times [F_y(x_0, Y_2, z_0) - F_y(x_0, Y_1, z_0)] \quad (4.12)$$

Тут

$$F_y(x_0, Y_i, z_0) = \frac{Y_i - y}{\left((x - x_0)^2 + (z - z_0)^2\right)} \times \frac{1}{\left[(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 + (Y_i - y)^2\right]^{1/2}}$$

де $i = 1, 2$.

Отримані співвідношення (4.6–4.12) представляють собою математичні моделі МП різноспрямованих ділянок струмопроводу ТП. На основі цих моделей може бути побудований аналітичний метод та методика розрахунку МП низьковольтного струмопроводу ТП, представленого на рис. 4.5, та отримані відповідні розрахункові співвідношення.

4.3.2 Метод розрахунку магнітного поля над вбудованою трансформаторною підстанцією

Використаємо отриману математичну модель МП ділянок струмопроводу ТП (4.6–4.12) та принцип суперпозиції для отримання розрахункових співвідношень з визначення індукції МП струмопроводу ТП (рис. 4.5).

Магнітне поле трифазного струмопроводу у точці P може бути визначено як векторна сума МП від прямолінійних ділянок фазних струмопроводів A, B, C зі струмами $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$, де:

$$\dot{I}_A = I_m e^{-j(\omega t + \frac{2\pi}{3})}; \dot{I}_B = I_m e^{-j\omega t}; \dot{I}_C = I_m e^{-j(\omega t - \frac{2\pi}{3})}, \quad (4.13)$$

I_m – амплітуда струму;

ω – кутова частота;

t – час.

Тоді для фази A струмопроводу зі струмом $\dot{I}_A$ компоненти індукції МП відповідно до (4.6–4.13) можуть бути представлені у вигляді [337]:

$$\dot{B}_x(\dot{I}_A) = \sum_n^N \dot{B}_{zx}(\dot{I}_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_k^K \dot{B}_{yx}(\dot{I}_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \quad (4.14)$$

$$\dot{B}_y(\dot{I}_A) = \sum_n^N \dot{B}_{zy}(\dot{I}_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_v^V \dot{B}_{xy}(\dot{I}_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}); \quad (4.15)$$

$$\dot{B}_z(\dot{I}_A) = \sum_v^V \dot{B}_{xz}(\dot{I}_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \sum_k^K \dot{B}_{yz}(\dot{I}_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \quad (4.16)$$

де $\dot{I}_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}$ – струм та координати кінців n -ї прямолінійної ділянки паралельної осі Z ;

$\dot{I}_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}$ – струм та координати кінців k -ї прямолінійної ділянки паралельної осі Y ;

$\dot{I}_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}$ – струм та координати кінців v -ї прямолінійної ділянки, паралельної осі X ;

N, K, V – кількість прямолінійних ділянок, паралельних осі Z, Y, X відповідно.

Для фази B струмопроводу компоненти індукції МП для зі струмом $\dot{I}_B$ відповідно до (4.6–4.13) можуть бути представлені у вигляді [337]:

$$\dot{B}_x(\dot{I}_B) = \sum_n^N \dot{B}_{zx}(\dot{I}_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_k^K \dot{B}_{yx}(\dot{I}_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \quad (4.17)$$

$$\dot{B}_y(\dot{I}_B) = \sum_n^N \dot{B}_{zy}(\dot{I}_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_v^V \dot{B}_{xy}(\dot{I}_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}); \quad (4.18)$$

$$\dot{B}_z(\dot{I}_B) = \sum_v^V \dot{B}_{xz}(\dot{I}_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \sum_k^K \dot{B}_{yz}(\dot{I}_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \quad (4.19)$$

де $\dot{I}_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}$ – струм та координати кінців n -ї прямолінійної ділянки паралельної осі Z ;

$\dot{I}_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}$ – струм та координати кінців k -ї прямолінійної ділянки, паралельної осі Y ;

$\dot{I}_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}$ – струм та координати кінців v -ї прямолінійної ділянки, паралельної осі X ;

N, K, V – кількість прямолінійних ділянок, паралельних осі Z, Y, X відповідно.

Для фази C струмопроводу компоненти індукції МП для зі струмом $\dot{I}_C$ відповідно до (4.6–4.13) можуть бути представлені у вигляді [337]:

$$\dot{B}_x(\dot{I}_C) = \sum_n^N \dot{B}_{zx}(\dot{I}_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_k^K \dot{B}_{yx}(\dot{I}_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \quad (4.20)$$

$$\dot{B}_y(I_C) = \sum_n^N \dot{B}_{zy}(I_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_v^V \dot{B}_{xy}(I_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}); \quad (4.21)$$

$$\dot{B}_z(I_C) = \sum_v^V \dot{B}_{xz}(I_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \sum_k^K \dot{B}_{yz}(I_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}); \quad (4.22)$$

де $I_{Cz,n}$, $x_{0,n}$, $y_{0,n}$, $Z_{1,2,n}$ – струм та координати кінців n -ї прямолінійної ділянки, паралельної осі Z ;

$I_{Cy,k}$, $x_{0,k}$, $Y_{1,2,k}$, $z_{0,k}$ – струм та координати кінців k -ї прямолінійної ділянки, паралельної осі Y ;

$I_{Cx,v}$, $X_{1,2,v}$, $y_{0,v}$, $z_{0,v}$ – струм та координати кінців v -ї прямолінійної ділянки, паралельної осі X ;

N , K , V – кількість прямолінійних ділянок, паралельних осі Z , Y , X відповідно.

Тоді компоненти індукції МП трифазного струмопроводу (рис. 4.5) можуть бути представлені як [337]:

$$\dot{B}_x = \dot{B}_x(I_A) + \dot{B}_x(I_B) + \dot{B}_x(I_C); \quad (4.23)$$

$$\dot{B}_y = \dot{B}_y(I_A) + \dot{B}_y(I_B) + \dot{B}_y(I_C); \quad (4.24)$$

$$\dot{B}_z = \dot{B}_z(I_A) + \dot{B}_z(I_B) + \dot{B}_z(I_C), \quad (4.25)$$

а діюче значення індукції його МП у точці $P(x,y,z)$ як:

$$\tilde{B} = \left| \sqrt{\dot{B}_x^2 + \dot{B}_y^2 + \dot{B}_z^2} \right|, \quad (4.26)$$

де $\dot{B}_x$, $\dot{B}_y$, $\dot{B}_z$ – просторові компоненти (4.23–4.25) визначені для діючого значення струмів I_A , I_B , I_C .

На основі (4.14–4.25) отримаємо наступні розрахункові співвідношення для

визначення індукції МП струмопроводу (рис. 4.5) [337]:

$$\begin{aligned}\dot{B}_x = & \sum_n^N \dot{B}_{z_x}(I_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_k^K \dot{B}_{y_x}(I_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\ & + \sum_n^N \dot{B}_{z_x}(I_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_k^K \dot{B}_{y_x}(I_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\ & + \sum_n^N \dot{B}_{z_x}(I_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_k^K \dot{B}_{y_x}(I_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k});\end{aligned}\quad (4.27)$$

$$\begin{aligned}\dot{B}_y = & \sum_n^N \dot{B}_{z_y}(I_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_v^V \dot{B}_{x_y}(I_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\ & + \sum_n^N \dot{B}_{z_y}(I_{Bz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_v^V \dot{B}_{x_y}(I_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \\ & + \sum_n^N \dot{B}_{z_y}(I_{Cz,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_v^V \dot{B}_{x_y}(I_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v})\end{aligned}\quad (4.28)$$

$$\begin{aligned}\dot{B}_z = & \sum_v^V \dot{B}_{x_z}(I_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \sum_k^K \dot{B}_{y_z}(I_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) + \\ & + \sum_v^V \dot{B}_{x_z}(I_{Bx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \sum_k^K \dot{B}_{y_z}(I_{By,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}) \\ & + \sum_v^V \dot{B}_{x_z}(I_{Cx,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \sum_k^K \dot{B}_{y_z}(I_{Cy,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}).\end{aligned}\quad (4.29)$$

Отримані автором розрахункові співвідношення (4.6–4.29) [337] складають нові метод та методику розрахунку індукції зовнішнього МП струмопроводу ТП (рис. 4.5) у всіх точках простору, в тому числі поблизу його поверхні.

Тестовий розрахунок МП струмопроводу реальної ТП на основі розробленої методики.

Виконаємо розрахунок індукції МП струмопроводу ТП 10/0,4 кВ потужністю 100 кВА з параметрами $d1 = 0,16$ м, $d2 = 0,05$ м, $L1 = 0,5$ м,

$L2 = 2,2$ м, $L3 = L4 = 0,9$ м, $L5=2$ м, $I = 150$ А, та іншими параметрами відповідно до табл. 4.1 [337].

Таблиця 4.1 – Параметри струмопроводу ТП (рис. 4.5), необхідні для розрахунку його МП

n	$i_{Az,n} = u \cdot i_A$	$x_{0n}, \text{ м}$	$y_{0n}, \text{ м}$	$Z_{1n}, \text{ м}$	$Z_{2n}, \text{ м}$
1	2	3	4	5	6
1	$u = 1$	0,16	0	1,5	2
2	$u = 1/3$	0,05	2,15	2	0
3	$u = 1/3$	0,95	2,15	2	0
4	$u = 1/3$	1,85	2,15	2	0
n	$i_{Bz,n} = u \cdot i_B$	$x_{0n}, \text{ м}$	$y_{0n}, \text{ м}$	$Z_{1n}, \text{ м}$	$Z_{2n}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0	0	1,5	2
2	$u = 1/3$	0	2,15	2	0
3	$u = 1/3$	0,9	2,15	2	0
4	$u = 1/3$	1,8	2,15	2	0
n	$i_{Cz,n} = u \cdot i_C$	$x_{0n}, \text{ м}$	$y_{0n}, \text{ м}$	$Z_{1n}, \text{ м}$	$Z_{2n}, \text{ м}$
1	$u = 1$	-0,16	0	1,5	2
2	$u = 1/3$	-0,05	2,15	2	0
3	$u = 1/3$	0,85	2,15	2	0
4	$u = 1/3$	1,75	2,15	2	0
k	$i_{Ay,k} = u \cdot i_A$	$x_{0k}, \text{ м}$	$Y_{1k}, \text{ м}$	$Y_{2k}, \text{ м}$	$z_{0k}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0,16	0	2,1	2
2	$u = 1/3$	0,05	2,1	2,15	2
3	$u = 1/3$	0,95	2,1	2,15	2
4	$u = 1/3$	1,85	2,1	2,15	2
k	$i_{By,k} = u \cdot i_B$	$x_{0k}, \text{ м}$	$Y_{1k}, \text{ м}$	$Y_{2k}, \text{ м}$	$z_{0k}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0	0	2,15	2

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6
k	$i_{By,k} = u \cdot i_C$	$x_{0k}, \text{ м}$	$Y_{1k}, \text{ м}$	$Y_{2k}, \text{ м}$	$z_{0k}, \text{ м}$
1	$u = 1$	-0,16	0	2,1	2
2	$u = 1$	-0,05	2,1	2,15	2
3	$u = 2/3$	-0,05	2,15	2,2	2
4	$u = 1/3$	0,85	2,2	2,15	2
5	$u = 1/3$	1,75	2,2	2,15	2
v	$i_{Ax,v} = u \cdot i_A$	$X_{1v}, \text{ м}$	$X_{2v}, \text{ м}$	$y_{0v}, \text{ м}$	$z_{0v}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0	0,16	0	1,5
2	$u = 1/3$	0,16	0,05	2,1	2
3	$u = 2/3$	0,16	0,95	2,1	2
4	$u = 1/3$	0,95	1,85	2,1	2
5	$u = 1/3$	0,05	0	2,15	0
6	$u = 1/3$	0,95	0,9	2,15	0
7	$u = 1/3$	1,85	1,8	2,15	0
v	$i_{Bx,v} = u \cdot i_B$	$X_{1v}, \text{ м}$	$X_{2v}, \text{ м}$	$y_{0v}, \text{ м}$	$z_{0v}, \text{ м}$
1	$u = 2/3$	0	0,9	2,15	2
2	$u = 1/3$	0,9	1,8	2,15	2
v	$i_{Cx,v} = u \cdot i_C$	$X_{1v}, \text{ м}$	$X_{2v}, \text{ м}$	$y_{0v}, \text{ м}$	$z_{0v}, \text{ м}$
1	$u = 1$	0	-0,16	0	1,5
2	$u = 1$	-0,16	-0,05	2,1	2
3	$u = 2/3$	-0,05	0,85	2,15	2
4	$u = 1/3$	0,85	1,75	2,15	2
5	$u = 1/3$	-0,05	0	2,1	0
6	$u = 1/3$	0,85	0,9	2,1	0
7	$u = 1/3$	1,75	1,8	2,1	0

Розрахунок виконаємо відповідно до (4.6–4.29) на горизонтальній площині (підлозі житлового приміщення), розташованій на висоті від 0,5 м до 3 м над

струмопроводом ТП. Результати розрахунку зведені до табл. 4.2 і представлені на рис. 4.9–4.11.

Як видно з результатів розрахунку (табл. 4.2, рис. 4.9–4.11), максимальні значення індукції МП ТП 100 кВА при її номінальному навантаженні складають від 0,55 мкТл до 30,6 мкТл на висоті від 0,5–3 м над ТП – в зоні можливого розташування житлового приміщення (рис. 4.2).

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку розподілу максимальних значень індукції МП струмопроводу ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА (рис. 4.5) на горизонтальній площині при її розташуванні на висоті h_f над струмопроводом

h_f , м	B , мкТл	h_f , м	B , мкТл
0,5	30,56585	1,9	1,767524
0,6	21,82841	2	1,556398
0,7	16,20571	2,1	1,377454
0,8	12,40228	2,2	1,224789
0,9	9,724627	1	2
1	7,777737	2,3	1,093757
1,1	6,324234	2,4	0,980665
1,2	5,214902	2,5	0,882552
1,3	4,352309	2,6	0,797024
1,4	3,670761	2,7	0,722134
1,5	3,124731	2,8	0,656283
1,6	2,681909	2,9	0,598152
1,7	2,318889	3	0,546647
1,8	2,018408	-	-

На рис. 4.9, 4.10 відповідно до (4.5–4.29) побудовано розподіл індукції МП ТП. Його аналіз показує, що індукція має максимум над фазою B основного

горизонтального струмопроводу ТП (рис. 4.5) та близький до дипольного характер його розподілу.

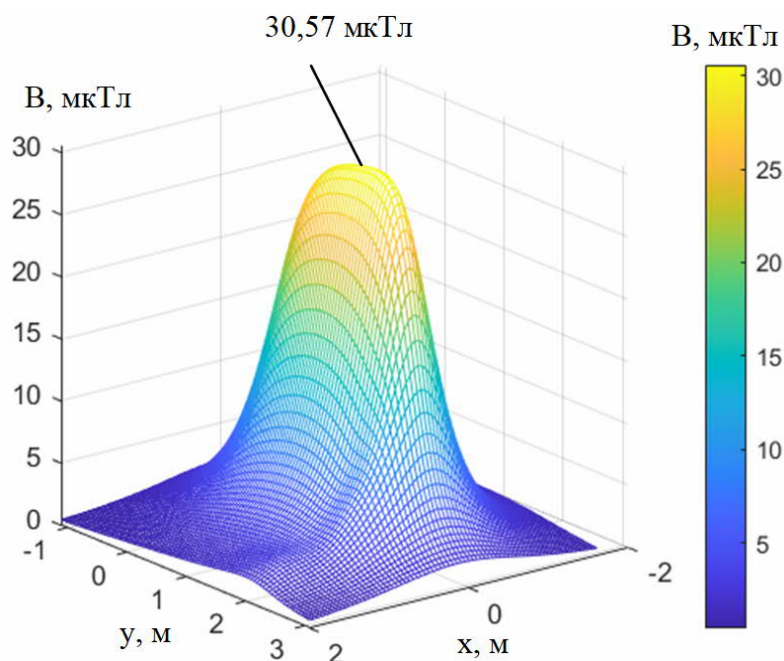


Рисунок 4.9 – Розрахунковий розподіл індукції МП на висоті 0,5 м над струмопроводом ТП

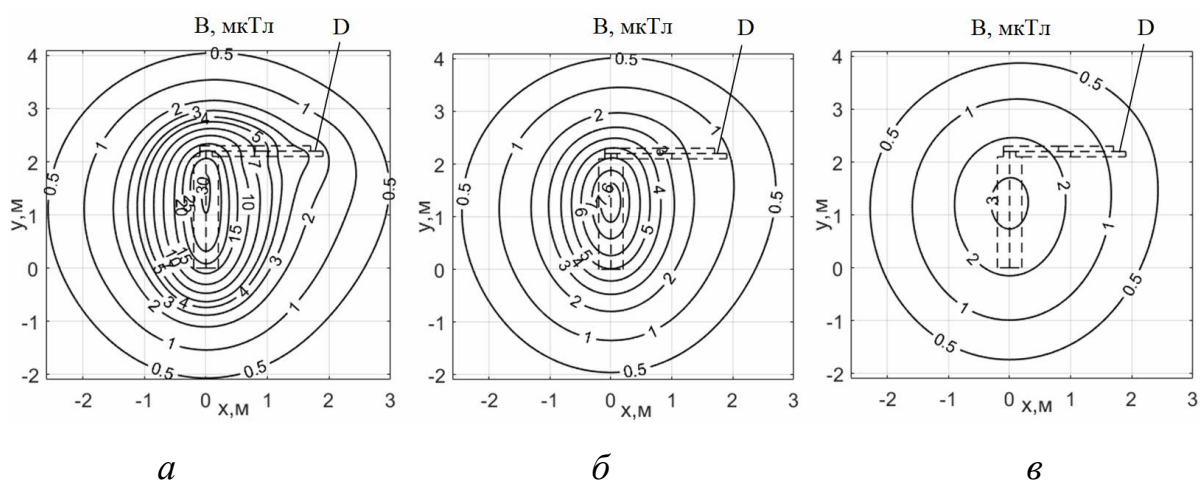


Рисунок 4.10 – Розрахунковий розподіл індукції МП струмопроводу ТП 6(10)/0,4 кВ на горизонтальній площині, розташованій на висоті 0,5 м (а), 1,0 м (б) і 1,5 м (в) від струмопроводу відповідно до табл. 4.1, D – проекція низьковольтного струмопроводу

Це підтверджує можливість організації ефективного екранування МП ТП простішим активним електромагнітним екраном з однією компенсаційною обмоткою [344].

4.3.3 Верифікація розробленої математичної моделі магнітного поля над трансформаторними підстанціями та методики його розрахунку

Експериментальну перевірку розроблених математичної моделі МП ТП та методики розрахунку МП струмопроводу ТП (рис. 4.5) здійснимо з допомогою експериментальних досліджень створеного автором повномасштабного лабораторного макету струмопроводу ТП потужністю 100 кВА (рис. 4.11).



Рисунок 4.11 – Лабораторний макет струмопроводу низької напруги ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА на магнітовимірювальному стенді ІЕМС НАН України

Перевірку проводимо при номінальному струмі 150 А шляхом порівняння результатів розрахунку (табл. 4.2) з результатами вимірів індукції його МП, зведених до табл. 4.3

Виміри діючого значення індукції МП проводилися за представленою в [164] методикою у вузлах координатної сітки $0,5 \times 0,5$ м на площині, віддаленій від струмопроводу на відстань від 0,5 м до 3 м. Для зручності проведення вимірів над ТП лабораторний макет струмопроводу покладено на бік (рис. 4.11). Струм ділянок трифазного струмопроводу задано по табл. 4.1. Результати вимірів представлені у табл. 4.3 та на рис. 4.12.

Таблиця 4.3 – Результати експериментальних досліджень максимальних значень індукції МП лабораторного макету струмопроводу ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА (рис. 4.12) на горизонтальній площині при її розташуванні на висоті h_f над струмопроводом

h_f , м	B , мкТл	h_f , м	B , мкТл
0,5	29,9	1,9	1,71
0,6	21,1	2	1,5
0,7	15,8	2,1	1,34
0,8	11,9	2,2	1,19
0,9	9,4	1	3
1	7,5	2,3	1,06
1,1	6,1	2,4	0,95
1,2	5,02	2,5	0,85
1,3	4,15	2,6	0,77
1,4	3,6	2,7	0,69
1,5	3,05	2,8	0,64
1,6	2,6	2,9	0,58
1,7	2,25	3	0,53
1,8	1,94	-	-

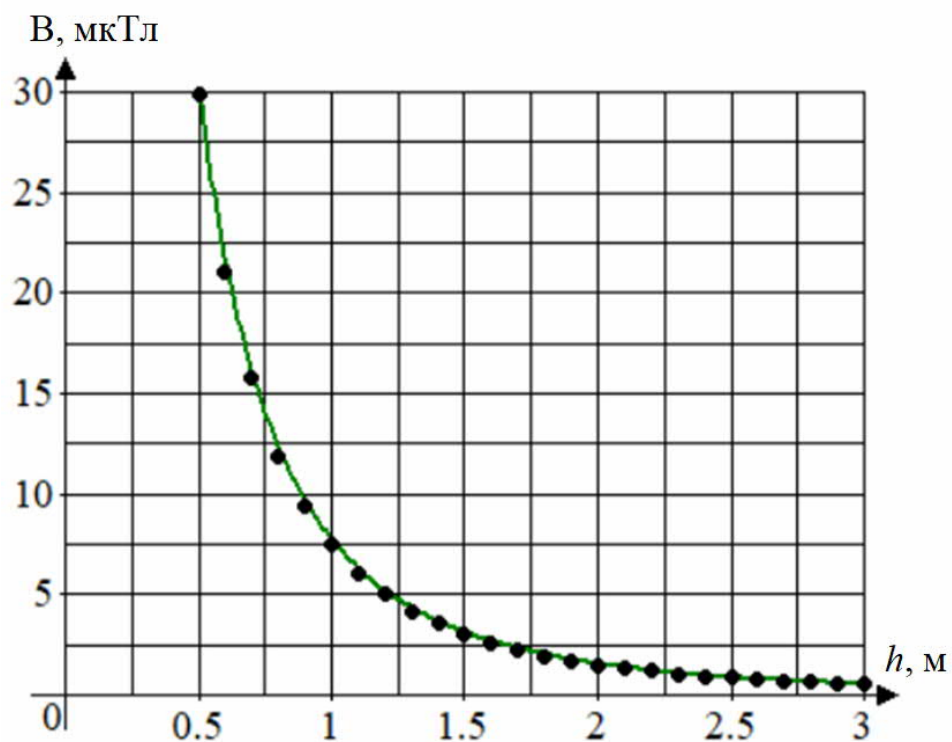


Рисунок 4.12 – Порівняльні результати розрахунку — та експерименту •••• розподілу індукції МП струмопроводу ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА відповідно до табл. 4.2, 4.3

За даними табл. 4.2 та табл. 4.3 розраховано похибку δ результатів розрахунку за даними експерименту відповідно до (4.5–4.29), що зведені до табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняння результатів розрахунку (табл. 4.2) з результатами вимірів (табл. 4.3)

h_f , м	Похибка, δ , %	h_f , м	Похибка, δ %
1	2	3	4
0,5	2,23	1,9	3,36
0,6	3,45	2	3,76
0,7	2,57	2,1	2,80
0,8	4,22	2,2	2,92

Продовження таблиці 4.4

1	2	3	4
0,9	3,45	1	4
1	3,70	2,3	3,18
1,1	3,68	2,4	3,23
1,2	3,88	2,5	3,83
1,3	4,87	2,6	3,51
1,4	1,97	2,7	4,66
1,5	2,45	2,8	2,54
1,6	3,15	2,9	3,13
1,7	3,06	3	3,14
1,8	4,04	-	-

Як слідує з табл. 4.4, розкид результатів розрахунку та експерименту не перевищує 5 %. Це підтверджує коректність розробленої математичної моделі МП струмопроводу, запропонованих розрахункових співвідношень та методики розрахунку індукції його МП, та прийнятих вище припущень.

4.4 Вибір методів зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях над вбудованими трансформаторними підстанціями

Проведений у розділі 1 аналіз відомих методів та засобів нормалізації МП електромереж показує, що для зменшення МП ТП теоретично можливо використання різних методів та засобів нормалізації МП [333, 345] приведених на рис. 4.13.

Відчутне зменшення МП ТП може бути досягнуте завдяки конструктивно-технологічним методам удосконалення конструкції ТП. Зокрема, у роботах [99, 164] запропоновано низку конструктивно-технологічних підходів – симетрування, транспонування, розщеплення струмопроводів, а також локальне активне й пасивне екранування – які дають змогу зменшити магнітне поле

підстанції щонайменше на порядок. Перспективним напрямом також вважається контурне екранування МП струмопроводів [164, 284].



Рисунок 4.13 – Методи зменшення МП над вбудованими ТП

Водночас модернізація конструкції вже існуючих підстанцій є технічно складною та обмеженою у правовому полі, а виробництво підстанцій у спеціальному конструктивному виконанні потребує значних інвестицій. В той же час конструктивно-технологічні методи потребують внесення змін у конструкцію ТП. Ці методи можуть використовуватися тільки на стадії проектування ТП.

Тому найбільш прийнятними для практичного застосування на діючих вбудованих ТП є методи зовнішнього екранування магнітного поля, що не передбачають зміни конструкції ТП.

Активне екранування здійснюється компенсаційними обмотками з регульованим струмом, що розміщуються за межами ТП поблизу житлових приміщень [99, 164].

Пасивне екранування реалізують шляхом встановлення електропровідних або феромагнітних матеріалів на стінах і стелях житлових приміщень, розташованих поблизу підстанції [346, 347]. Такий підхід є досить

універсальним, проте для частоти 50 Гц пасивне екранування потребує значних матеріальних витрат.

Комбіноване активно-пасивне екранування МП, що передбачає спільне використання активних та пасивних засобів, використовується в разі недостатньої ефективності засобів активного екранування для нормалізації МП в житлових приміщеннях.

Враховуючи те, що в роботі йде мова про діючі вбудовані ТП, фізичний та юридичний доступ до яких обмежений, в подальшому розглядаються тільки методи екранування, які реалізуються без втручання в конструкцію ТП.

4.5 Розробка методів та засобів екранування магнітного поля над вбудованими трансформаторними підстанціями

4.5.1 Вибір засобів екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій

Аналіз показує [344, 345, 348] , що найбільш ефективними і дешевими на промисловій частоті є САЕ (рис. 4.14), що реалізуються з однією чи двома компенсаційними обмотками (КО) в розімкненій структурі із слідкуванням за струмом ТП.

Ефективність екранування МП частотою 50 Гц відомими [186, 261, 349] простішими пасивними електромагнітними екранами (ПЕ) (рис. 4.14) із мідних, алюмінієвих, або сталевих П (U) подібних пластин товщиною 1–4 мм, невелика і складає 1,5–5 одиниць. При цьому ПЕ мають суттєву металоємність і вартість, і тому можуть бути використані тільки як додаткові засіби зменшення МП ТП при недостатній ефективності САЕ.

Тому в подальшому як основний засіб екранування МП ТП розглядаємо САЕ.

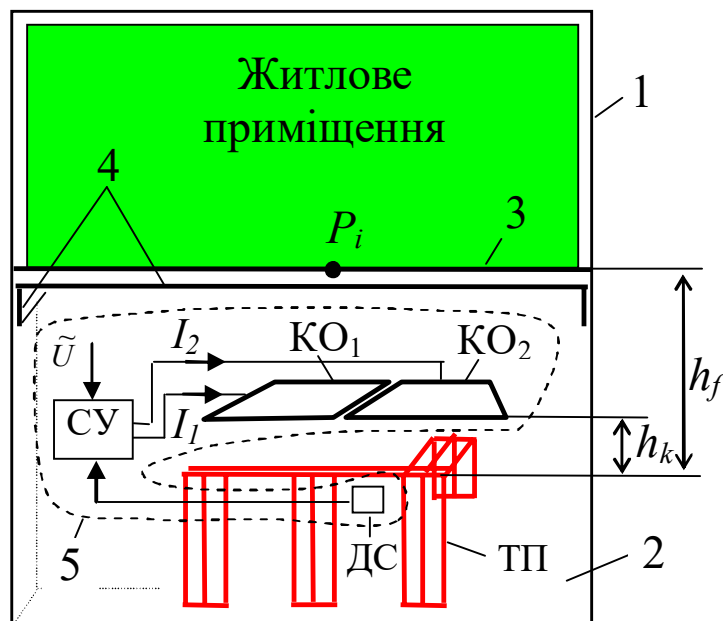


Рисунок 4.14 –Екранування МП над вбудованою в житловий будинок ТП: 1 – житловий будинок; 2 – приміщення ТП; 3 – підлога; 4 – ПЕ; 5 – САЕ

4.5.2 Удосконалений метод та методика синтезу систем активного екранування магнітного поля трансформаторних підстанцій

Розглянемо розроблений автором удосконалений метод проектування (синтезу) САЕ, який в порівнянні з відомими [159, 257] має більшу ефективність при малих (1,0-1,6 м) відстанях між ТП і житловим приміщенням.

При аналізі приймемо наступні припущення:

- в якості теоретичної основи математичної моделі МП ТП використовуємо метод Біо-Савара та принцип суперпозиції [53, 54, 120].
- відстань між струмопроводом ТП та підлогою розташованого над ТП житлового приміщення складає 0,8–1,6 м.
- зовнішнє МП вбудованої ТП заміщується МП його трифазного низьковольтного струмопроводу 0,4 кВ [335];
- струми фаз струмопроводу симетричні і синусоїдальні з частотою 50 Гц і створюють тривимірне квазістаціонарне МП;

– впливом зовнішніх феромагнітних (електропровідних) елементів та джерел МП в оточуючому просторі нехтуємо.

Вихідними даними для синтезу САЕ є МП ТП, визначене на підлозі житлового приміщення, де рівень МП є максимальним. Як показано в [257], у разі розташування житлового приміщення над ТП, а засобів екранування між ТП та приміщенням, та враховуючи потенційність МП ТП, зменшення МП на підлозі приміщення до нормативного рівня гарантує його зменшення у всьому об'ємі приміщення.

МП трифазного низьковольтного струмопроводу (рис. 4.5) визначимо на основі закону Біо-Савара (1.20) та принципу суперпозиції (4.30). При цьому МП струмопроводу $\vec{B}(P)_\Sigma$ у точці P_i визначається як векторна сума МП $\vec{B}_n(I_A)$, $\vec{B}_k(I_B)$, $\vec{B}_m(I_C)$ від струмів всіх прямолінійних ділянок фазних струмопроводів А, В, С зі струмами I_A , I_B , I_C (4.13), на який умовно розділяється струмопровід (рис. 4.5) [341]:

$$\vec{B}_\Sigma = \sum_{n=1}^N \vec{B}_n(I_A) + \sum_{k=1}^K \vec{B}_k(I_B) + \sum_{m=1}^M \vec{B}_m(I_C), \quad (4.30)$$

де N, K, M – кількість прямолінійних ділянок фазних струмопроводів А, В, С відповідно.

Просторові компоненти вектору індукції МП струмопроводу ТП у точці P_i (рис. 4.14) визначаються як [341]:

$$\begin{aligned} \dot{B}_x(P_i) &= \sum_{n=1}^N \dot{B}_{x_n}(I_A) + \sum_{k=1}^K \dot{B}_{x_k}(I_B) + \sum_{m=1}^M \dot{B}_{x_m}(I_C) \\ \dot{B}_y(P_i) &= \sum_{n=1}^N \dot{B}_{y_n}(I_A) + \sum_{k=1}^K \dot{B}_{y_k}(I_B) + \sum_{m=1}^M \dot{B}_{y_m}(I_C) \end{aligned}$$

$$\dot{B}z(P_i) = \sum_{n=1}^N \dot{B}z_n(I_A) + \sum_{k=1}^K \dot{B}z_k(I_B) + \sum_{m=1}^M \dot{B}z_m(I_C), \quad (4.31)$$

а діюче значення індукції його МП у точці P_i як:

$$\tilde{B}(P_i) = \left| \sqrt{\dot{B}x(P_i)^2 + \dot{B}y(P_i)^2 + \dot{B}z(P_i)^2} \right|, \quad (4.32)$$

де $\dot{B}_x$, $\dot{B}_y$, $\dot{B}_z$ – просторові компоненти визначені для діючого значення струмів I_A , I_B , I_C .

При синтезі САЕ її шуканими параметрами є геометричні розміри і координати компенсаційних обмоток D_{coil} що визначаються координатами кутів КО (x_i, y_i, z_i) та параметри контуру управління I_{coil} : амплітуди Im_k струмів і фаз φ_k компенсаційних обмоток:

$$D_{coil} = \{x_i, y_i, z_i\}, \quad (4.33)$$

$$I_{coil} = \{Im_k, \varphi_k\}. \quad (4.34)$$

Відповідно шукані параметри визначаються

$$F = \{D_{coil}, I_{coil}\}. \quad (4.35)$$

МП САЕ у точці P_i визначимо по закону Біо-Савара (1.20) як векторну суму МП прямолінійних ділянок компенсаційних обмоток

$$\vec{B}_{coil}(F, P_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_k^K \left(I_k \sum_{n=1}^N \frac{\vec{D}_{k,n} \times \vec{R}_{k,n}}{R_{k,n}^3} \right), \quad (4.36)$$

де $\vec{D}_{k,n}$ – вектор що визначається координатами кінців n -го прямолінійного відрізка k -ї КО;

$\vec{R}_{k,n}$ – вектор спрямований від кінця n -го прямолінійного відрізка k -ї КО у точку спостереження P_i ;

$\dot{I}_k = Im_k e^{-j(\omega t + \varphi_k)}$ – струм k -ї КО.

Екрановане МП ТП визначається як

$$\vec{B}(F, P_i) = \vec{B}(P_i)_{\Sigma} + \vec{B}_{coil}(F, P_i). \quad (4.37)$$

Шукані параметри САЕ визначаються [349] із

$$F^* = \arg \max_{P_i} \min_F |\vec{B}(F, P_i)| \quad (4.38)$$

Для розв’язання (4.38) можуть бути використані різні методи оптимізації [161, 349, 350] (стохастичні методи, генетичні алгоритми, та інші), які суттєво не впливають на результат синтезу, а визначають тільки швидкість його отримання. САЕ реалізується в розімкненій структурі (рис. 4.15) із слідкуванням за струмом струмопроводу ТП.

Для синтезу САЕ здобувачем використовувався метод оптимізації на основі алгоритму оптимізації мультироєм частинок з множини Парето-оптимальних рішень і урахуванням бінарних відносин переваги відповідно до [183] в пакеті прикладних програм [351, 352].

Таким чином, співвідношення (4.33–4.38) представляють собою методику синтезу САЕ МП ТП. На основі цієї методики виконаємо синтез САЕ [353] для різних типів ТП.

4.5.3 Синтез систем активного екранування для різних типів вбудованих трансформаторних підстанцій

А) Синтез САЕ з однією КО для ТП 100 кВА. Вихідні данні: МП ТП з одним трансформатором потужністю 100 кВА моделюється її низьковольтним струмопроводом з геометричними розмірами приведеними на рис. 4.5 ($d1 = 0,16$ м $d2 = 0,05$ м, $L1 = 0,5$ м, $L2 = 2,1$ м, $L3 = L4 = 0,8$ м, $L5 = 2$ м) [341].

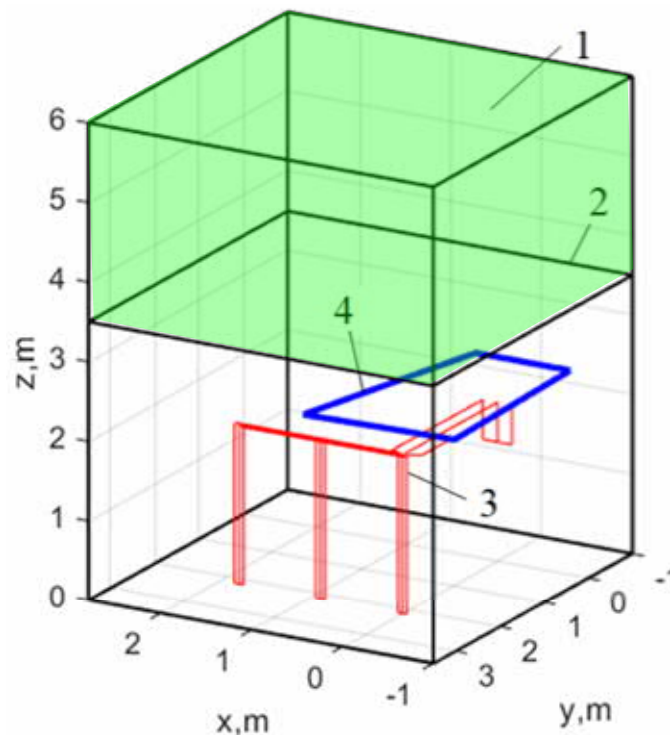


Рисунок 4.15 – Розташування житлового приміщення (1) з підлогою (2) над ТП (3) та розміщення КО САЕ(4)

Визначимо індукцію МП на поверхні підлоги приміщення. При цьому діючі значення струмів струмопроводу ТП (рис. 4.5): $I_n = 150$ А; $I_1 = I_n$; $I_2 = 2/3 I_n$; $I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = 1/3 I_n$.

Визначимо ефективність САЕ при відстані $h_f = 1$ м (рис. 4.14) при використанні САЕ з однією компенсаційною обмоткою (КО) (рис. 4.15).

Розрахований відповідно до (4.6–4.29) розподіл індукції вихідного МП ТП на підлозі представлений на рис. 4.16. Максимальне значення індукції МП становить 7,84 мкТл, що перевищує нормативний рівень для населення [4] у 15,6 рази.

За методикою (4.33–4.38), виконано синтез САЕ та визначені її параметри (рис. 4.14). Так, координати кутів КО: $x_1 = -0,455$ м; $x_2 = -0,605$ м; $x_3 = 0,807$ м; $x_4 = 0,21$ м; $y_1 = -0,28$ м; $y_2 = 2,206$ м; $y_3 = 2,478$ м; $y_4 = -0,311$ м; Відстань між КО та струмопроводом; $h_k = 0,201$ м; Ампер-витки КО; $IW = 37,23$ А; Фазовий зсув струму КО відносно фази В; $\varphi = 1,597$ рад [341].

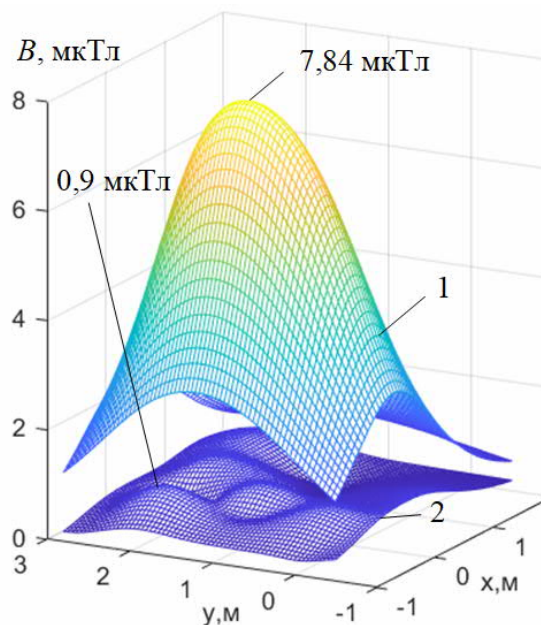


Рисунок 4.16 – Розподіл індукції МП ТП 100 кВА $I = 150$ А на підлозі приміщення ($h_f = 1$ м) при використанні синтезованої САЕ:
1 – вихідний, 2 – екранований

Розрахований розподіл індукції екранованого МП ТП на підлозі при $h_f = 1$ м представлений на рис. 4.16 і показує, що рівень МП у приміщенні зменшився з 7,84 мкТл до 0,9 мкТл і перевищує ГДР 0,5 мкТл. При цьому розрахункова ефективність SF екранування САЕ складає 8,7 одиниць.

В) Синтез САЕ двома КО для ТП 100 кВА при $h_f = 1,0$ м (рис. 4.18).

Максимальне значення індукції МП ТП становить 7,8 мкТл (рис. 4.16)

САЕ має наступні параметри: КО1, координати кутів: $x_{11} = -0,3297$ м; $x_{12} = -0,5085$ м; $x_{13} = 0,5828$ м; $x_{14} = 0,1317$ м; $y_{11} = -0,0002$ м; $y_{12} = 1,9382$ м; $y_{13} = 2,5935$ м; $y_{14} = -0,7856$ м; $h_k = 0,2$ м; Ампер-витки КО; $IW1 = 31,34$ А; Фазовий зсув струму КО відносно фази В; $\varphi1 = 1,5776$ рад.

КО2, координати кутів: $x_{21} = 1,8392$ м; $x_{22} = 0,5$ м; $x_{23} = 0,1317$ м; $x_{24} = 0,5828$ м; $y_{21} = 2,8827$ м; $y_{22} = 0$ м; $y_{23} = -0,7856$ м; $y_{24} = 2,5935$ м; $h_k = 0,2$ м; Ампер-витки КО; $IW2 = 2,62$ А; Фазовий зсув струму КО відносно фази В; $\varphi2 = 1,6617$ рад [341].

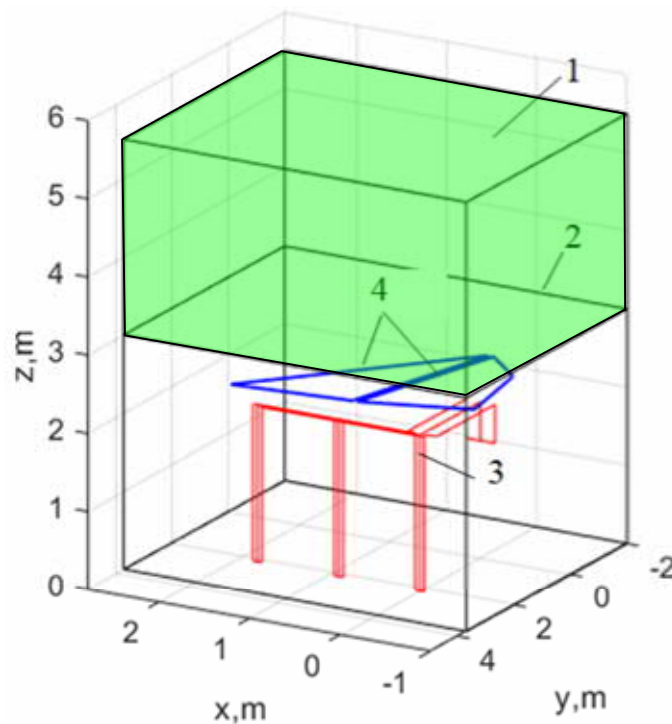


Рисунок 4.17 – Розташування житлового приміщення, ТП 100 кВА та САЕ з двома КО при $h_f = 1,0$ м: 1 – житлове приміщення; 2 – підлога; 3 – струмопровід ТП 0,4 кВ; 4 – КО САЕ

Як слідує з рис. 4.18, використання в САЕ двох КО дозволяє зменшити рівень МП у приміщенні з 7,84 до 0,51 мкТл (рис. 4.19) і реалізує ефективність екранування $SF = 15$ одиниць.

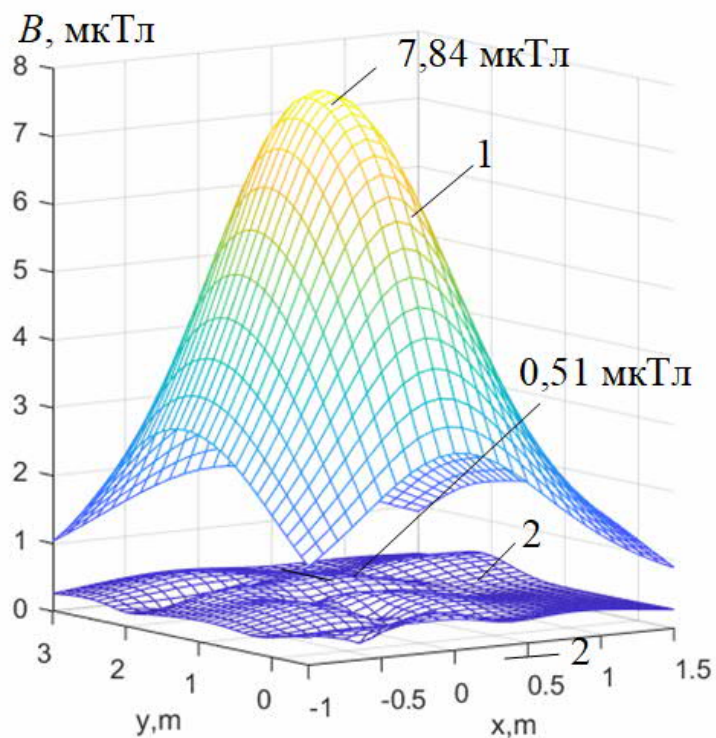


Рисунок 4.18 – Розподіл індукції МП ТП 100 кВА $I = 150$ А на підлозі приміщення ($h_f = 1,0$ м) при використанні синтезованої САЕ з двома КО:
1 – вихідний; 2 – екранований САЕ з двома КО

С) Синтез САЕ з однією КО для ТП 100 при $h_f = 1,2$ м. Визначимо ефективність САЕ для ТП 100 кВА на відстані $h_f = 1,2$ м, де максимальне значення індукції МП ТП становить 5,27 мкТл (рис. 4.19).

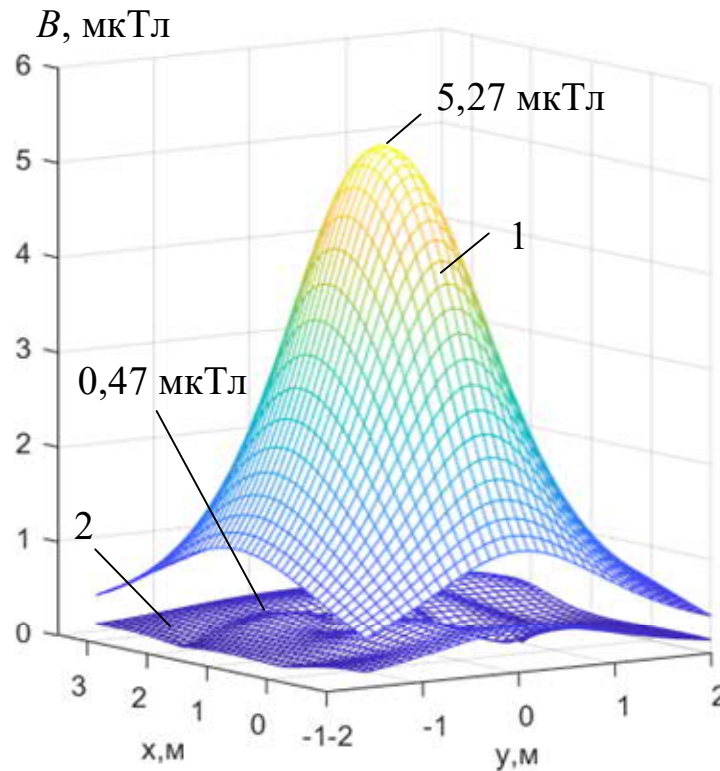


Рисунок 4.19– Розрахунковий розподіл індукції МП ТП 100 кВА $I = 150$ А на підлозі приміщення ($h_f = 1,2$ м) при використанні синтезованої САЕ:

1 – вихідний; 2 – екранований САЕ з однією КО

САЕ реалізуємо з однією КО (рис. 4.15) з наступними параметрами. Координати кутів КО: $x_1 = -0,529$ м; $x_2 = -0,579$ м; $x_3 = 0,858$ м; $x_4 = 0,283$ м; $y_1 = -0,302$ м; $y_2 = 2,245$ м; $y_3 = 2,494$ м; $y_4 = -0,383$ м; Відстань між КО та струмопроводом; $h_k = 0,205$ м; Ампер-витки КО; $IW = 34,35$ А; Фазовий зсув струму КО відносно фази В; $\varphi = 1,5697$ рад [341].

Синтезована САЕ дозволяє зменшити рівень індукції МП у приміщені з 5,27 мкТл до 0,47 мкТл та реалізує ефективність екранування $SF = 11$ одиниць.

Д) Синтез САЕ з двома КО для ТП 400 кВА. Результати розрахунку МП ТП 400 кВА та МП екранованого САЕ на відстані $h_f = 0,8$ м, (рис. 4.20) [341] показали наступне:

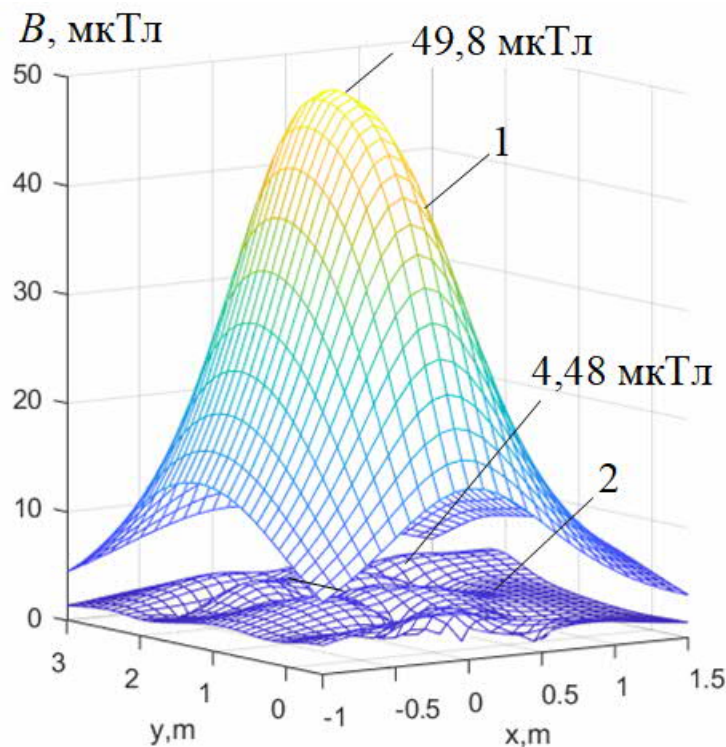


Рисунок 4.20 – Розподіл індукції МП ТП 400 кВА $I = 600$ А на підлозі приміщення ($h_f = 0,8$ м) при використанні синтезованої САЕ з двома КО.

1 – вихідний; 2 – екранований САЕ

Максимальне вихідне значення індукції МП ТП 400 кВА становить 49,8 мкТл, що перевищує гранично допустимий рівень індукції МП (0,5 мкТл) у 100 разів; Максимальне екрановане значення індукції МП ТП 400 кВА при використанні САЕ з двома КО становить 4,48 мкТл. При цьому САЕ має ефективність екранування $SF = 11$ одиниць.

Е) Синтез САЕ з двома КО для ТП 400 кВА при $h_f = 1,6$ м.

Результати розрахунку МП ТП 400 кВА та МП екранованого САЕ на відстані $h_f = 1,6$ м, (рис. 4.21) [341] показали наступне: максимальне значення індукції МП ТП 400 кВА становить 10,9 мкТл; максимальне значення індукції МП ТП 400 кВА екрановане САЕ з двома КО зменшилося до 0,48 мкТл. Синтезована САЕ має ефективність екранування $SF = 22$ одиниці.

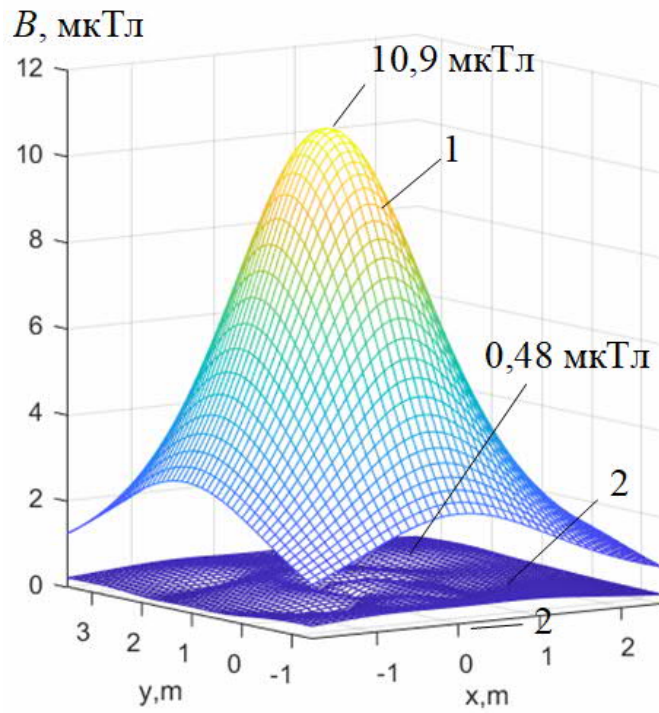


Рисунок 4.21 – Розподіл індукції МП ТП 400 кВА $I = 600$ А на підлозі приміщення ($h_f = 1,6$ м) при використанні синтезованої САЕ з двома КО.

1 – вихідний; 2 – екранований САЕ

4.6 Експериментальна перевірка розробленого методу синтезу систем активного екранування

Експериментальна перевірка виконана на повномасштабному лабораторному макеті низьковольтного струмопроводу ТП 100 кВА (рис. 4.5) з лабораторним макетом САЕ (рис. 4.22) шляхом порівняння результатів розрахунку МП синтезованої САЕ з результатами вимірів на основі експерименту.

Для проведення експериментальних досліджень синтезованої САЕ використаний повномасштабний лабораторний макет трифазного низьковольтного струмопроводу ТП 6/0,4 кВ, 100 кВА (рис. 4.11), а також створений лабораторний макет САЕ МП ТП (рис. 4.22) [341, 354, 355].

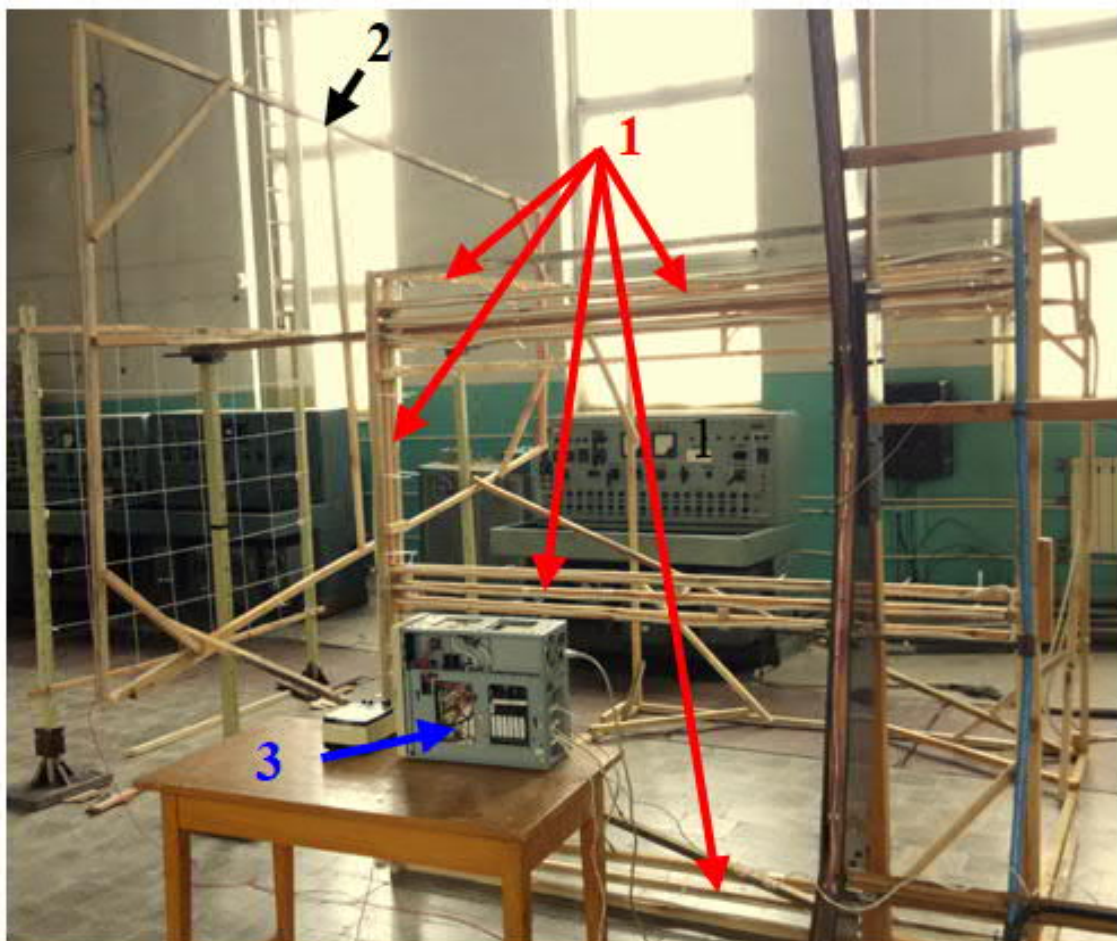


Рисунок 4.22 – Лабораторний макет струмопроводу низької напруги
ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА, $I = 150$ А з лабораторним макетом САЕ:

- 1 – струмопровід низької напруги ТП;
- 2 – компенсаційна обмотка САЕ;
- 3 – система управління САЕ

Макет струмопроводу (рис. 4.22) виготовлено з дерев'яних рейок і проводу ПВС перерізом 30 мм^2 та встановлено на робочому місці Магнітовимірювального стенду магнітодинамічного комплексу ІЕМС НАН України [15].

Лабораторна установка (рис. 4.23) складається макета струмопроводу низької напруги ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА (рис. 4.22), який живиться через індукційний регулятор типу ІР 59/32 (рис. 4.24 б), що забезпечує регулювання трифазного струму в межах 0–220 А .

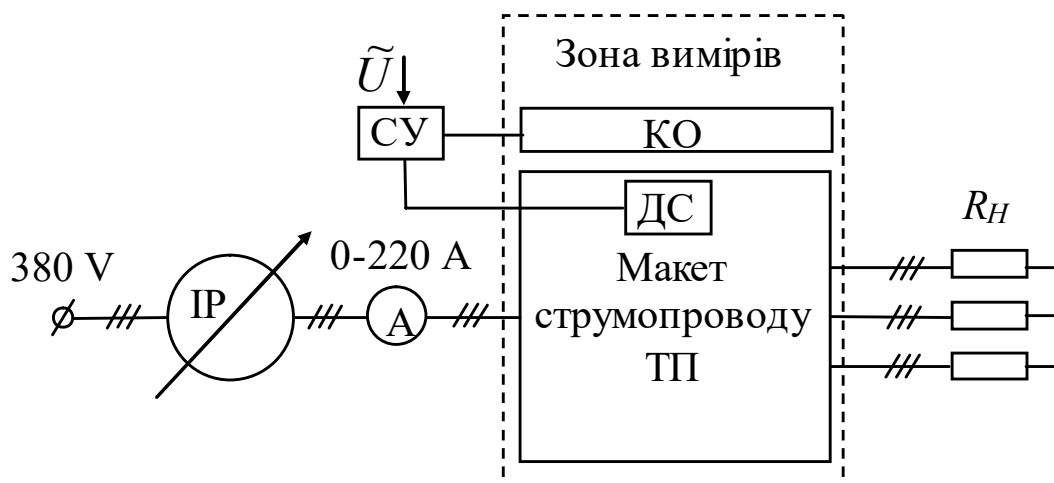


Рисунок 4.23 – Електрична схема лабораторної установки з макетами струмопроводу ТП 100 кВА і САЕ



а



б

Рисунок 4.24 – Силлові частини лабораторної установки
(а) індукційний регулятор IP-59/32; (б) модуль навантаження (R_H)

Вимірювання ефективних значень індукції магнітного поля виконувались у вузлах координатної сітки з кроком 0,25 м за допомогою магнітометру Magnetoscor 1.069 на контрольній площині, розташованій на відстані 1 м від струмопроводу [356, 357].

Для спрощення проведення експерименту макет ТП було покладено на бік (рис. 4.22). У такому положенні вимірювання проводили на вертикальній

площині, що знаходиться на відстані 1 м від струмопроводу, що відповідає умовам виконаних розрахунків.

На рис. 4.25 а представлені результати вимірів індукції екранованого МП ТП 100 кВА на підлозі при $h_f = 1$ м [341]. Максимальне значення індукції МП при роботі САЕ складає 0,49 мкТл. Ефективність екранування складає $SF = 10,2$ одиниць.

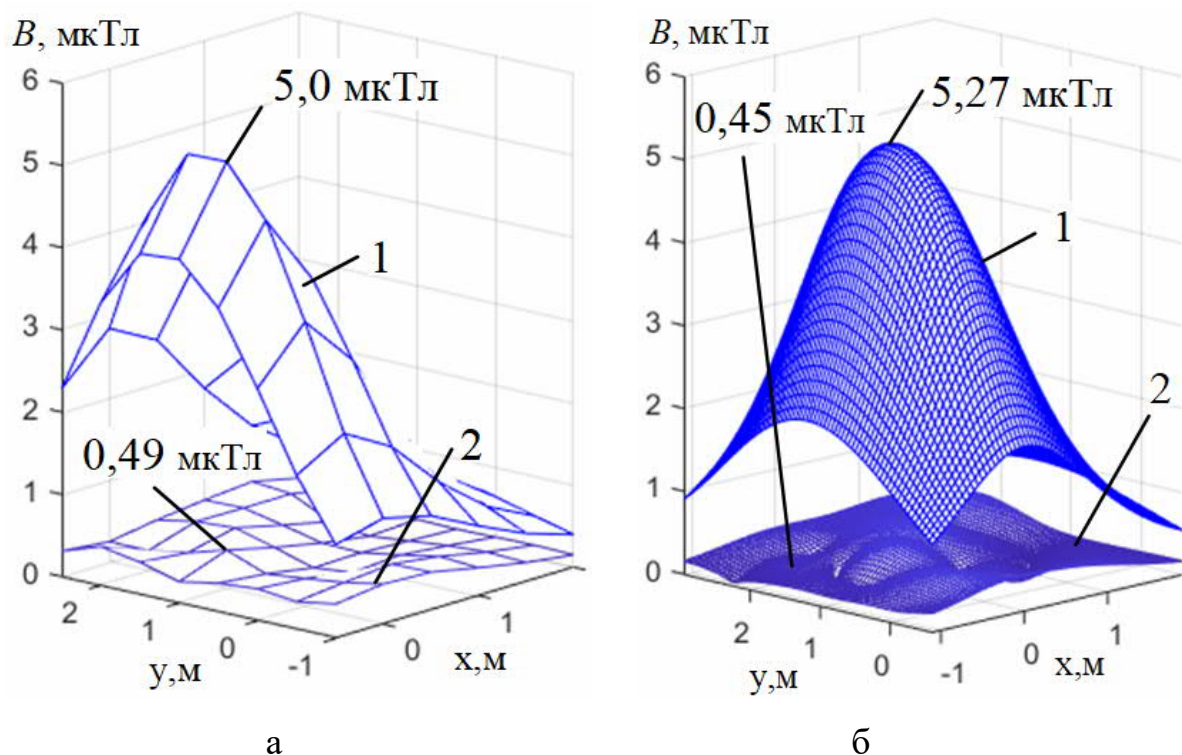


Рисунок 4.25 – Розподіл індукції МП ТП 100 кВА $I = 150$ А на підлозі приміщення ($h_f = 1$ м) при використанні синтезованої САЕ (а) експеримент (б) розрахунок: 1 – вихідний; 2 – екранований

Порівняння результатів вимірів (рис. 4.25 а) з результатами розрахунку МП ТП (рис. 4.25 б) з показує, що їх розкид не перевищує 10 %. Це підтверджує коректність запропонованого автором удосконаленого методу синтезу САЕ МП ТП і дозволяє вважати запропоновані автором математичну модель МП ТП та методики розрахунку на її основі верифікованими.

4.7 Узагальнення результатів досліджень ефективності синтезованих систем екранування

Узагальнені і верифіковані розрахункові залежності індукції МП в житлових приміщеннях над вбудованими ТП потужністю 100кВА-400кВА в функції $h_f=[0,8-1,6\text{ м}]$ при використанні синтезованих САЕ, приведених на рис. 4.16, 4.17, 4.19-4.21, та інших САЕ для ТП, синтезованих за розробленою методикою, представлені на рис. 4.26 у вигляді графіків (криві 1-4).

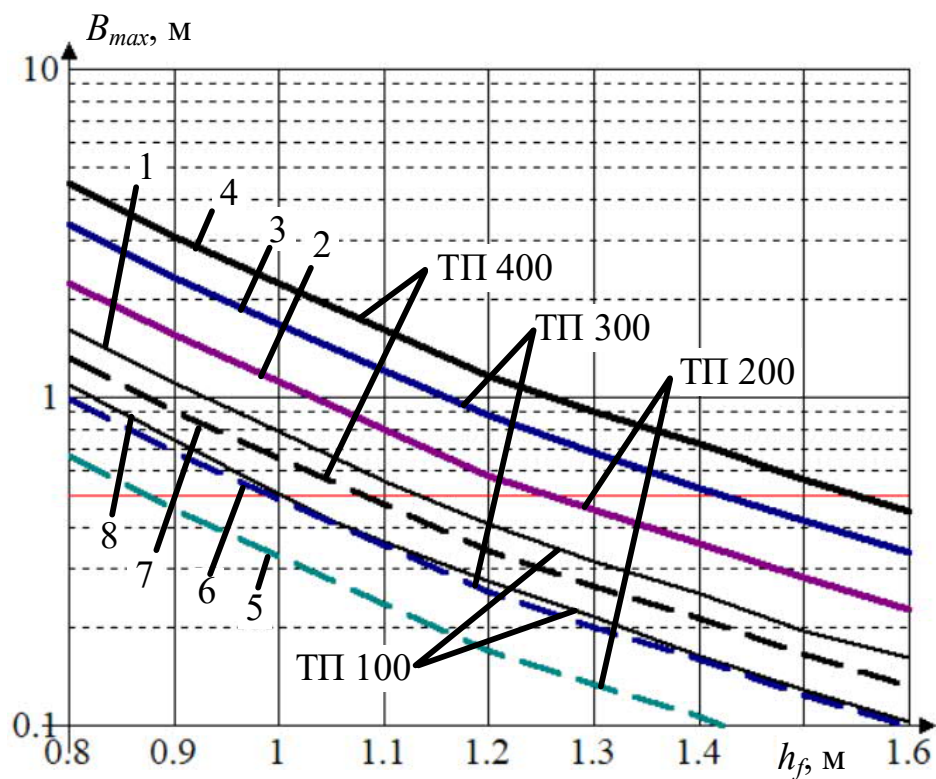


Рис. 4.26 – Індукція МП над вбудованими ТП при окремому використанні синтезованих САЕ (1-4), та використанні САЕ сумісно з пасивними екранами (ПЕ) (5-8): 1 – САЕ з однією КО; 2-4– САЕ з двома КО; 5-8 – САЕ з двома КО та U-подібним ПЕ

Їх аналіз дозволяє сформулювати наступні умови, виконання яких достатньо для нормалізації МП в житлових приміщеннях над ТП 100-400 кВА:

– МП ТП 100 кВА може бути нормалізоване при: $h_f \geq 1,2$ м в разі використання синтезованої САЕ з однією КО; при $h_f \geq 1,0$ м – САЕ з двома КО;

– МП ТП 200 кВА може бути нормалізоване при: $h_f \geq 1,27$ м в разі використання синтезованої САЕ з двома КО; при $h_f \geq 1,0$ м необхідне додаткове екранування з ефективністю екранування 2,3 од.;

– МП ТП 300 кВА може бути нормалізоване при: $h_f \geq 1,42$ м може бути нормалізоване в разі використання синтезованої САЕ з двома КО; при $h_f \geq 1,0$ м необхідне додаткове екранування з ефективністю 3,4 од.;

– МП ТП 400 кВА при: $h_f \geq 1,55$ м може бути нормалізоване в разі використання синтезованою САЕ з двома КО; при $h_f \geq 1,0$ м необхідне додаткове екранування з ефективністю екранування 4,5 од.

Таким чином, для нормалізації МП над ТП потужністю 200-400 кВА при $h_f \approx 1,0$ м відповідно до рис. 4.26 (криві 5-8), необхідне сумісне використання як розглянутих синтезованих САЕ, так і ПЕ з коефіцієнтом екранування 2-5 од. В якості таких ПЕ можуть бути використані відомі [261] U-подібні електропровідні екрани з листового алюмінію товщиною 2-4 мм, що розміщуються на стелі приміщення ТП відповідно до рис. 4.14.

Таким чином, синтезовані автором САЕ при додатковому використанні відомих ПЕ з ефективністю 2-5 од. дозволяють зменшити індукцію МП в житлових приміщеннях над ТП потужністю 100-2х400 кВА до нормативного рівня 0,5 мкТл при $h_f \geq 1,0$, що в цілому є достатнім для захисту здоров'я населення більшості будинків старої забудови з вбудованими ТП.

Очевидно, що при визначенні конкретних засобів екранування необхідно враховувати їх техніко-економічні параметри. Так, САЕ з двома КО [153] практично вдвічі дорожча від простішої САЕ з однією КО, а ПЕ істотно дорожчі від САЕ відповідної ефективності.

Нормалізація МП для ТП потужністю 400-800 кВА (400- 2х400 кВА), що виконуються в двохтрансформаторному виконанні [153, 341] з двох секцій половинної потужності, проводиться для кожної секції окремо відповідно до сформульованих вище умов.

4.8 Висновки за четвертим розділом

1. Вперше експериментально визначено розподіл індукції МП над міськими ТП 6(10)/0,4 кВ старої забудови потужністю до 400 (2х400) кВА на висоті від 1,0 до 3 м від їх струмопроводів, де можуть розташовуватися житлові приміщення. Показано, що індукція МП досягає від 8,0 до 30,0 мкТл, що добре узгоджується з результатами досліджень інших авторів. Отримані результати істотно перевищують ГДР санітарних норм для житлових приміщень (0,5 мкТл), що обумовлює необхідність істотного зменшення МП над вбудованими ТП.

2. На основі закону Біо-Савара та принципу суперпозиції побудовано нову аналітичну математичну модель МП ТП, яка не має обмежень з відстані до розрахункової зони.

3. З використанням запропонованої математичної моделі вперше розроблено нову аналітичну методику розрахунку МП вбудованої ТП 6(10)/0,4 кВ, інваріантну до відстані між ТП та точкою спостереження. Виявлено близький до дипольного характер розподілу МП над ТП, що підтверджує можливість його ефективного зменшення простішими системами активного екранування з однією компенсаційною обмоткою.

4. Здійснено верифікацію розроблених математичної моделі та методики розрахунку МП шляхом експериментальних досліджень повномасштабного лабораторного макету струмопроводу ТП потужністю 100 кВА на магнітовимірювальному стенді інституту. Вимірювання підтвердили співпадіння результатів розрахунку та експерименту з розкидом не більш 5 %, що свідчить про коректність розроблених математичної моделі та методики розрахунку та можливість її коректного та ефективного практичного застосування.

5. Набули подальшого розвитку метод та методика синтезу САЕ МП ТП при малих (1,0–1,6 м) відстанях від ТП до підлоги житлового приміщення, та проведена його експериментальна перевірка на повномасштабному фізичному макеті ТП 100 кВА з фізичним макетом синтезованої САЕ, що підтвердила

співпадіння результатів моделювання (синтезу) та експерименту з похибкою менш 10 %.

6. Набув подальшого розвитку метод синтезу САЕ МП ТП потужністю 100-2х400 кВА, та розроблені САЕ на його основі, які дозволяють нормалізувати індукцію МП в житлових приміщеннях над вбудованими ТП 100 кВА при відстанях $\geq 1,0$ м , ТП 200 кВА при відстанях $\geq 1,27$ м , ТП 300 кВА при відстанях $\geq 1,42$ м , ТП 400 кВА при відстанях $\geq 1,55$ м. Показана можливість нормалізації МП над ТП 100-400 (2х400) кВА при мінімальній відстані 1,0 м між ТП та підлогою приміщенняв разі комплексного використання як синтезованих САЕ, так і відомих пасивних електромагнітних екранів з коефіцієнтом екранування від 2,3 до 4,5 од.

7. Результати досліджень у цьому розділі опубліковані у роботах здобувача [333-335, 337, 339-345, 348, 353-357] і впроваджені відповідно до додатків В3, В5, В6 дисертації.

РОЗДІЛ 5

МАГНІТНЕ ПОЛЕ ВНУТРІШНІХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ ТА МЕТОДИ ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ ДО БЕЗПЕЧНОГО РІВНЯ

5.1 Загальні положення

Як показано в розділі 1 дисертації, основними внутрішніми джерелами МП в житлових приміщеннях, що підлягають подальшому дослідженню, є максимально наближені до житлових приміщень ВЕЖ і СКЕ.

Кабелі ВЕЖ (рис. 5.1 а) зі струмом до 30 А розташовані в стінах житлових приміщень, а кабелі СКЕ (рис. 5.1 б, в) з номінальним струмом 10 А змонтовані під покриттям підлоги приміщень на глибині 0,05–0,1 м.

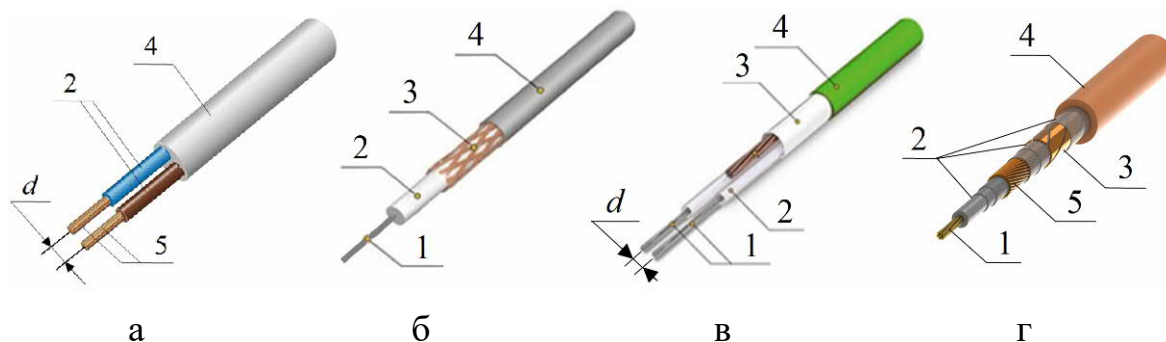


Рисунок 5.1 – Конструктивне виконання типових двожильного планарного кабелю ВЕЖ (а) та одножильного (б) та двожильних планарних (в) і коаксиальних (г) нагрівальних кабелів СКЕ

- 1, 5 – нагрівальні (струмопровідні) жили,
- 2 – електроізоляція,
- 3 – електропровідний заземлювальний екран;
- 4 – зовнішня електроізоляція

Тому рівень МП в житловому приміщенні, що формується ВЕЖ та СКЕ, залежить від конструкції використаних кабелів (рис. 5.1) і схеми їх прокладання в житловому приміщенні [343, 358, 359].

В цьому розділі визначимо та експериментально обґрунтуємо: математичні моделі МП та методики його розрахунку для одножильних та дво жильних планарних та коаксиальних (рис. 5.1) кабелів ВЕЖ та СКЕ; математичні моделі та методики розрахунку МП ВЕЖ та СКЕ з різними типами кабелів та типовими схемами їх прокладання і їх вплив на на житлові приміщення; виконаємо санітарно-гігієнічну оцінку МП, що створюється ВЕЖ та СКЕ в житлових приміщеннях, та визначимо методи нормалізації МП при використанні ВЕЖ та СКЕ.

5.2 Магнітне поле одножильних та дво жильних планарних прямо лінійних кабелів

Математичні моделі МП прямо лінійних кабелів.

При побудові моделі приймемо наступні припущення, які дозволяють спростити моделювання, але істотно не впливають на його результат:

1. Довжина L кабелю суттєво (на порядок) більша від відстані r до точки спостереження P , а також від відстані d між осями жил дво жильних кабелів, що дозволяє розглядати їх як нескінченні;

2. НК моделюються паралельними прямо лінійними провідниками у вигляді струмових ниток, розташованих у горизонтальній площині;

3. МП НК є потенційним і плоскопаралельним;

4. Впливом зовнішніх феромагнітних (електропровідних) елементів та джерел МП житлового приміщення, а також електропровідного екрану 3 (рис. 5.1) НК нехтуємо;

5. Напруга мережі живлення кабелів ВЕЖ і НК синусоїдальна частотою 50 Гц;

6. ВЕЖ працює в робочому режимі, при якому струми витоку в контурі заземлення відсутні.

Одножильний прямолінійний кабель (рис. 5.1 б).

Відповідно до закону повного струму в інтегральній формі [54], лінійний інтеграл напруженості $\mathbf{H}$ МП уздовж замкнутого контуру дорівнює електричному струму I крізь поверхню, обмежену цим контуром:

$$\oint_L (\mathbf{H}, d\mathbf{l}) = I. \quad (5.1)$$

Застосовуючи (5.1) до кола, що лежить на площині з радіусом r і центром у точці, через яку проходить нескінченний провідник, який представляє собою жилу одножильного кабелю, отримаємо:

$$2\pi r H = I. \quad (5.2)$$

За допомогою (5.2) виявимо залежність напруженості МП нескінченного одножильного кабелю від струму його жили, координат осі жили (x_c, y_c) , та координат точки спостереження $P(x, y)$:

$$H(r) = \frac{I}{2\pi r^*}, \quad r^* = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}. \quad (5.3)$$

Із (5.3) за умов $x = r, y = 0$ отримаємо відоме [16, 54] співвідношення, що визначає індукцію МП на відстані r від одиночного одножильного прямолінійного НК із струмом жили I :

$$B_{OK} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}. \quad (5.4)$$

Двожильний планарний прямолінійний кабель (рис. 5,1 а, в)

Як показано автором в [343, 358], максимальне значення індукції МП двожильного планарного кабелю, розташованого в горизонтальній площині ХУ із відстанню між паралельними жилами d і струмами в них $\pm I$, розподілено по вертикальній осі Z. В загальному випадку задача визначення МП такого НК може бути вирішена виключно чисельними методами [343]. Однак, якщо розглядати МП тільки вздовж осі Z, на висоті h від НК, то задача в силу симетрії суттєво спрощується.

Схема розташування двожильного планарного прямолінійного кабелю, розташованого в горизонтальній площині, що використовується в ВЕЖ та СКЕ, представлена на рис. 5.2. Основними параметрами, що впливають на МП цього двожильного кабелю є відстань d між осями його жил Ж1, Ж2, а також діюче значення різноспрямованого струму I ($I_1 = -I_2$) в його жилах.

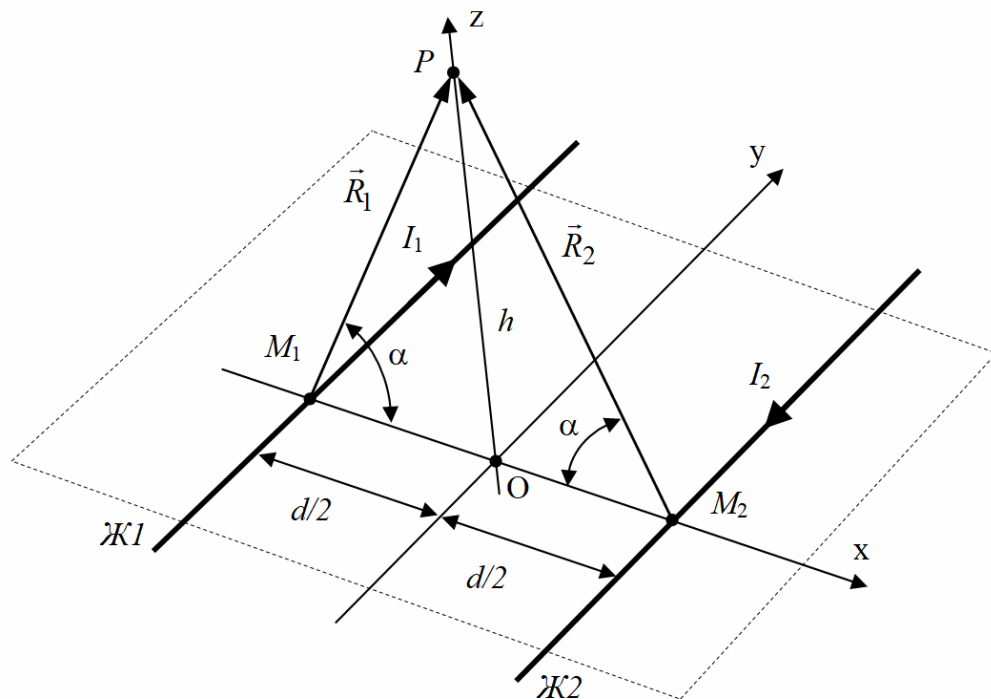


Рисунок 5.2 – Розташування двожильного кабелю із жилами Ж1 і Ж2 на горизонтальній площині

При побудові математичної моделі МП, планарний двожильний кабель моделюються паралельними прямолінійними провідниками у вигляді струмових ниток, розташованих у горизонтальній (XY) або вертикальній (XZ) площині. МП в точці P (рис. 5.2) може бути визначено на основі закону Біо-Савара [54] як суперпозиція МП від окремих жил кабелю. При цьому максимальні діючі значення напруженості МП кабелю відповідно до [54, 343, 358] будуть зосереджені по лінії $O-P$, яка ортогональна площині розташування кабелю і є віссю симетрії для його жил.

Модулі векторів $\vec{R}_1$ і $\vec{R}_2$, які спрямовані в точку спостереження P , в силу симетрії будуть однакові і відповідно до рис. 5.2 дорівнюють:

$$|\vec{R}| = R = \sqrt{\frac{d^2}{4} + h^2}. \quad (5.5)$$

Модулі напруженості МП кожного із струмів I будуть також однакові і на основі (5.4) складають:

$$|\vec{H}| = H = \frac{I}{2\pi h}; I_1 = -I_2. \quad (5.6)$$

При максимумі МП, вектори $\vec{H}_1$ (рис. 3 а) і $\vec{H}_2$ (рис. 5.3 б), що створюються зустрічними струмами I_1 та I_2 , є ортогональними до відповідних радіус-векторів $\vec{R}_1$ і $\vec{R}_2$. Тут $H_{1,x}$, $H_{1,z}$ – компоненти (проекції) вектору $\vec{H}_1$ на відповідні координатні осі.

З рис. 5.3 слідує, що:

$$H_{1,x} = -|\vec{H}| \sin \alpha, \quad H_{1,z} = |\vec{H}| \cos \alpha; \quad (5.7)$$

$$H_{2,x} = |\vec{H}| \sin \alpha, \quad H_{2,z} = |\vec{H}| \cos \alpha, \quad (5.8)$$

де $H_{2,x}$, $H_{2,z}$ компоненти (проекції) вектора $\vec{H}_2$ на відповідні осі.

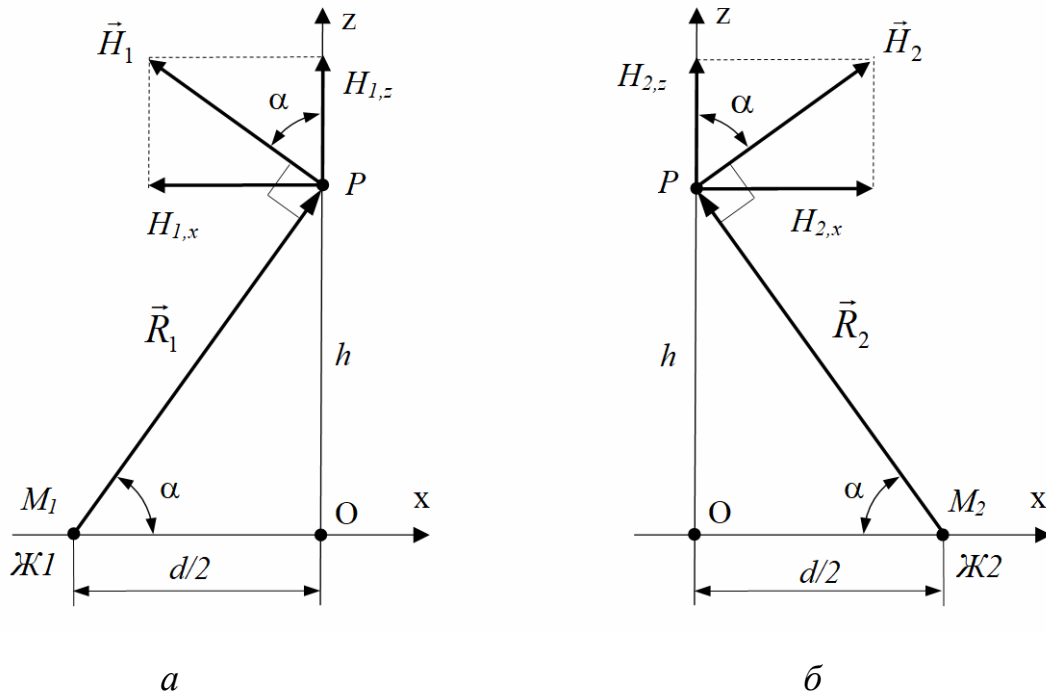


Рисунок 5.3 – До визначення максимуму напруженості МП від окремих жил
двожильного кабелю (*a* - $\vec{H}_1$; *б* - $\vec{H}_2$)

Визначимо компоненти напруженості МП $H_{0,x}$, $H_{0,z}$ в точці P як суму відповідних компонент із (5.7, 5.8):

$$H_{0,x} = -|\vec{H}| \sin \alpha + |\vec{H}| \sin \alpha = 0, \quad (5.9)$$

$$H_{0,z} = 2|\vec{H}| \cos \alpha. \quad (5.10)$$

З рис. 5.2 також слідує, що:

$$\cos \alpha = \frac{d}{2h}. \quad (5.11)$$

Тоді відповідно до (5.10) із урахуванням (5.5), (5.6) і (5.11) отримаємо:

$$H_{0,z} = 2 \cdot \frac{I}{2\pi \cdot h} \cdot \frac{d}{2h} = \frac{I}{\pi \cdot h^2} \cdot \frac{d}{2} = \frac{I \cdot d}{2\pi \left(\frac{d^2}{4} + h^2 \right)}. \quad (5.12)$$

Переходячи в (5.12) до індукції МП, отримаємо наведене у [343] розрахункове співвідношення для визначення максимального діючого значення індукції МП на відстані h від осі прямолінійного двожильного кабелю, розташованого у площині ХУ (для нагрівального кабелю), або ХZ (для кабелю ВЕЖ) [358]:

$$B_{K \max} = \mu_0 H_{0,z} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I \cdot d}{\left\{ h^2 + (0,5d)^2 \right\}}, \text{ де } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.} \quad (5.13)$$

За умови $h > 3d$, коли МП кабелю набуває дипольного характеру [99], співвідношення (5.13) може бути спрощене і представлене як [26]:

$$B_{K \max} \approx \frac{\mu_0 \cdot I \cdot d}{2\pi h^2}. \quad (5.14)$$

Таким чином, на основі виконаного вище аналізу, теоретично підтверджена коректність наведеного автором у [343] співвідношення (5.13) для індукції МП двожильного планарного кабелю. Виконаємо тепер його верифікацію.

Верифікація отриманого розрахункового співвідношення (5.13).

Верифікацію виконуємо шляхом порівняння результатів розрахунку відповідно до (5.13), та комп'ютерного розрахунку за діючою в Міненерго верифікованою методикою [308], а також результатами експерименту з вимірювання розподілу МП двожильного кабелю «Arnold Rak 6101-20 ЕС» [289].

Експеримент виконувався на магнітовимірювальному стенді інституту [15] за методикою, описаною в [343]. Результати порівняння зведені до табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати порівняння розрахунку МП двожильного кабелю ($d = 2,2$ мм, $I = 10$ А) за отриманим співвідношенням (5.13) з розрахунком за діючою методикою [308] та результатами експерименту

№ п п	h , мм	$B_{K\max s}$ за отриманим співвідношен ням (9), мкТл	$B_{K\max b}$ за методикою СОУ-Н ЕЕ 20.179, мкТл	$B_{K\max e}$ за результатами експерименту мкТл	Похибка за результатами тестового розрахунку, δ_b , %	Похибка за результат ами експериме нту, δ_e , %
5	5,0	167,8749	167,8749	171,1	0	1,88
6	6,0	118,2478	118,2478	113,3	0	4,37
7	7,0	87,63195	87,63195	90,4	0	3,06
8	8,0	67,47431	67,47431	64,7	0	4,29
9	9,0	53,52147	53,52147	52,5	0	1,95
10	10	43,47397	43,47397	42,1	0	3,26
11	20	10,96683	10,96683	10,9	0	0,61
12	30	4,882325	4,882325	5,01	0	2,55
13	40	2,747922	2,747922	2,71	0	1,40
14	50	1,759149	1,759149	1,75	0	0,52
15	60	1,221812	1,221812	1,17	0	4,43
16	70	0,897737	0,897737	0,93	0	3,47
17	100	0,439947	0,439947	0,46	0	4,36
18	150	0,195545	0,195545	0,19	0	2,92
19	200	0,109997	0,109997	0,105	0	4,76

Похибка δ_b , δ_e визначена як:

$$\delta_i = \frac{|B_{K \max i} - B_{K \max s}|}{B_{K \max i}} \cdot 100\%, \quad (5.15)$$

де $i = (b, e)$; $B_{K \max b}$ – індукція МП отримана за методикою СОУ-Н ЕЕ 20.179; $B_{K \max e}$ – індукція МП отримана за результатами експерименту; $B_{K \max s}$ – індукція МП отримана за співвідношенням (5.13).

За даними табл. 5.1 побудовані графіки залежності модуля індукції МП кабелю від відстані h від його осі до точки спостереження, які представлені на рис. 5.4.

Як слідує з табл. 5.1, та рис. 5.4, розрахунок за отриманим співвідношенням (5.13) повністю співпадає із тестовим розрахунком за методикою СОУ-Н ЕЕ 20.179 [308]. Розрахунок за (5.13) також співпадає з результатами експерименту в межах визначеної в [308] похибки вимірювання МП (5 %). Тому отримані результати верифікації повністю підтверджують коректність отриманого розрахункового співвідношення (5.13).

Отримане розрахункове співвідношення (5.13) теоретично обґрунтоване, успішно верифіковане, і може широко використовуватися для визначення максимальних діючих значень індукції МП прямолінійних двожильних кабелів електропроводки та електрообігріву підлог житлових приміщень.

Таким чином, на основі закону Біо-Савара і принципів суперпозиції та симетрії, вперше розроблена математична модель МП та просте розрахункове співвідношення для визначення максимальних діючих значень індукції магнітного поля прямолінійного двожильного кабелю [343, 358]. Ці максимальні значення зосереджені по осі симетрії жил кабелю, ортогональній площині його розташування. Здійснено успішну верифікацію отриманих математичної моделі та розрахункового співвідношення шляхом співставлення отриманих на його основі результатів з результатами тестового комп'ютерного розрахунку, а також результатами натурного експерименту.

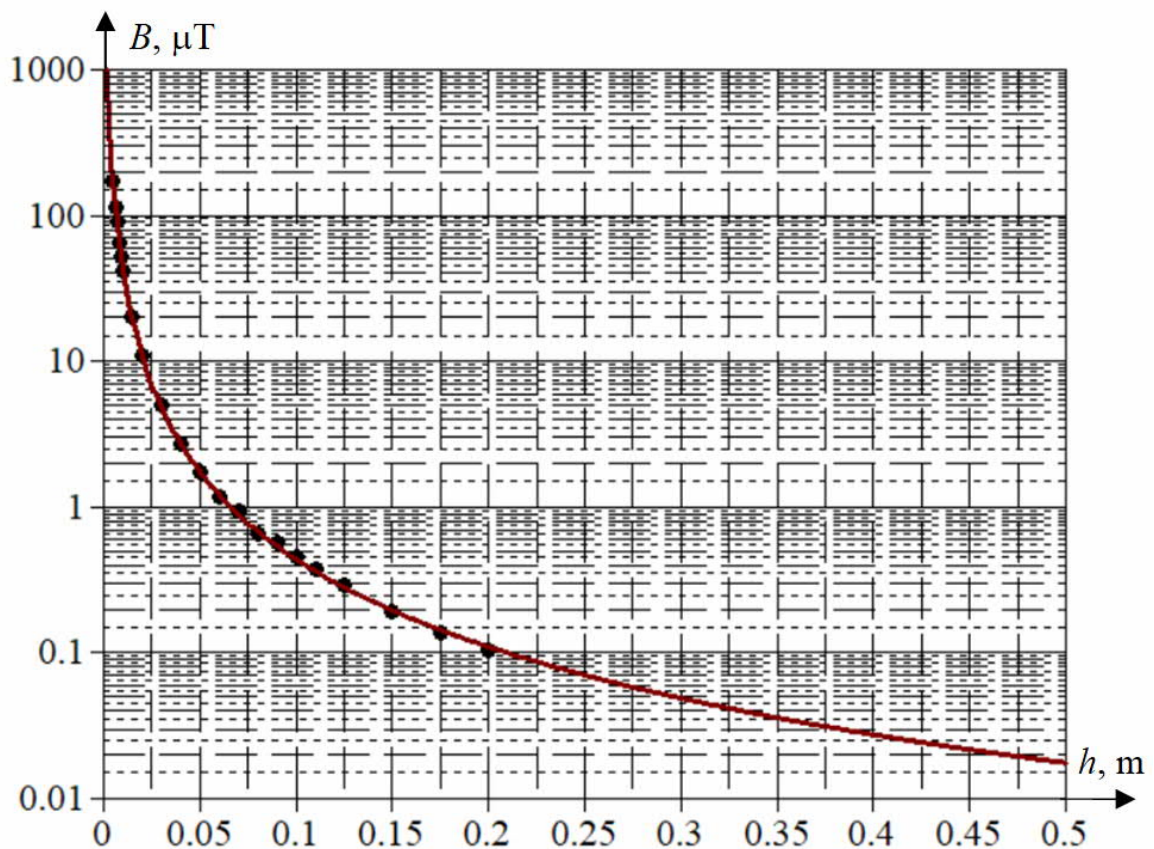


Рисунок 5.4 – Розрахункові — та експериментальні ••• значення індукції МП прямолінійного двожильного кабелю типу «Arnold Rak 6101-20 EC», $d = 2,2$ мм, $I = 10$ А при віддаленні на відстань h , (розрахунок за (5.13))

Практичне використання отриманого і верифікованого розрахункового співвідношення (5.13) дозволяє спростити санітарно-гігієнічну оцінку відповідності індукції магнітного поля частотою 50 Гц діючому в Україні нормативному рівню 0,5 мкТл, буде сприяти скорішому вирішенню проблеми зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня.

5.3 Магнітне поле прямолінійних коаксіальних кабелів

Ідеальний коаксіальний НК (рис. 5.1 з) має дві розташовані симетрично електропровідні жили (зовнішню у вигляді полого циліндру та круглу внутрішню), осі яких співпадають (рис. 5.5 а).

Відомо [53, 360], що індукція МП нескінченного циліндричного провідника еквівалентно МП нитки з тим самим струмом, що проходить через вісь симетрії такого провідника. Відповідно, в ідеальному коаксіальному НК осі обох його провідників (рис. 5.5 а) збігаються, а їх струми різноспрямовані. Тому зовнішнє МП цих струмів взаємно компенсується і для ідеального коаксіального НК його результуюче МП за межами провідників буде відсутнє.

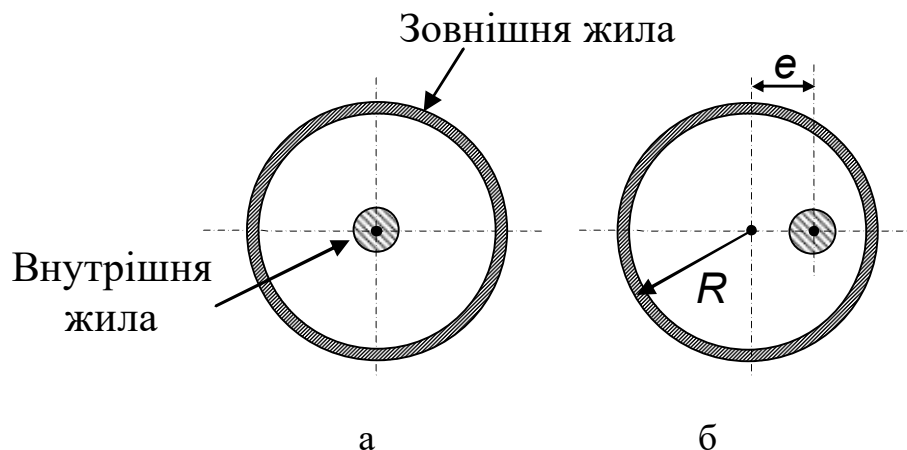


Рисунок 5.5 – Геометрія ідеального (симетричного) коаксіального кабелю СКЕ (а) та реального коаксіального кабелю (б), що має технологічний ексцентриситет e

Але при промисловому виробництві НК виникають технологічні відхилення від симетричної форми. При цьому геометрична вісь внутрішньої жили НК може зміщуватися (рис. 5.5 б) на величину ексцентриситету e [361, 362], що характеризує величину її відхилення від осі симетрії зовнішнього циліндричного провідника НК.

Величина технологічного розкиду ексцентриситету коаксіальних кабелів при серійному виробництві може складати 5–15 % (0,1–0,3 мм) від ідеальної відстані d між віссю його центральної жили і поверхнею циліндричної струмопровідної жили. Тоді зовнішнє МП реального коаксіального НК буде збігатися з МП умовного двожильного планарного НК (5.13), в якому відстань між його жилами дорівнює величині ексцентриситету ($d = e$).

Тому, як вперше показано автором в [343], зовнішнє МП реального коаксіального НК буде збігатися з МП умовного двожильного планарного НК (5.13), в якому відстань між його жилами d відповідає величині ексцентриситету e . З урахуванням викладеного та (5.13), індукція МП коаксіального НК:

$$B_{DKK \max} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I \cdot e}{\left\{ r^2 + (0,5e)^2 \right\}}. \quad (5.16)$$

5.4 Теоретичні та експериментальні дослідження індукції магнітного поля прямолінійних планарних та коаксіальних нагрівальних кабелів

Розрахунок індукції МП різних типів НК.

Використаємо отримані співвідношення (5.4), (5.13), (5.16) для інженерного розрахунку індукції МП НК як функції від відстані r до точки спостереження. Тут величина r відповідає глибині h_k прокладання НК (рис. 1.21), що визначає відстань від поверхні підлоги до осі жил НК. Результати розрахунку представлені на рис. 5.6.

Так, індукція МП одножильного НК при рекомендованій виробниками глибині прокладання 0,03–0,05 м [291–296] складає 40–65 мкТл. Це в 80–130 разів перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл, що виключає використання одножильних НК в житлових приміщеннях.

Індукція МП двожильних планарних НК при глибині прокладання 0,03–0,05 м в залежності від відстані між їх жилами d (рис. 5.6) складає від 2,0 до 5,5 мкТл, що перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл у 4–11 разів.

Індукція МП коаксіального НК при $e = 0,2$ мм і стандартній глибині прокладання 0,03–0,05 м складає (рис. 5.6) від 0,16 до 0,45 мкТл, що відповідає нормативному рівню 0,5 мкТл. Тому коаксіальні НК при обмеженні їх ексцентриситету на рівні $0,1d$ (приблизно 0,2 мм) можуть безпечно експлуатуватися у житлових приміщеннях при стандартній глибині прокладання 0,03–0,05 м.

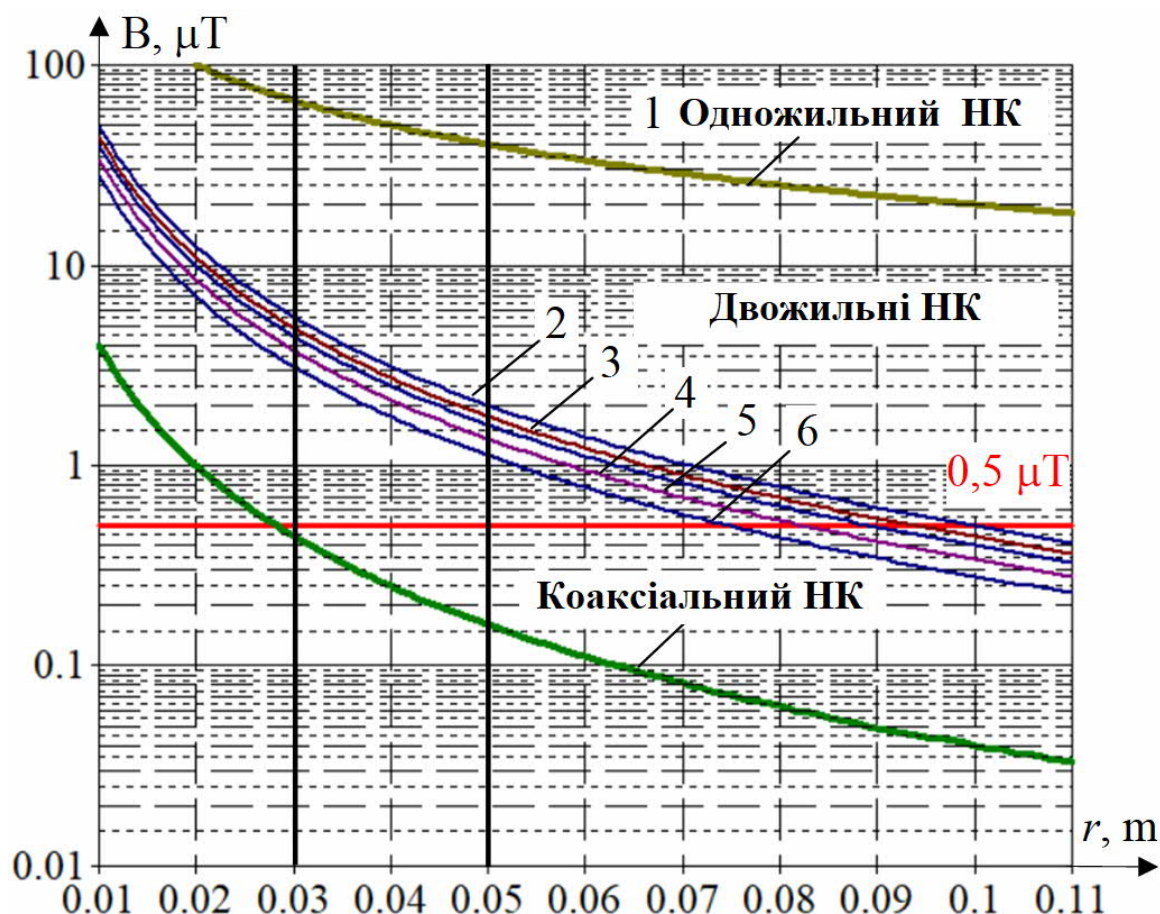


Рисунок 5.6 – Розрахункові значення індукції МП різних типів
 прямолінійних НК при віддаленні на відстань r по осі Z
 (двожильні НК з d : 2 – 2,5 мм; 3 – 2,2 мм; 4 – 2 мм; 5 – 1,7 мм;
 6 – 1,4 мм; коаксіальний НК з $e = 0,2$ мм); $I = 10$ А

Експериментальні дослідження індукції МП реальних НК.

Порівняльні результати теоретичних та експериментальних досліджень індукції МП реальних НК наведені на рис. 5.7. Вони представлені планарним двожи́льним НК типу «Arnold Rak 6101-20 EC» [289] та коаксіальним НК типу «Volterm» [295] при $e = 0,2$ мм і $0,05$ мм (криві 2, 3), який був спеціально наданий фірмою «VOLTERM» [295] для випробування на магнітовимірювальному стенді інституту.

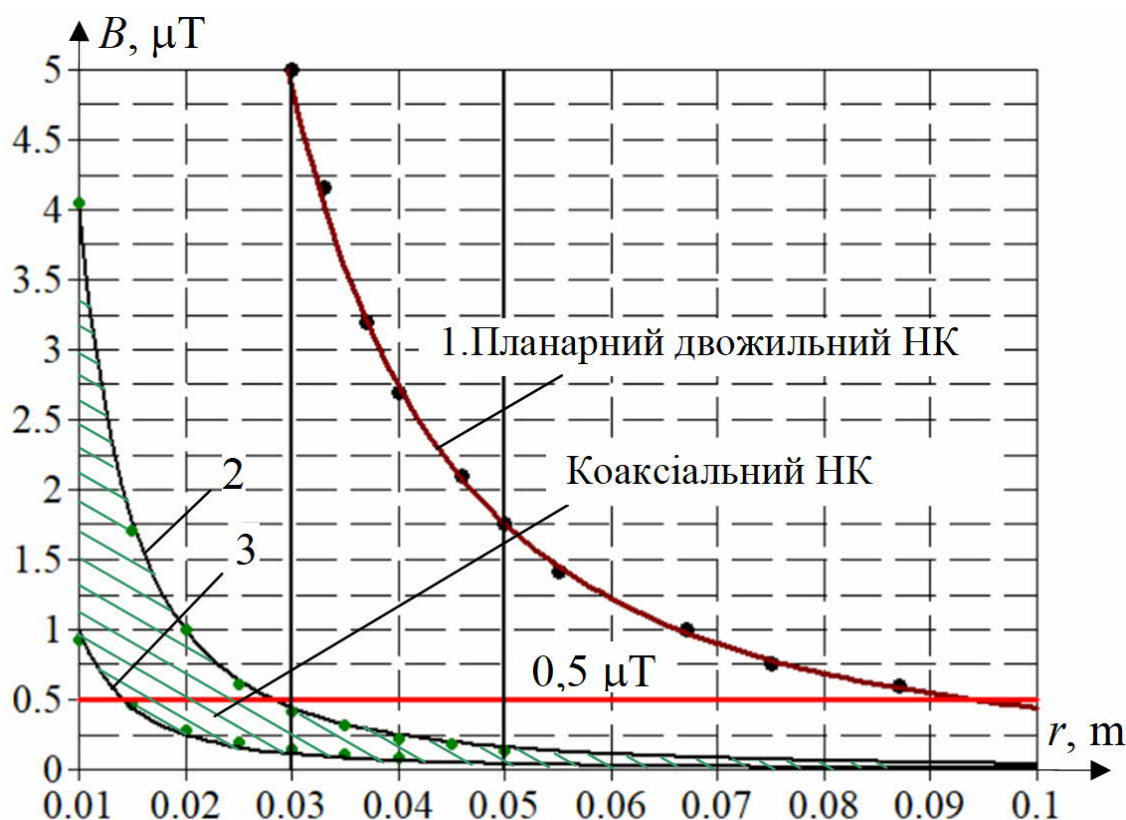


Рисунок 5.7 – Розрахункові — та експериментальні •••• значення індукції
 МП прямолінійних двожильного планарного НК типу
 «Arnold Rak 6101-20 EC», $d = 2,2$ мм (1), а також коаксіального НК
 типу «Volterm» (2, 3) з ексцентриситетом $e = 0,2-0,05$ мм, при
 віддаленні від них на відстань r по осі Z , $I = 10$ А

Порівняльний аналіз результатів розрахунку та експерименту (рис. 5.7) МП планарних НК показує, що вони відповідають розрахунковим значенням (рис. 5.6), а їх розкид не перевищує 5%.

Порівняльний аналіз результатів розрахунку та експерименту коаксіальних НК типу «VOLTERM» (рис. 5.7) підтверджує, що при максимально виявленому ексцентриситеті по їх довжині величиною 0,2 мм, вони створюють на порядок менше МП, ніж кращі планарні НК.

5.5 Магнітне поле внутрішніх електромереж та його вплив на житлові приміщення

Внутрішня електромережа живлення житлового приміщення (ВЕЖ) може мати струм до 30 А і живиться від однієї із фаз 220 В електромережі будинку [358, 359]. Типова ВЕЖ житлового приміщення (рис. 5.8) виконана із прокладених в стінах стандартних двожильних кабелів із відстанню між жилами d не більш 5 мм (типу ВВГ), які і є основним джерелом МП ВЕЖ.

Як показано в розділі 1 дисертації, ГДР індукції МП в житловому приміщенні регламентується (ПУЕ) і відповідно до табл. 1.3 вона не повинна перевищувати 0,5 мкТл на відстані більш 0,5 м від стін приміщення.

Виконаємо санітарно-гігієнічну оцінку рівня МП, що створюється ВЕЖ в житловому приміщенні.

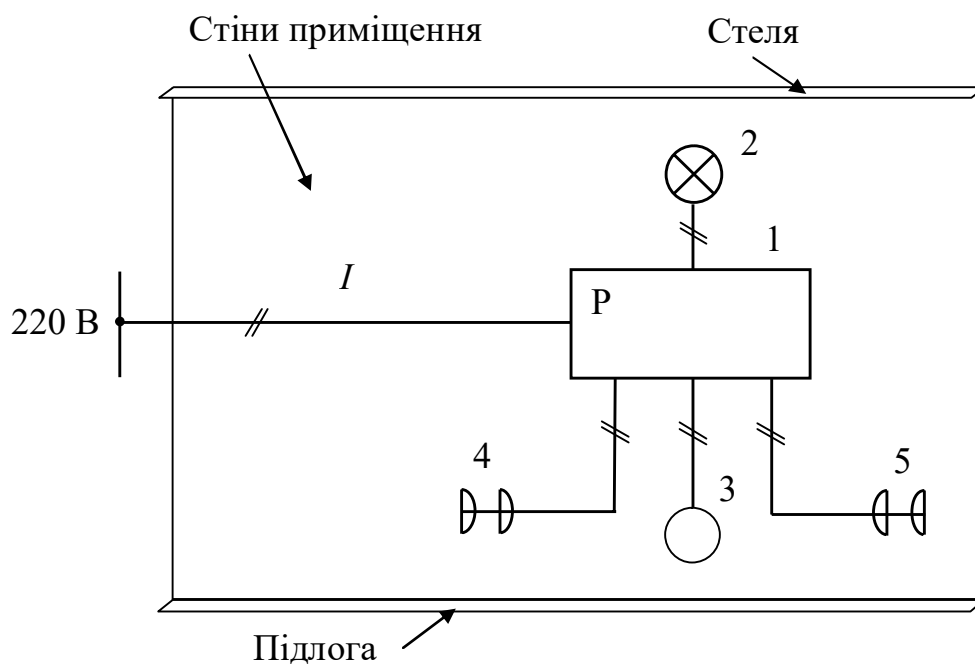


Рисунок 5.8 – Розміщення типових елементів ВЕЖ з двожильних кабелів в стіні житлового приміщення (2 – лампа освітлення; 3 – вимикач; 4, 5 – розетки)

Розрахунок максимальних значень індукції МП ВЕЖ виконаємо відповідно до співвідношення (5.13) для струмів 10-30 А на відстанях від стіни від 0,05 м до 0,5 м з урахуванням наступних припущень:

- максимальний струм кабелів ВЕЖ не перевищує 30 А;
- монтаж ВЕЖ виконано на основі виключно двожильних кабелів з максимальною відстанню між жилами 0,005 м [358, 359], в яких прямий та зворотний струми кожного контуру мають протилежний напрямок;
- ВЕЖ працює в номінальному режимі, при якому струми витoku в контурі заземлення відсутні [194].

Результати розрахунку представлені на рис. 5.9, які показують, що максимальне значення індукції МП кабелю ВЕЖ при струмі 30 А на відстані 0,5 м від стіни житлового приміщення, складає не більш 0,12 мкТл, не перевищує ГДР 0,5 мкТл, і є небезпечним для населення.

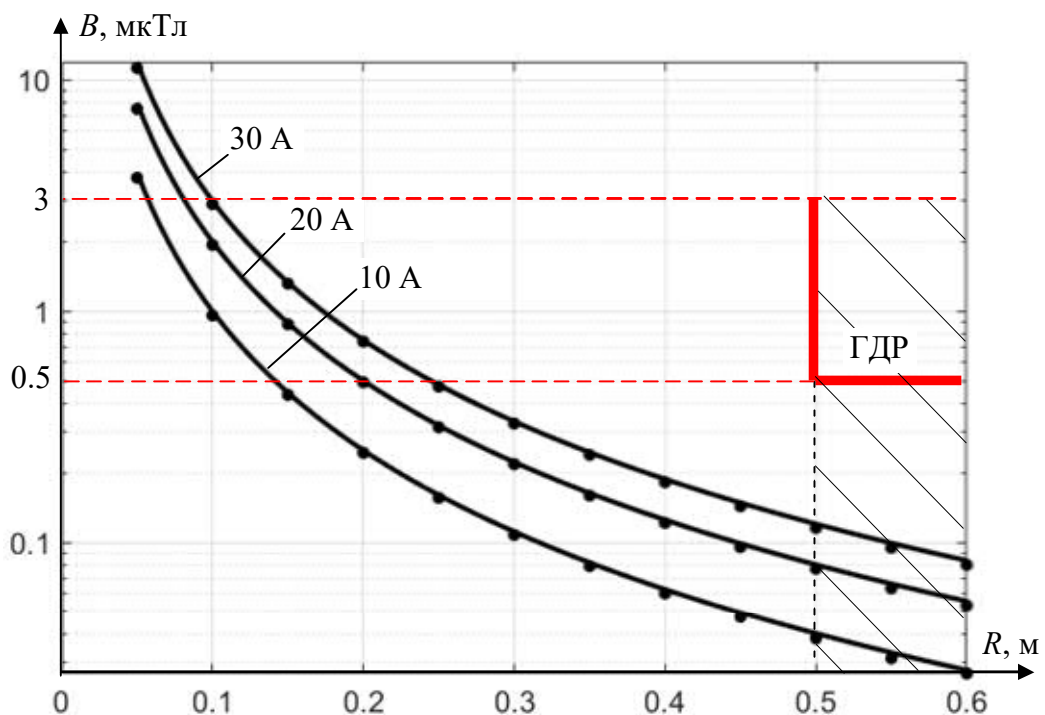


Рисунок 5.9 – Розрахункові — та експериментальні ●●● значення максимальної індукції МП ВЕЖ при різних струмах навантаження кабелю типу ВВГ ($d=5$ мм) в функції відстані R до точки спостереження

Результати розрахунку підтверджені експериментально при вимірюванні розподілу індукції МП відрізка прямолінійного кабелю типу ВВГ ($d = 5$ мм) довжиною 4 м при струмах навантаження 10, 20, 30 А. Розкид результатів розрахунку і експерименту (рис. 5.9) не перевищує 5%.

Таким чином, результати виконаних теоретичних та експериментальних досліджень МП ВЕЖ показують, що індукція МП ВЕЖ для найгіршого випадку ($I = 30$ А, $R = 0,5$ м, $d = 5$ мм) не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл.

Тому при подальшому аналізі впливом ВЕЖ можна знехтувати в зв'язку з безпечним рівнем індукції її МП ВЕЖ на відстані більш 0,5 м від стін житлового приміщення.

5.6 Магнітне поле систем кабельного електрообігріву та його вплив на житлові приміщення

Виконаємо тепер дослідження розподілу індукції МП СКЕ з різними НК при схемі їх прокладання відповідно до рис. 5.10. Таке прокладання змінює просторовий розподіл МП СКЕ у порівнянні з МП одиночного прямолінійного НК завдяки взаємному впливу за МП розташованих поблизу провідників із різноспрямованим струмом.

5.6.1 Математична модель магнітного поля систем кабельного електрообігріву

При побудові моделі МП приймаємо наступні припущення: НК СКЕ моделюються ламаною лінією (меандром, рис. 5.10) із прямолінійних і паралельних струмових ниток, розташованих у горизонтальній площині; квазістаціонарне МП СКЕ є тривимірним; впливом зовнішніх феромагнітних (електропровідних) елементів та джерел МП нехтуємо; напруга мережі живлення синусоїдальна.

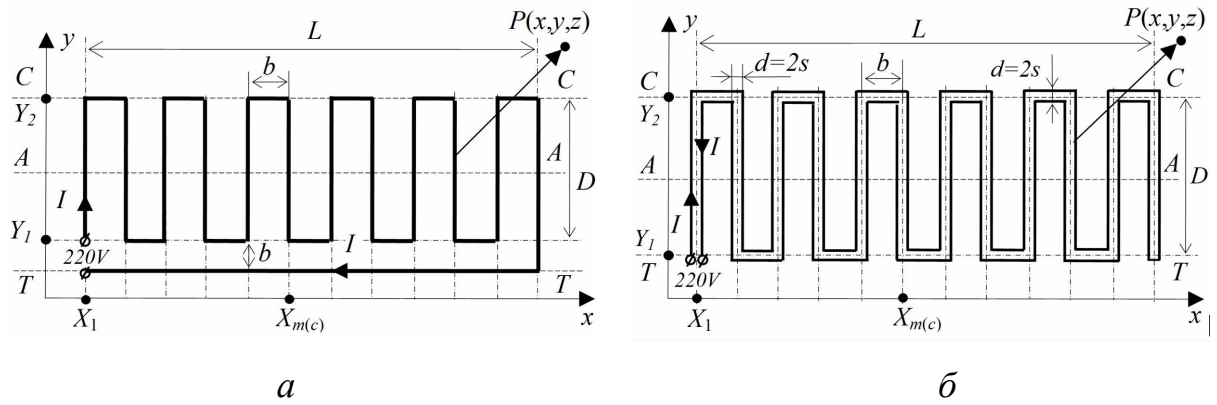


Рисунок 5.10 – Геометрія прокладання одножильного (а) та двожильного (б) НК СКЕ в горизонтальній площині XY під підлогою та схеми їх підключення до квартирної електромережі

Моделювання виконаємо аналітичним методом на основі закону Біо-Савара та принципу суперпозиції [16, 53, 54, 360] шляхом визначення результату у вигляді векторної суми індукції МП в точці спостереження $P(x,y,z)$ від окремих провідників зі струмом. В точці з радіус-вектором $\mathbf{R}$ елемент контуру $d\mathbf{r}$ зі струмом I генерує МП з індукцією:

$$d\mathbf{B}(t) = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^3} [d\mathbf{r} \times \mathbf{R}], \quad (5.17)$$

де вектор $\mathbf{R}$ направлений з точки розташування елемента контуру $d\mathbf{r}$ у точку спостереження $P(x, y, z)$. Повне МП контуру C має індукцію:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_C \frac{[d\mathbf{r} \times \mathbf{R}]}{R^3}. \quad (5.18)$$

Розглянемо МП (рис. 5.11 а), створюване струмом I , який проходить прямолінійною ділянкою між точками $A_n(X_0, Y_1, 0)$ і $A_k(X_0, Y_2, 0)$, тобто, відрізок зі струмом розташований у площині $z = 0$ паралельно осі y на відстані X від осі y (рис. 5.11 а).

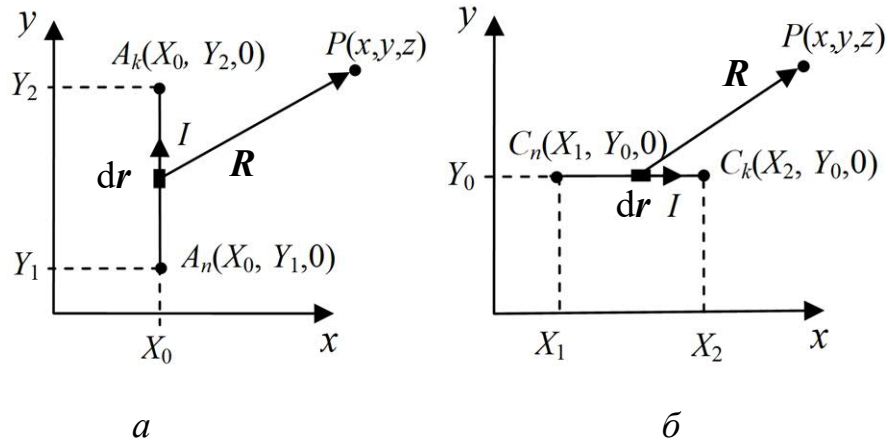


Рисунок 5.11 – До визначення індукції МП відрізків зі струмом, розташованих паралельно осям y (а) та x (б)

У цьому випадку елемент контуру дорівнює:

$$d\mathbf{r} = d\eta \mathbf{e}_y, \quad Y_1 \leq \eta \leq Y_2, \quad (5.19)$$

а його координати:

$$(X_0, \eta, 0), \quad Y_1 \leq \eta \leq Y_2. \quad (5.20)$$

Тоді вектор, спрямований із точки, в якій розташований елемент струму $d\mathbf{r}$, у точку спостереження $P(x, y, z)$ дорівнює:

$$\mathbf{R} = (x - X_0, y - \eta, z).$$

Куб відстані між елементом контуру та точкою спостереження:

$$R^3 = \left[(x - X_0)^2 + z^2 + (y - \eta)^2 \right]^{3/2}. \quad (5.21)$$

Векторний добуток:

$$[d\mathbf{l} \times \mathbf{R}] = \begin{vmatrix} \mathbf{e}_x & \mathbf{e}_y & \mathbf{e}_z \\ 0 & d\eta & 0 \\ x - X_0 & y - \eta & z \end{vmatrix} = zd\eta \mathbf{e}_x - (x - X_0)d\eta \mathbf{e}_z. \quad (5.22)$$

Компоненти індукції прямолінійного відрізка зі струмом запишуться як:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} z \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{R^3}, B_y = 0, B_z = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - X_0) \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{R^3} \quad (5.23)$$

У [363] міститься формула для невизначеного інтегралу:

$$\begin{aligned} \int \frac{dt}{T(t)^{3/2}} &= \frac{4at + 2b}{(4ac - b^2)T(t)^{1/2}}; \\ T(t)^{1/2} &= [c + bt + at^2]^{1/2}. \end{aligned} \quad (5.24)$$

Використовуючи її, обчислимо інтеграл у (5.23):

$$\begin{aligned} \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{R^3} &= \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{[(x - X_0)^2 + z^2 + (y - \eta)^2]^{3/2}} = \\ &= \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{[c + (y - \eta)^2]^{3/2}} = \int_{Y_1}^{Y_2} \frac{d\eta}{[c + (\eta - y)^2]^{3/2}} = \\ &= \int_{Y_1 - y}^{Y_2 - y} \frac{dt}{[c + t^2]^{3/2}} = \left[\frac{1}{c} \frac{t}{[c + t^2]^{1/2}} \right]_{Y_1 - y}^{Y_2 - y}, c = (x - X_0)^2 + z^2 \\ &= \frac{1}{(x - X_0)^2 + z^2} \left[\frac{Y_2 - y}{[(x - X_0)^2 + z^2 + (Y_2 - y)^2]^{1/2}} - \right. \end{aligned}$$

$$-\frac{Y_1 - y}{\left[(x - X_0)^2 + z^2 + (Y_1 - y)^2 \right]^{1/2}} \Bigg]. \quad (5.25)$$

Позначимо:

$$F(X_0, Y) = \frac{Y - y}{\left[(x - X_0)^2 + z^2 + (Y - y)^2 \right]^{1/2}}.$$

Тоді компоненти МП запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} BY_x(X_0, Y_1, Y_2) &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} z [F(X_0, Y_2) - F(X_0, Y_1)]; \\ BY_z(X_0, Y_1, Y_2) &= -\frac{\mu_0 I}{4\pi} (x - X_0) [F(X_0, Y_2) - F(X_0, Y_1)]; \\ BY_y(X_0, Y_1, Y_2) &= 0. \end{aligned} \quad (5.26)$$

Функції $BY_x(X_0, Y_1, Y_2)$, $BY_y(X_0, Y_1, Y_2)$, $BY_z(X_0, Y_1, Y_2)$ дають компоненти індукції МП відрізка провідника, паралельного осі y зі струмом I на відстані X_0 від осі.

Розглянемо МП у напрямку осі x від струму I , що проходить по відрітку між точками $C_n(X_1, Y_0, 0)$ і $C_k(X_2, Y_0, 0)$ (рис. 5.11 б). Відрізок зі струмом розташований у площині $z = 0$, проходить паралельно осі x на відстані Y_0 від осі x . Виконуючи аналогічні (5.19–5.24) обчислення, отримаємо:

$$\begin{aligned} BX_y(Y_0, X_1, X_2) &= -\frac{\mu_0 I}{4\pi} z [G(X_2, Y_0) - G(X_1, Y_0)]; \\ BX_z(Y_0, X_1, X_2) &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} (y - Y_0) [G(X_2, Y_0) - G(X_1, Y_0)]; \\ BX_x(Y_0, X_1, X_2) &= 0, \end{aligned} \quad (5.27)$$

де

$$G(X, Y_0) = \frac{X - x}{\left[(y - Y_0)^2 + z^2 \right] \left[(y - Y_0)^2 + z^2 + (X - x)^2 \right]^{3/2}}.$$

Функції $BX_x(Y_0, X_1, X_2)$, $BX_y(Y_0, X_1, X_2)$, $BX_z(Y_0, X_1, X_2)$ дають просторові компоненти індукції МП відрізка провідника, паралельного осі x зі струмом I на відстані Y_0 від осі.

Використаємо (5.26, 5.27) для визначення розрахункових співвідношень МП реальних СКЕ підлог при використанні одножильних та двохжильних НК, типова схема укладки яких представлена на рис. 5.10.

5.6.2 Магнітне поле систем кабельного електрообігріву при використанні одножильних нагрівальних кабелів

Індукція МП у точці P від системи одножильних провідників (рис. 5.10 а) у площині $z = \text{const}$, які паралельні осям координат x і y , визначається векторною сумою індукцій МП від їх прямолінійних відрізків. Тоді, відповідно до (5.25–5.27), компоненти індукції МП СКЕ можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} B_x &= \sum_{m=1}^{m=K/2} [BY_x(X_{2m-1}, Y_1, Y_2) + BY_x(X_{2m}, Y_2, Y_1)] + \\ &\quad + BY_x(X_K, Y_1, Y_1 - b); \\ B_y &= \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_y(Y_2, X_{2c-1}, X_{2c}) + BX_y(Y_1, X_{2c}, X_{2c+1})] + \\ &\quad + BX_y(Y_2, X_{K-1}, X_K) + BX_y(Y_1 - b, X_K, X_1); \\ B_z &= \sum_{m=1}^{m=K/2} [BY_z(X_{2m-1}, Y_1, Y_2) + BY_z(X_{2m}, Y_2, Y_1)] + \\ &\quad + BY_z(X_K, Y_1, Y_1 - b) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_z(Y_2, X_{2c-1}, X_{2c}) + BX_z(Y_1, X_{2c}, X_{2c+1})] + \\
& + BX_z(Y_2, X_{K-1}, X_K) + BX_z(Y_1 - b, X_K, X_1),
\end{aligned} \tag{5.28}$$

де $X_m, Y_{1,2}, K$ – координати кінців та кількість відрізків паралельних осі y ;

$X_c, Y_{1,2}$ – координати кінців відрізків паралельних осі x .

Діюче значення індукції МП СКЕ у точці $P(x,y,z)$ визначається як:

$$\tilde{B}(P) = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \tag{5.29}$$

де просторові компоненти B_x, B_y, B_z отримані відповідно до (5.28).

5.6.3 Магнітне поле систем кабельного електрообігріву при використанні двожильних нагрівальних кабелів

Індукція МП у точці $P(x,y,z)$ від системи двожильних провідників (рис. 5.11 б) з відстанню між осями жил $d = 2s$, розкладених у площині $z = \text{const}$ паралельно осям координат x і y , визначається сумою МП від їх прямолінійних відрізків. Тоді, відповідно до (5.25–5.27), компоненти індукції МП СКЕ з двожильним НК можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned}
B_x = & \sum_{m=1}^{m=K/2} \left[BY_x(X_{2m-1} - s, Y_1 + s, Y_2 + s) + \right. \\
& + BY_x(X_{2m} + s, Y_2 + s, Y_1 + s) + \\
& + BY_x(X_{2m-1} + s, Y_2 - s, Y_1 - s) + \\
& \left. + BY_x(X_{2m} - s, Y_1 - s, Y_2 - s) \right] + \\
& + BY_x(X_K + s, Y_1 + s, Y_1 - s),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_y = & \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_y(Y_2 + s, X_{2c-1} - s, X_{2c} + s) + \\
& + BX_y(Y_1 + s, X_{2c} + s, X_{2c+1} - s) + \\
& + BX_y(Y_2 - s, X_{2c} - s, X_{2c-1} + s) + \\
& + BX_y(Y_1 - s, X_{2c+1} + s, X_{2c} - s)] + \\
& + BX_y(Y_2 + s, X_{K-1} - s, X_K + s) + \\
& + BX_y(Y_2 - s, X_K - s, X_{K-1} + s) + \\
& + BX_y(Y_1 - s, X_K + s, X_K - s), \\
B_z = & \sum_{m=1}^{m=K/2} [BY_z(X_{2m-1} - s, Y_1 + s, Y_2 + s) + \\
& + BY_z(X_{2m} + s, Y_2 + s, Y_1 + s) + \\
& + BY_z(X_{2m-1} + s, Y_2 - s, Y_1 - s) + \\
& + BY_z(X_{2m} - s, Y_1 - s, Y_2 - s)] + \\
& + BY_z(X_K + s, Y_1 + s, Y_1 - s) + \\
& + \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_z(Y_2 + s, X_{2c-1} - s, X_{2c} + s) + \\
& + BX_z(Y_1 + s, X_{2c} + s, X_{2c+1} - s) + \\
& + BX_z(Y_2 - s, X_{2c} - s, X_{2c-1} + s) + \\
& + BX_z(Y_1 - s, X_{2c+1} + s, X_{2c} - s)] + \\
& + BX_y(Y_2 + s, X_{K-1} - s, X_K + s) + \\
& + BX_y(Y_2 - s, X_K - s, X_{K-1} + s) + \\
& + BX_y(Y_1 - s, X_K + s, X_K - s).
\end{aligned} \tag{5.30}$$

Діюче значення індукції МП визначається з (5.29).

Отримані співвідношення (5.28–5.30) дозволяють розраховувати розподіл індукції МП СКЕ у разі виконання їх НК із прямолінійних відрізків – у вигляді

прямокутного меандру (рис. 5.10). Однак фактична форма розкладання НК може виконуватися як із практично прямолінійних відрізків [288], так і у вигляді «змійки» [290] із радіусом вигину НК на рівні $0,5b$ (рис. 5.10), або меншим. За рамками цього дослідження здобувачем вивчено вплив форми розкладання вершини НК на рівень МП СКЕ, та показано, що розкладання у вигляді прямокутного меандру (рис. 5.10) дає максимальні значення МП. Підтвердженням цього є верифіковані криві 1, 3 на рис. 5.13, 5.14. Це дозволяє використовувати запропоновані співвідношення (5.28–5.30) як універсальні, без урахування форми вершин розкладки, для визначення індукції МП СКЕ в найгіршому випадку.

5.7 Дослідження розподілу магнітного поля систем кабельного електрообігріву з нагрівальними кабелями різних типів

Використаємо співвідношення (5.28–5.30) для визначення індукції МП СКЕ з одножильними та двошльними НК. При цьому маємо на увазі, що максимальні значення індукції потенційного МП СКЕ у всьому об'ємі приміщення зосереджені на його підлозі.

На рис. 5.12 представлена карта розподілу МП над СКЕ з одножильним НК, виконаного з розмірами $1,2 \times 0,8$ м та кроком 0,1 м (рис. 5.10 а). Максимальний рівень індукції МП (42 мкТл) має місце на вершині меандру (рис. 5.10 а) – на лінії СС, та над зворотнім проводом (лінія ТТ). Ці значення практично співпадають з МП від одиночного прямолінійного НК (рис. 5.6), що дозволяє оцінювати максимальні значення МП цієї СКЕ за співвідношенням (5.4). У зв'язку із істотним перевищенням нормативного рівня МП, СКЕ з одножильним НК в подальшому не розглядаються.

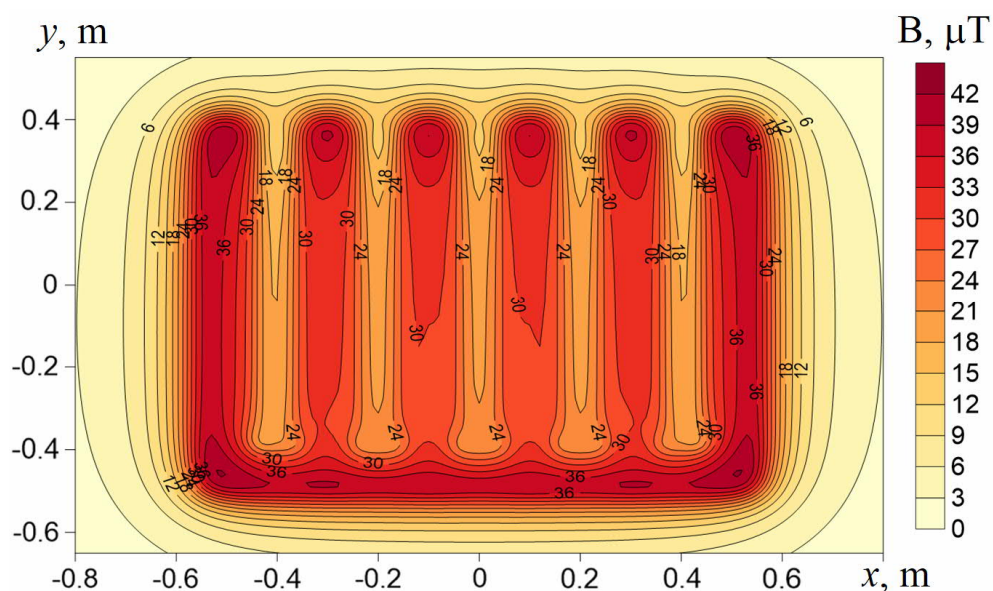


Рисунок 5.12 – Розрахункові значення розподілу індукції МП
від СКЕ з одножильним НК типу Fenix ASL1P 18
на поверхні підлоги при $h_k = 0,05$ м, $I = 10$ А

Розрахована карта розподілу МП СКЕ з промисловим зразком двожильного планарного НК (рис. 5.10 б) при $h_k = 0,05$ м з $d = 2,2$ мм, представлена на рис. 5.13 а.

На рис. 5.13 б наведені характерні графічні залежності. Як видно з рис. 5.13, максимальні значення індукції СКЕ складають 2,16 мкТл. Вони мають місце на вершинах розкладання – по лініях ТТ та СС (рис. 5.10 б). Ці значення є більшими від МП одиночного прямолінійного НК (рис. 5.6) приблизно на 15 %.

Розрахована карта розподілу МП СКЕ з промисловим зразком коаксіального НК з $e = 0,2$ мм при $h_k = 0,05$ м, виконаного відповідно до рис. 5.10 б, представлена на рис. 5.14 а. На рис. 5.14 б наведені розраховані графічні залежності.

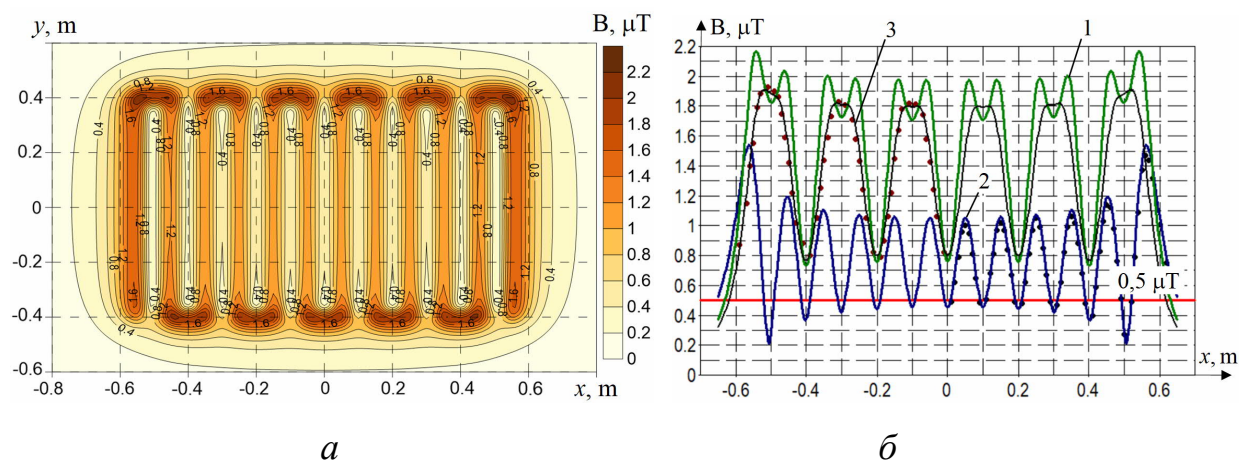


Рисунок 5.13 – Розподіл МП від СКЕ з двожильним планарним НК типу Arnold Рак 6101-20 ЕС ($I = 10$ А, $d = 2,2$ мм), на поверхні підлоги при $h_k = 0,05$ м (СКЕ з прямокутним розкладанням НК (рис. 5.10 б): 1 – по лінії СС; 2 – по лінії АА); 3 – СКЕ з розкладанням НК «змійкою» (рис. 5.15) по лінії СС (рис. 5.10 б),
(— розрахунок ••• експеримент)

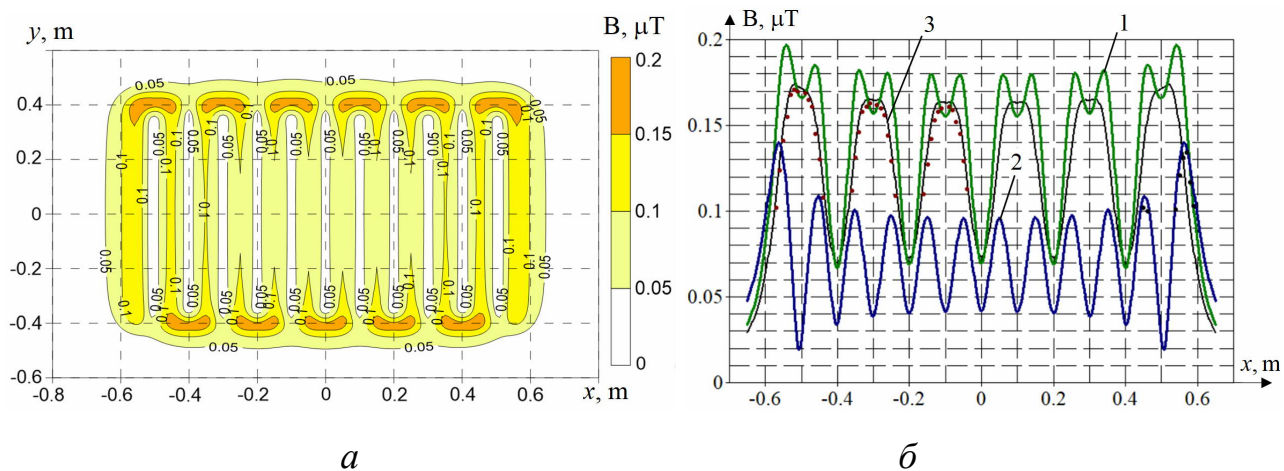


Рисунок 5.14 – Розподіл МП від СКЕ з коаксіальним НК типу «Volterm HR18» ($I = 10$ А, $e = 0,2$ мм), на поверхні підлоги при $h_k = 0,05$ м (СКЕ з прямокутним розкладанням НК (рис. 5.10,б): 1 – по лінії СС; 2 – по лінії АА); 3 – СКЕ з розкладанням НК «змійкою» (рис. 5.15) по лінії СС (рис. 5.10,б),
(— розрахунок ••• експеримент)

Як видно з рис. 5.14, максимальні значення індукції СКЕ складають 0,196 мкТл, що істотно менше нормативного рівня 0,5 мкТл.

5.8 Експериментальні дослідження магнітного поля різних типів нагрівальних кабелів та систем кабельного електрообігріву на їх основі

Дослідження виконувались на промислових зразках НК і лабораторних макетах СКЕ на їх основі на унікальному магнітовимірювальному стенді ІЕМС НАН України [15, 364]. Досліджувались промислові зразки планарного двожильного НК типу «Arnold Rak 6101-20 ЕС» і коаксіального НК типу «Volterm HR18», а також лабораторні макети СКЕ на їх основі, виконані відповідно до рис. 5.10 з розмірами $1,2 \times 0,8$ м та розкладанням НК з кроком 0,1 м змійкою (рис. 5.10). Вимірювання індукції МП проводились сертифікованим векторним магнітометром типу Magnetoscop 1.069 фірми Foerster (діапазон вимірювань індукції МП 1 нТ-600 мТл, похибка 2,5 %).

Вимірювання МП окремих НК.

Результати вимірювань індукції МП представлені на рис. 5.7.

Для планарного НК розкид результатів розрахунку та експерименту не перевищує 5 %, що підтверджує коректність розроблених математичних моделей і розрахункових співвідношень (5.28–5.30).

В процесі експериментальних досліджень коаксіального НК типу «Volterm HR18», виявлена неоднорідність розподілу індукції МП за його довжиною, яка при $r = 0,03$ м змінюється від 0,16 мкТл до 0,44 мкТл. При цьому максимальні значення індукції МП згідно (5.16) відповідають величині ексцентриситету e на рівні 0,2 мм, а мінімальні значення e на рівні 0,05 мм. Розкид експериментальних значень індукції МП за довжиною цього НК представлений на рис. 5.7 у вигляді заштрихованої зони між кривими 2 і 3. Він є значним і свідчить про нестабільність ексцентриситету цього НК, що указує на необхідність удосконалення технології виробництва коаксіального НК фірми «Volterm».

Вимірювання МП СКЕ.

Вимірювання індукції МП СКЕ виконувались на їх лабораторних макетах (рис. 5.15) з вказаними типами НК.



Рисунок 5.15 – Дослідження розподілу індукції МП лабораторного макету СКЕ з коаксіальним НК типу «VOLTERM» на магнітовимірному стенді ІЕМС НАН України

Результати вимірювань представлені на рис. 5.13, 5.14. Розкид результатів розрахунку та експерименту не перевищує 7 %.

Найбільший розкид має місце на вершинах СКЕ (лінії СС, рис. 5.10 б), що пов'язаний із відмінністю форми вершини макету (напівколо, рис. 5.15) і розрахункової моделі (прямокутник, рис. 5.10). Однак, розкид результатів експерименту в порівнянні із додатково виконаним авторами розрахунком індукції МП СКЕ для випадку розкладання вершин СКЕ відповідно до рис. 5.15 у формі напівкола із радіусом 50 мм (крива 3 на рис. 5.13, 5.14), також не перевищує 7 %. Тому результати експерименту цілком підтверджують коректність розроблених математичних моделей МП СКЕ (5.17–5.27) і отриманих на їх основі співвідношень (5.28–5.30).

5.9 Оцінка відповідності магнітного поля систем кабельного електрообігріву нормативному рівню

На основі верифікованих розрахункових співвідношень (5.28–5.30), виконаний розрахунок максимальних значень індукції МП, що створюються СКЕ з сучасними двожильними планарними НК з d від 1,4 до 2,5 мм, та коаксіальними НК з ексцентриситетом $e = 0,2$ мм і $e = 0,1$ мм. Розрахунок виконаний на поверхні підлоги житлового приміщення при різній глибині h_k прокладання НК і струмі 10 А. Результати розрахунку у вигляді графіків представлені на рис. 5.16.

Аналіз рис. 5.16 дозволяє констатувати наступне. При виконанні СКЕ на основі сучасних двожильних НК з мінімальною відстанню між жилами 1,4 мм, максимальне значення індукції МП на підлозі житлових приміщень складає 3,75–1,3 мкТл при рекомендованій глибині прокладання 0,03–0,05 м та струмі 10 А. Це в 7,5–2,6 разів перевищує гранично допустимий рівень індукції МП 0,5 мкТл в житлових приміщеннях (табл. 1.3). Тому безпечне використання СКЕ на основі сучасних двожильних НК досягається тільки при глибини їх прокладання більш 0,085–0,1 м, або в разі обмеження струму СКЕ і, відповідно, їх теплової потужності.

Виконання СКЕ на основі коаксіальних НК з ексцентриситетом $e \leq 0,2$ мм при рекомендованій глибині прокладання 0,03–0,05 м дозволяє зменшити індукцію їх МП до нормативного рівня 0,5 мкТл.

Тому широке запровадження коаксіальних НК є ефективним методом вирішення проблеми зменшення можливих ризиків для здоров'я населення та забезпечення його комфортного проживання в житлових приміщеннях.

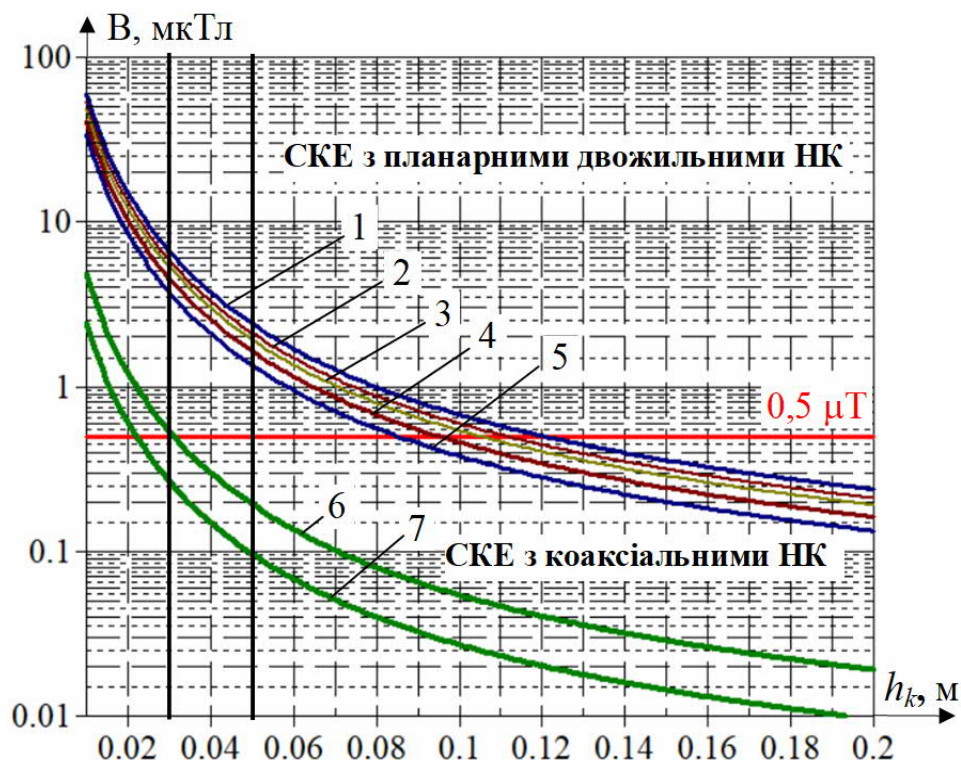


Рисунок 5.16 – Розраховані за верифікованими співвідношеннями (5.29, 5.30) максимальні значення індукції МП СКЕ, що створюються на поверхні підлоги з

двожилльними планарними НК

(d : 1 – 2,5 мм; 2 – 2,2 мм; 3 – 2 мм; 4 – 1,7 мм; 5 – 1,4 мм)

та коаксіальними НК (6 – $e = 0,2$ мм; 7 – $e = 0,1$ мм)

при різній глибині їх прокладання h_k , $I = 10$ А

5.10 Методи нормалізації магнітного поля в житлових приміщеннях при використанні систем кабельного електрообігріву

Виконаний вище аналіз показує, що індукція МП СКЕ залежить від типу НК, що використовується в СКЕ, глибини прокладання НК, а також величини струму НК.

Зменшення МП СКЕ можливо при зменшенні величини струму СКЕ, та збільшенні глибини прокладання НК. Але при цьому погіршуються основні характеристики СКЕ – зменшується її теплова потужність, а також висота і корисний об'єм житлового приміщення. Тому методи зменшення МП СКЕ шляхом

зменшення величини струму та глибини прокладання НК доцільно застосовувати тільки в крайньому випадку. Тому для нормалізації МП СКЕ більш доцільно використання тих НК, що характеризуються мінімальним рівнем МП.

Мінімальне значення індукції МП найбільш розповсюджених двожильних планарних НК обмежено мінімально можливою відстанню між їх жилами, що зараз складає 1,4 мм і визначається якістю сучасних електроізоляційних матеріалів. При цьому, при рекомендованій глибині прокладання 0,03–0,05 м та струмі 10 А, СКЕ створює індукцію МП на підлозі житлових приміщень величиною 3,75–1,3 мкТл, що в 7,5–2,6 разів перевищує гранично допустимий рівень індукції МП 0,5 мкТл в житлових приміщеннях. Безпечно для населення використання таких СКЕ може бути реалізоване тільки при збільшенні глибини прокладання НК до 0,1 м, або в разі обмеження струму СКЕ, що погіршує їх споживчі характеристики і є небажаним.

Таким чином, основним методом нормалізації МП СКЕ в житлових приміщеннях є використання коаксіальних НК з обмеженим ексцентриситетом $e \leq 0,2$ мм (наприклад, НК типу «VOLTERM»), що дозволяє на порядок зменшити МП СКЕ в порівнянні з використанням кращих сучасних двожильних планарних НК.

5.11 Висновки за п'ятим розділом

1. На основі закону Біо-Савара і принципів суперпозиції та симетрії, теоретично обґрунтоване та експериментально верифіковане просте аналітичне розрахункове співвідношення для визначення максимальних діючих значень індукції МП прямолінійних двожильних планарних кабелів, які використовуються для електропроводки та електрообігріву підлог житлових приміщень. Його використання дозволяє спростити санітарно-гігієнічну оцінку відповідності індукції магнітного поля частотою 50 Гц в житлових приміщеннях діючому в Україні нормативному рівню 0,5 мкТл і буде сприяти скорішому

вирішенню проблеми зменшення магнітного поля в житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня.

2. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що зовнішнє МП коаксіального нагрівального кабелю буде збігатися з магнітним полем умовного двожильного планарного НК, в якому відстань між його жилами відповідає величині ексцентриситету центральної жили коаксіального НК, та на цій основі вперше запропоноване верифіковане аналітичне розрахункове співвідношення для визначення індукції МП коаксіального НК.

3. Теоретично обґрунтовано, та експериментально підтверджено на зразках коаксіального НК типу «VOLTERM», що при максимально виявленому їх ексцентриситеті величиною 0,2 мм, коаксіальні НК створюють на порядок менше МП, ніж кращі планарні НК з мінімальною відстанню між жилами 1,4 мм.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що індукція МП на відстані 0,5 м від ВЕЖ для найгіршого випадку ($I = 30\text{ А}$, відстань між жилами кабелю 5 мм) складає не більше 0,25 мкТл і не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл, що дозволяє при подальшому аналізі не враховувати вплив ВЕЖ на житлові приміщення за МП.

5. Запропоновано та експериментально обґрунтовано аналітичну методику розрахунку розподілу МП СКЕ, виконаних на основі планарних та коаксіальних НК, та показано, що максимальні значення індукції їх МП в цілому співпадають з максимальною індукцією МП окремих прямолінійних НК.

6. Показано, що, побудова СКЕ на основі сучасних двожильних планарних НК (при рекомендованій глибині прокладання 0,03-0,05 м та струмі 10 А з мінімальною відстанню між жилами 1,4 мм), призводить до створення індукції МП на підлозі житлових приміщень величиною 3,75-1,3 мкТл, що в 7,5-2,6 разів перевищує гранично допустимий рівень індукції МП 0,5 мкТл в житлових приміщеннях. Тому безпечно для населення використання СКЕ в житлових приміщеннях, виконаних на основі сучасних двожильних планарних НК, досягається тільки при глибини їх прокладання більш 0,085-0,1 м, або в разі обмеження струму СКЕ і, відповідно, їх теплової потужності.

7. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що виконання СКЕ на основі коаксіальних НК з ексцентриситетом $e \leq 0,2$ мм при рекомендованій глибині прокладання 0,03-0,05 м дозволяє зменшити індукцію їх МП до нормативного рівня 0,5 мкТл.

8. Показано, що найбільш ефективним методом нормалізації магнітного поля в житлових приміщеннях при проектуванні систем кабельного електрообігріву є їх виконання на основі коаксіальних НК, що характеризуються на порядок меншим МП. Цей метод дозволяє ефективно вирішувати проблему зменшення можливих ризиків для здоров'я населення при використанні СКЕ в житлових приміщеннях, та забезпечення його комфортного проживання в житлових приміщеннях.

9. Результати досліджень у цьому розділі опубліковані у роботах здобувача [343, 358, 359] і впроваджені відповідно до додатків В4, В5, В6 дисертації.

РОЗДІЛ 6

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ТА ВНУТРІШНІХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ НА РІВЕНЬ МП В ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕННЯХ БУДИНКІВ

6.1 Загальні положення

В попередніх дослідженнях автора, розглянутих в розділах 1-5 дисертації, основна увага приділялась дослідженню впливу окремих електромереж за МП на житлові приміщення, та створенню методів їх нормалізації. Однак інтенсивність впливу може посилитись при наявності групи електромереж, які наближені до житлових будинків, або знаходяться всередині будинків [359], і разом з житловим будинком представляють собою електротехнічний комплекс [4], як це показано в розділі 1 дисертації. До таких електромереж в першу чергу можна віднести зовнішні високовольтні повітряні ЛЕП, а також такі внутрішні електромережі, як низьковольтні струмопроводи (СТП) вбудованих ТП, системи кабельного електрообігріву підлог (СКЕ) житлових приміщень. При цьому впливом ВЕЖ, відповідно до п.4 висновків до розділу 5, нехтуємо.

Разом з тим, розподіл МП в житлових приміщеннях будинків за умов комплексного впливу кількох (n) різних електромереж (рис. 6.1) досі залишається не достатньо дослідженим [343].

Навіть якщо вплив кожної з вказаних електромереж буде обмежений індукцією $\tilde{B}_{norm} = 0,5$ мкТл (нормалізований), то при їх комплексному впливі сумарна індукція МП $\tilde{B}_{\Sigma}$ може значно перевищувати нормативний рівень 0,5 мкТл. Так, рівень $\tilde{B}_{\Sigma}$ залежить від численних параметрів кожної з n електромереж та їх комбінацій і може варіюватися в межах, відповідно до (6.1) з максимальним граничним значенням $n\tilde{B}_{norm}$ [359]:

$$\tilde{B}_{норм} \leq \tilde{B}_{\Sigma} \leq n\tilde{B}_{норм} \quad (6.1)$$

$$\tilde{B}_{\Sigma max} = n\tilde{B}_{норм} \quad (6.2)$$

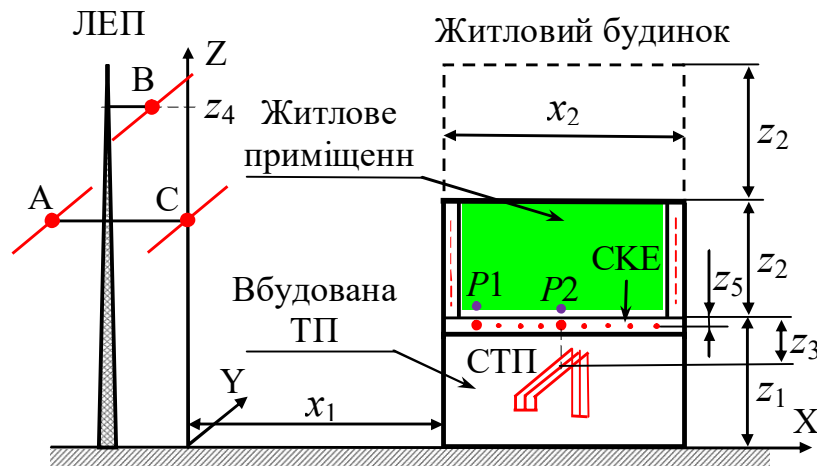


Рисунок 6.1 – Житловий будинок із вбудованою трансформаторною підстанцією як елемент електротехнічного комплексу, що складається із зовнішніх (ЛЕП) і внутрішніх (струмопровід ТП (СТП), СКЕ) електромереж

Відсутність можливості визначення реального рівня сумарного МП $\tilde{B}_{\Sigma}$ змушує враховувати його максимальне значення $n\tilde{B}_{норм}$ (6.2), що при нормалізації МП в приміщенні може призвести до запровадження методів зменшення індукції МП з надмірною ефективністю і викликати необґрунтоване подорожчання інженерних засобів зменшення МП, та нераціональні економічні втрати.

Тому актуальними є дослідження комплексного впливу групи з n електромереж (ЛЕП, ТП, СКЕ) на рівень діючого значення індукції МП в житлових приміщеннях для визначення умов економічно ефективного обмеження МП окремих електромереж, при яких сумарне значення МП в житлових приміщеннях не буде перевищувати нормативний рівень $\tilde{B}_{норм} = 0,5$ мкТл [4].

6.2 Аналіз комплексного впливу групи з n електромереж за магнітним полем

Виконаємо аналіз процесу комплексного впливу зовнішніх та внутрішніх електромереж ЛЕП, ТП, СКЕ на рівень МП в житлових приміщеннях будинків, та визначимо умови, які забезпечують мінімально необхідні обмеження індукції МП окремих електромереж, за яких сумарний рівень індукції МП в житлових приміщеннях не буде перевищувати нормативний рівень 0,5 мкТл [359]. При виконанні аналізу приймемо наступні припущення.

- Досліджується діюче значення індукції МП групи з n електромереж (ЛЕП, ТП, СКЕ), та їх просторових компонент.
- Напруги живлення досліджуваної групи електромереж синхронізовані, мають частоту 50 Гц, а їх $\cos \varphi = 1$.
- Струмопроводи всіх n електромереж зорієнтовані паралельно координатним осям.
- Струми електромереж синусоїдальні, симетричні, моделюються струмовими нитками і можуть мати різний напрямок передачі потужності.
- В досліджуваній зоні житлового приміщення відсутні феромагнітні і електропровідні елементи, та додаткові джерела МП.
- Індукція МП кожної з n електромереж є інваріантною щодо МП інших електромереж і лінійно залежить від її струму.
- МП ЛЕП трифазне двовимірне, МП вбудованої ТП трифазне тривимірне і моделюється його низьковольтним струмопроводом; МП СКЕ характеризується вертикальною компонентою z і моделюється прямолінійними відрізками двожильних нагрівальних кабелів, що живляться від напруги 220 В.

Прийняті припущення не вносять істотної похибки при аналізі і дозволяють враховувати найгірші випадки, коли вплив електромереж на діюче значення індукції МП в приміщенні є максимальним.

Комплексний вплив n різних електромереж (ЛЕП, ТП, СКЕ) на розподіл індукції МП в житловому приміщенні може бути визначений шляхом

підсумовування миттєвих значень просторових компонент $b_x(t)$, $b_y(t)$, $b_z(t)$ індукції МП кожної з цих електромереж відповідно до наступних співвідношень [359]:

$$b_{\Sigma i, \lambda, x}(P, t) = \sum_{i=1}^n \beta^i b_{\lambda, x}(P, t); \quad (6.3)$$

$$b_{\Sigma i, \lambda, y}(P, t) = \sum_{i=1}^n \beta^i b_{\lambda, y}(P, t); \quad (6.4)$$

$$b_{\Sigma i, \lambda, z}(P, t) = \sum_{i=1}^n \beta^i b_{\lambda, z}(P, t). \quad (6.5)$$

При цьому параметри досліджуваних електромереж визначаються співвідношеннями:

$$\beta^i \in (-1, +1), \omega = 2\pi f, f = 50 \text{ Гц}; \quad (6.6)$$

$$\lambda = (A, C, B); i = 1 \equiv \text{ЛЕП}, i = 2 \equiv \text{ТП}, i = 3 \equiv \text{СКЕ}, \quad (6.7)$$

$$A^i \sim \sin(\omega t - \varphi_i), \quad (6.8)$$

$$B^i \sim \sin(\omega t + 2\pi/3 - \varphi_i), \quad (6.9)$$

$$C^i \sim \sin(\omega t - 2\pi/3 - \varphi_i), \quad (6.10)$$

де A, B, C – фази електромереж;

i, n – номер і кількість електромереж;

β^i – коефіцієнт напрямку передачі енергії;

φ_i – кут зсуву струму відповідно напруги;

x, y, z – координатні осі,

P – точка спостереження.

При аналізі також враховуємо додаткові умови, що обумовлені прийнятими вище припущеннями:

$$\varphi_{ЛЕП} = 0; \varphi_{ТП} = 0; \varphi_{СКЕ} = \pi/6, \quad (6.11)$$

$$b_{ЛЕП\ y(P)} = b_{СКЕ\ x(P)} = b_{СКЕ\ y(P)} = 0. \quad (6.12)$$

Визначення величини впливу за МП групи з n електромереж на населення здійснюємо через діючі значення індукції їх МП $\tilde{B}^i(P)$, що підлягають санітарному нормуванню [20, 328] і фізичному вимірюванню стандартними магнітометрами. Діючі значення індукції МП визначимо як [16, 30]:

$$\tilde{B}_i(P) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [b_i(P, t)]^2 dt}, \quad T = 2\pi/\omega. \quad (6.13)$$

Тоді на основі (6.3–6.5) та (6.13), отримаємо:

$$\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, x}(P, t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (b_{\Sigma i, \lambda, x}(P, t))^2 dt}, \quad (6.14)$$

$$\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, y}(P, t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (b_{\Sigma i, \lambda, y}(P, t))^2 dt}, \quad (6.15)$$

$$\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, z}(P, t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (b_{\Sigma i, \lambda, z}(P, t))^2 dt}, \quad (6.16)$$

Операція інтегрування в (6.14–6.16) відповідно (6.13) може бути виконана чисельними методами, на основі спеціалізованих комп'ютерних програм, або аналітично.

Шукане діюче значення модуля індукції МП для групи з n електромереж $\tilde{B}_{\Sigma}(P)$ визначається як середньоквадратична сума діючих значень просторових компонент x, y, z (6.14–6.16):

$$\tilde{B}_{\Sigma}(P) = \sqrt{[\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, x}(P)]^2 + [\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, y}(P)]^2 + [\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, z}(P)]^2} \quad (6.17)$$

При цьому, відповідно до чинних нормативів [4, 20], діюче значення індукції $\tilde{B}_{\Sigma}(P)$, що отримане з (6.17), не повинно перевищувати нормативного значення $\tilde{B}_{norm} = 0,5$ мкТл всередині житлового приміщення і задовольняти умові:

$$\tilde{B}_{\Sigma}(P) \leq 0,5 \text{ мкТл} \quad (6.18)$$

6.3 Аналіз індивідуального впливу окремих електромереж

На основі отриманих співвідношень (6.1–6.18) відповідно до [359] виконаємо аналіз індивідуального впливу ЛЕП, ТП, СКЕ на рівень МП в житловому приміщенні (рис. 6.1). Для цього визначимо миттєві значення просторових компонент x, y, z індукції МП окремих електромереж, що розглядаються.

Для повітряних ЛЕП миттєві значення просторових компонент індукції їх МП можуть бути визначені відповідно до отриманих автором в [305, 308, 337] співвідношень:

$$b_{A,x}(P) = \frac{\mu_0 I_A}{2\pi} \cdot \frac{z - z_A}{r_A^2} \sin(\omega t - \varphi), \quad (6.19)$$

$$b_{A,z}(P) = \frac{\mu_0 I_A}{2\pi} \cdot \frac{x - x_A}{r_A^2} \sin(\omega t - \varphi), \quad (6.20)$$

$$b_{B,x}(P) = \frac{\mu_0 I_B}{2\pi} \cdot \frac{z - z_B}{r_B^2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right), \quad (6.21)$$

$$b_{B,z}(P) = \frac{\mu_0 I_B}{2\pi} \cdot \frac{x - x_B}{r_B^2} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right), \quad (6.22)$$

$$b_{C,x}(P) = \frac{\mu_0 I_C}{2\pi} \cdot \frac{z - z_C}{r_C^2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right), \quad (6.23)$$

$$b_{C,z}(P) = \frac{\mu_0 I_C}{2\pi} \cdot \frac{x - x_C}{r_C^2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right), \quad (6.24)$$

$$r_A^2 = (x - x_A)^2 + (z - z_A)^2, \quad r_B^2 = (x - x_B)^2 + (z - z_B)^2, \\ r_C^2 = (x - x_C)^2 + (z - z_C)^2. \quad (6.25)$$

Для вбудованих ТП, що заміщуються їх низьковольтними струмопроводами, миттєві значення їх просторових компонент визначається відповідно до [358] на основі закону Біо-Савара і принципу суперпозиції [16, 360]. Вони отримані шляхом підсумовування компонент індукції МП, яке створюється кожною з прямолінійних ділянок $L1-L5$ (рис. 6.2) струмопроводу.

Так, наприклад, для фази А компоненти індукції МП визначаються як [358]:

$$b_{A,x}(P) = \sum_n^N b_{zx}(I_{A,z,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, z_{1,2,n}) \sin(\omega t + \varphi) + \\ + \sum_k^K b_{yx}(I_{A,x,k}, x_{0,k}, y_{1,2,k}, z_{0,k}) \sin(\omega t + \varphi), \quad (6.26)$$

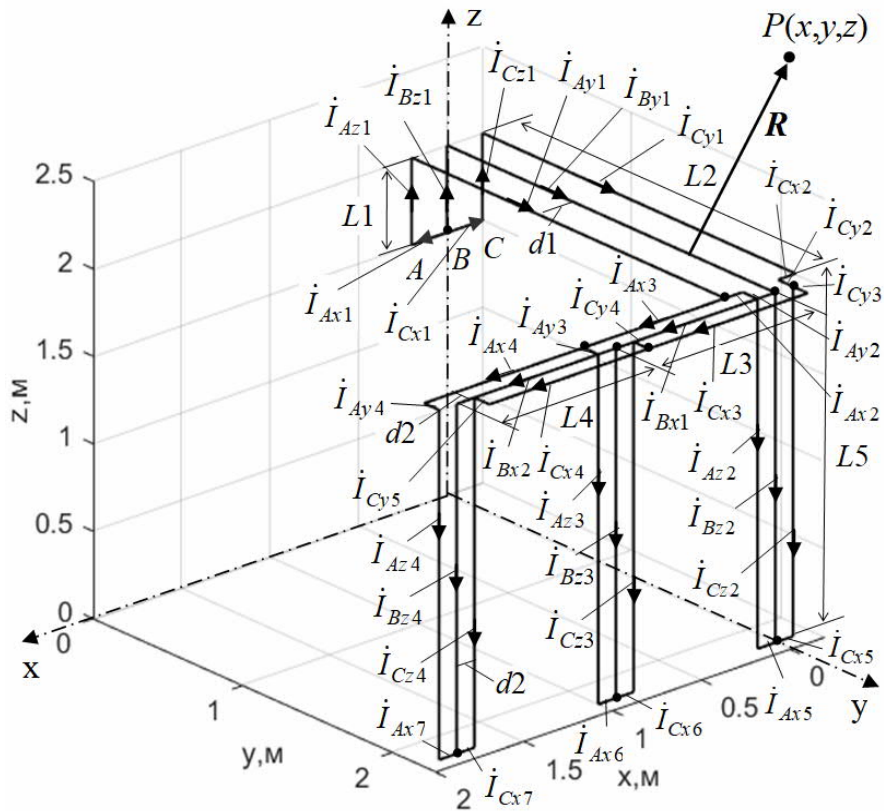


Рисунок 6.2 – Досліджуваний низьковольтний струмопровід ТП 6(10)/0,4 кВ,
100 кВА

$$b_{A,y}(P) = \sum_n^N b_{zy}(I_{A,z,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, z_{1,2,n}) \sin(\omega t + \varphi) + \sum_v^V b_{xy}(I_{A,x,v}, x_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) \sin(\omega t + \varphi), \quad (6.27)$$

$$b_{A,z}(P) = \sum_v^V b_{xz}(I_{C,x,v}, x_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) \sin(\omega t + \varphi) + \sum_k^K b_{yz}(I_{C,y,k}, x_{0,k}, y_{1,2,k}, z_{0,k}) \sin(\omega t + \varphi) \quad (6.28)$$

де $I_{Az,n}$, $x_{0,n}$, $y_{0,n}$, $z_{1,2,n}$ – струм та координати кінців n -ї прямолінійної ділянки паралельної осі Z ;

$I_{Ay,k}$, $x_{0,k}$, $y_{1,2,k}$, $z_{0,k}$ – струм та координати кінців k -ї прямолінійної ділянки паралельної осі Y ;

$I_{Cx,v}$, $x_{1,2,v}$, $y_{0,v}$, $z_{0,v}$ – струм та координати кінців v -ї прямолінійної ділянки, паралельної осі X ;

N , K , V – кількість прямолінійних ділянок, паралельних осі Z , Y , X відповідно.

Для фаз В і С струмопроводу компоненти індукції визначаються аналогічно [358].

Система СКЕ.

З метою спрощення аналізу і врахування найгіршого випадку з максимальним МП [343], СКЕ заміщується двома паралельними осі у прямолінійними відрізками двожильних нагрівальних кабелів (рис. 6.1), розкладених під підлогою приміщення: перший з них проходить на відстані 0,5 м від стіни (точка $P1$), а координата x осі другого (точка $P2$) співпадає з координатою x середньої фази струмопроводу $L2$ ТП (рис. 6.2). Тоді миттєве максимальне значення індукції МП СКЕ, яка виконана двожильним нагрівальним кабелем, при струмі $I_{СКЕ}$, визначається його просторовою компонентою z і при живленні від однофазної електромережі 220 В відповідно до [343] буде складати:

$$b_{A,z}(r, P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{2} \cdot I_{СКЕ} \cdot d}{\left[r^2 + (0,5d)^2 \right]} \sin(\omega t - \varphi), \quad (6.29)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

d – відстань між осями жилами кабелю;

r – відстань від осі кабелю до точки спостереження P ,

$\varphi = \pi/6$ – фазовий зсув між лінійним струмом фази А ЛЕП (ТП) і відповідним фазним струмом СКЕ.

6.4 Дослідження комплексного впливу ліній електропередачі, трансформаторних підстанцій і систем кабельного електрообігріву за магнітним полем

Проведений вище аналіз і отримані співвідношення (6.3–6.24) дозволяють дослідити розподіл діючого значення МП в житловому приміщенні (рис. 6.1) при комплексному впливі ЛЕП, ТП і СКЕ. При цьому найбільш вірогідним є виникнення цього впливу від пари електромереж ЛЕП+СКЕ. Менш вірогідним є вплив від комбінацій ТП+ЛЕП або ТП+СКЕ, а також від трьох електромереж ЛЕП+ТП+СКЕ. Однак з точки зору забезпечення безпеки здоров'я населення, що потребує консервативного підходу [4], доцільно дослідити всі варіанти комплексного впливу згаданих груп електромереж на рівень МП в житловому приміщенні.

Параметри досліджуваних електромереж.

В якості зовнішньої електромережі розглядаємо типову повітряну ЛЕП 110 кВ, 250 А з трикутним підвісом проводів фаз, зорієнтованих паралельно осі y (рис. 6.1). Координати проводів фаз цієї ЛЕП: А (-6,3 м; 7 м), В (-2,1 м; 13 м), С (0 м; 7 м), $x_1 = 20$ м.

В якості вбудованої ТП (рис. 6.1) розглядаємо ТП потужністю 100 кВА, яку як джерело МП відповідно до [337] моделюємо низьковольтним струмопроводом (СТП) (рис. 6.2) з параметрами: $d_1 = 0,16$ м, $d_2 = 0,05$ м, $L_1 = 0,5$ м, $L_2 = 2,2$ м, $L_3 = L_4 = 0,9$ м, $L_5 = 2$ м, номінальний струм $I = 150$ А; струми прямолінійних ділянок струмопроводу ($L_1 - L_5$): $I_1 = I_2 = I$, $I_3 = I/2$, $I_4 = I_5 = I/3$.

Система СКЕ виконана із зорієнтованих паралельно осі y у стандартних двожильних нагрівальних кабелів із відстанню між жилами 2,2 мм [343, 358]. Вона має номінальний струм 10 А, $z_5 = 0,05$ м, живиться від фазної напруги однієї з фаз (а, в, с) квартирної електромережі 220 В. Кабелі СКЕ представляємо у вигляді прямолінійних відрізків, зорієнтованих паралельно осі y , що відповідно

до [343, 358] дозволяє моделювати максимальне МП СКЕ в місці прокладання кабелю.

Житловий будинок (рис. 6.1) має розташовану на 1-му поверсі вбудовану ТП і житлове приміщення на 2-му поверсі над вбудованою ТП з параметрами $z_1 = 3,5$ м, $z_2 = 2,5$ м, $z_3 = 1,5$ м, $z_4 = 13$ м. При визначенні сумарного МП враховується, що точки спостереження P_1 , P_2 (рис. 6.1) знаходяться між струмопроводами ЛЕП і ТП, СКЕ.

Методика дослідження комплексного впливу.

Дослідження комплексного впливу здійснюємо за співвідношеннями (6.3–6.29) шляхом комп'ютерного моделювання в програмному середовищі MATLAB [351].

1. Встановлюємо величини початкових струмів ($I_{поч}$), ЛЕП, ТП, СКЕ, при яких кожна з цих електромереж окремо створює в житловому приміщенні МП відповідно до рис. 6.3, максимальні діючі значення індукції яких дорівнюють нормативному рівню 0,5 мкТл:

$$\tilde{B}_{ЛЕП} = \tilde{B}_{ТП} = \tilde{B}_{СКЕ} = \tilde{B}_{norm} = 0,5 \text{ мкТл.} \quad (6.30)$$

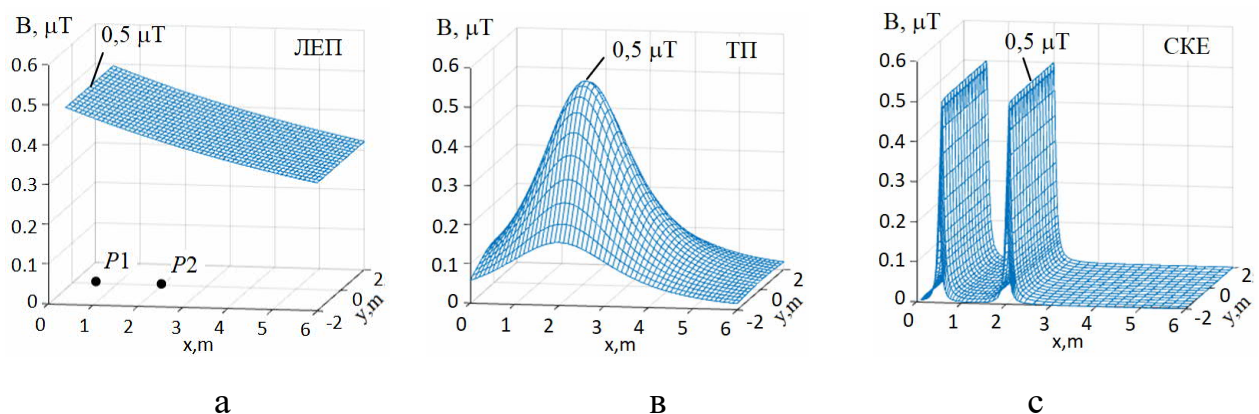


Рисунок 6.3 – Розрахований відповідно до [306, 337, 343] розподіл індукції МП в житловому приміщенні при окремому впливі ЛЕП, ТП, СКЕ, максимальна індукція МП кожної з яких відповідає нормативному рівню $\tilde{B}_{norm}$

(а – ЛЕП, в – ТП, с – СКЕ).

При цьому контрольною точкою для ЛЕП є максимально наближена до неї точка $P1$ (рис. 6.1), а для ТП і СКЕ це точка $P2$ (рис. 6.1), координата x якої співпадає з координатою x середньої фази струмопроводу $L2$ ТП (рис. 6.2). У цих точках сумарна індукція буде максимальною.

2. Відповідно до (6.17) розраховуємо сумарне МП $\tilde{B}_{\Sigma}$, що створюється ЛЕП, ТП, СКЕ при виконанні умови (6.30), результати якого вносимо до табл. 6.1 при різних комбінаціях параметрів електромереж, що розглядаються.

3. Зменшуємо пропорційно струм I_{noc} кожної електромережі по п. 1 методики до рівня, коли їх сумарне значення $\tilde{B}_{\Sigma}$ зменшиться до рівня $\tilde{B}_{norm} = 0,5$ мкТл за кожним пунктом табл. 6.1, а максимальна індукція кожної з електромереж $\tilde{B}_{\Sigma norm}$ буде однаковою:

$$\tilde{B}_{\Sigma norm} = \tilde{B}_{ЛЕП} = \tilde{B}_{ТП} = \tilde{B}_{СКЕ} . \quad (6.31)$$

При цьому визначаємо і заносимо до табл. 6.1. значення індукції $\tilde{B}_{\Sigma}$ при умові (6.27) та $\tilde{B}_{\Sigma norm}$ кожної з електромереж. Також визначаємо і фіксуємо в табл. 6.1 величини коефіцієнту нормування K_m , що визначає необхідну величину зменшення сумарної індукції $\tilde{B}_{\Sigma}$ для досягнення нормативного рівня

$$K_m = \tilde{B}_{\Sigma} / \tilde{B}_{norm} , K_m \in (1 \div n) , \tilde{B}_{\Sigma norm} = \tilde{B}_{norm} / K_m . \quad (6.32)$$

Також визначаємо індукцію нормованого сумарного МП $\tilde{B}_{\Sigma norm}$ для кожної з електромереж, при досягненні якої їх сумарний рівень зменшується до 0,5 мкТл.

4. Аналогічні дії за п. 1-3 виконуємо при дослідженні комплексного впливу для двох різних електромереж в комбінаціях ЛЕП-ТП, ЛЕП-СКЕ, ТП-СКЕ.

Результати розрахунку відповідно до [343] вносимо до табл. 6.1–6.4.

Таблиця 6.1 – Діюче значення індукції сумарного МП ТП+ЛЕП+СКЕ $\tilde{B}_\Sigma$, значення $\tilde{B}_{\Sigma norm}$ та коефіцієнту K_m при зміні знаків струмів, і фази живлення СКЕ

№	ТП β^n , ABC	ЛЕП β^n , ABC	СКЕ β^n , фаза	$\tilde{B}_\Sigma$ мкТл	$\tilde{B}_{\Sigma norm}$ мкТл	K_m
1	2	3	4	5	6	7
1	+	+	+, a	0,84	0,3	1,68
2	+	+	-, a	0,84	0,3	1,68
3	+	-	+, a	1,14	0,22	2,28
4	+	-	-, a	0,97	0,26	1,94
5	+	+	+, b	0,66	0,38	1,32
6	+	+	-, b	0,69	0,36	1,38
7	+	-	+, b	1,22	0,2	2,44
8	+	-	-, b	0,94	0,27	1,88
9	+	+	+, c	0,93	0,27	1,86
10	+	+	-, c	0,79	0,32	1,58
11	+	-	+, c	0,91	0,28	1,82
12	+	-	-, c	1,32	0,19	2,64
13	+	+	+, a	1,09	0,23	2,18
14	+	+	-, a	0,91	0,28	1,82
15	+	-	+, a	1,12	0,22	2,24
16	+	-	-, a	0,79	0,32	1,58
17	+	+	+, b	0,77	0,33	1,54
18	+	+	-, b	1,09	0,23	2,18
19	+	-	+, b	0,87	0,29	1,74
20	+	-	-, b	0,87	0,29	1,74

Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4	5	6	7
21	+	+	+, с	0,96	0,26	1,92
22	+	+	-, с	0,81	0,31	1,62
23	+	-	+, с	0,74	0,34	1,48
24	+	-	-, с	1,11	0,23	2,22

Найбільш характерні результати досліджень сумарного МП ЛЕП +ТП+СКЕ представлені у вигляді графіків на рис. 6.4–6.7, що розраховані відповідно до (6.3–6.12, 6.14–6.17, 6.19–6.29) та даних табл. 6.1.

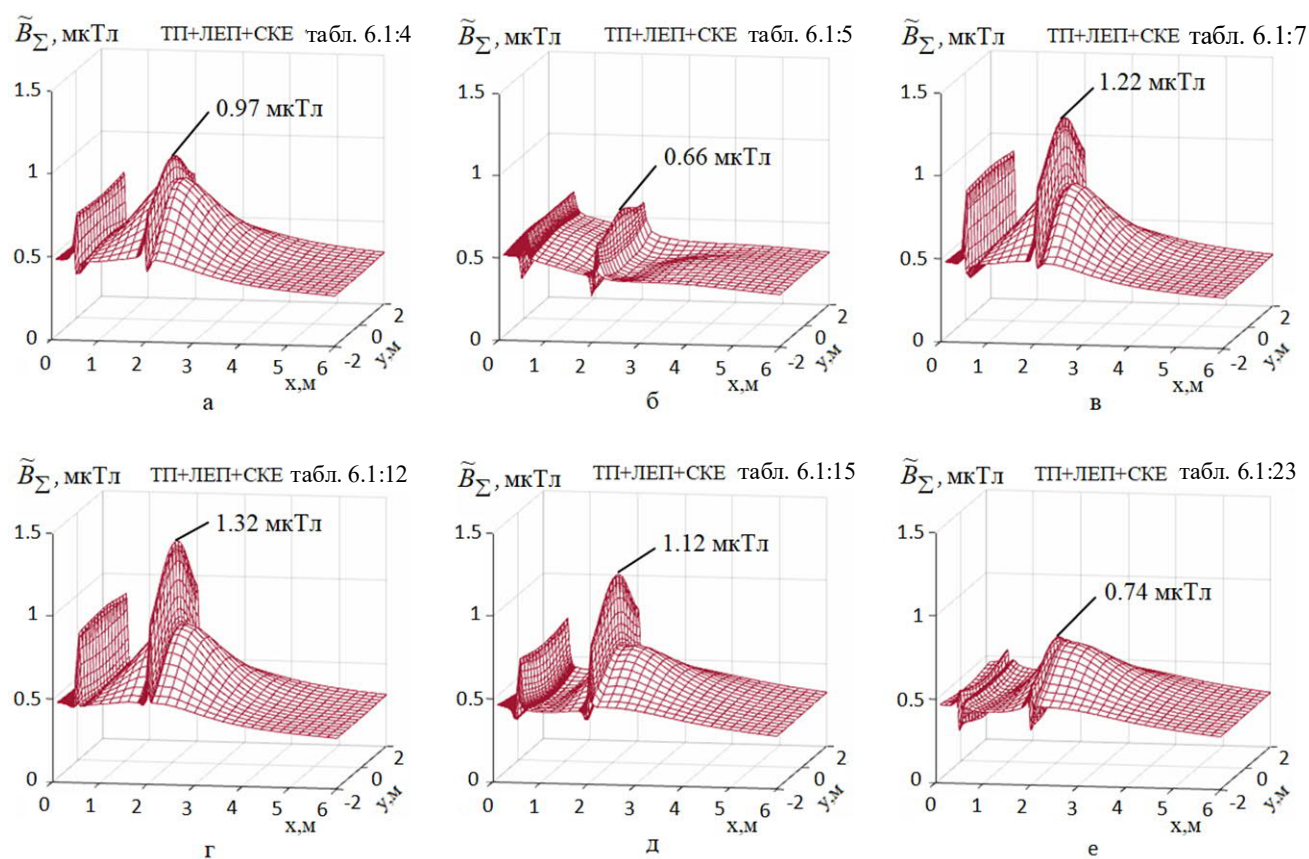


Рисунок 6.4 – Характерні сумарні впливи ЛЕП + ТП + СКЕ на рівень $\tilde{B}_\Sigma$ в житловому приміщенні

Результати розрахунку комплексного впливу за МП електромереж ЛЕП+ТП представлені в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Діюче значення індукції сумарного МП ТП+ЛЕП $\tilde{B}_{\Sigma}$, значення $\tilde{B}_{\Sigma \text{ norm}}$ та коефіцієнту K_m при зміні порядку чергування фаз і знаків струмів

№	ТП β^n	ЛЕП β^n	$\tilde{B}_{\Sigma}$ мкТл	$\tilde{B}_{\Sigma \text{ norm}}$ мкТл	K_m
1	+ ABC	+ ABC	0,53	0,47	1,06
2	+ ABC	–ABC	0,85	0,29	1,7
3	+ ABC	+ ACB	0,7	0,36	1,4
4	+ABC	– ACB	0,7	0,36	1,4

Найбільш характерні результати досліджень сумарного МП ТП+ЛЕП представлені у вигляді графіків на рис. 6.5, що розраховані відповідно до (6.3–6.12, 6.14–6.17, 6.19–6.28) та даних табл. 6.2.

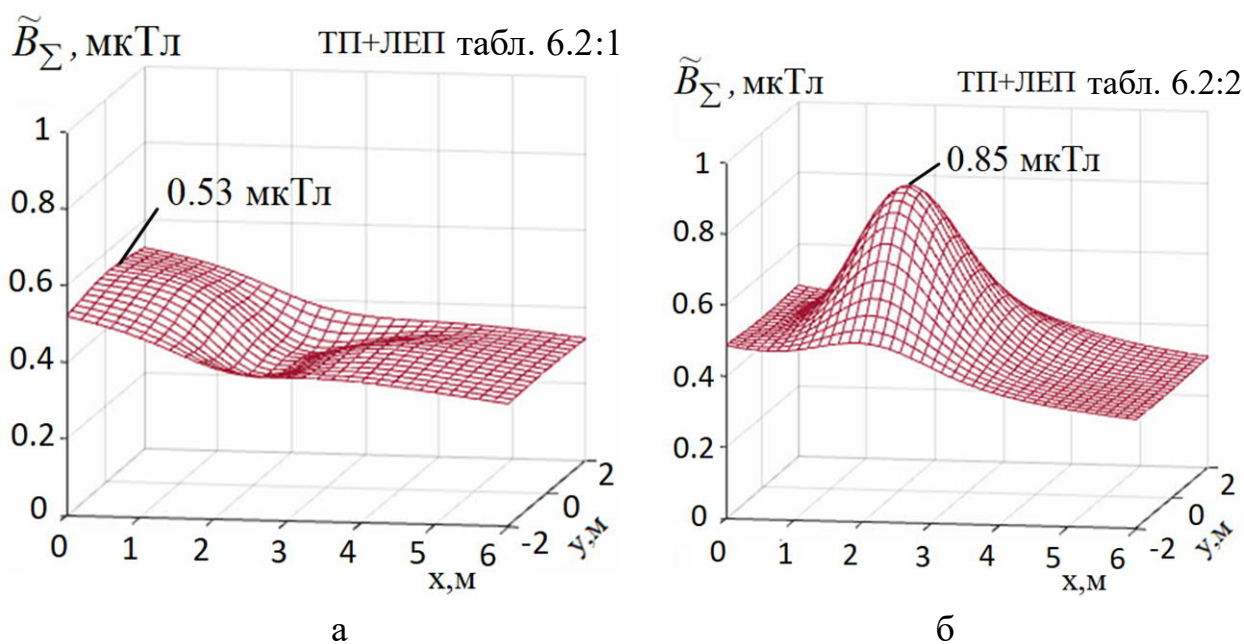


Рисунок 6.5 – Сумарний мінімальний (а) і максимальний (б) вплив ТП+ЛЕП на рівень МП $\tilde{B}_{\Sigma}$ в житловому приміщенні

Результати розрахунку відповідно до (6.3–6.12, 6.14–6.17, 6.19–6.28) комплексного впливу за МП електромереж ТП+СКЕ представлені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Діюче значення індукції сумарного МП ТП+СКЕ $\tilde{B}_\Sigma$, значення $\tilde{B}_{\Sigma norm}$ та коефіцієнту K_m при зміні знаків струмів і фази живлення СКЕ

№	ТП β^n , АВС	СКЕ β^n , фаза	$\tilde{B}_\Sigma$, μТ	$\tilde{B}_{\Sigma norm}$ μТ	K_m
1	+	+, а	0,87	0,29	1,74
2	+	-, а	0,56	0,45	1,12
3	+	+, b	0,86	0,29	1,72
4	+	-, b	0,57	0,44	1,14
5	+	+, c	0,57	0,44	1,14
6	+	-, c	0.98	0,26	1.96

Найбільш характерні результати досліджень сумарного МП ТП+СКЕ представлені у вигляді графіків на рис. 6.6, що розраховані відповідно до (6.3–6.12, 6.14–6.17, 6.26–6.29) та даних табл. 6.3.

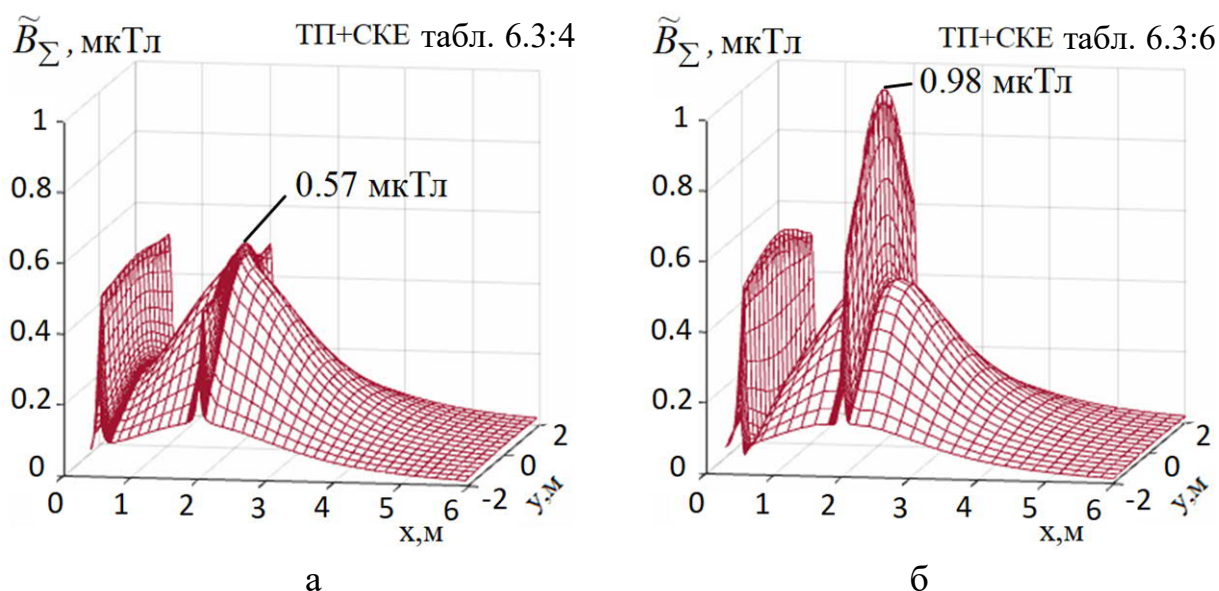


Рисунок 6.6 – Сумарний мінімальний (а) і максимальний (б) впливи ТП + СКЕ на рівень $\tilde{B}_\Sigma$ в житловому приміщенні

Результати розрахунку відповідно до (6.3–6.12, 6.14–6.17, 6.19–6.26, 6.29) комплексного впливу за МП електромереж ЛЕП +СКЕ представлені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Діюче значення індукції сумарного МП ЛЕП+СКЕ $\tilde{B}_{\Sigma}$, значення $\tilde{B}_{\Sigma norm}$ та коефіцієнту K_m при зміні знаків струмів і фази живлення СКЕ

№	ТП β^n , ABC	СКЕ β^n , фаза	$\tilde{B}_{\Sigma}$, μT	$\tilde{B}_{\Sigma norm}$ μT	K_m
1	+	+, a	0,77	0,33	1,54
2	+	-, a	0,79	0,32	1,58
3	+	+, b	0,64	0,39	1,28
4	+	-, b	0,9	0,28	1,8
5	+	+, c	0,89	0,28	1,78
6	+	-, c	0,59	0,42	1,18

Найбільш характерні результати досліджень сумарного МП ЛЕП+СКЕ представлені у вигляді графіків на рис. 6.7, що розраховані відповідно до (6.3–6.12, 6.14–6.17, 6.19–6.26, 6.29) та даних табл. 6.4.

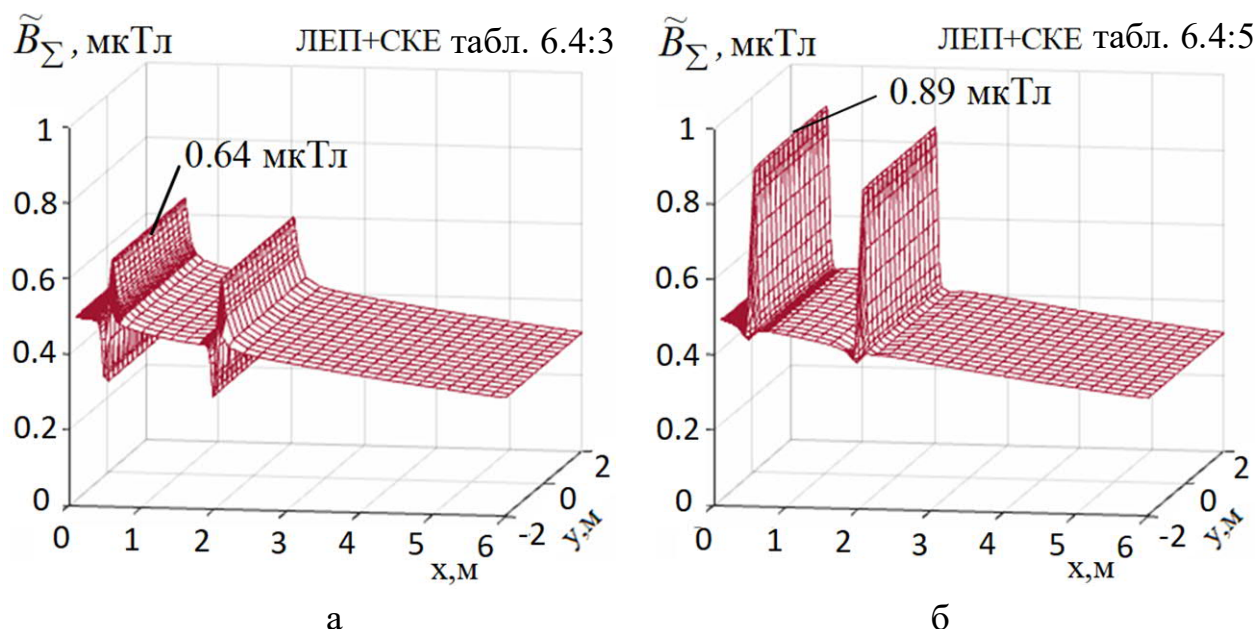


Рисунок 6.7 – Сумарний мінімальний (а) і максимальний (б) впливи ЛЕП + СКЕ на рівень $\tilde{B}_{\Sigma}$ в житловому приміщенні

Аналіз результатів дослідження комплексного впливу ЛЕП, ТП, СКЕ за розробленими методами.

Отримані вище результати моделювання за розробленими методами, що описується співвідношеннями (6.1–6.29), є наступними [343]. Так, для пари ТП-ЛЕП (табл. 6.2, рис. 6.5) максимальне значення $\tilde{B}_{\Sigma}$ досягає 0,85 мкТл при протилежних знаках струмів електромереж і потребує зменшення індукції МП кожного з цих джерел в 1,7 рази (з 0,5 мкТл до 0,29 мкТл), а мінімальне значення $\tilde{B}_{\Sigma}$ 0,7 мкТл має місце при співпадінні напрямку струмів ТП і ЛЕП.

Для пари ТП-СКЕ (табл. 6.3, рис. 6.6) максимальне значення $\tilde{B}_{\Sigma}$ складає 0,86 мкТл при живленні СКЕ від фази +A (+B) і мінімальне (0,57 мкТл) при живленні СКЕ від фази +C (–B).

Для пари ЛЕП-СКЕ (табл. 6.4, рис. 6.7) максимальне значення $\tilde{B}_{\Sigma}$ складає 0,89 мкТл при живленні СКЕ від фази +A (–A) і мінімальне (0,59 мкТл) при живленні СКЕ від фази –C.

Таким чином, для груп з двох розглянутих електромереж максимальне значення $\tilde{B}_{\Sigma}$ складає 0,89 мкТл, а мінімальне 0,57 мкТл. При цьому для нормалізації МП цих електромереж, необхідний коефіцієнт нормування K_m (6.32) буде складати від 1,06 до 1,96 одиниць і при $n = 2$ наближається до граничних значень – 1 або 2 одиниці.

Для групи ТП, ЛЕП, СКЕ (табл. 6.1, рис. 6.4) максимальне значення $\tilde{B}_{\Sigma}$ складає 1,32 мкТл і має місце при протилежних струмах ТП і ЛЕП і живленні СКЕ від фази – C, а мінімальне значення – 0,66 мкТл при співпадінні напрямків струмів ТП і ЛЕП і живленні СКЕ від фази +B. При цьому для нормалізації МП цих трьох ($n = 3$) електромереж, необхідний коефіцієнт нормування K_m складає від 1,32 до 2,64 одиниць. Зміна порядку чергування фаз істотно не впливає на рівень МП.

Додаткові дослідження також показують, що зміна геометрії підвісу проводів ЛЕП 110 кВ з трикутної (рис. 6.1) на горизонтальну або вертикальну

принципово не впливає на величину $\tilde{B}_\Sigma$.

Для всіх груп електромереж величини $\tilde{B}_\Sigma$ і K_m істотно залежать від режиму живлення СКЕ (знак струму і фаза живлення). Це створює умови для мінімізації МП в приміщенні споживачем СКЕ.

6.5 Експериментальні дослідження комплексного впливу групи електромереж за магнітним полем

Отримані вище результати моделювання за розробленими методами (6.1–6.29), були підтверджені експериментальними випробуваннями, проведеними на магнітовимірювальному стенді [15] ІЕМС НАН України. Випробування виконані для групи електромереж ЛЕП+ТП на створеній для цього експериментальній установці (рис. 6.9).

Опис експериментальної установки. Експериментальна установка (рис. 6.9) складається з лабораторних макетів ЛЕП і ТП.

В якості лабораторного макету ТП використаний повномасштабний макет струмопроводу ТП 6(10)/0,4 кВ, 100 кВА (рис. 6.8) з параметрами (рис. 6.2)

В якості макету ЛЕП (рис. 6.8) використаний лабораторний макет ЛЕП (рис. 6.8) з наступними параметрами (рис. 6.9).

Координати розташування основних елементів експериментальної установки (рис. 6.8) представлені на рис. 6.9, де: $x_1 = 1,7$ м; $x_2 = 0,8$ м; $x_3 = 0,4$ м; $x_4 = 1,5$ м; $z_1 = 2$ м; $z_2 = 0,5$ м; $z_3 = 0,5$ м; $z_4 = 1,7$ м; $z_5 = 2,2$ м; $y_1 = 2,1$ м; $d_1 = 0,16$ м; $d_2 = 0,05$ м.



Рисунок 6.8 – Експериментальна лабораторна установка для дослідження комплексного впливу за МП ЛЕП та ТП (а – макет трифазного низьковольтного струмопроводу ТП 100 кВА; б – макет трифазної ЛЕП)

Електрична схема експериментальної установки (рис. 6.8) представлена на рис. 6.10 а. Макет ЛЕП живиться від трифазного індукційного регулятора типу ІР-59/32 (рис. 6.10 б), що дозволяє змінювати струм навантаження трифазної ЛЕП від 0 до 250 А. Напрямок передачі електричної енергії ЛЕП змінюється шляхом фізичного розвороту макету ЛЕП (рис. 6.8) на 180 градусів.

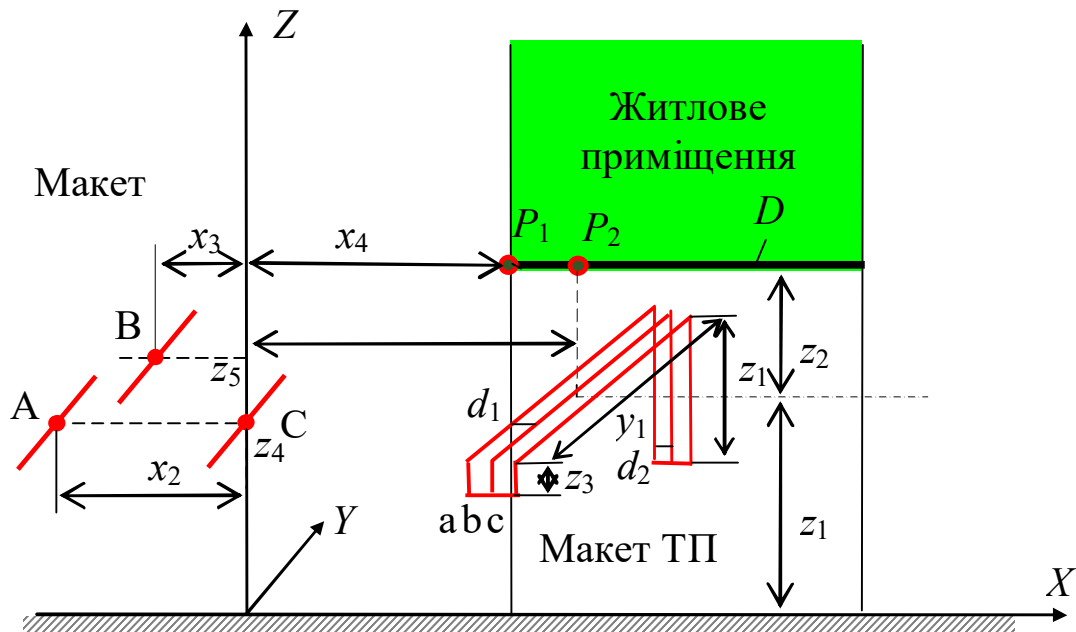
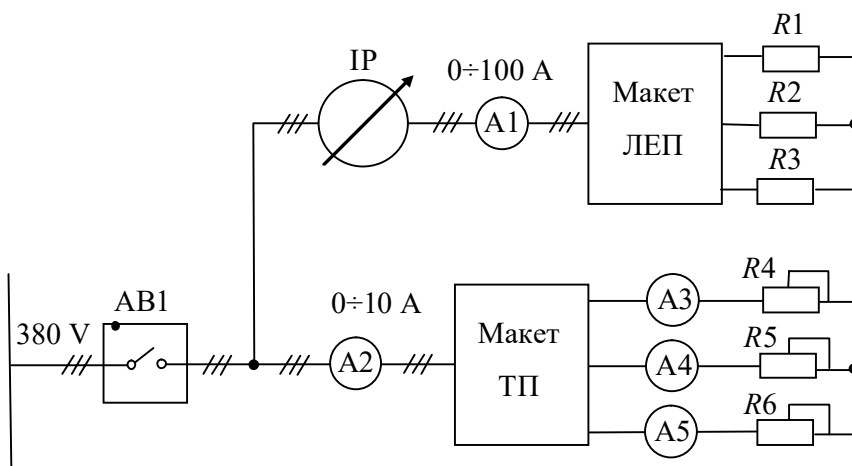


Рисунок 6.9 – Координати розташування основних елементів експериментальної лабораторної установки для дослідження комплексного впливу ЛЕП та ТП за МП



а



б

Рисунок 6.10 – Електрична схема експериментальної лабораторної установки для дослідження комплексного впливу ЛЕП+ТП за МП (а) та індукційний регулятор типу IP-59/32 (б) для живлення макету ЛЕП

Макет ТП експериментальної установки (рис. 6.8) живиться від електричної мережі 380 В (рис. 6.10). Трифазний струм навантаження ТП може

регулюватися в діапазоні 0–10 А за допомогою реостатів R4-R6 і контролюється амперметрами A2-A4.

Діюче значення індукції МП на контрольній площині D над макетом ТП (рис. 6.9) вимірюється атестованим векторним магнітометром типу Magnetoscor 1.069 (рис. 6.11) з параметрами: діапазон вимірювань індукції МП 1,0 нТл-600 мкТл, відносна похибка 2,5 %. Для точного позиціонування датчика магнітометру на контрольній площині D (рис. 6.10) використано координатну сітку з шагом 0,25 мм та спеціальний координатний пристрій для фіксації повороту датчика на 90 град. при вимірюванні просторових компонент x і z індукції МП.



Рисунок 6.11 – Магнітометр типу Magnetoscor 1.069 для вимірювання діючого значення індукції МП промислової частоти

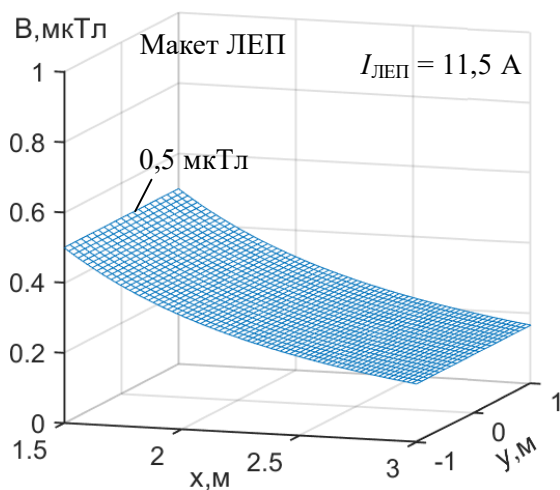
Результати експериментальних досліджень комплексного впливу ЛЕП+ТП за МП та їх аналіз.

Для порівняння результатів розрахунку та експериментальних досліджень з розподілу МП, що створюється експериментальною установкою (рис. 6.8) за запропонованими вище методами, розраховано розподіл індукції МП на контрольній площині D при окремому впливі макетів ЛЕП і ТП, МП яких відповідає нормативному рівню $\tilde{B}_{\text{норм}}$. Результати розрахунку представлені на рис. 6.12. Також розраховано розподіл індукції МП на контрольній площині D при сумарному впливі макетів ЛЕП і ТП, МП кожного з яких відповідає нормативному рівню $\tilde{B}_{\text{норм}}$, і зміні напрямку струму ЛЕП. Результати розрахунку представлені на рис. 6.13.

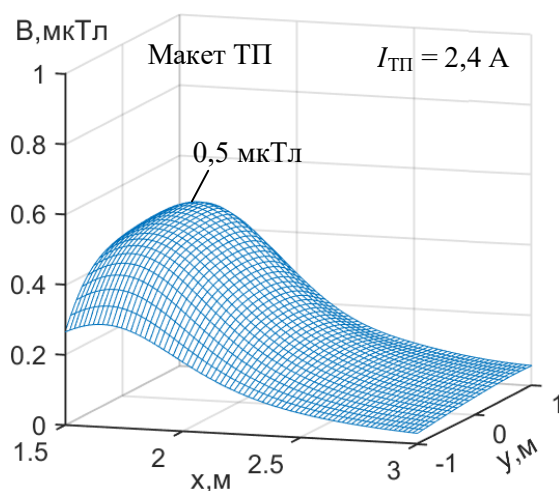
Результати розрахунку МП також занесені в табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Результати експериментальних досліджень індукції сумарного МП макетів ЛЕП и ТП при $z_2=0,5$ м, $I_{ЛЕП} = (+/-)11,5$ А, $I_{ТП} = 2,4$ А

№ пп	Координата x точки спостереження, м	Напря м струму ЛЕП	Експеримент B_p , мкТл	Розрахунок B , мкТл	Відносна похибка δ , %
1	2	3	4	5	6
1	1,5	+	0,614	0,60	2,3
2	1,6	+	0,475	0,46	3,3
3	1,7	+	0,338	0,33	2,5
4	1,8	+	0,248	0,25	0,7
5	1,9	+	0,232	0,23	0,9
6	2	+	0,253	0,24	5,3
7	2,1	+	0,273	0,26	4,7
8	2,2	+	0,280	0,27	3,7
9	2,3	+	0,278	0,26	6,4
10	2,4	+	0,269	0,25	7,1
11	2,5	+	0,257	0,24	6,7
12	2,6	+	0,244	0,22	9,8
13	1,5	-	0,741	0,72	2,8
14	1,6	-	0,824	0,80	2,9
15	1,7	-	0,852	0,82	3,8
16	1,8	-	0,814	0,79	2,9
17	1,9	-	0,728	0,70	3,8
18	2	-	0,62	0,59	4,8
19	2,1	-	0,514	0,49	4,7
20	2,2	-	0,424	0,41	3,3
21	2,3	-	0,353	0,33	6,5
22	2,4	-	0,298	0,28	6,0

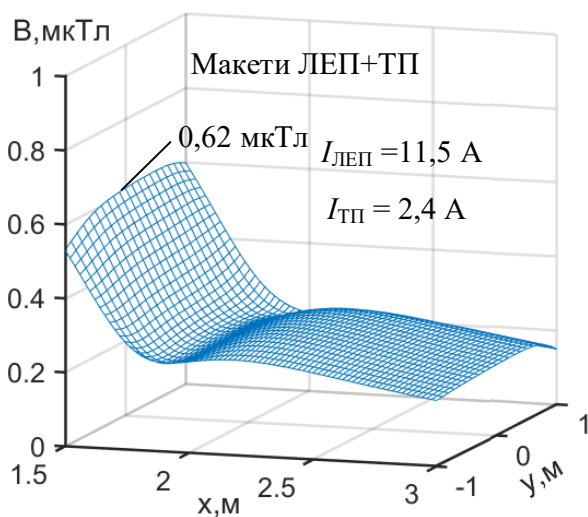


а

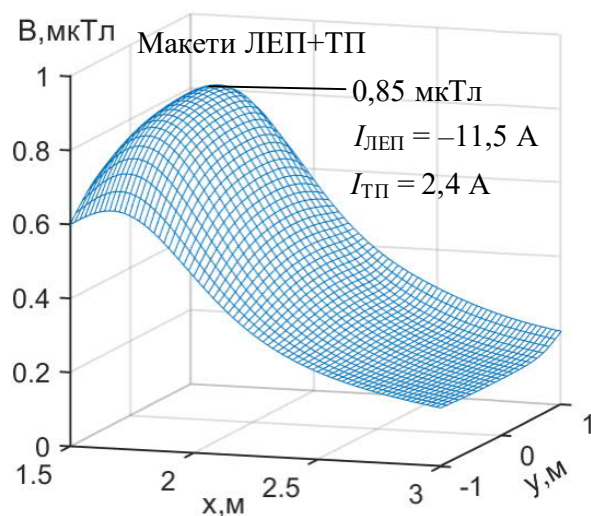


б

Рисунок 6.12 – Розрахунковий розподіл діючого значення індукції МП на контрольній площині D при окремому впливі макетів ЛЕП і ТП, МП яких відповідає нормативному рівню $\tilde{B}_{norm}$ ($z_2 = 0,5$ м) .



а



б

Рисунок 6.13 – Розрахунковий розподіл діючого значення індукції МП на контрольній площині D при сумарному впливі макетів ЛЕП і ТП, МП кожного з яких відповідає нормативному рівню $\tilde{B}_{norm}$, і зміні напрямку передачі енергії (знаку струму ЛЕП) ($z_2=0,5$ м)

Результати експериментальних досліджень розподілу діючого значення індукції МП на контрольній площині D при окремому впливі макетів ЛЕП і ТП,

МП яких відповідає нормативному рівню $\tilde{B}_{norm}$, представлені на рис. 6.14. Вони добре узгоджуються з результатами розрахунку (рис. 6.12).

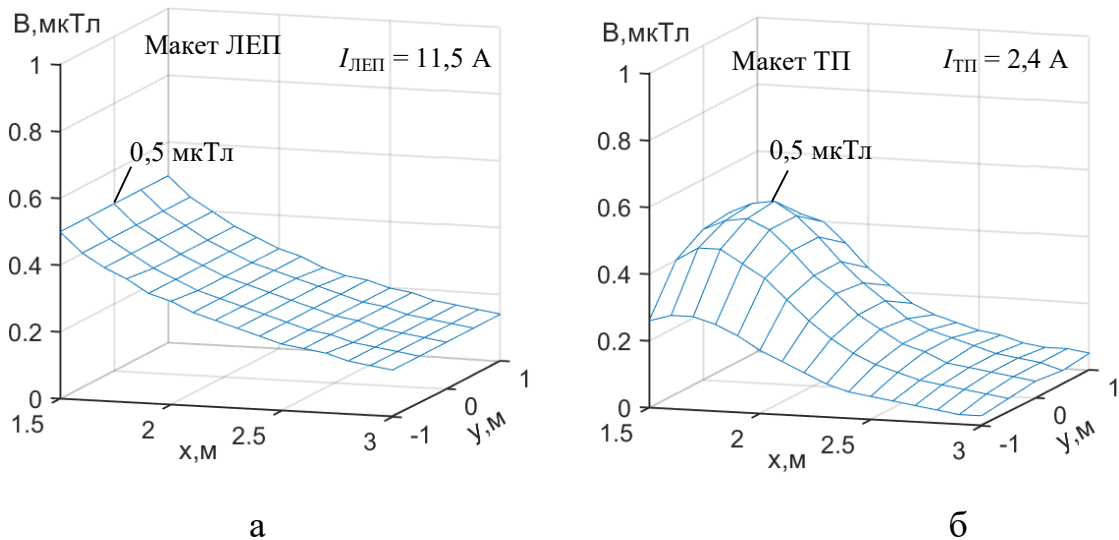


Рисунок 6.14 – Експериментально визначений розподіл діючого значення індукції МП на контрольній площині D при окремому впливі лабораторної установки (рис. 6.8) з макетами ЛЕП і ТП, МП яких відповідає нормативному рівню $\tilde{B}_{norm}$ ($z_2 = 0,5$ м)

Результати експериментальних досліджень розподілу діючого значення індукції МП на контрольній площині D при сумарному впливі лабораторної установки (рис. 6.8) з макетами макетів ЛЕП і ТП, МП кожного з яких відповідає нормативному рівню $\tilde{B}_{norm}$ ($z_2 = 0,5$ м), і зміні напрямку струму ЛЕП представлені на рис. 6.15, а також занесені в табл. 6.5. Вони також добре узгоджуються з результатами розрахунку (рис. 6.13).

Порівняння результатів розрахунку та експерименту з розподілу діючого значення індукції МП при сумарному впливі макетів ЛЕП і ТП, що представлені в табл. 6.5 і на рис. 6.12–6.15 показує, що розкид розрахункових та експериментальних значень індукції МП не перевищує 10%. Це підтверджує коректність запропонованих автором методики розрахунку сумарного МП (6.3-6.29) та методів визначення комплексного впливу групи електромереж за МП на її основі (6.30-6.32).

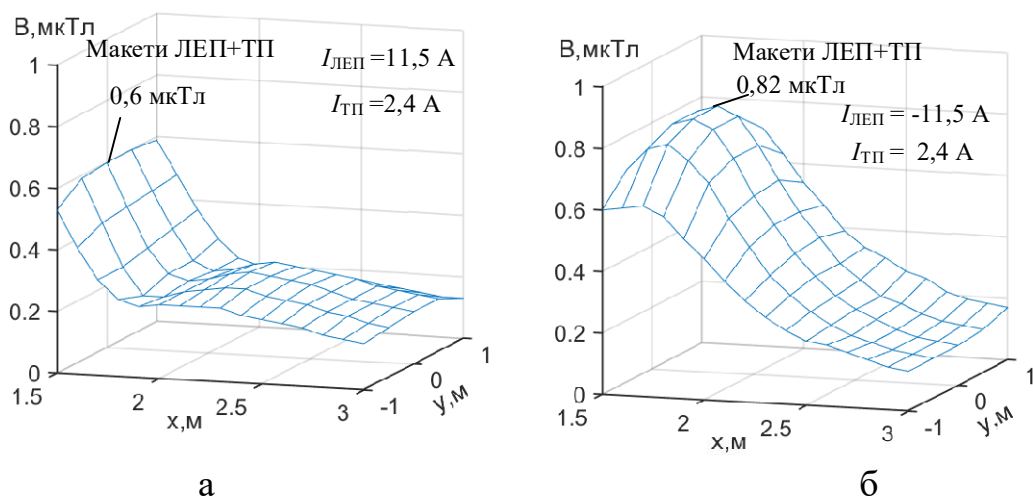


Рисунок 6.15 – Експериментально визначений розподіл діючого значення індукції МП на контрольній площині D при сумарному впливі макетів ЛЕП і ТП, МП кожного з яких відповідає нормативному рівню $\tilde{B}_{norm}$ ($z_2 = 0,5$ м), і зміні напряму передачі енергії (знаку струму ЛЕП) ($z_2 = 0,5$ м)

6.6 Методи нормалізації комплексного впливу групи електромереж за магнітним полем

Як слідує з результатів досліджень в підрозділі 6.4, для нормалізації комплексного впливу з двох вже окремо нормалізованих за МП електромереж (ЛЕП+ТП, ЛЕП+СКЕ, ТП+СКЕ), необхідно зменшити індукцію МП кожної з них від 1,06 до 1,96 разів. Це дозволить мінімізувати коефіцієнт нормалізації K_m їх МП з максимальних значень в 2 одиниці до мінімальних значень 1,96 (1,06) одиниць, що забезпечує зменшення цього коефіцієнта на 2–47 % і дозволяє відповідно зменшити економічні втрати на нормалізацію МП цих ЛЕП.

Основною задачею нормалізації МП від групи електромереж є мінімізація коефіцієнтів K_m , яку в першу чергу доцільно здійснювати шляхом реалізації запропонованих вище методів на основі визначення всіх фактичних параметрів групи електромереж, наведених в табл. 6.1–6.4.

Для нормалізації комплексного впливу з трьох вже окремо нормалізованих за МП електромереж (ЛЕП+ТП+СКЕ), необхідно зменшити індукцію МП кожної

з них від 1,32 до 2,64 разів. Це дозволить мінімізувати коефіцієнт нормалізації K_m їх МП з максимальних значень в 3 одиниці до мінімальних значень 2,64 (1,32) одиниць, що забезпечує зменшення цього коефіцієнта на 12–56 % і дозволяє відповідно зменшити економічні втрати на нормалізацію МП.

Для нормалізації комплексного впливу групи з n вже попередньо нормалізованих електромереж, МП яких не перевищує 0,5 мкТл, використовуємо наведену вище методику досліджень. Для цього можуть бути запроваджені такі відомі інженерні методи зменшення МП електромереж [306, 333], як захист відстанню, активне та пасивне екранування, конструктивно-технологічні заходи, вибір яких здійснюється на основі техніко-економічного аналізу. Очевидно, що чим меншим є необхідний коефіцієнт нормалізації K_m , тим меншими будуть економічні витрати на його практичну реалізацію.

Таким чином, методи нормалізації комплексного впливу групи електромереж за магнітним полем ґрунтуються на комплексному використанні запропонованих автором верифікованих методів математичного моделювання і методик розрахунку МП ЛЕП (розділ 2 дисертації), структурних методів зменшення МП ЛЕП та методів активного і пасивного екранування МП ТП (розділи 3-4 дисертації), розроблених автором рекомендацій з мінімізації МП СКЕ. Використання розроблених методів дозволяє зменшити економічні втрати на нормалізацію МП в житлових приміщеннях будинків при комплексному впливі 2(3) електромереж на 12%–56% в порівнянні з розповсюдженою зараз песимістичною оцінкою, при якій коефіцієнт нормування K_m приймається максимальним і складає 3 (2) одиниці.

Більш складною буде нормалізація комплексного впливу для групи електромереж, кожна з яких ще не нормалізована і має перевищення за МП над нормативним рівнем 0,5 мкТл [4]. У цьому випадку спочатку визначається необхідний початковий коефіцієнт нормалізації МП $K_{m,n,i} = \tilde{B}_i / \tilde{B}_{norm}$ для кожної i -ї електромережі. На другому етапі розраховується остаточний коефіцієнт нормалізації $K_{m,i}$:

$$K_{m,i} = K_{m,n,i} K_m \quad (6.33)$$

Таким чином, запропоновані здобувачем на основі (6.3–6.33) методи визначення комплексного впливу групи електромереж на рівень МП у житлових приміщеннях, яка включає методи аналізу, розрахунку та оцінки впливу зовнішніх і внутрішніх електромереж (ЛЕП, ТП, СКЕ) і дозволяє виявити і реалізувати умови економічно доцільного обмеження індукції магнітного поля окремих електромереж, за яких сумарний рівень МП у житлових приміщеннях не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл.

Істотне зменшення K_m також можливо за рахунок організації оптимального режиму живлення СКЕ.

Враховуючи важливість практичної реалізації запропонованих методів зменшення комплексного впливу зовнішніх та внутрішніх електромереж на рівень МП в житлових приміщеннях будинків, перспективною є розробка проекту змін до відповідних нормативних документів Міненерго.

6.7 Висновки до шостого розділу

1. Невизначеність процесів комплексного впливу магнітного поля групи з n електромереж на рівень магнітного поля в житловому приміщенні може призвести до запровадження методів зменшення індукції їх МП з надмірною ефективністю, та викликати нераціональні економічні втрати.

2. Запропоновано методи визначення комплексного впливу групи електромереж на рівень МП в житлових приміщеннях, що базується на законі Біо-Савара та принципі суперпозиції. Ці методи на основі врахування функціональної залежності між миттєвими значеннями струмів в електромережах, їх геометричними і фізичними параметрами, та сумарним діючим значенням індукції МП в приміщенні, дозволяють забезпечити встановлення мінімально необхідних обмежень індукції МП для окремих

електромереж, при яких сумарне МП не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл.

3. Запропоновано метод нормалізації сумарного МП, яке утворюється групою електричних мереж у житловому приміщенні, заснований на вищезгаданій методиці. Цей метод дозволяє визначати фактичний рівень сумарного МП в приміщенні і на цій основі розробляти економічно ефективні заходи для нормалізації МП в приміщенні.

4. Коректність розроблених методів визначення комплексного впливу групи електромереж за МП підтверджено експериментальними випробуваннями групи електромереж ЛЕП+ТП на створеній для цього експериментальній установці, що складається з повномасштабного лабораторного макету струмопроводу ТП 100 кВА та макету ЛЕП. Порівняння результатів розрахунку та експерименту для найгіршого випадку показує, що розкид розрахункових та експериментальних значень індукції МП не перевищує 10%.

5. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що впровадження запропонованих методів для визначення комплексного впливу реальних електромереж (повітряних ЛЕП 110 кВ, вбудованої трансформаторних підстанцій 6/10 кВ, систем кабельного електрообігріву 2,2 кВт) дозволяє зменшити необхідний коефіцієнт нормалізації K_m магнітного поля окремих електромереж на 12–56 % і відповідно зменшити економічні витрати на нормалізацію магнітного поля в приміщенні.

6. Зважаючи на важливість практичної реалізації запропонованих методів для економічно ефективного зменшення впливу групи електромереж на рівень магнітного поля в житлових приміщеннях до безпечних для населення значень, перспективною є розробка проекту змін до відповідних нормативних документів Міністерства енергетики.

7. Результати досліджень у цьому розділі опубліковані у роботах здобувача [306, 333, 343, 358, 359] і впроваджені відповідно до додатків В1-В6 дисертації.

ВИСНОВКИ ДО ДИСЕРТАЦІЇ

В дисертаційній роботі розвинуто методи моделювання, розрахунку і зменшення індукції магнітного поля в житлових будинках під впливом зовнішніх та внутрішніх електромереж, та розроблено науково-методичні основи і засоби їх електромагнітної сумісності з житловим середовищем на основі нормалізації магнітного поля в житлових приміщеннях до безпечного для населення рівня. Отримані в дисертації результати в сукупності складають суттєвий внесок у вирішення актуальної проблеми захисту населення від негативного впливу магнітного поля промислової частоти, що створюється в житлових приміщеннях наближеними електромережами при їх індивідуальному або комплексному впливі.

1. Виявлені основні джерела МП промислової частоти, що створюють МП в житлових приміщеннях будинків, та обґрунтована необхідність обмеження сумарної індукції їх МП до рівня санітарних норм 0,5 мкТл. До цих джерел, які підлягають подальшому дослідженню, відносяться повітряні лінії електропередачі (ЛЕП) 0,4-330 кВ, вбудовані трансформаторні підстанції (ТП) 6(10)/0,4 кВ, системи кабельного електрообігріву (СКЕ) підлог житлових приміщень і внутрішні електромережі живлення (ВЕЖ) житлових приміщень 0,4 кВ.

2. Теоретично доведено, та експериментально обґрунтовано, що стіни та міжповерхові перекриття житлових будинків із типових будівельних матеріалів, включаючи збірний залізобетон, мають низьку ефективність екранування МП промислової частоти електромереж, яка не перевищує 10%. Отже, МП електромереж практично безперешкодно проникає в житлові приміщення, що є важливим чинником для розрахунку рівнів індукції МП у житлових приміщеннях від зовнішніх і внутрішніх електромереж.

3. Розроблено та експериментально обґрунтовано у лабораторних та натурних умовах нову математичну модель, метод моделювання та верифіковану

методику розрахунку МП трифазних ЛЕП. На відміну від існуючих підходів, розроблений метод базується виключно на діючих значеннях магнітної індукції. Це дозволяє використовувати для розрахунку тільки величини, що підлягають санітарному нормуванню та прямому вимірюванню стандартними приладами, чим забезпечується підвищення достовірності результатів. Розроблені метод і методика розрахунку МП ЛЕП склали теоретичну основу для чинного нормативного документу Міненерговугілля «СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання» в редакції 2016 року», співавтором якого є здобувач.

4. Теоретично визначено та експериментально підтверджено, що за межами чинних охоронних зон повітряних ЛЕП 110–330 кВ, визначених за електричним полем (ЕП), може мати місце перевищення в 1,5–5,6 разів гранично допустимого рівня індукції МП ЛЕП (0,5 мкТл), що обумовлює необхідність збільшення величини чинних охоронних зон ЛЕП 330 кВ – в 2,8 рази (з 30 м до 83 м) і ЛЕП 110 кВ – в 1,5 рази (з 20 м до 30 м).

5. Розроблено та експериментально обґрунтовано нову мультидипольну математичну модель МП повітряних ЛЕП, яка дозволяє моделювати індукцію МП поблизу меж їх охоронних зон, та має чітку фізичну інтерпретацію, що спрощує розробку методів зменшення МП електромереж на її основі.

6. Із застосуванням розробленої мультидипольної моделі МП ЛЕП запропоновано новий метод зменшення МП ЛЕП- метод векторної компенсації МП. Він заснований на симетруванні системи розщеплених проводів фаз для досягнення осьової симетрії системи більш високого порядку і дозволяє зменшити МП за рахунок забезпечення взаємної компенсації магнітних моментів системи її проводів. Реалізація методу векторної компенсації здійснюється за рахунок удосконалення геометрії підвісу проводів ЛЕП і не потребує додаткового відчуження земельних ділянок.

7. На основі розробленого методу векторної компенсації запропоновано метод проектування ЛЕП з удосконаленим підвісом її розщеплених проводів фаз і зменшеним МП, та розроблено нові схеми підвісу ЛЕП 110 – 330 кВ з

підвищеним порядком їх симетрії ($p=2, p=3$), практична реалізація яких дозволяє структурними методами зменшити на порядок індукцію МП на границях охоронних зон ЛЕП.

8. Визначені умови удосконалення геометрії підвісу проводів двоколових повітряних ЛЕП 110–330 кВ для зменшення їх МП на основі методу векторної компенсації, що дозволило запропонувати метод «перефазування» проводів фаз A2 і C2 (A1, B1, C1–C2, B2, A2) ліній електропередачі, який дозволяє зменшити індукцію їх МП ЛЕП до 3–6 разів шляхом модернізації діючих ЛЕП, виконаних на стандартних опорах типу «бочка».

9. На основі закону Біо-Савара та принципу суперпозиції розроблено та верифіковано нову аналітичну математичну модель та методику розрахунку МП для вбудованих трансформаторних підстанцій (ТП) 6(10)/0,4 кВ, що на відміну від існуючої дозволяє виконувати розрахунок МП на малих (біля 1 м) відстанях від струмопроводів ТП до житлових приміщень.

10. Набув подальшого розвитку метод синтезу САЕ МП ТП потужністю 100-2х400 кВА, та синтезовані САЕ на його основі, які дозволяють нормалізувати індукцію МП в житлових приміщеннях над вбудованими ТП 100 кВА при відстанях $\geq 1,0$ м, ТП 200 кВА при відстанях $\geq 1,27$ м, ТП 300 кВА при відстанях $\geq 1,42$ м, ТП 400 кВА при відстанях $\geq 1,55$ м. Показана можливість нормалізації МП над ТП 100-400 (2х400) кВА при мінімальній відстані 1,0 м в разі комплексного використання як синтезованих САЕ, так і відомих пасивних електромагнітних екранів з коефіцієнтом екранування МП від 2,3 до 4,5 од.

11. Розроблено і експериментально обґрунтовано математичні моделі МП дво жильних планарних і коаксіальних кабелів, що використовуються для системи кабельного електрообігріву і ВЕЖ житлових приміщень.

12. Досліджено МП системи кабельного електрообігріву (СКЕ) на основі сучасних дво жильних планарних нагрівальних кабелів з мінімальною відстанню між жилами 1,4 мм. Показано, що побудова таких СКЕ при рекомендованій глибині прокладання 0,03–0,05 м та струмі 10 А, призводить до створення індукції МП на підлозі житлових приміщень величиною 3,75–1,3 мкТл, що в 7,5–

2,6 разів перевищує гранично допустимий рівень індукції магнітного поля 0,5 мкТл. Тому безпечно для населення використання в житлових приміщеннях СКЕ, виконаних на основі сучасних двожильних планарних нагрівальних кабелів (НК), досягається тільки при глибини їх прокладання більш 0,085–0,1 м, або в разі обмеження струму СКЕ і, відповідно, їх теплової потужності.

13. Досліджено МП СКЕ, що побудовані на основі сучасних коаксіальних НК. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що виконання СКЕ на основі коаксіальних НК є найбільш ефективним методом нормалізації МП в житлових приміщеннях. Це дозволяє на порядок зменшити індукцію їх МП і вирішити проблему мінімізації можливих ризиків для здоров'я населення при використанні СКЕ в житлових приміщеннях.

14. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що індукція МП на відстані 0,5 м від ВЕЖ для найгіршого випадку ($I = 30\text{ А}$, відстань між жилами кабелю 5 мм) складає не більше 0,12 мкТл і не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл, що дозволяє при подальшому аналізі не враховувати вплив ВЕЖ на житлові приміщення за МП.

15. Розроблено методи визначення комплексного впливу групи зовнішніх і внутрішніх електромереж на рівень МП в житлових приміщеннях, що базується на законі Біо-Савара та принципі суперпозиції, використання яких дозволяє зменшити необхідний коефіцієнт нормалізації МП окремих електромереж на 12–56 %, що обумовлює відповідне зменшення вартості засобів нормалізації МП. Ці методи на основі врахування функціональної залежності між миттєвими значеннями струмів в електромережах, їх геометричними і фізичними параметрами, та сумарним діючим значенням індукції МП в приміщенні, дозволяють забезпечити встановлення мінімально необхідних обмежень індукції МП для окремих електромереж, при яких сумарне МП не перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл.

16. Розроблено науково-методичні основи забезпечення електромагнітної сумісності зовнішніх та внутрішніх електромереж з житловим середовищем при їх індивідуальному або груповому впливі за МП шляхом комплексного

зменшення індукції їх МП до безпечного для населення рівня в житлових приміщеннях. Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків, і рекомендацій дисертаційних досліджень підтверджується використанням коректних методів досліджень, узгодженням розрахунків з експериментальними даними та раніш відомими з літературних джерел результатами, апробацією основних положень і результатів на представницьких наукових конференціях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The International EMF Project / World Health Organization. – Режим доступу: <https://www.who.int/initiatives/the-international-emf-project> (дата звернення: 20.10.2025).
2. Environmental Health Criteria 232: Extremely Low Frequency Fields. Geneva : World Health Organization, 2007. 86 p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241572325> (дата звернення: 20.10.2025).
3. Electromagnetic fields: Magnetic flux density (microT), exposure limit / World Health Organization. URL: [https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/magnetic-flux-density-\(microt\)](https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/magnetic-flux-density-(microt)) (дата звернення: 20.10.2025).
4. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Харків : Форт, 2017. 760 с.
5. ДБН В.2.2-15:2019. Житлові будинки. Основні положення. Мінрегіон України. Київ, 2019. (Державні будівельні норми України).
6. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM–2015. Germany : Institut fer Baubiologie + Ekologie IBN, 2015. 5 p. URL: <https://www.baubiologie.de/site/wp-content/uploads/richtwerte-2015-englisch> (дата звернення: 20.10.2025).
7. Гігієнічне обґрунтування вимог до розміщення та експлуатації кабельних ліній електропередачі та їх обладнання в умовах сучасної міської забудови / А. М. Сердюк та ін. *Гігієна населених місць* : зб. наук. пр. 2015. № 66. С. 20–29.
8. Ordinanza sulla protezione dalle radiazioni non ionizzanti (ORNI), SR 814.710, del 23 dicembre 1999 (Stato 1° gennaio 2022) / Federal Council of Switzerland. URL: www.fedlex.admin.ch (дата звернення: 24.01.2026).
9. ДБН В.2.2-20:2008. Будинки і споруди. Готелі. Мінрегіонбуд України. Київ, 2008. (Державні будівельні норми України).

10. Assessment of Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields: Working Group Report. National Institutes of Health, 1998. 524 p. (NIH Publication No. 98-3981). URL: niremf.ifac.cnr.it (дата звернення: 24.01.2026).

11. Про затвердження Правил охорони електричних мереж : Постанова Кабінету Міністрів України від 27 груд. 2022 р. № 1455. Офіційний портал Кабінету Міністрів України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-pravyl-okhorony-elektrychnykh-merezh-1455-271222> (дата звернення: 20.10.2025).

12. ДСН 239-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань : Наказ МОЗ України від 01.08.1996 № 239 (у редакції наказу МОЗ України від 05.09.2023 № 1577). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0488-96> (дата звернення: 20.10.2025).

13. Albano M., Benato R., Turri R. Predictive analysis of environmental magnetic fields generated by multiple power lines. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*. Bologna, Italy, 2003. Vol. 2. 6 p. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304689.

14. Landau L. D., Lifshitz E. M. The classical theory of fields (Course of theoretical physics, Volume 2). Oxford: Pergamon Press, 1975. 402 p..

15. Баранов М. І., Розов В. Ю., Сокол Е. І. До 100-річчя Національної академії наук України – колиски вітчизняної науки і техніки. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. № 5. С. 3–11. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.5.01.

16. Нестеренко А. Д. Введение в теоретическую электротехнику. Киев : Наукова думка, 1969. 351 с.

17. Duplex ABC Cable with ACSR Neutral. *Henan Province Jianyun Cable Co., Ltd*. URL: <https://www.jianyuncable.com/aerial-bundle-cable/duplex-abc-cable.html> (дата звернення: 20.10.2025).

18. Features of designing high-voltage overhead power lines in an underground collector / S. Yu. Shevchenko et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No. 4. Art. 08. DOI: 10.20998/2074-272X.2025.4.08.

19. Grechko O., Kulyk O. Current State and Future Prospects of Using SF₆ Gas as an Insulation in the Electric Power Industry. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, 2024. P. 1–6. DOI: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10877987.
20. СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011. Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова (у редакції наказу Міністерства енергетики України від 26.01.2017 № 82). Київ, 2017. 132 с.
21. Magnetic fields from domestic appliances in the UK / A. W. Preece et al. *Physics in Medicine & Biology*. 1997. Vol. 42, no. 1. P. 67–76. DOI: 10.1088/0031-9155/42/1/004.
22. Three-dimensional numerical simulation of power frequency electromagnetic field inside and outside substation / Z. Du et al. *Power System Technology*. 2012. Vol. 36, no. 6. P. 229–235.
23. Tomasevich Y., Lima A. C. S. Analysis of 50/60-Hz Magnetic Fields in 2-D Induced by High-Voltage Transmission Lines. *2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*. Lima, Peru, 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/INTERCON52678.2021.9532811.
24. Grbić M. Levels of electromagnetic fields in the vicinity of transmission power lines and facilities and mitigation techniques. *Tesla Innovation Days (2024, Belgrade) : zbornik radova*. 2024. P. 46–49. DOI: 10.5937/TID24046G.
25. Bendík J., Cenký M., Eleschová Ž. The Influence of Harmonic Content on the RMS Value of Electromagnetic Fields Emitted by Overhead Power Lines. *Modelling*. 2024. Vol. 5, no. 4. P. 1519–1531. DOI: 10.3390/modelling5040079.
26. Манілов А. М., Красножон А. В., Товстюк С. О. Оцінювання величини магнітного поля кабельного обігріву житлових та промислових приміщень з точки зору його безпеки для людини. *Промелектро*. 2022. № 3–6. С. 32–36. URL: <https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2022/EP/Promelektro-3-6-2022.pdf> (дата звернення: 24.01.2026).

27. Does apartment's distance to an in-built transformer room predict magnetic field exposure levels? / A. Huss et al. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2013. Vol. 23, no. 5. P. 554–558. DOI: 10.1038/jes.2013.33.
28. Said I., Hussain H. B., Dave V. Characterization of magnetic field at distribution substations. *9th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. 2010. P. 423–426. DOI: 10.1109/EEEIC.2010.5489953.
29. Navarro-Camba E. A., Segura-García J., Gomez-Perretta C. Exposure to 50 Hz Magnetic Fields in Homes and Areas Surrounding Urban Transformer Stations in Silla (Spain): Environmental Impact Assessment. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, no. 8. Art. 2641. DOI: 10.3390/su10082641.
30. Exposure to 50 Hz magnetic field in apartment buildings with built-in transformer stations in Hungary / G. Thuroczy et al. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008. Vol. 131, no. 4. P. 469–473. DOI: 10.1093/rpd/ncn199.
31. Ponnle A. A. Measurement and Assessment of Exposure to 50 Hz Magnetic Fields from Common Home Electrical Appliances. *European Journal of Engineering and Technology Research*. 2022. Vol. 7, no. 3. P. 119–127. DOI: 10.24018/ejeng.2022.7.3.2832.
32. Moriyama K., Yoshitomi K. Apartment electrical wiring: a cause of ELF magnetic field exposure in residential areas. *Bioelectromagnetics*. 2005. No. 26. P. 238–241. DOI: 10.1002/bem.20099.
33. Indoor transformer stations and ELF magnetic field exposure: use of transformer structural characteristics to improve exposure assessment / E. O. Okokon et al. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2014. Vol. 24, no. 1. P. 100–104. DOI: 10.1038/jes.2013.54.
34. Garrido C., Otero A. F., Cidras J. Low-Frequency Magnetic Fields from Electrical Appliances and Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. Vol. 18, no. 4. P. 1310–1319. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.817744.
35. Improving Current Transformer-Based Energy Extraction From AC Power Lines by Manipulating Magnetic Field / Y. Zhuang et al. *IEEE Transactions on*

Industrial Electronics. 2020. Vol. 67, no. 11. P. 9471–9479. DOI: 10.1109/TIE.2019.2952795.

36. Canova A., Giaccone L., Cirimele V. Active and passive shield for aerial power lines. *Proc. of the 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2019)*. 2019. No. 1096. 5 p.

37. Application of a new IEC magnetic field assessment methodology to promote transformer substation sustainable development / J. Izaguirre et al. *IEEE 2011 EnergyTech*. Cleveland, OH, USA, 2011. P. 1–6. DOI: 10.1109/EnergyTech.2011.5948512.

38. Grbić M., Canova A., Giaccone L. Levels of Magnetic Field in an Apartment near 110/35 kV Substation and Proposal of Mitigation Techniques. *10th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016)*. Belgrade, Serbia, 2016. No. 030. DOI: 10.1049/cp.2016.1025.

39. MacDonald M. A Comparison of Electricity Transmission Technologies: Costs and Characteristics. An Independent Report by Mott MacDonald in Conjunction with the IET. 2025. 335 p. URL: https://www.theiet.org/media/axwkktkb/100110238_001-rev-j-electricity-transmission-costs-and-characteristics_final-full.pdf (дата звернення: 20.10.2025).

40. Saied M. M. Canceling the Power Frequency Magnetic and Electric Fields of Power Lines. *IETE Journal of Education*. 2014. Vol. 54, no. 2. P. 90–99. DOI: 10.1080/09747338.2013.10876111.

41. Подольцев О. Д., Кучерява І. М. Захищені ізоляцією проводи для повітряних ліній електропередачі на середню напругу: переваги, комп'ютерні розрахунки. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 5. С. 14–17. DOI: 10.15407/techned2022.05.014.

42. Болух В. Ф., Назаренко С. А., Рассоха М. О. Мультиполевая модель импульсного электромеханического преобразователя. *Интегрированные технологии и энергосбережение*. 2009. № 3. С. 34–40.

43. Determination of parameters of an autonomous source of a constant magnetic field for a portable electromagnetic-acoustic transducer / V. F. Bolyukh et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No. 4. P. 72–79. DOI: 10.20998/2074-272X.2025.4.09.

44. Bolyukh V. F. Electromechanical processes during the start of induction-type magnetic levitation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No. 3. P. 3–10. DOI: 10.20998/2074-272X.2025.3.01.

45. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами / В. Б. Клепиков и др. *Электротехника*. 1999. № 5. С. 2–6.

46. Grinchenko V. S. Alfa-beta transformation approach for the active shielding of flat power line. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 11–13.

47. Розов В. Ю., Заутнер Ф. Л., Пилюгина О. Ю. Погрешность измерений магнитного поля, вызываемая массами активных материалов, расположенных вблизи источника. *Технічна електродинаміка*. 1995. № 4. С. 3–8.

48. Розов В. Ю., Ерисов А. В., Волохов С. А. Стенд для измерения магнитных моментов изделий. *Праці міжнародної науково-технічної конф. «Метрологія в електроніці-97»*. Т. 1. Харків : ДНВО «Метрологія», 1997. С. 167–169.

49. Системи управління високоякісними джерелами постійного струму / В. Ю. Розов та ін. Київ : Техніка, 1999. 236 с.

50. Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня / В. Ю. Розов та ін. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2008. Ч. 2. С. 3–8.

51. Розов В. Ю., Гетьман А. В. Структура контурних динамічних систем для практичного гармонічного аналізу магнітного поля технічних об'єктів. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2008. Ч. 3. С. 97–100.

52. Нормирование и измерение собственного магнитного поля космических аппаратов / В. Ю. Розов та ін. *Тезисы докладов III-й международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее»*. Дніпропетровськ, 2011. С. 45.

53. Smythe W. R. Static and Dynamic Electricity. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 1968. 623 p.

54. Stratton J. A. Electromagnetic Theory. New York : McGraw-Hill Book Company, Inc., 1941. 615 p.

55. Buchholz H. Elektrische und magnetische Potentialfelder. Berlin, Göttingen, Heidelberg : Springer-Verlag, 1957. 552 s.

56. Someda C. G. Electromagnetic Waves. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2006. 596 p.

57. Van Bladel J. G. Electromagnetic Fields. 2nd ed. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2007. 1155 p.

58. Rothwell E. J., Cloud M. J. Electromagnetics. Boca Raton : CRC Press, 2001. 540 p.

59. Moliton A. Basic Electromagnetism and Materials. New York, London : Springer, 2007. 430 p.

60. Balanis C. A. Advanced Engineering Electromagnetics. New York, Toronto : John Wiley & Sons, Inc., 1989. 985 p.

61. ДСанПіН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів : Наказ МОЗ України від 18.12.2002 № 476. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03> (дата звернення: 20.10.2025).

62. Non-ionizing radiation, Part 1, Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. Lyon, France : IARC Press, 2002. Vol. 80. 429 p.

63. ДСТУ EN 61140:2019. Захист від ураження електричним струмом. Загальні вимоги для установок та обладнання (EN 61140:2016, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 43 с. (Національний стандарт України).

64. IEC 60479-1:2018. Effects of Current On Human Beings and Livestock – Part 1: General Aspects. Geneva : IEC, 2018. 72 p.
65. DNA fragmentation in human fibroblasts under extremely low frequency electromagnetic field exposure / F. Focke et al. *Mutation Research*. 2009. Vol. 683, no. 1-2. P. 74–83. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2009.08.012.
66. Feychting M., Floderus B., Ahlbom A. Parental occupational exposure to magnetic fields and childhood cancer (Sweden). *Cancer Causes & Control*. 2000. Vol. 11, no. 2. P. 151–156. DOI: 10.1023/A:1008915016571.
67. Wertheimer N., Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *American Journal of Epidemiology*. 1979. Vol. 109, no. 3. P. 273–284.
68. Extremely-low-frequency magnetic field exposure of children at schools near high voltage transmission lines / C.-Y. Li et al. *Science of the Total Environment*. 2007. Vol. 376, no. 1-3. P. 151–159. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.050.
69. Havas M. Biological Effects of Low Frequency. *Electromagnetic Environments and Health in Buildings* / ed. by D. Clements-Croome. London : Spon Press, 2004. P. 207–254.
70. Ozen S. Evaluation and measurement of magnetic field exposure at a typical high-voltage substation and its power lines. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008. Vol. 128, no. 2. P. 198–205. DOI: 10.1093/rpd/ncm341.
71. MPRII 1990:08. User's Guide to MPR II. Swedish Board for Technical Accreditation (SWEDAC). 1990. 32 p.
72. Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003. Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti. *Gazzetta Ufficiale*. 2003. Serie Generale n. 200. URL: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2003/08/29/03A09749/sg> (data di accesso: 24.01.2026).
73. Quantification of lifetime accumulated ELF-EMF exposure from household appliances in the context of a retrospective epidemiological case–control study / T.

Behrens et al. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2004. Vol. 14. P. 144–153. DOI: 10.1038/sj.jea.7500305.

74. ICNIRP Guidelines for limiting exposure to timevarying electric and magnetic fields (1 Hz-100 kHz) / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Physics*. 2010. Vol. 99, no. 6. P. 818–836. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.

75. Stam R. Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields). National Institute for Public Health and the Environment. The Netherlands, 2018. 18 p. URL: <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/Comparison%20of%20international%20policies%20on%20electromagnetic%20fields%202018.pdf> (дата звернення: 20.10.2025).

76. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). *Official Journal of the European Union*. 2013. L 179. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj> (дата звернення: 20.10.2025).

77. Repubblica Italiana. Legge 22 febbraio 2001, n. 36. Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*. 2001. n. 55. URL: www.gazzettaufficiale.it (дата звернення: 20.10.2025).

78. Repubblica Italiana. Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81. Attuazione dell'art. 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. *Governo Italiano*. 2008. URL: www.normattiva.it. (дата звернення: 20.10.2025).

79. Ahlbom A. et al. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *British Journal of Cancer*. 2000. Vol. 83, no. 5. P. 692–698. DOI: 10.1054/bjoc.2000.1376.

80. Kheifets L. et al. Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. *British Journal of Cancer*. 2010. Vol. 103, no. 7. P. 1128–1135. DOI: 10.1038/sj.bjc.6605838.

81. Exposure to extremely low-frequency magnetic fields and childhood cancer: A systematic review and meta-analysis / G. Seomun, J. Lee, J. Park. *PLOS ONE*. 2021. Vol. 16, no. 5. Art. e0251628. DOI: 10.1371/journal.pone.0251628.

82. Tenforde T. S. Interaction of ELF magnetic fields with living systems. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields* / ed. by C. Polk, E. Postow. 2nd ed. CRC Press, 1996. P. 185–230. DOI: 10.1201/9781351071017.

83. Savitz D. A., Checkoway H., Loomis D. P. Magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality among electric utility workers. *Epidemiology*. 1998. Vol. 9, no. 4. P. 398–404. DOI: 10.1097/00001648-199807000-00009.

84. Johansen C., Olsen J. H. Risk of cancer among Danish utility workers – a nationwide cohort study. *American Journal of Epidemiology*. 1998. Vol. 147, no. 6. P. 548–555. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a009486.

85. Neurodegenerative Diseases in Welders and Other Workers Exposed to High Levels of Magnetic Fields / N. Håkansson et al. *Epidemiology*. 2003. Vol. 14, no. 4. P. 420–426. DOI: 10.1097/01.EDE.0000078446.76859.c9.

86. Van Loock W. Elementary effects in humans exposed to electromagnetic fields and radiation. *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM 2009)*. Xian, China, 2009. P. 221–224. URL: ieeexplore.ieee.org (дата звернення: 20.10.2025).

87. Effect of low-frequency magnetic fields on brain electrical activity in human subjects / A. A. Marino et al. *Clinical Neurophysiology*. 2004. Vol. 115, no. 5. P. 1195–1201. DOI: 10.1016/j.clinph.2003.12.019.

88. Hamza A.-S. H., Mohmoud S. A., Ghania S. M. Environmental Pollution by Magnetic Field associated with Power Transmission Lines. *Energy Conversion and Management*. 2001. Vol. 43, no. 18. P. 2443–2452. DOI: 10.1016/S0196-8904(01)00184-1.

89. Hameyer K., Mertens R., Belmans R. Numerical methods to evaluate the electromagnetic fields below overhead transmission lines and their measurement. *First IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (ICCDACS)*. 1995. P. 32–36. DOI: 10.1109/ICCDACS.1995.499071.

90. Hameyer K., Mertens R., Belmans R. Computation and measurement of electromagnetic fields of AC-high-voltage transmission lines. *6th International Conference on AC & DC Transmission*. 1996. No. 423. P. 52–57.

91. Розов В. Ю., Реуцкий С. Ю., Пилюгина О. Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 11–13.

92. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdvi I. V. Method of adjustment of three-circuit system of active shielding of magnetic field in multi-storey buildings from overhead power lines with wires triangular arrangement. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. No. 1. P. 21–28. DOI: 10.20998/2074-272X.2022.1.03.

93. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdvi I. V. Comparison of the effectiveness of thripole-loop and double-loop systems of active shielding of a magnetic field in a multi-storey old buildings. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. No. 3. P. 21–27. DOI: 10.20998/2074-272X.2022.3.04.

94. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdvi I. V. Synthesis of an effective system of active shielding of the magnetic field of a power transmission line with a horizontal arrangement of wires using a single compensation winding. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022. No. 6. P. 15–21. DOI: 10.20998/2074-272X.2022.6.03.

95. Active shielding of magnetic field with circular space-time characteristic / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. No. 2. P. 26–32. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.2.04.

96. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdvi I. V. The effectiveness of active shielding of magnetic field with circular space-time characteristic and with different shielding coils spatial positions. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. No. 3. P. 15–23. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.3.03.

97. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdvi I. V. Active shielding of magnetic field of overhead power line with phase conductors of triangle arrangement. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 25–28. DOI: 10.15407/techned2020.04.025.

98. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів лінії електропередавання. Методика / С. Біткін, Ю. Думанський, В. Іскра, В. Молчанов, А. Квицинський, В. Лях, В. Сердюк. Київ: ДП «Укрсільенергопроект», 2008. 34 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України, (Втратив чинність). Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=26451 (дата звернення 01.10.2025).

99. Розов В. Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 1995. 42 с. (Препр. НАН України. Ін-т електродинаміки ; № 772).

100. Marincu A., Greconici M., Musuroi S. The Electromagnetic Field Around a High Voltage 400 KV Electrical Overhead Lines and the Influence on the Biological Systems. *Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics*. 2005. Vol. 18, no. 1. P. 105–111. DOI: 10.2298/FUEE0501105M.

101. Розов В. Ю. Математическая модель электрооборудования как источника внешнего магнитного поля. *Техническая электродинамика*. 1995. № 2. С. 3–7.

102. Conti R. et al. Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines. *IEEE Bologna Power Tech Conference*. Bologna, Italy, 2003. Paper 147. 6 p. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304342.

103. Dezelak K., Stumberger G., Jakl F. Arrangements of Overhead Power Line Conductors. *Modern Electric Power Systems (MEPS): Proceedings of the International Symposium*. Wroclaw, Poland, 2010. P. 1–6.

104. Swanson J., Kaune W. T. Comparison of residential power-frequency magnetic fields away from appliances in different countries. *Bioelectromagnetics*. 1999. Vol. 20, no. 4. P. 244–254. URL: pubmed.ncbi.nlm.nih.gov (дата звернення: 24.01.2026).

105. Krajewski W. Numerical Evaluation of the magnetic field exposure near the transition tower of an overhead-underground HV line. *Progress In Electromagnetics Research M*. 2010. Vol. 14. P. 247–261. DOI: 10.2528/PIERM10062402.
106. Lindell I. V. *Methods for Electromagnetic Field Analysis*. New York : IEEE Press, 1996. 332 p.
107. Moro F., Turri R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2008. Vol. 23, no. 2. P. 1042–1048. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.915832.
108. Moro F., Turri R. Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment. *Progress In Electromagnetics Research B*. 2012. Vol. 37. P. 343–364. DOI: 10.2528/PIERB11102706.
109. Волохов С. А., Добродеев П. Н. Влияние динамического эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле электрических машин. *Техническая электродинамика*. 1997. № 3. С. 67–71.
110. Reutskiy S. Yu. Method of particular solutions for solving PDEs of the second and fourth orders with variable coefficients. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2013. Vol. 37, issue 10. P. 1305–1310. DOI: 10.1016/j.enganabound.2013.06.002.
111. Andreuccetti D., Zoppetti N. Magnetic fields dispersed by high-voltage power lines: An Advanced evaluation method based on 3-D models of electrical lines and the territory. *Radiation Protection Dosimetry*. 2004. Vol. 111, no. 4. P. 343–347. DOI: 10.1093/rpd/nch051.
112. Leung S. W., Chan K. H., Fung L. C. Investigation of power frequency magnetic field radiation in typical high-rise building. *European Transactions on Electrical Power*. 2011. Vol. 21, no. 5. P. 1711–1718. DOI: 10.1002/etep.500.
113. Filippopoulos G., Tsanakas D. Analytical calculation of the magnetic field produced by electric power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2005. Vol. 20, no. 2. P. 1474–1482. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.839184.

114. Investigation of electrical potential and electromagnetic field for overhead high voltage power lines in Malaysia / R. K. Z. Sahbudin et al. *Journal of Applied Sciences*. 2010. Vol. 10, no. 22. P. 2862–2868. DOI: 10.3923/jas.2010.2862.2868.

115. Gryz K., Karpowicz J., Zajdler K. Evaluation of Electromagnetic Exposure during Workers' Activities near High-Voltage Electricity Grids. *Electromagnetic Ergonomics: from Electrification to a Wireless Society*. CRC Press, 2023. P. 55–73. DOI: 10.1201/9781003020486-4.

116. Description of power lines by equivalent source system / A. Canova et al. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2005. Vol. 24, no. 3. P. 893–905. DOI: 10.1108/03321640510598210.

117. Integral and analytical models for evaluating the distance of compliance / D. Bavastro et al. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*. 2014. Vol. 27, no. 3. P. 590–599. DOI: 10.1002/jnm.1941.

118. Simplified power transformer models for environmental magnetic impact analysis / A. Canova et al. *2nd International Conference on EMF-ELF*. Paris, France, 2011. DOI: 11577/176331.

119. Geri A., Veca G. M. Power-frequency magnetic field calculation around an indoor transformer substation. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*. 2005. Vol. 39. P. 695–704. DOI: 10.2495/BE050671.

120. Power Frequency Magnetic Fields from In-house Secondary Substations / E. Salinas et al. *CIREN'99: 15th Conference on Electricity Distribution*. Nice, France, 1999. P. 161–164.

121. Tarmizi A. I., Rotaru M. D., Sykulski J. K. Magnetic field calculations within substation environment for EMC studies. *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555611.

122. Medved' D., Pavlík M., Zbojovský J. Computer modeling of electromagnetic field around the 22 kV high voltage overhead lines. *2018 International*

IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE). 2018. P. 289–294. DOI: 10.1109/CANDO-EPE.2018.8601179.

123. Шевченко С. Ю., Волохин В. В., Окунь А. А. Визначення магнітного поля підстанцій високої напруги на основі метода скінченних елементів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. № 2/4 (56). С. 35–39.

124. Ghanim Thiab Hasan, Kamil Jadu Ali, Ali Hlal Mutlaq. The Influence of the Mixed Electric Line Poles on the Distribution of Magnetic Field. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*. 2022. Vol. 10, no. 2. P. 292–301. DOI: 10.52549/ijeei.v10i2.3572.

125. Fikry A., Lim S. C., Ab Kadir M. Z. A. EMI radiation of power transmission lines in Malaysia. *F1000Research*. 2022. Vol. 10, no. 1136. P. 20. DOI: 10.12688/f1000research.73067.2.

126. Faria J. A. B., Almeida M. E. Accurate calculation of magnetic-field intensity due to overhead power lines with or without mitigation loops with or without capacitor compensation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. Vol. 22, no. 2. P. 951–959. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.883025.

127. Grbic M., Canova A., Giaccone L. Magnetic field in an apartment located above 10/0.4 kV substation: levels and mitigation techniques. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*. 2017. No. 1. P. 752–756. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0090.

128. Nafar M., Solookinejad G., Jabbari M. Magnetic Field Calculation of 63 kV Transmission Lines. *International Journal of Recent Research and Applied Studies (IJRRAS)*. 2013. Vol. 17, no. 2. P. 218–224.

129. Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland / M. Rösli et al. *The Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 409, no. 18. P. 3364–3369. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.05.041.

130. Measuring and simulation of magnetic field generated by high voltage overhead transmission lines / M. Ahsan et al. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 23. Art. 102688. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102688.

131. 50 Hz Temporal Magnetic Field Monitoring from High-Voltage Power Lines: Sensor Design and Experimental Validation / K. Deprez et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 16. Art. 5325. DOI: 10.3390/s24165325.

132. Hasselgren L., Moller E., Hamnerius Y. Calculation of magnetic shielding of a substation at power frequency using FEM. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1994. Vol. 9, no. 3. P. 1398–1405. DOI: 10.1109/61.311195.

133. Fast magnetic field modeling for shielding systems / L. Giaccone et al. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2013. Vol. 49, no. 7. P. 4128–4131. DOI: 10.1109/TMAG.2012.2237391.

134. Гетьман А. В. Аналіз та синтез структури магнітного поля технічних об'єктів на основі просторових гармонік : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.05. Харків, 2019. 316 с.

135. Резинкина М. М. Расчет трехмерных электрических полей в неоднородных средах методом конечных объемов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.05. Харків, 2005. 421 с.

136. Грецких С. В. Ослабление статического геомагнитного поля ферромагнитными элементами домов : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.05. Харків, 2015. 159 с.

137. Ткаченко О. О. Магнітне поле високовольтних кабельних ліній при двосторонньому заземленні екранів кабелів : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.05. Харків, 2018. 92 с.

138. Чуніхін К. В. Магнітне поле електромагнітів систем керування космічними апаратами : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.05. Харків, 2019. 134 с.

139. Подольцев О. Д., Кучерява І. М. Тривимірна модель розрахунку магнітного поля підземної кабельної лінії. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2020. Вип. 56. С. 16–19. DOI: 10.15407/publishing2020.56.016.

140. Щерба А. А., Подольцев О. Д., Кучерява І. М. Дослідження магнітного поля силових кабелів, прокладених у поліетиленових трубах з магнітними

властивостями. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С. 15–21. DOI: 10.15407/techned2020.03.015.

141. Васецкий Ю. М. Асимптотические методы решения задач электродинамики в системах с массивными криволинейными проводниками. Київ : Наукова думка, 2010. 271 с.

142. Vasetsky Y., Zaporozhets A. Approximate Mathematical Models for Analysis of Alternating Electromagnetic Field of Sources Near Conducting Body. *Electromagnetic Field Near Conducting Half-Space*. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2023. Vol. 1070. P. 33–67. DOI: 10.1007/978-3-031-38423-3_2.

143. Мультипольная модель технического объекта и его магнитный центр / В. Ю. Розов та ін. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 2. С. 98–104.

144. Vasetsky Y., Zaporozhets A. Electromagnetic Field of Arbitrary Spatial Current Contour Located Near Conducting Body with Flat Surface. *Electromagnetic Field Near Conducting Half-Space*. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2023. Vol. 1070. P. 1–32. DOI: 10.1007/978-3-031-38423-3_1.

145. Vasetsky Y. M. Analytical determination of a quasi-stationary electromagnetic field created by magnetic moments and eddy currents in conducting half-space. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2024. No. 3. P. 48–54. DOI: 10.20998/2074-272X.2024.3.07.

146. Розов В. Ю., Заутнер Ф. Л., Пилюгина О. Ю. Вероятностный метод прогнозирования электромагнитных полей электрооборудования в низкочастотном диапазоне. *Технічна електродинаміка*. 1994. № 1. С. 3–6.

147. Розов В. Ю., Заутнер Ф. Л., Пилюгина О. Ю. Расчет магнитного поля трехфазных кабелей. *Технічна електродинаміка*. 1994. № 3. С. 7–11.

148. Розов В. Ю., Гетьман А. В., Кильдишев А. В. Пространственный гармонический анализ внешнего магнитного поля протяженных объектов в вытянутой сфероидальной системе координат. *Технічна електродинаміка*. 1999. № 1. С. 7–11.

149. Электромагнитное экранирование ферромагнитным корпусом электрической машины / В. Ю. Розов та ін. *Технічна електродинаміка*. 2004. № 6. С. 18–22.

150. Анализ техногенных искажений геомагнитного поля в помещениях и нормирование их допустимых уровней / В. Ю. Розов та ін. *Гігієна населених місць* : зб. наук. пр. Київ : ДУ «ІГМЕ АМНУ», 2008. № 55. С. 98–104.

151. Розов В. Ю., Реуцкий С. Ю., Пилюгина О. Ю. Аппроксимация внешнего магнитного поля технического объекта методом фундаментальных решений. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2010. Ч. 1. С. 3–6.

152. Магнетизм космических аппаратов / В. Ю. Розов та ін. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2010. Ч. 2. С. 144–147.

153. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов / В. Ю. Розов та ін. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 4. С. 56–61. DOI: 10.20998/2074-272X.2015.4.09.

154. Аналитический расчет магнитного поля трехфазных кабельных линий при двустороннем замыкании собственных экранов кабелей / В. Ю. Розов та ін. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. С. 13–18. DOI: 10.15407/techned2017.02.013.

155. Розов В. Ю., Грінченко В. С., Ткаченко О. О. Розрахунок магнітного поля трифазних кабельних ліній при двосторонньому замиканні власних екранів кабелів, охоплених ферромагнітними осердями. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 5. С. 44–47. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.5.07.

156. Rozov V., Grinchenko V. Simulation and analysis of power frequency electromagnetic field in buildings closed to overhead lines. *Proc. of 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kyiv, Ukraine, 2017. P. 500–503. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100538.

157. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields / V. Rozov et al. *IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*. Kyiv, Ukraine, 2018. P. 358–361. DOI: 10.1109/MMET.2018.8460251.

158. Резинкина М. М. Выбор параметров тонких электромагнитных экранов для снижения уровней магнитной индукции. *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84, № 2. С. 1–7. DOI: 10.1134/S1063784214020194.

159. Кундіус К. Д. Системи активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій : дис. ... д-ра філософії : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Харків : НТУ «ХП», 2023. 136 с. URL: repository.kpi.kharkov.ua (дата звернення: 24.01.2026).

160. Лупиков В. С. Повышение эффективности компенсации магнитного момента токопроводов электрических цепей с вентилями : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.06. Харьков, 1987. 148 с.

161. Bravo-Rodriguez J., Del-Pino-Lopez J., Cruz-Romero P. A Survey on optimization techniques applied to magnetic field mitigation in power systems. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 7. Art. 1332. DOI: 10.3390/en12071332

162. Розов В. Ю. Системи автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля енергонасичених об'єктів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03. Харків : НТУ «ХП», 2002. 37 с.

163. Особенности снижения внешних магнитных полей электрических машин / В. Ю. Розов та ін. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 1996. 41 с. (Препр. НАН України. Ін-т електродинаміки ; № 778).

164. Розов В. Ю., Ерисов А. В., Лупиков В. С. Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных устройств и полупроводниковых преобразователей. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 1996. 46 с. (Препр. НАН України. Ін-т електродинаміки ; № 791).

165. Кільдішев О. В. Дослідження систем автоматичної компенсації зовнішніх магнітних полів великих електричних машин змінного струму : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01. Харків : ХДПУ, 1996. 21 с.

166. Пилюгина О. Ю. Повышение эффективности снижения внешних магнитных полей электрических машин переменного тока : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01. Харьков, 2001. 149 с.

167. Лупиков В. С. Повышение эффективности методов, применяемых для снижения внешнего магнитного поля электрооборудования. *Техническая электродинамика*. 2000. № 1. С. 7–13.

168. Майсурадзе Н. С. Разработка методики и аппаратуры для точного воспроизведения напряженности слабых магнитных полей с компенсацией внешнего магнитного поля : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тбилиси : ТГУ, 1973. 21 с.

169. Method for design of two-level system of active shielding of power frequency magnetic field based on a quasi-static model / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2024. No. 2. P. 3–11. DOI: 10.20998/2074-272X.2024.2.05.

170. The method for design of combined electromagnetic shield for overhead power lines magnetic field / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2024. No. 3. P. 22–30. DOI: 10.20998/2074-272X.2024.3.03.

171. The method for design of electromagnetic hybrid active-passive shielding by overhead power lines magnetic field / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2024. No. 4. P. 22–30. DOI: 10.20998/2074-272X.2024.4.03.

172. Method for prediction and control by uncertain microsatellite magnetic cleanliness based on calculation and compensation magnetic field spatial harmonics / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2024. No. 1. P. 23–33. DOI: 10.20998/2074-272X.2024.1.04.

173. The method of multi-objective parametric design of magnetic field active canceling robust system for residential multy-story buildings closed to double-circuit overhead power lines / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. No. 2. P. 27–36. DOI: 10.20998/2074-272X.2023.2.05.

174. Optimization of spatial arrangement of magnetic field sensors of closed loop system of overhead power lines magnetic field active silencing / B. I. Kuznetsov

et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. No. 4. P. 3–11. DOI: 10.20998/2074-272X.2023.4.01.

175. Method for control by orbital spacecraft magnetic cleanliness based on multiple magnetic dipole models with consideration of their uncertainty / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. No. 5. P. 3–12. DOI: 10.20998/2074-272X.2023.5.01.

176. Overhead Power Lines Magnetic Field Reducing in Multi-Story Building by Active Shielding Means / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No. 2. P. 23–29. DOI: 10.20998/2074-272X.2021.2.04.

177. Reduction of magnetic field level in residential old buildings from overhead power lines by means of active screening / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No. 5. P. 24–29. DOI: 10.20998/2074-272X.2021.5.04.

178. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdii I. V. Simplified mathematical model of group of overhead power lines magnetic field. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. No. 4. P. 15–20. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.4.04.

179. Волошко О. В. Синтез систем активного екранування магнітного поля ліній електропередачі. *Вісник Національної академії наук України*. 2017. № 3. С. 64–73. DOI: 10.15407/visn2017.03.064.

180. Magnetic field mitigation at power frequency: design principles and case studies / D. Bavastro et al. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. Vol. 51, no. 3. P. 2009–2016. DOI: 10.1109/TIA.2014.2369813.

181. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power frequency magnetic field reduction. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Minneapolis, USA, 2002. P. 222–226. DOI: 10.1109/IEMC.2002.1032478.

182. Лупиков В.С., Способ настройки системы компенсации магнитного поля распределительного устройства. *Електротехніка і електромеханіка*. 2003. №2. С. 38-42.

183. Розов В. Ю. Селективная компенсация пространственных гармоник магнитного поля энергонасыщенных объектов. *Технічна електродинаміка*. 2002. № 1. С. 8–13.

184. Optimization of combined active-passive electromagnetic shielding system for overhead power lines magnetic field normalization in residential building space / B. I. Kuznetsov et al. *Електротехніка і електромеханіка*. 2025. № 5. С. 27–37. DOI: 10.20998/2074-272X.2025.5.04.

185. Кузнецов Б. И., Бовдуй И. В., Волошко А. В., Виниченко Е. В., Котляров Д. А. Замкнутая система активного экранирования магнитного поля вблизи токопроводов электростанций. *Вестник НТУ «ХПИ». Серия : Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*. 2013. № 36 (1009). С.347–348.

186. Активное экранирование магнитного поля вблизи генераторных токопроводов электростанций / Б. И. Кузнецов и др. *Електротехніка і електромеханіка*. 2013. № 6. С. 66–71. DOI: 10.20998/2074-272X.2013.6.13.

187. Грінченко В. С. Підвищення ефективності екранування техногенного магнітного поля високовольтних кабельних ліній. *Вісник Національної академії наук України*. 2014. № 8. С. 71–76. DOI: 10.15407/vsn2014.08.071.

188. Grinchenko V. S. Alpha-beta transformation approach for the active shielding of flat power line. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 11–13.

189. Экспериментальные исследования эффективности системы активного экранирования магнитного поля вблизи генераторных токопроводов электростанций / И. В. Бовдуй и др. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 17–19.

190. Синтез комбинированных систем активного экранирования техногенного магнитного поля промышленной частоты / Б. И. Кузнецов и др. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». 2014. № 15 (91). С. 412–414.

191. Резинкина М. М. Выбор параметров тонких электромагнитных экранов для снижения уровней магнитной индукции. *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84, № 2. С. 1–7. DOI: 10.1134/S1063784214020194.

192. Розвиток методів моделювання і нормалізації зовнішнього магнітного поля ліній електропередачі («МЕРЕЖА») : звіт про НДР (заключ.) / ДУ «ІТПМ НАН України» ; кер. В. Ю. Розов. Харків, 2016. 215 с. № ДР 0111U010332.

193. Розроблення енергозберігаючих технологій зі зменшення техногенного електромагнітного впливу енергетики на навколишнє середовище (шифр «ЕМП») : звіт про НДР (заключ.) / ДУ «ІТПМ НАН України» ; кер. В. Ю. Розов. Харків, 2019. № ДР 0115U001359.

194. Розробка наукових засад захисту середовища тривалого перебування людини від дії постійного і низькочастотного техногенного магнітного поля (шифр «ТИША») : звіт про НДР (заключ.) / ДУ «ІТПМ НАН України» ; кер. В. Ю. Розов. Харків, 2014. № ДР 0110U005288.

195. Kaden H. Die elektromagnetische Schirmung in der Fernmelde- und Hochfrequenztechnik. Berlin : Springer-Verlag, 1950. 276 s. DOI: 10.1007/978-3-662-30238-5.

196. Kaiser K. L. Electromagnetic Shielding. Boca Raton : CRC Press, 2007. 352 p.

197. Du Y., Burnett J. Magnetic shielding principle of linear cylindrical shield at power frequency. *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 1996. P. 488–493. DOI: 10.1109/ISEMC.1996.561278.

198. Salinas E. Mitigation of Power-Frequency Magnetic Fields : Doctoral Thesis. Göteborg : Chalmers University of Technology, 2001. 144 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/70557565.pdf> (дата звернення: 24.01.2026).

199. Evaluation of different Analytical Methods for the Design of ELF magnetic field shields / A. Canova et al. *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting*. Chicago, IL, USA, 2001. Vol. 2. P. 1173–1179. DOI: 10.1109/IAS.2001.955641.

200. Quercio M., Barlassina L., Canova A. Characterization of the shielding properties of a power transformer enclosure. *IEEE EUROCON 2023 - 20th International Conference on Smart Technologies*. Torino, Italy, 2023. P. 349–353. DOI: 10.1109/EUROCON56442.2023.10198995.
201. Mitigation of the Electric and Magnetic Fields of 500-kV Overhead Transmission Lines / A. Z. E. Dein et al. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 33900–33908. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3161932.
202. Mitigation of Low Frequency Magnetic Field Emitted by 10/0.4 kV Substation in the School / M. Grbic et al. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*. 2025. Vol. 38, issue 2. Art. e30015. DOI: 10.1002/jnm.30015.
203. Theoretical Analysis of a Magnetic Shielding System Combining Active and Passive Modes / Q. Meng et al. *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, no. 6. Art. 538. DOI: 10.3390/nano14060538.
204. Canova A., Giaccone L., Quercio M. A proposal for performance evaluation of low frequency shielding efficiency. *IET Conference Proceedings (CIRED 2021)*. 2021. Vol. 6. P. 935–939. DOI: 10.1049/icp.2021.1634.
205. On the Power Lines - Electromagnetic Shielding Using Magnetic Steel Laminates / T. Damatopoulou et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 21. Art. 7215. DOI: 10.3390/en14217215.
206. Working Group C4.204. Mitigation techniques of power frequency magnetic fields originated from electric power systems. *CIGRE Technical Brochure*. 2009. No. 373. 110 p. DOI: 10.11577/31675.
207. Numerical and experimental development of multilayer magnetic shields / D. Bavastro et al. *Electric Power Systems Research*. 2014. Vol. 116. P. 374–380. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.06.021.
208. Buccella C., Feliziani M., Prudenzi A. Active shielding design for a MV/LV distribution transformer substation. *2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Beijing, China, 2002. P. 350–353. DOI: 10.1109/ELMAG.2002.1177473.

209. Canova A., Giaccone L. Real-time optimization of active loops for the magnetic field minimization. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 2018. Vol. 56, no. S1. P. 97–106. DOI: 10.3233/JAE-172283.
210. Ga-based active loop optimization for magnetic field mitigation of MV/LV substations / J. C. Del-Pino-Lopez et al. *IEEE Latin America Transactions*. 2014. Vol. 12, no. 6. P. 1055–1061. DOI: 10.1109/TLA.2014.6894000.
211. Design of active loops for magnetic field mitigation in MV/LV substation surroundings / J. Del-Pino-Lopez et al. *Electric Power Systems Research*. 2015. Vol. 119. P. 337–344. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.10.016.
212. Garzia F., Geri A. Active shielding design in full 3D space of indoor MV/LV substations using genetic algorithm optimization. *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2003. Vol. 1. P. 197–202. DOI: 10.1109/ISEMC.2003.1236592.
213. Garzia F., Geri A. Reduction of magnetic pollution in urban areas by an active field cancellation. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2004. Vol. 72. P. 569–579. DOI: 10.2495/URB040551.
214. Celozzi S., Garzia F. Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization. *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*. 2004. Vol. 151, no. 1. P. 2–7. DOI: 10.1049/ip-smt:20040002.
215. Shenkman A., Sonkin N., Kamensky V. Active protection from electromagnetic field hazards of a high voltage power line. *HAIT Journal of Science and Engineering*. 2005. Vol. 2, no. 1-2. P. 254–265.
216. Celozzi S. Active compensation and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction. *Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*. Minneapolis, 2002. P. 222–226. DOI: 10.1109/ISEMC.2002.1032478.
217. Active Shielding System for ELF Magnetic Fields / A. Canova et al. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015. Vol. 51, no. 3. P. 1–4. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2354512.

218. Barsali S., Giglioli R., Poli D. Active shielding of overhead line magnetic field: Design and applications. *Electric Power Systems Research*. 2014. Vol. 110. P. 55–63. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.01.004.

219. Celozzi S., Garzia F. Magnetic field reduction by means of active shielding techniques. *WIT Transactions on Biomedicine and Health*. 2003. Vol. 7. P. 79–89. DOI: 10.2495/BIO030081.

220. Use of rod compactors for high voltage overhead power lines magnetic field mitigation / F. Bignucolo et al. *Energies*. 2017. Vol. 10, no. 9. Art. 1381. DOI: 10.3390/en10091381.

221. Mimos E. I., Tsanakas D. K., Tzinevrakis A. E. Optimum phase configurations for the minimization of the magnetic fields of underground cables. *Electrical Engineering*. 2010. No. 91. P. 327–335. DOI: 10.1007/s00202-010-0143-6.

222. Zucca M., Ribaldone P. Magnetic field mitigation above a double trefoil HV underground power line. *18th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2005)*. Turin, 2005. Paper 91. 5 p.

223. Magnetic field management considerations for underground cable duct bank / C. Bascom et al. *IEEE Transmission & Distribution Conference and Exposition*. New Orleans, 2005. Paper 05TD0399. DOI: 10.1109/TDC.2005.1546949.

224. Riba Ruiz J. R., Alabern Morera X. Magnetic shields for underground power lines. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'04)*. Barcelona, 2004. Paper 230. 6 p.

225. del Pino López J. C., Cruz Romero P., Dular P. Parametric analysis of magnetic field mitigation shielding for underground power cables. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'07)*. Sevilla, 2007. Paper 326. 6 p.

226. Electromagnetic shielding of high-voltage cables / M. De Wulf et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. No. 316. P. 908–911. DOI: 10.1016/j.jmmm.2007.03.141.

227. Salinas E. Conductive and ferromagnetic screening of 50 Hz magnetic fields from a three-phase system of busbars. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2001. Vol. 226-230. P. 1239–1241. DOI: 10.1016/S0304-8853(00)00778-5.

228. Optimal screen width for field reduction applications of low frequency magnetic fields in three-phase conductors / H. Beltran et al. *9º Congreso Hispano Luso de Ingeniería Eléctrica*. Marbella, Málaga, 2005. Paper 236. 7 p.

229. Salinas E., Rezinkina M., Atalaya J. Some 2D–3D aspects of shielding of longitudinal sources of extremely low frequency magnetic fields. *Environmentalist*. 2009. Vol. 29. P. 141–146. DOI: 10.1007/s10669-008-9192-3.

230. Underground power cables in urban areas: of the magnetic field a simple technique for the passive shielding / L. Battistelli et al. *The Sustainable City III: Urban Regeneration and Assessment* / ed. by C. A. Brebbia, N. Marchettini. WIT Press, 2004. P. 581–590. DOI: 10.2495/SC040561.

231. Alotto P., Guarnieri M., Moro F., Turri R. Mitigation of residential magnetic fields generated by MV/LV substations. *42nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2007)*. 2007. P. 832–836. DOI: 10.1109/UPEC.2007.4469055.

232. Grinchenko V. S., Tkachenko O. O. Mitigation of overhead line magnetic field by grid shield with electrically separated sections. *Технічна електродинаміка*, 2020, №. 5, С. 5-9. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.005>

233. Acosta J. S., Tavares M. C. Multi-objective optimization of overhead transmission lines including the phase sequence optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 115. Art. 105495. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105495.

234. Burnett J., Du Y. P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*. 2002. Vol. 37, no. 8–9. P. 769–775. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00045-8.

235. Evaluation of different analytical methods for the design of ELF magnetic field shields / A. Canova et al. *Conference Record of the 2001 IEEE Industry*

Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting. 2001. Vol. 2. P. 1173–1179. DOI: 10.1109/IAS.2001.955641.

236. D'Amore M., Menghi E., Sarto M. S. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2003. Vol. 1. P. 203–208. DOI: 10.1109/ISEMC.2003.1236593.

237. Bourdages M., Turgeon A. Assessment of magnetic field mitigation methods for distribution networks. *19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2007)*. Vienna, 2007. Paper 0480. 4 p.

238. Salinas E., Rezinkina M. Choice of parameters for passive shielding of power-frequency magnetic fields. *Environmentalist*. 2009. Vol. 29. P. 135–140. DOI: 10.1007/s10669-008-9191-4.

239. Canova A., Giaccone L. A novel technology for magnetic field mitigation: High magnetic coupling passive loop. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2011. Vol. 26, no. 3. P. 1625–1633. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2099671.

240. Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines / A. Canova et al. *Electric Power Systems Research*. 2012. Vol. 89. P. 109–115. DOI: 10.1016/j.epsr.2012.02.016.

241. Canova A., Giaccone L. Magnetic field mitigation of power cable by high magnetic coupling passive loop. *20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2009)*. Prague, 2009. P. 1–4. DOI: 10.1049/cp.2009.0556.

242. Optimization of electric and magnetic field emissions produced by independent parallel overhead power lines / A. Ranković et al. *Serbian Journal of Electrical Engineering*. 2017. Vol. 14, no. 2. P. 199–216. DOI: 10.2298/SJEE161115002R.

243. El Dein A. Z. Optimal Arrangement of Egyptian Overhead Transmission Lines' Conductors Using Genetic Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014. Vol. 39. P. 1049–1059. DOI: 10.1007/s13369-013-0698-7.

244. Dezelak K., Stumberger G., Jakl F. Reduction of electric and magnetic field emissions caused by overhead power lines. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)*. Granada, Spain, 2010. DOI: 10.24084/repqj08.342.

245. Almeida M. E., Maló Machado V., Guerreiro das Neves M. Mitigation of the magnetic field due to underground power cables using an optimized grid. *European Transactions on Electrical Power*. 2011. Vol. 21, no. 1. P. 180–187. DOI: 10.1002/etep.427.

246. Segundo H., Roig V. Reduction of low voltage power cables electromagnetic field emission in MV/LV substations. *Electric Power Systems Research*. 2008. Vol. 78, no. 6. P. 1080–1088. DOI: 10.1016/j.epsr.2007.09.006.

247. Magnetic field reduction study for low voltage distribution panels located in MV/LV substations / H. Beltran et al. *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007)*. Barcelona, 2007. P. 1–6. DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424098.

248. Cruz-Romero P., Izquierdo C., Burgos M. Optimum passive shields for mitigation of power lines magnetic field. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2003. Vol. 18, no. 4. P. 1357–1362. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.817754.

249. Ga-based passive loop optimization for magnetic field mitigation of transmission lines / P. Cruz-Romero et al. *Neurocomputing*. 2007. Vol. 70, no. 16-18. P. 2679–2686. DOI: 10.1016/j.neucom.2006.05.016.

250. Magnetic field mitigation by means of passive loop: Technical optimization / A. Canova et al. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2012. Vol. 31, no. 3. P. 870–880. DOI: 10.1108/03321641211209762.

251. Salinas E. Passive and active shielding of power-frequency magnetic fields from secondary substation components. *Proceedings of International Conference on Power System Technology (PowerCon 2000)*. Perth, Australia, 2000. Vol. 2. P. 855–860. DOI: 10.1109/ICPST.2000.897126.

252. Operational experiences of active shielding systems for overhead HV lines / S. Barsali et al. *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*. Florence, Italy, 2012. P. 774–777. DOI: 10.1109/EnergyCon.2012.6415936.

253. Girdinio P., Nervi M. Techniques for the automatic optimisation of active shields. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2001. Vol. 20, no. 3. P. 732–739. DOI: 10.1108/EUM00000000005556.

254. Romero P. C., Mitchell C. I., Payan M. B. Optimal design of active shielding for power lines. *14th Power Systems Computation Conference (PSCC)*. Sevilla, Spain, 2002. Vol. 24. P. 1–7.

255. Del Pino López J. C., Romero P. C. Experimental supply equipment for active loop-based magnetic field mitigation. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'07)*. Sevilla, Spain, 2007. Paper 324. 6 p.

256. A new approach to design flexible magnetic active shielding / I. M. V. Caminiti et al. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2013. Vol. 49, № 2. P. 791–794. DOI: 10.1109/TMAG.2012.2223460.

257. Кундіус К. Д. Аналіз ефективності активного екранування зовнішнього магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій потужністю до 1260 кВ·А. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2022. № 11–12. С. 50–62. DOI: 10.20998/2313-8890.2022.11.05.

258. The investigation of distribution of the magnetic flux density of operating two-circuit power line 110 kV «ChTPP-Chernihiv-330» in the residential area and methods of its decreasing to a safe level / A. V. Krasnozhon et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. № 6. P. 55–62. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.6.08.

259. Лупіков В. С. Наукові основи технології компенсації магнітного поля поблизу низьковольтних комплектних пристроїв : дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.01. Харків : НТУ «ХП», 2003. 369 с.

260. Добродеев П. Н. Повышение эффективности методов снижения внешнего магнитного поля электрических машин постоянного тока : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01. Харків, 2004. 121 с.

261. Гринченко В. С. Підвищення ефективності екранування магнітного поля трифазних струмопроводів незамкнутими електромагнітними екранами : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.05. Харків, 2012. 146 с.

262. Щерба А. А., Подольцев О. Д., Кучерява І. М. Зниження рівня магнітного поля підземної кабельної лінії на відповідальних ділянках за допомогою композиційних магнітних екранів кінцевої довжини. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 1. С. 17–24. DOI: 10.15407/techned2022.01.017.

263. Grinchenko V., Pyrohova U. Mitigation of overhead line magnetic field by U-shaped grid shield. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, Ukraine, 2019. P. 345–348. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879834.

264. Грінченко В. С. Зниження магнітного поля трифазних ліній електропередачі ґратчастим електромагнітним екраном. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 4. С. 29–32. DOI: 10.15407/techned2018.04.029.

265. Grinchenko V. S., Chunikhin K. V. Shielding of a uniform alternating magnetic field using a circular passive loop. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2015. № 2. P. 31–34. DOI: 10.20998/2074-272x.2015.2.06.

266. Rezinkina M. M., Grinchenko V. S. Usage of electromagnetic shields for power frequency magnetic field mitigation in power industry. *Technical Electrodynamics*. 2012. № 3. С. 15–16.

267. Расчетный выбор параметров электромагнитных экранов сложной пространственной конфигурации / М. Резинкина та ін. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 10–16.

268. Шидловский А. К., Розов В. Ю. Системы автоматической компенсации внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов. *Технічна електродинаміка*. 1996. № 1. С. 3–9.

269. Розов В. Ю., Волохов С. А., Ерисов А. В. Повышение эффективности размагничивающих устройств корабля. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2000. Ч. 3. С. 7–12.

270. Розов В. Ю. Методы снижения внешних магнитных полей энергонасыщенных объектов. *Технічна електродинаміка*. 2001. № 1. С. 16–20.

271. Розов В. Ю., Волохов С. А., Ерисов А. В. Электромагнитный компенсатор магнитных полей технических объектов. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2001. № 15. С. 191–197.

272. Розов В. Ю. Анализ эффективности параметрических систем автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов. *Технічна електродинаміка*. 2002. № 2. С. 3–10.

273. Розов В. Ю. Построение систем автоматической компенсации внешних магнитных полей подвижных объектов, содержащих ферромагнитные массы. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2002. Ч. 2. С. 9–14.

274. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А. Системы автоматического управления магнитным полем технических объектов. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». 2003. Ч. 2. С. 88–91.

275. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А. Исследование замкнутой системы автоматического управления магнитным полем технического объекта. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2004. Ч. 2. С. 13–16.

276. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А. Метод активного экранирования внешнего магнитного поля технических объектов. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2006. Ч. 3. С. 13–16.

277. Введение в демагнетизацию технических объектов / В. Ю. Розов та ін. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 4. С. 55–59.

278. Розов В. Ю., Резинкина М. М., Пелевин Д. Е. Пути нормализации техногенных искажений геомагнитного поля в среде длительного пребывания

людей. *Гігієна населених місць* : зб. наук. пр. Київ : ДУ «ІГМЕ АМНУ», 2007. Вип. 50. С. 232–242.

279. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А., Реуцкий С. Ю. Замкнутые системы компенсации магнитного поля технических объектов с различными способами формирования обратных связей. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2008. Ч. 4. С. 98–103.

280. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А., Пелевин Д. Е. Принципы построения систем автоматической компенсации биотропных искажений геомагнитного поля на рабочих местах оперативного персонала. *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». 2009. Ч. 1. С. 51–54.

281. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А., Давыдов А. А. Методы формирования сигналов обратных связей в замкнутых системах управления магнитным полем технических объектов при наличии сторонних источников магнитного поля. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 6. С. 8–16.

282. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А. Автоматическое управление внешним магнитным полем технических объектов. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 1. С. 11–18.

283. Повышение эффективности контурного экранирования магнитного поля высоковольтных кабельных линий / В. Ю. Розов та ін. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 5–7.

284. Розов В. Ю., Добродеев П. Н., Квицинский А. А. Двухконтурное пассивное экранирование магнитного поля высоковольтных кабельных линий в зонах соединительных муфт. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 1. С. 23–28. DOI: 10.15407/techned2017.01.023.

285. MacDonald M. A Comparison of Electricity Transmission Technologies: Costs and Characteristics. An Independent Report by Mott MacDonald in Conjunction with the IET. 2025. 335 p. URL: https://www.theiet.org/media/axwkktkb/100110238_001-rev-j-electricity-transmission-costs-and-characteristics_final-full.pdf (дата звернення: 26.03.2025).

286. ДБН В.2.5-24:2012. Електрична кабельна система опалення. Київ : Мінрегіон України, 2012. 81 с. (Державні будівельні норми України).

287. Milutinov M., Juhas A., Pekarić-Nadž N. Magnetic field of electrical radiant heating system. *Safety Engineering*. 2017. Vol. 7, no. 2. P. 61–65. DOI: 10.7562/SE2017.7.02.03.

288. SunTouch Heating Mat Kits. *Flooring Supply Shop*. URL: <https://www.flooringsupplyshop.com/category/suntouch-heating-mats-kits-119> (дата звернення: 01.10.2025).

289. Arnold Rak. *Rak Wärmetechnik GmbH*. URL: <https://www.rak-waermetechnik.de> (дата звернення: 01.10.2025).

290. Hemstedt. *Hemstedt GmbH*. URL: <https://www.hemstedt.de> (дата звернення: 01.10.2025).

291. Handbook for Comfortable Warm Floors. *nVent Raychem*. 2022. 48 p. URL: https://www.nvent.com/sites/default/files/acquiadam_assets/2022-08/RAYCHEM-TH-EU1001-Floorheating-EN.pdf (дата звернення: 01.10.2025).

292. ELEKTRA Heating Cables. Installation manual. *Elektra*. 72 p. URL: https://elektra.pl/download/ru/electrical-heating-systems/floor-heating/heating-cables-VCD/vcd7_vcd10_vcd17_heating_cables_manual.pdf (дата звернення: 01.10.2025).

293. Woks. ПАТ «Одескабель». URL: <https://woks.ua/ua> (дата звернення: 01.10.2025).

294. Indoor Cable Floor Heating Systems. Application manual. *Danfoss*. 2016. 52 p. URL: <https://assets.danfoss.com/documents/89845/AB213486470188en-010101.pdf> (дата звернення: 01.10.2025).

295. VOLTERM Coaxial Heating system. *Volterm*. URL: <https://volterm.com.ua> (дата звернення: 01.10.2025).

296. HeatTech. Radiant Floor Heating Cable. *HeatTech Products*. URL: <https://www.heattechproducts.com/electric-radiant-floor-heating-cable-kits> (дата звернення: 24.01.2026).

297. Амбарцумянц К. Нагрівальні кабелі: конструкція та застосування. *AW-Therm*. URL: <https://aw-therm.com.ua/nagrevatelnye-kabeli-konstrukciya-i-primenenie/> (дата звернення: 01.10.2025).

298. Brune D., Hellborg R., Persson B. R. R., Pääkkönen R. Radiation at home, outdoors and in the workplace. Scandinavian Science Publisher, 2001. 547 p. ISBN 82-91833-02-8.

299. Electric floor heating systems : Fact sheet / Federal Office of Public Health (FOPH). Bern, Switzerland : BAG, 2025. URL: <https://www.bag.admin.ch/dam/en/sd-web/oVd7pX0ecj6k/Fact%20sheet%20electric%20floor%20heating%20systems.pdf> (дата звернення: 10.01.2026).

300. Numerical Assessment of Electric Underfloor Heating Enhanced by Photovoltaic Integration / H. Charvátová et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 18. Art. 5916. DOI: 10.3390/s25185916.

301. Thieblemont H., Haghighat F., Moreau A. Thermal Energy Storage for Building Load Management: Application to Electrically Heated Floor. *Applied Sciences*. 2016. Vol. 6, no. 7. Art. 194. DOI: 10.3390/app6070194.

302. Gołębiowski J., Forenc J. The influence of side thermal insulation on distribution of the temperature field in an electrical floor heater. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2016. Vol. 92, no. 12. P. 271–277. DOI: 10.15199/48.2016.12.68.

303. Sheppard A. R., Kavet R., Renew D. C. Exposure guidelines for low-frequency electric and magnetic fields: report from the Brussels workshop. *Health Physics*. 2002. Vol. 82, no. 3. P. 324–332.

304. Kheifets L., Swanson J., Greenland S. Childhood leukemia, electric and magnetic fields, and temporal trends. *Bioelectromagnetics*. 2006. Vol. 27, no. 7. P. 545–552. DOI: 10.1002/bem.20251.

305. Розробка верифікованої методики розрахунку індукції магнітного поля трифазних ліній електропередачі («Метод-М») : звіт про НДР (заключ.) / ДУ «ІТПМ НАН України» ; кер. В. Ю. Розов. Харків, 2015. 105 с. № ДР 0113U001980.

306. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока / В. Ю. Розов, Д. Є. Пелєвін та ін. *Техническая электродинамика*. 2012. № 1. С. 3–9.

307. Особливості розрахунку магнітного поля повітряних ЛЕП 330-750 кВ в зоні виконання робіт без зняття напруги / В. Ю. Розов, Д. Є. Пелєвін та ін. *Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України* : зб. тез доп. наук.-практ. конф. (17 Марзеєвські читання). Київ : ДУ «ІГЗ ім. О.М. Марзеєва НАМН України», 2021. Вип. 21. С. 325–329. URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/xvii_marzieiev_readings_proceedings_2021.pdf (дата звернення: 24.01.2026).

308. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами)/ Ю. Думанський, А. Квицинський, І. Майстренко, Д. Пелєвін, О. Пилюгіна, С. Реуцький, В. Розов Київ: НЕК «Укренерго», 2016. 37 с. (Нормативний документ Міненерговугілля України, (Чинний)). Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=67246 (дата звернення 01.10.2025).

309. Mamishev A. V., Nevels R. D., Russell B. D. Effects of conductors sag on spatial distribution of power line magnetic field. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1996. Vol. 11, no. 3. P. 1571–1576. DOI: 10.1109/61.517516.

310. El Dein A. Z. Magnetic-field calculation under EHV transmission lines for more realistic cases. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2009. Vol. 24, no. 4. P. 2214–2222. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2028493.

311. Begamudre R. D. Extra High Voltage AC Transmission Engineering. 3rd ed. New Delhi : New Age International, 2006. 985 p.

312. IEEE 644-2019. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines. 2020. 40 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.2020.9068517.

313. Bowman J. D., Kelsh M. A., Kaune W. T. Manual for measuring occupational electric and magnetic field exposures. Cincinnati, OH : National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1998. 137 p.

314. Пелєвін Д. Є. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 14–16. URL: https://previous.techned.org.ua/2014_5/st4.pdf (дата звернення: 24.01.2026).

315. Пелєвін Д. Є. Экранирование магнитного поля промышленной частоты стенами жилых домов. *Електротехніка і електромеханіка*. 2015. № 4. С. 53–55. URL: eie.khpi.edu.ua (дата звернення: 24.01.2026).

316. Розов В. Ю., Грінченко В. С., Пелєвін Д. Є., Чуніхін К. В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 6–8. DOI: 10.15407/techned2016.03.006.

317. Розвиток методів моделювання та нормалізації зовнішнього магнітного поля електрообладнання підстанцій («БІОМАГ») : звіт про НДР (заключ.) / ДУ «ІТПМ НАН України» ; кер. В. Ю. Розов. Харків, 2019. 137 с. № ДР 0111U010333.

318. Розов В. Ю., Левина С. В. Моделирование статического геомагнитного поля внутри помещений современных жилых домов. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 8–10.

319. Розов В. Ю., Завальний О. В., Золотов С. М., Грецких С. В. Методы нормализации статического геомагнитного поля в жилых домах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 4. С. 60–65.

320. Исследование статического геомагнитного поля в жилых и общественных помещениях / В. Ю. Розов, Д. Є. Пелєвін та ін. *Гігієна населених місць* : зб. наук. пр. Київ : ДУ «ІГЗ ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2013. Вип. 62. С. 169–176. URL: http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/gnm_2013_62_30.pdf (дата звернення: 24.01.2026).

321. Розов В. Ю., Пелєвін Д. Є., Левіна С. В. Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях. *Електротехніка і електромеханіка*. 2013. № 6. С. 72–76.

322. Розов В. Ю., Пелєвін Д. Є., Кундіус К. Д. Дослідження магнітного поля повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ на границі чинних охоронних зон та визначення необхідності їх збільшення. *Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки* : тези доповідей XXVII Міжнар. симпозіуму SIEMA'2025 (Харків, 30–31 жовтня 2025 р.). Харків : НТУ «ХП», 2025. С. 71. URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/siema/wp-content/uploads/sites/111/2026/01/Zbirnyk-tez-2025.pdf> (дата звернення: 24.12.2025).

323. Ерисов А. В., Пелевина Е. Д., Пелевин Д. Е. Метод расчета индукции магнитного поля линий электропередачи на основе цилиндрических пространственных гармоник. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 2. С. 24–27. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.2.04.

324. Štafl M. Electrodynamics of electrical machines / ed. by G. A. Toombs. London : Iliffe Books ; Prague : Academia, 1967. 183 p.

325. Jabłoński P. Cylindrical conductor in an arbitrary time-harmonic transverse magnetic field. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011. No. 5. P. 49–53.

326. Korn G. A., Korn T. M. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review. 2nd, rev. and enl. ed. New York : McGraw-Hill, 1968. 1130 p.

327. Розов В. Ю., Реуцкий С. Ю., Пелєвін Д. Є., Пилюгіна О. Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 21–22. URL: https://previous.techned.org.ua/2012_2/st8.pdf (дата звернення: 24.12.2025).

328. Розов В. Ю., Реуцкий С. Ю., Пелєвін Д. Є., Пилюгіна О. Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 2. С. 3–9. URL: https://previous.techned.org.ua/2013_2/st1.pdf (дата звернення: 24.12.2025).

329. Розов В. Ю., Пелєвін Д. Є. Дипольная модель магнитного поля трехфазной электрической цепи. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 4. С. 3–7. URL: https://previous.techmed.org.ua/2012_4/st1.pdf (дата звернення: 24.12.2025).

330. Теоретичні основи електротехніки: підручник : у 3 т. Том 1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами / В. С. Бойко та ін. Київ: «Політехніка», 2004. 272 с.

331. Rozov V. Y., Pelevin D. Y., Kundius K. D. Simulation of the magnetic field in residential buildings with built-in substations based on a two-phase multi-dipole model of a three-phase current conductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. No. 5. P. 87–93. DOI: 10.20998/2074-272X.2023.5.13.

332. Кацадзе Т. Л. Основы механических расчетов воздушных линий электропередавания. Підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 334 с.

333. Розов В. Ю., Пелєвін Д. Є., Пелєвіна К. Д. Внешнее магнитное поле городских трансформаторных подстанций и методы его нормализации. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 5. С. 60–66. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.5.10.

334. Розов В. Ю., Пелєвін Д. Є., Кундіус К. Д. Вплив на житлове середовище електромагнітного поля міських трансформаторних підстанцій. *Фізичні фактори довкілля та їх вплив на формування здоров'я населення* : зб. тез доп. наук.-практ. конф. (16 Марзєєвські читання). Київ : ДУ «ІГЗ ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2020. Вип. 20. С. 24–26. URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/xvi_marzieiev_readings_proceedings_2020.pdf (дата звернення: 24.10.2025).

335. Розов В. Ю., Пелєвін Д. Е., Кундіус К. Д. Моделирование магнитного поля у житлових будинках із вбудованими трансформаторними підстанціями на основі двофазної мультидипольної моделі трифазного струмопроводу. *Електротехніка і електромеханіка*. 2023. № 5. С. 87–93. DOI: 10.20998/2074-272X.2023.5.13.

336. Розвиток наукових засад нормалізації геомагнітного поля в приміщеннях сучасних житлових будинків (шифр БІОМАГ 2) : звіт про НДР (заключ.) / ДУ «ІТПМ НАН України» ; Харків, 2021. 158 с. № ДР 0116U005462.

337. Пелєвін Д. Є. Розрахунок магнітного поля низьковольтного струмопроводу вбудованої трансформаторної підстанції. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія : *Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2024. № 2 (9). С. 63–71. DOI: 10.20998/EREE.2024.2(9).310498.

338. Розроблення наукових засад енергозберігаючих технологій зменшення електромагнітного впливу на житлове середовище міських трансформаторних підстанцій (шифр «ЕМП ТП») : звіт про НДР (заключ.) / ДУ «ІТПМ НАН України» ; Харків, 2019. 74 с. № ДР 0119U101726.

339. Розов В. Ю., Пелєвін Д. Е. Розрахунок магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції. *Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки* : тези доповідей XXVII Міжнар. симпозіуму SIEMA'2024 (Харків, 24–25 жовтня 2024 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2024. С. 68. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/c1cfa909-791e-425f-99bb-cff6a062439d> (дата звернення: 24.10.2025).

340. Грінченко В. С., Пелєвін Д. Є. Математична модель магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції. *Перспективи розвитку територій: теорія і практика. Поствоєнне відновлення* : матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених (Харків, 16–17 листопада 2023 р.). Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. С. 83–85.

341. Пелєвін Д. Нормалізація магнітного поля в житлових приміщеннях, розташованих над вбудованими трансформаторними підстанціями 6(10)/0,4 кВ потужністю 100-400 кВА. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія : *Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*. 2024. № 2 (12). С. 39–45. DOI: 10.20998/2079-3944.2024.2.08.

342. Розов В. Ю., Пелєвін Д. Є., Кундіус К. Д. Магнітне поле вбудованих трансформаторних підстанцій при розкиді струмів навантаження. *Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки* : тези доповідей XXVII

Міжнар. симпозиуму SIEMA'2025 (Харків, 30–31 жовтня 2025 р.). Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 18. URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/siema/wp-content/uploads/sites/111/2026/01/Zbirnyk-tez-2025.pdf> (дата звернення: 24.01.2026).

343. Розов В. Ю., Реуцький С. Ю., Пелєвін Д. Є., Кундіус К. Д. Магнітне поле кабельних систем електрообігріву підлог житлових приміщень. *Електротехніка і електромеханіка*. 2024. № 5. С. 48–57. DOI: 10.20998/2074-272X.2024.5.07.

344. Розов В. Ю., Кундіус К. Д., Пелєвін Д. Є. Активное экранирование внешнего магнитного поля трансформаторных подстанций, встроенных в жилые дома. *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. № 3. С. 24–30. DOI: 10.20998/2074-272X.2020.3.04.

345. Розов В. Ю., Пелєвін Д. Є., Кундіус К. Д. Методи нормалізації магнітного поля в житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанціями. *Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України* : зб. тез доп. наук.-практ. конф. (17 Марзєєвські читання). Київ : ДУ «ІГЗ ім. О.М. Марзєєва НАМН України», 2021. Вип. 21. С. 329–331. URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/xvii_marzieiev_readings_proceedings_2021.pdf (дата звернення: 24.01.2026).

346. Szabó J., Jánossy G., Thuróczy G. Survey of residential 50 Hz EMF exposure from transformer stations. *Bioelectromagnetics*. 2007. Vol. 28, no. 6. P. 48–52. DOI: 10.1002/bem.20264.

347. Burnett J., Du Y. P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*. 2002. Vol. 37, no. 8–9. P. 769–775. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00043-4.

348. Mitigation of urban substation magnetic field by active loop / D. Pelevin et al. *Book of Abstracts 2nd Workshop on Engineering Optimization – WEO 2021*. Warsaw, Poland, 2021. P. 81–82. URL: <http://v4shm.ippt.pan.pl/WEO2021-BookOfAbstracts.pdf#page=81> (дата звернення: 24.01.2026).

349. The method for design of combined electromagnetic shield for overhead power lines magnetic field / B.I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2024. No. 3. P. 22–30. DOI: 10.20998/2074-272X.2024.3.03.

350. Synthesis of combined shielding system for overhead power lines magnetic field normalization in residential building space / B. I. Kuznetsov et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No. 6. P. 40–50. DOI: 10.20998/2074-272X.2025.6.06.

351. MATLAB. *The MathWorks*. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата звернення: 05.09.2025).

352. Fortran. *Fortran-lang.org*. URL: <https://fortran-lang.org/ru/index> (дата звернення: 05.09.2025).

353. Розов В. Ю., Кузнецов Б. І., Пелєвін Д. Є. Синтез нелинейного робастного управління системою компенсації искажень магнітного поля на основі аналітичних моделей нелинейностей. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». Одеса : ОНПУ, 2011. № 03(79). С. 50–51. URL: <https://eltechs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/560> (дата звернення: 24.01.2026).

354. Кузнецов Б. И., Пелевин Д. Е., Бовдуй И. В., Котляров Д. А. Синтез системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 2. С. 131–132. URL: https://previous.techned.org.ua/2012_2/st63.pdf (дата звернення: 24.01.2026).

355. Компенсация искажений магнитного поля промышленной частоты / Б. І. Кузнецов, Д. Є. Пелєвін та ін. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». 2012. № 03(19). С. 135–136. URL: https://ees.kdu.edu.ua/statti/2012_3_135.pdf (дата звернення: 24.01.2026).

356. Кузнецов Б.І., Бовдуй І.В., Пелєвін Д.Є., Волошко О.В., Винниченко О.В., Котляров Д.О. Исследование эффективности системы активного экранирования магнитного поля вблизи токопроводов электростанций.

Вестник НТУ «ХПИ» Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харків: НТУ «ХПИ». 2013. № 36. С. 349–350.

357. Экспериментальное исследование макета системы активного экранирования магнитного поля вблизи токопроводов электростанций / Б. И. Кузнецов, Д. Є. Пелєвін та ін. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. Серія : Електротехніка і енергетика. 2013. № 1(14). С. 134–137. URL:https://www.researchgate.net/publication/387164345_Experimental_Research_of_the_Prototyping_System_of_Active_Screening_of_Magnetic_Field_Near_Power_Stations_Bus (дата звернення: 24.01.2026).

358. Пелєвін Д. Є. Магнітне поле дво жильних електричних кабелів житлових приміщень. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2024. № 7 (196). С. 8–15. DOI: 10.20998/2313-8890.2024.07.01.

359. The complex influence of external and internal electricity networks on the magnetic field level in residential premises of buildings / V. Y. Rozov, D.Ye. Pelevin et al. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. № 4. P. 11–19. DOI: 10.20998/2074-272X.2025.4.02.

360. Simonyi K. Foundations of Electrical Engineering: Fields–Networks–Waves. Oxford : Pergamon Press, 1963. P. 838–864.

361. Кессаєв О.Г. Вплив на параметри передачі ексцентриситету та еліптичності коаксіальних радіочастотних кабелів. *Вісник НТУ«ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*, 2013, No 59, С. 62-69.

362. Безпрозваних Г.В., Бойко А.М., Кессаєв О.Г. Вплив конструктивних та технологічних неоднорідностей на хвильовий опір коаксіальних радіочастотних кабелів. *Електротехніка і Електромеханіка*, 2013, No 2, С. 57-61

363. Dwight H.B. Tables of Integrals and Other Mathematical Data. 4th ed. The Macmillan Company, 1972. 336 p.

364. Розов В.Ю. К 40-летию Научно-технического центра магнетизма технических объектов НАН Украины. История, достижения, перспективы. *Технічна електродинаміка*, 2010, No 3, С. 74-80.

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science.

1. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелєвін Д.Є., Яковенко В.М. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*, 2012. № 1. С. 3–9.
URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1350>. (Scopus).

Здобувачу належить математична модель магнітного поля високовольтних ліній електропередачі та її експериментальне обґрунтування, санітарно-гігієнічна оцінка магнітного поля на границях охоронних зон.

2. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є. Дипольная модель магнитного поля трехфазной электрической цепи. *Технічна електродинаміка*, 2012. № 4. С. 3–7.
URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1378>. (Scopus).

Здобувачу належить теоретичне обґрунтування можливості використання двофазної моделі трифазного електричного кола для визначення дипольної складової його магнітного поля для випадку симетрії напруги живлення.

3. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелєвін Д.Є., Пилюгіна О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*, 2013. № 2. С. 3–9.
URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1145>. (Scopus, Q3).
<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100207636&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належить мультидипольна математична модель магнітного поля лінії електропередачі та її експериментальна перевірка, метод зменшення магнітного поля на основі удосконалені геометрії підвісу розщеплених проводів і підвищенні порядку їх осьової симетрії (метод векторної компенсації), приклади удосконалених схеми підвісу проводів дволанцюгової ЛЕП 330 кВ.

4. Пелєвін Д.Є. Методи зниження магнітного поля воздушних ліній електропередачі за межами охоронних зон. *Технічна електродинаміка*, 2014. № 5. С. 14–16. URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1023>. (Scopus, Q3). <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100207636&tip=sid&clean=0>

5. Пелєвін Д.Є. Екранування магнітного поля промислової частоти стінами житлових будинків. *Електротехніка і електромеханіка*, 2015. № 4. С. 53–55. URL: <http://eie.khpi.edu.ua/article/view/2074-272X.2015.4.10/44952>. (Web of Science).

6. Erisov A.V., Pelevin, D.Y., Pielievina K.D. Calculation method of electric power lines magnetic field strength based on cylindrical spatial harmonics. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016. no. 2. pp.24–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.2.04>. (Web of Science).

Здобувачу належить математична модель МП ЛЕП на основі циліндричних просторових гармонік, та метод розрахунку величини захисної зони ЛЕП на її основі.

7. Розов В.Ю., Грінченко В.С., Пелєвін Д.Є., Чуніхін К.В. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*, 2016. № 3. С. 6–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.006>. (Scopus, Q3). <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100207636&tip=sid&clean=0>

8. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Pielievina K.D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017. no. 5. pp. 60–66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10>. (Web of Science).

Здобувачу належить математичне моделювання магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій в житлових приміщеннях та його експериментальна перевірка, санітарно-гігієнічна оцінка рівня магнітного поля та методи його нормалізації.

9. Rozov V.Y., Kundius K.D., Pelevin D.Y. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020. no. 3. pp. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.3.04>. (Scopus).

Здобувачу належить комп'ютерне моделювання магнітного поля та обґрунтування можливості зменшення магнітного поля в приміщеннях із вбудованими трансформаторними підстанціями до нормативного рівня з допомогою простіших систем активного екранування з однією (двома) планарними компенсаційними обмотками, визначення їх основних параметрів.

10. Rozov V.Y., Reutskyi S.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Approximate method for calculating the magnetic field of 330-750 kV high-voltage power line in maintenance area under voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022. no. 5. pp. 71–77. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.12>. (Scopus, Q3). <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101066743&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належить методика вимірювання індукції магнітного поля ЛЕП та її експериментальна перевірка.

11. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Kundius K. D. Simulation of the magnetic field in residential buildings with built-in substations based on a two-phase multi-dipole model of a three-phase current conductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023. no. 5. pp. 87–93. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13>. (Scopus, Q3). <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101066743&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належить обґрунтування можливості заміщення вбудованої трансформаторної підстанції як джерела магнітного поля її низьковольтним струмопроводом, експериментальна перевірка мультидипольної моделі магнітного поля трансформаторної підстанції на повномасштабному макеті струмопроводу трансформаторної підстанції 100 кВА.

12. Rozov V.Y., Reutskyi S.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Magnetic field of electrical heating cable systems of the floors for residential premises. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024. no. 5. pp. 48–57.

DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.5.07>. (Scopus, Q3).

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101066743&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належить математична модель магнітного поля систем кабельного електрообігріву (СКЕ) і методика розрахунку МП та їх експериментальна перевірка, оцінка відповідності МП СКЕ санітарним нормам та рекомендації з безпечного використання СКЕ.

13. Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye, Reutskiy S.Yu, Kundius K.D, Vorushylo A.O. The complex influence of external and internal electricity networks on the magnetic field level in residential premises of buildings. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025. no. 4. pp. 11–19. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.02>. (Scopus, Q2).

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101066743&tip=sid&clean=0>

Здобувачу належать методи визначення комплексного впливу групи електромереж на рівень сумарного магнітного поля в житлових приміщеннях та метод нормалізації сумарного МП на її основі.

Статті в наукових фахових виданнях України категорії Б:

14. Розов В.Ю., Кузнецов Б.І., Пелєвін Д.Є. Синтез нелинейного робастного управления системой компенсации искажений магнитного поля на основе аналитических моделей нелинейностей. *Електротехнічні та комп'ютерні системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»*, Одеса: «ОНПУ», 2011. № 03(79). С. 50–51. URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/560>.

Здобувачу належить обґрунтування актуальності теми досліджень та представлення прикладу системи компенсації.

15. Кузнецов Б.І., Пелєвін Д.Є., Бовдуй І.В., Коломиец В.В., Котлярів Д.О. Компенсация искажений магнитного поля промышленной частоты. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»*, 2012. №03(19). С. 135–

136.URL: https://www.researchgate.net/publication/297475462_Active_screening_of_industrial_frequency_magnetic_field_system_synthesis

Здобувачу належить виконання експериментальних досліджень систем компенсації.

16. Кузнецов Б.І., Нікітіна Т.Б., Пелєвін Д.Є., Бовдуй І.В., Волошко О.В., Винниченко О.В. Котлярів Д.О. Экспериментальное исследование макета системы активного экранирования магнитного поля вблизи токопроводов электростанций. *Наукові праці Донецького Національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика»*, 2013. №1(14), С. 134–137. URL:

https://www.researchgate.net/publication/387164345_Experimental_Research_of_the_Prototyping_System_of_Active_Screening_of_Magnetic_Field_Near_Power_Stations_Bus.

Здобувачу належить розроблення методики експериментальних досліджень системи активного екранування.

17. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є., Левіна С.В. Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях. *Електротехніка і електромеханіка*, 2013. № 6. С. 72–76. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2013.6.13>.

Здобувачу належить методика експериментального визначення коефіцієнту екранування магнітного поля феромагнітним каркасом житлового будинку.

18. Кузнецов Б.І., Бовдуй І.В., Пелєвін Д.Є., Волошко О.В., Винниченко О.В., Котляров Д.О. Исследование эффективности системы активного экранирования магнитного поля вблизи токопроводов электростанций. *Вестник НТУ «ХПИ» Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*. Харків: НТУ «ХПИ». 2013. № 36. С. 349–350. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/12e9a854-e822-4b13-9f0a-5caa0f6770fc/content>.

Здобувачу належить методика експериментальних досліджень систем активного екранування.

19. Пелєвін Д.Є. Магнітне поле двожильних електричних кабелів житлових приміщень. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2024. №7(197). С. 8–15. URL: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/311135>

20. Пелєвін Д.Є. Нормалізація магнітного поля в житлових приміщеннях, розташованих над вбудованими трансформаторними підстанціями 6(10)/0,4 кВ потужністю 100-400 кВА. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. № 2(12). С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.2.08>.

21. Пелєвін Д.Є. Розрахунок магнітного поля низьковольтного струмопроводу вбудованої трансформаторної підстанції. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Енергетика: надійність та енергоефективність»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. № 2(9). С. 63–71. DOI: [https://doi.org/10.20998/EREE.2024.2\(9\).310498](https://doi.org/10.20998/EREE.2024.2(9).310498).

*Наукові праці за матеріалами конференцій
які засвідчують апробацію матеріалів дисертації :*

22. Пелєвін Д.Є. Синтез системы активного экранирования магнитного поля промышленной частоты / Б.И Кузнецов., Д.Є. Пелєвін, І.В. Бовдуй, Д.А. Котлярів // *Технічна електродинаміка*, 2012. – №2. С. 131-132. (Scopus)
URL: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/1311>.

Здобувачу належить виконання експериментальних досліджень систем активного екранування.

23. Розов В.Ю., Думанский Ю.Д., Пелєвін Д.Є., Левіна С.В. Исследование статического геомагнитного поля в жилых и общественных помещениях. *Гігієна населених місць: Зб. наук. пр. К.: ДУ «ІГМЕ АМНУ»*, Київ, Україна, 2013, Вип. 62, С. 169-176. URL: http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/gnm_2013_62_30.pdf.

Здобувачу належить аналіз коефіцієнту екранування магнітного поля феромагнітним каркасом житлового будинку.

24. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Вплив на житлове середовище електромагнітного поля міських трансформаторних підстанцій. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції «Фізичні фактори довкілля та їх вплив на формування здоров'я населення»*, м. Київ, 12–13 листопада 2020 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзеєва НАМН України», 2020 р., Вип. 20, С. 24-26. URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/xvi_marzieiev_readings_proceedings_2020.pdf.

Здобувачу належить аналіз розподілу магнітного поля міських трансформаторних підстанцій.

25. Розов В.Ю., Реуцький С.Ю., Пелєвін Д.Є., Грецьких С.В. Особливості розрахунку магнітного поля повітряних ЛЕП 330-750 кВ в зоні виконання робіт без зняття напруги. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції (17 Марзеєвські читання) «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України»*, м. Київ, 21-22 жовтня 2021 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзеєва НАМН України», 2021 р., Вип. 21, С. 325-329. URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/xvii_marzieiev_readings_proceedings_2021.pdf.

Здобувачу належить методика вимірювання індукції магнітного поля ЛЕП та її експериментальна перевірка.

26. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Методи нормалізації магнітного поля в житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанціями. *Збірка тез доповідей Науково-практичної конференції (17 Марзеєвські читання) «Актуальні питання громадського здоров'я та екологічної безпеки України»*, м. Київ, 21-22 жовтня 2021 р. Київ: ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзеєва НАМН України», 2021 р., Вип. 21, С. 329-331. URL: https://health.gov.ua/wp-content/uploads/2024/02/xvii_marzieiev_readings_proceedings_2021.pdf.

Здобувачем запропоновано методи нормалізації магнітного поля в житлових будинках з вбудованими трансформаторними підстанціями.

27. Pelevin D., Kundius K., Sokol O., Grinchenko V. Mitigation of urban substation magnetic field by active loop. *Book of Abstracts 2nd Workshop on Engineering Optimization – WEO 2021*, Warsaw, Poland, 7-8 October 2021. Warsaw: Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences, 2021, pp. 81-82. URL: <http://v4shm.ippt.pan.pl/WEO2021-BookOfAbstracts.pdf#page=81>

Здобувачу належить розрахунок магнітного поля трансформаторної підстанції.

28. Грінченко В.С., Пелєвін Д.Є. Математична модель магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції. *Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку територій: теорія і практика. Поствоєнне відновлення»*, м. Харків, 16–17 листопада 2023 р. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023, С. 83-85.

URL: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/2023/Tezy_2023/Zb_irka_tez_16_17_11_23.pdf.

Здобувачу належить математична модель магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції.

29. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є. Розрахунок магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції. *Тези доповідей XXVII Міжнародного симпозіуму SIEMA'2024, 24 - 25 жовтня 2024 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2024 р. С. 68.* URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/c1cfa909-791e-425f-99bb-cff6a062439d>.

Здобувачу належить методика розрахунку магнітного поля вбудованої трансформаторної підстанції.

30. Розов В.Ю., Пелєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Магнітне поле вбудованих трансформаторних підстанцій при розкиді струмів навантаження. *Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Тези доповідей XXVII Міжнародного симпозіуму SIEMA'2025, 30–31 жовтня 2025 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2025 р. С. 18.* URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/siema/wp-content/uploads/sites/111/2026/02/Zbirnyk-tez-2025.pdf>

Здобувачу належить математичне моделювання магнітного поля вбудованих трансформаторних підстанцій в житлових приміщеннях

31. Розов В.Ю., Пєлєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Дослідження магнітного поля повітряних леп 0,4-330 кВ на границі чинних охоронних зон та визначення необхідності їх збільшення. Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. *Тези доповідей XXVII Міжнародного симпозіуму SIEMA '2025, 30–31 жовтня 2025 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2025 р. С. 71. URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/siema/wp-content/uploads/sites/111/2026/02/Zbirnyk-tez-2025.pdf>.*

Здобувачу належить математична модель магнітного поля високовольтних ліній електропередачі, санітарно-гігієнічна оцінка магнітного поля на границях охоронних зон.

ДОДАТОК Б

МАТЕРІАЛИ З ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Б1. Матеріали договору з НЕК «Укрєнерго»:

LITPM

ДОГОВІР № 13-3/1516-15/42/06-2015
на створення науково-технічної продукції

м. Київ

« 15 » 06 . 2015 р.

Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укрєнерго» (ДП «НЕК «Укрєнерго») в особі головного інженера Відокремленого підрозділу «Науково-технічний центр електроенергетики» Державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укрєнерго» (НТЦЕ) Квицинського Анатолія Олександровича, що діє на підставі Положення про НТЦЕ та довіреності № 159 від 04.03.2015 р., (далі – **Замовник**), з однієї сторони і Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» в особі директора Розова Володимира Юрійовича, що діє на підставі Статуту, (далі – **Виконавець**), уклали цей договір (далі – Договір) про таке:

1 Предмет Договору

1.1 **Замовник** доручає, а **Виконавець** зобов'язується виконати науково-технічну розробку (далі – НТР) зі створення науково-технічної продукції (НТП) «Перегляд нормативного документу СОУ-Н ЕЕ 20.179: 2008 «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика» в частині підвищення достовірності розрахункових співвідношень на основі вимірювань та розширення сфери застосування методики» (далі – Робота) відповідно до технічного завдання (далі – ТЗ).

1.2 Наукові, технічні, економічні та інші вимоги до науково-технічної продукції, визначені технічним завданням на Роботу, затвердженим **Замовником** (Додаток 1).

1.3 **Виконавець** зобов'язується виконати Роботу до 30 вересня 2015 року з урахуванням п. 3.3 цього Договору.

2 Вартість Роботи і порядок розрахунків

2.1 Вартість роботи встановлена в сумі 80 000 грн. (вісімдесят тисяч гривень 00 коп.), без ПДВ відповідно до протоколу погодження договірної ціни (Додаток 4).

2.2 Оплата виконаних робіт здійснюється шляхом перерахування коштів на поточний рахунок Виконавця за фактично надані послуги відповідно до календарного плану (Додаток 2).

2.3 Робота починається **Виконавцем** після підписання договору.

2.4 **Замовник** здійснює розрахунок з **Виконавцем** за виконану Роботу за етапами договору відповідно до календарного плану з відстрочкою платежу протягом 30 календарних днів з моменту одержання НТП за актами здавання-приймання на підставі рахунків-фактур у національній валюті України шляхом перерахування грошових коштів **Замовника** на поточний рахунок **Виконавця**.

3 Порядок здачі та приймання Роботи

3.1 Порядок здачі та приймання виконаної Роботи здійснюється згідно з вимогами цього Договору. Оцінка науково-технічної продукції здійснюється відповідно до вимог ТЗ на Роботу

3.2 Після завершення роботи за етапом **Виконавець** подає **Замовнику** акти здавання-приймання НТП за етапами роботи з додатками у вигляді комплексу звітної наукової, технічної, іншої документації, передбаченої вимогами ТЗ і Календарного плану. Датою виконання роботи Виконавцем вважається дата надання Замовнику звітної документації.

3.3 Для забезпечення виконання робіт за етапом 2 Календарного плану **Замовник** на протязі 15 календарних днів з дати надання **Виконавцем** звітної документації за етапом 1 Календарного плану надає Виконавцю зауваження і пропозиції до першої редакції проекту змін до нормативного документу (НД). В разі затримки надання вказаних зауважень і пропозицій, строк виконання робіт за договором подовжується на строк затримки з подальшим оформленням Сторонами додаткової угоди до Договору, яка передбачає подовження терміну виконання робіт за Договором.

3.4 У разі дострокового виконання Роботи **Замовник** має праве достроково прийняти Роботу.

3.5 Якщо в процесі виконання Роботи з'ясовується неминучість одержання негативного результату або недоцільність подальшого проведення Роботи, **Виконавець** зобов'язаний призупинити Роботу і протягом 10 днів повідомити про це **Замовника**. У цьому разі Сторони зобов'язані протягом 20 днів вирішити питання про доцільність та можливість продовження виконання Роботи.

4 Відповідальність Сторін

4.1 За невиконання або неналежне виконання своїх зобов'язань за цим Договором Сторони несуть відповідальність згідно з чинним законодавством та цим Договором.

4.2 У разі припинення дії Договору з ініціативи **Замовника** останній оплачує **Виконавцю** виконану Роботу в обсязі фактичних витрат на дату припинення виконання робіт.

4.3 У разі порушення встановленого умовами Договору строку виконання зобов'язань **Виконавець** сплачує **Замовнику** пеню у розмірі 0,5 % (нуль цілих п'ять десятих відсотка) ціни прострочених зобов'язань, за кожний день прострочення, а за прострочення понад тридцять днів додатково сплачує штраф у розмірі 14 % (чотирнадцять відсотків) від вказаної ціни.

4.4 За порушення умов щодо якості зобов'язання **Виконавець** сплачує **Замовнику** штраф в розмірі 40 % (сорока відсотків) ціни неякісно виконаного зобов'язання та зобов'язується усунути такі недоліки протягом 5 робочих днів з моменту його виявлення **Замовником**.

4.5 За порушення строків оплати (за винятком випадків, встановлених Договором) **Замовник** сплачує **Виконавцю** пеню в розмірі половини облікової ставки НБУ, яка діяла на момент нарахування пені, від суми простроченого платежу за кожний день прострочення.

4.6 У разі виникнення між Сторонами судового спору з приводу виконання, розірвання або зміни Договору, **Виконавець** зобов'язаний сплатити на користь **Замовника** штраф у розмірі 1000 грн. за кожен випадок ненадання або прострочення надання документів за запитом суду, який порушив провадження у справі, у строк, зазначений у відповідній ухвалі.

4.7 За незабезпечення збереження інформації, що стала відома **Виконавцю** у зв'язку з укладенням/виконанням Договору та/або стосується предмету Договору та/або інформації про ДП «НЕК «Укренерго», в результаті чого така інформація стала відома третім особам, за винятком осіб/випадків, визначених чинним законодавством України, інша сторона Договору сплачує штраф у визначеному Договором розмірі за кожний випадок такого незабезпечення збереження інформації понад відшкодування у повному розмірі збитків.

Сторони домовилися, що для вимог про стягнення з **Виконавця** штрафних санкцій (неустойка, штраф, пеня) застосовується строк позовної давності три роки.

Сторони домовилися, що за прострочення виконання **Виконавцем** зобов'язань за Договором, нарахування штрафних санкцій (неустойка, штраф, пеня) припиняється через рік від дня, коли зобов'язання мало бути виконано.

Збитки, завдані під час виконання зобов'язань за Договором, підлягають відшкодуванню у повній сумі понад встановлені Договором штрафні санкції.

5 Інші умови

5.1 Власником створеної НТП є **Замовник**.

5.2 Майнові права інтелектуальної власності на створену за цим Договором НТП належать **Замовнику**.

5.3 **Виконавець** має право за узгодженням із **Замовником** перерозподіляти кошти по статтях витрат.

5.4 Сторони погодилися, що текст Договору, будь-які первинні документи, матеріали, інформація та відомості, які стосуються Договору, є конфіденційними і не можуть передаватися третім особам без попередньої письмової згоди. Повноважні представники, які підписують цей Договір, повідомлені про їх права, передбачені статтями 8, 21 Закону України «Про захист персональних даних» № 2297-VI від 01.06.2010 року та надають згоду на обробку та включення своїх персональних даних, зазначених в Договорі до баз персональних даних сторін, виключно з метою його виконання.

5.6 **Замовник** має статус платника податку на прибуток на загальних умовах у відповідності до Податкового кодексу України, **Виконавець** є неприбутковою установою, неплатником ПДВ та неплатником податку на прибуток.

5.7 Жодна із Сторін не має права передавати свої права та обов'язки за цим Договором іншим особам без письмової згоди на це інших сторін Договору.

6 Права та обов'язки сторін

6.1 Замовник зобов'язаний:

6.1.1 Провести платежі за цим Договором, у розмірах і в терміни, установлені розділами 2.1 – 2.4 Договору.

6.1.2 Прийняти Роботу згідно з актами здавання-приймання відповідно до вимог **Замовника** і ТЗ на Роботу.

6.1.3 Не оплачувати виконані **Виконавцем** роботи понад ТЗ.

6.2 Замовник має право:

6.2.1 Достроково розірвати цей Договір у разі невиконання зобов'язань **Виконавцем**, повідомивши про це його у десятиденний строк.

6.2.2 Контролювати виконання роботи у терміни встановлені цим Договором, не втручаючись в господарську діяльність **Виконавця**.

6.2.3 Повернути акти-здавання приймання Роботи без здійснення оплати в разі неналежного оформлення документів за цим Договором.

6.3 Виконавець зобов'язаний:

6.3.1 Забезпечити виконання Роботи у строки, встановлені цим Договором.

6.3.2 Забезпечити виконання Роботи, якість якої відповідає умовам, встановленим ТЗ та цим Договором.

6.4 Виконавець має право:

6.4.1 Своєчасно та в повному обсязі отримувати плату за виконану Роботу, в порядку встановленому цим Договором.

6.4.2 На дострокове виконання Роботи.

7 Обставини непереборної сили

7.1 Сторони звільняються від відповідальності за невиконання або неналежне виконання зобов'язань за цим Договором у разі виникнення обставин непереборної сили, які не існували під час укладання Договору та виникли поза волею Сторін. Форс - мажорними обставинами (обставинами непереборної сили) є випадки передбачені ст. 14 Закону України «Про торгово-промислові палати в Україні».

7.2 Сторона, яка не може виконувати зобов'язання за цим Договором унаслідок дії обставин непереборної сили, повинна негайно не пізніше ніж протягом 5 (п'яти) календарних днів з моменту їх виникнення повідомити про це іншу Сторону у письмовій формі.

7.3 Доказом виникнення обставин непереборної сили та строку їх дії є Сертифікат про форс-мажорні обставини, який видається Торгово-промисловою палатою України або регіональною торгово-промисловою палатою.

7.4 У разі коли строк дії обставин непереборної сили продовжується більше ніж три місяці, кожна із Сторін в установленому порядку має право розірвати цей Договір.

8 Вирішення спорів

8.1 У випадку виникнення спорів або розбіжностей Сторони зобов'язуються вирішувати їх шляхом взаємних переговорів та консультацій.

8.2 У разі недосагнення Сторонами згоди, спори (розбіжності) вирішуються у судовому порядку.

9 Строк дії Договору

9.1 Цей Договір набирає чинності з моменту підписання його Сторонами та діє до 31.12.2015 р., але в будь-якому разі до повного виконання сторонами взятих за Договором зобов'язань.

9.2 Цей Договір укладається і підписується у двох примірниках, що мають однакову юридичну силу, по одному для кожної із Сторін.

10 Додатки до Договору

10.1 Невід'ємною частиною цього Договору є:

Додаток 1. Технічне завдання на виконання НТР (9 арк.)

Додаток 2. Календарний план (1 арк.)

Додаток 3. Кошторис (1 арк.)

Додаток 4. Протокол погодження договірної ціни (1 арк.)

10.2 Документація згідно пункту 3.2 Договору передається **Замовнику** у двох примірниках на паперовому носії та в електронній формі.

11 Місцезнаходження та банківські реквізити Сторін

ЗАМОВНИК

Відокремлений підрозділ «Науково-технічний центр електроенергетики» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго»
04112, м. Київ, вул. Дорогожицька, 11/8
тел./факс (044) 206-73-91
Розрахунковий рахунок № 26009010066452
у АТ «Укресімбанк» м. Києва
МФО 322313
Код ЄДРПОУ 36470200

ВИКОНАВЕЦЬ

Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України»
61106, м. Харків, вул. Індустріальна, 19
тел./факс (0572) 99-21-62
Розрахунковий рахунок № 31250201110346
у ГУДКСУ в Харківській області
МФО 851011
Код ЄДРПОУ 00216881

Головний інженер Відокремленого підрозділу
«Науково-технічний центр
електроенергетики» Державного
підприємства «Національна енергетична
компанія «Укренерго»


А.О. Квицинський
(підпис)
_____ 2015 р.
М.П.

Директор Державної установи «Інститут
технічних проблем магнетизму Національної
академії наук України»


В.Ю. Розов
(підпис)
_____ 2015 р.
М.П.

Григор *Григор*

ВИКОНАВЕЦЬ

Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України»
Адреса: 61106, м. Харків,
вул. Індустріальна, 19
код ЄДРПОУ 00216881
р/р 31250201110346
УГУДКСУ в Харківській області
МФО 851011

ЗАМОВНИК

Відокремлений підрозділ
"Науково-технічний центр електроенергетики"
Державного підприємства "Національна енергетична компанія "Укренерго" (НТЦЕ)
Адреса: 04112, м. Київ, вул. Дорогожицька, 11/8
код ЄДРПОУ 36470200
р/р 26009010066452 у АТ «Укресімбанк»
м. Києва, МФО 322313,
ІПН 001002226654
Свідоцтво платника ПДВ № 200037859

АКТ № 1

від «30» липня 2015 р.

здавання-приймання виконаних робіт за договором
№ 13-3/1516-15/42/06-2015 від 15 червня 2015 року
на виконання науково-технічної розробки зі створення науково-технічної
продукції «Перегляд нормативного документу СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008
«Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання.
Методика» в частині підвищення достовірності розрахункових
співвідношень на основі вимірювань та розширення сфери застосування
методики»

Загальна вартість роботи за договором 80000,00 (вісімдесят тисяч) грн. без ПДВ.

Ми, що нижче підписались, представник **ВИКОНАВЦЯ** – директор Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» Розов В.Ю., з одного боку, та представник **ЗАМОВНИКА** – директор відокремленого підрозділу "Науково-технічний центр електроенергетики" державного підприємства "Національна енергетична компанія "Укренерго" (НТЦЕ) Лучніков В.А., з іншого боку, склали цей акт, про те, що науково-технічна продукція задовольняє умовам договору, технічного завдання та в належному порядку оформлена.

Стислий опис науково-технічної продукції відповідно до етапу 1 календарного плану: перша редакція проекту змін до Методики, пояснювальна записка.

Виконано робіт з початку року на 50000,00 (п'ятдесят тисяч) грн. 00 коп. без ПДВ.

Вартість роботи за 1 етапом, що здається, складає 50000,00 (п'ятдесят тисяч) грн. 00 коп. без ПДВ.

Роботу здав:
ВИКОНАВЕЦЬ

Директор Державної установи
«Інститут технічних проблем
магнетизму НАН України»



В.Ю. Розов
м.сто. Харків

Роботу прийняв
ЗАМОВНИК

Директор
НТЦЕ




В.А. Лучніков

ВИКОНАВЕЦЬ

Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України»
Адреса: 61106, м. Харків,
вул. Індустріальна, 19
код ЄДРПОУ 00216881
р/р 31250201110346
у ГУДКСУ в Харківській області
МФО 851011

ЗАМОВНИК

Відокремлений підрозділ
"Науково-технічний центр електроенергетики"
Державного підприємства "Національна енергетична компанія "Укренерго" (НТЦЕ)
Адреса: 04112, м. Київ, вул. Дорогожицька, 11/8
код ЄДРПОУ 36470200
р/р 26009010066452 у АТ «Укресімбанк»
м. Києва, МФО 322313,
ПІН 001002226654
Свідоцтво платника ПДВ № 200037859

АКТ № 2

від «30» вересня 2015 р.
здавання-приймання виконаних робіт за договором
№ 13-3/1516-15/42/06-2015 від 15 червня 2015 року
на виконання науково-технічної розробки зі створення науково-технічної
продукції «Перегляд нормативного документу СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008
«Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання.
Методика» в частині підвищення достовірності розрахункових
співвідношень на основі вимірювань та розширення сфери застосування
методики»

Загальна вартість роботи за договором 80000,00 (вісімдесят тисяч) грн. без ПДВ.

Ми, що нижче підписались, представник **ВИКОНАВЦЯ** – директор Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» Розов В.Ю., з одного боку, та представник **ЗАМОВНИКА** – головний інженер Відокремленого підрозділу «Науково-технічний центр електроенергетики» Державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НТЦЕ) Квицинський А.О., з іншого боку, склали цей акт, про те, що науково-технічна продукція задовольняє умовам договору, технічного завдання та в належному порядку оформлена.

Стислий опис науково-технічної продукції відповідно до етапу 2 календарного плану: остаточна редакція проекту змін до Методики. Пояснювальна записка.

Виконано робіт з початку року на 80000,00 (вісімдесят тисяч) грн. 00 коп. без ПДВ.

Вартість роботи за 2 етапом, що здається, складає 30000,00 (тридцять тисяч) грн. 00 коп. без ПДВ.

Роботу здав:
ВИКОНАВЕЦЬ

Директор Державної установи
«Інститут технічних проблем
магнетизму НАН України»
В.Ю. Розов



Роботу прийняв
ЗАМОВНИК

Головний інженер
НТЦЕ
А.О. Квицинський



Б2. Методика розрахунку:

НОРМАТИВНИЙ ДОКУМЕНТ МІНЕНЕРГОВУТІЛЛЯ УКРАЇНИ

**РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО І МАГНІТНОГО ПОЛІВ
ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ
МЕТОДИКА
(зі змінами)**

СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008

Київ

**Відокремлений підрозділ
«Науково-проектний центр розвитку об'єднаної енергетичної системи
України» Державного підприємства «Національна енергетична компанія
«Укренерго»**

2016

ПЕРЕДМОВА

- 1 **ЗАМОВЛЕНО:** Міністерство енергетики та вугільної промисловості України

- 2 **РОЗРОБЛЕНО:** Відокремлений підрозділ «Науково-технічний центр електроенергетики» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго»

Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України»

Державна установа «Інститут гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєєва Академії медичних наук України»

- 3 **РОЗРОБНИКИ:** Ю. Думанський, А. Квицинський (керівник розробки), І. Майстренко (відповідальний виконавець), Д. Пелєвін, О. Пилюгіна, С. Реуцький, В. Розов

- 4 **ВНЕСЕНО:** Відділ нормативно-технологічного забезпечення роботи електричних мереж та станцій Управління з питань функціонування та реформування електроенергетичного сектора Міністерства енергетики та вугільної промисловості України,
К. Новиков

- 5 **ЗАТВЕРДЖЕНО
ТА НАДАНО
ЧИННОСТІ:** Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України
від 1 липня 2016 р. № 423

- 6 **ТЕРМІН
ПЕРЕВІРКИ:** 2021 рік

Право власності на цей документ належить державі.

Відтворювати, тиражувати і розповсюджувати його повністю чи частково на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу Міненерговугілля України заборонено.

© Міненерговугілля України, 2016



МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

НАКАЗ

« 07 » 07 2012

м. Київ

№ 423

Про внесення змін до нормативного документа «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика»

З метою визначення оцінки впливу ліній електропередавання на довкілля під час проектування, будівництва та експлуатації

НАКАЗУЮ:

1. Внести зміни до нормативного документа «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика» (далі – Методика), затвердженого наказом Міненерговугілля від 22.10.2008 № 512, виклавши його у редакції, що додається.

2. Об'єднанню енергетичних підприємств «Галуzeвий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики» (Котельников О. О.) внести цей наказ до реєстру нормативних документів Міненерговугілля України.

3. Державному підприємству «Національна енергетична компанія «Укренерго» (Ковальчук В. В.) забезпечити видання та розповсюдження необхідної кількості примірників Методики державним підприємствам, що належать до сфери управління Міненерговугілля, та господарським товариствам, щодо яких Міненерговугілля здійснює управління корпоративними правами держави, відповідно до замовлень.

4. Наказ набирає чинності через 90 днів.

5. Контроль за виконанням цього наказу покласти на заступника Міністра Светеліка О.Д.

Міністр



І. Насалик

ЗМІСТ

	С.
1 Сфера застосування	1
2 Нормативні посилання	1
3 Терміни та визначення понять	2
4 Позначення та скорочення	2
5 Методика розрахунку електричного і магнітного полів ліній електропередавання	3
5.1 Загальні положення	3
5.2 Підготовка вихідних даних для розрахунку	4
5.3 Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії електропередавання	4
5.4 Розрахунок індукції магнітного поля повітряної лінії електропередавання	7
5.5 Розрахунок індукції магнітного поля кабельної лінії електропередавання	10
5.6 Вимоги до оформлення результатів розрахунку	14
Додаток А Гранично допустимі значення напруженості електричного поля ліній електропередавання	15
Додаток Б Тимчасові гранично допустимі рівні магнітного поля, яке утворюється підземними кабельними лініями змінного струму промислової частоти	16
Додаток В Порядок виконання вимірювань електричного і магнітного полів ліній електропередавання в умовах експлуатації	17
Додаток Г Приклади розрахунку електричного і магнітного полів трифазних ліній електропередавання	21
Додаток Д Найбільші значення магнітної індукції підземних кабельних ліній електропередавання на висоті 0,5 м від поверхні землі	33
Додаток Е Перелік приладів, рекомендованих для вимірювання електричного і магнітного полів ліній електропередавання	35
Додаток Ж Бібліографія	37

ВСТУП

Цей нормативний документ «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика» (далі – Методика) є результатом перегляду діючої Методики СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 в частині підвищення достовірності розрахункових співвідношень та верифікації їх результатів на основі вимірів, що дозволить розширити сфери застосування Методики, поліпшити діяльність суб'єктів господарювання у сфері будівництва електричних мереж, забезпечити безпечну експлуатацію об'єктів і реалізацію права громадян на безпечне оточуюче середовище.

Теоретичною основою Методики стали результати спільних наукових досліджень Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України», Відокремленого підрозділу «Науково-технічний центр електроенергетики» Державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» та Державної установи «Інститут гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзкева» НАМН України з урахуванням останніх світових досягнень в напрямках моделювання, розрахунку, вимірювання та нормування електричного та магнітного полів повітряних і підземних кабельних ліній електропередавання.

Перелік нормативно-правових актів та нормативно-технічних документів, які регламентують проектування, експлуатацію і будівництво електричних мереж та визначають гранично допустимі рівні і орієнтовні безпечні рівні впливу електричного і магнітного полів на організм людини, наведено в основній частині Методики.

Нормування електричного та магнітного полів на робочих місцях регламентовано такими документами: ГКД 34.03.501 та ДСанПіН № 198-97.

ЗАТВЕРДЖЕНО

Наказ Міністерства енергетики
та вугільної промисловості України
від 20 жовтня 2008 року № 512
(у редакції наказу Міністерства енергетики
та вугільної промисловості України
від 1 липня 2016 року № 423)

СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008

НОРМАТИВНИЙ ДОКУМЕНТ МІНЕНЕРГОВУТІЛЛЯ УКРАЇНИ

**РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО І МАГНІТНОГО ПОЛІВ
ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ
МЕТОДИКА
(зі змінами)**

Чинний від 2016-09-29

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Цю Методику призначено для розрахунку напруженості електричного поля та індукції магнітного поля промислової частоти (50 Гц) трифазних повітряних ліній електропередавання та індукції магнітного поля промислової частоти трифазних підземних кабельних ліній електропередавання у процесі визначення можливих впливів планової діяльності (під час будівництва та експлуатації) на навколишнє соціальне середовище (населення) відповідно до ДБН А.2.2-1.

1.2 Цю Методику призначено для застосування суб'єктами електроенергетики, що здійснюють проектування, будівництво та експлуатацію повітряних ліній електропередавання і підземних кабельних ліній електропередавання.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

У цій Методикі є посилання на такі нормативні документи:

ДСТУ 2843-94 Електротехніка. Основні поняття. Терmini та визначення

ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення)

ДБН 360-92** Містобудування. Планування та забудова міських та сільських поселень

ДБН А.2.2-1-2003 Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд

ДБН А.2.2-3-2014 Склад і зміст проектної документації на будівництво
ДСП 173-96 Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів

ДСН 239-96 Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань

ГКД 34.03.501-94 Визначення рівнів впливу електромагнітного поля промислової частоти на персонал енергетичних підприємств. Методика визначення

ДСанПіН № 198-97 Державні санітарні норми і правила при виконанні робіт в невідкритих електроустановках напругою до 750 кВ

ПУЕ 2014 Правила улаштування електроустановок

3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

У цій Методикі використано терміни, установлені в ДБН 360: сільбишня територія (до сільбищної території входять ділянки житлових будинків, громадських установ, будинків і споруд, у тому числі навчальних, проектних, науково-дослідних та інших інститутів без дослідних виробництв, внутрішньосільбишня вулично-дорожня і транспортна мережа, а також площі, парки, сади, сквери, бульвари, інші об'єкти зеленого будівництва й місця загального користування), сільбищний район, дачні та садівничі товариства і об'єднання громадян, зона відпочинку, вулиця, дорога; у ДСТУ 2843: діюче значення, напруженість електричного поля, магнітна індукція, електрична напруга, діюче значення сили електричного струму, електрична стала, магнітна стала, відносна діелектрична проникність, відносна магнітна проникність.

Нижче подано терміни, додатково використані у цій Методикі, та визначення позначених ними понять:

3.1 впливна величина

Вид впливу електромагнітного поля лінії електропередавання, який підлягає нормуванню.

3.2 метод суперпозиції

Метод розрахунку, згідно з яким впливну величину проводів зі струмом у заданій точці простору обчислюють як векторну суму впливів, утворених кожним із проводів зі струмом у цій точці.

4 ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ

У цій Методикі застосовано такі позначення та скорочення:

$E_{x,\xi}(P)$, $E_{y,\xi}(P)$ – діючі значення просторових компонент вектора напруженості електричного поля кожної фази $\xi \in A, B, C$ у точці спостереження P у декартовій системі координат, В/м;

$B_{x,\xi}(P)$, $B_{y,\xi}(P)$ – діючі значення просторових компонент вектора індукції магнітного поля кожної фази $\xi \in A, B, C$ у точці спостереження P у декартовій системі координат, Тл;

I – діюче значення електричного струму, А;

U – діюче значення електричної напруги, В;

$E_x(P)$, $E_y(P)$ – діючі значення просторових компонент вектора напруженості електричного поля в точці спостереження P ;

$B_x(P)$, $B_y(P)$ – діючі значення просторових компонент вектора індукції магнітного поля в точці спостереження P ;

$E_d(P)$ – діюче значення напруженості електричного поля ЛЕП у точці спостереження P ;

$B_d(P)$ – діюче значення індукції магнітного поля ЛЕП у точці спостереження P ;

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – електрична стала, Ф/м;

ε – відносна діелектрична проникність середовища, в.о.;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна стала, Гн/м;

μ – відносна магнітна проникність середовища, в.о.;

ω – кутова частота, рад/с;

ЕП – електричне поле;

МП – магнітне поле;

ЛЕП – лінія електропередавання;

КЛ – кабельна лінія електропередавання;

ПЛ – повітряна лінія електропередавання.

5 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО І МАГНІТНОГО ПОЛІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

5.1 Загальні положення

5.1.1 Напруженість електричного поля (ЕП) повітряних ліній (ПЛ) електропередавання необхідно розраховувати у випадках, передбачених ДСН 173, ДСН 239.

5.1.2 Індукцію магнітного поля ПЛ необхідно розраховувати під час проектування ПЛ з площею поперечного перерізу проводів понад 95 мм².

5.1.3 Напруженість електричного поля підземних кабельних ліній електропередавання (КЛ) не розраховують, тому що вони не створюють небезпечного для населення електричного поля на поверхні землі.

5.1.4 Індукцію магнітного поля підземних КЛ необхідно розраховувати у випадках проектування КЛ з одножильними кабелями з перерізом струмопровідної жили понад 95 мм² – у разі заземлення екранів з обох боків і проектування КЛ з одножильними кабелями з перерізом струмопровідної жили понад 35 мм² – у разі заземлення екранів з одного боку.

5.1.5 Значення впливних величин ЛЕП розраховують для номінальної напруги і максимального симетричного навантаження в нормальному режимі роботи за відповідності показників якості електричної енергії вимогам ГОСТ 13109.

5.1.6 Значення напруженості (індукції) електричного і магнітного полів, утворюваних ПЛ, визначають на висоті 1,8 м над поверхнею землі.

5.1.7 Значення індукції магнітного поля, утворюваного підземними КЛ, визначають на висоті 0,5 м від поверхні землі.

5.1.8 У разі прокладання КЛ у санітарно-захисній зоні ПЛ, значення напруженості (індукції) електричного і магнітного полів, утворюваних ПЛ і КЛ слід обчислювати на висотах 0,5; 1,0 м та 1,8 м від поверхні землі.

5.1.9 Характеристики середовища (відносна діелектрична проникність, відносна магнітна проникність) у розрахунках приймають незмінними. Діюче значення напруженості електричного поля і діюче значення магнітної індукції в точках простору обчислюють, використовуючи метод суперпозиції.

5.1.10 Гранично допустимі значення напруженості електричного поля ПЛ наведено в додатку А.

Тимчасові гранично допустимі рівні магнітного поля, яке утворюється підземними кабельними лініями змінного струму промислової частоти, наведено в додатку Б.

Приклади розрахунку інтенсивності електричного і магнітного полів ЛЕП наведено в додатку Г.

Найбільші значення магнітної індукції підземних КЛ на висоті 0,5 м від поверхні землі наведено в додатку Д.

5.2 Підготовка вихідних даних до розрахунку

5.2.1 До початку розрахунку необхідно:

- виконати класифікацію територій по трасі ЛЕП згідно з ДБН 360;
- накреслити профіль траси ЛЕП;
- виявити місця найбільшого наближення проводів ПЛ і кабелів КЛ до горизонтальних площин над поверхнею землі, проведених на висоті, зазначеній у 5.1.6 – 5.1.8 цієї Методики.

5.2.2 Обґрунтувати вибір характеристик середовища (відносна діелектрична проникність середовища, відносна магнітна проникність середовища).

5.2.3 Згідно з ДСН 239, визначити гранично допустимі значення впливних величин (діюче значення напруженості електричного поля, діюче значення магнітної індукції).

5.3 Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії електропередавання

5.3.1 Обчислення діючих значень напруженості електричного поля ПЛ виконують для площини, проведеної нормально до напрямку траси ПЛ через точку максимального наближення проводів до землі (як правило, посередині прогону за найбільшої стріли провисання проводу, яка регламентується в Главі 2.5 ПУЕ–2014) за таких умов:

- проводи ПЛ – система нескінченно довгих паралельних заряджених циліндрів, які віддалено від землі на відстань, визначену проектними рішеннями, але не меншу унормованої в Главі 2.5 ПУЕ: 2014;
- електричне поле ПЛ за межами проводів є потенційним і має дві просторові компоненти;
- електричні заряди проводів фаз рівномірно розподілено вздовж їхніх осей;
- навколишній простір вільний від провідних середовищ і не містить джерел електричного поля;
- грозозахисні троси в розрахунковій схемі не враховують;
- земна поверхня є плоскою та має нульовий потенціал;
- взаємний електричний вплив між проводами ПЛ відсутній – є лише електрична взаємодія проводів із землею;
- відносна діелектрична проникність навколишнього середовища $\epsilon = 1$;

- електричні потенціали проводів фаз є синусоїдними функціями часу, рівні за амплітудою та в різних фазах зміщені на кут $2\pi/3$ рад;
- фазовий зсув напруг відповідних фаз багатоколових ПЛ відсутній.

5.3.2 Розрахунок діючого значення напруженості електричного поля ПЛ виконують у декартовій системі координат таким чином.

5.3.2.1 Діючі значення компонент вектора напруженості електричного поля ПЛ в точці спостереження $P = (x_p, y_p)$ кожної фази $\xi \in A, B, C$ обчислюють як суму напруженостей електричного поля проводів та їхніх дзеркальних відображень відносно землі, яка має нульовий потенціал (рисунок 5.1), за наведеними нижче формулами:

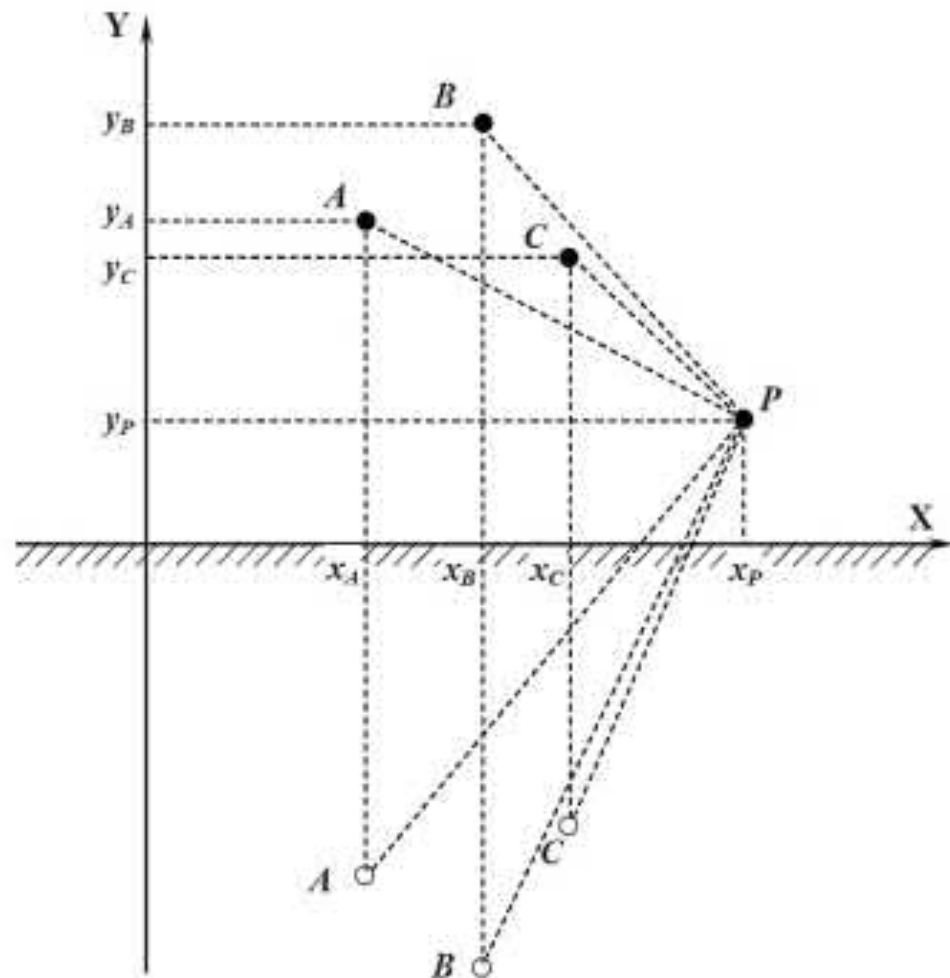


Рисунок 5.1 – Схема розташування проводів ПЛ

$$E_{\xi}(P) = \frac{U_{\xi}}{\ln\left(\frac{2y_{\xi}}{r}\right)} \left[\frac{x_p - x_{\xi}}{(x_p - x_{\xi})^2 + (y_p - y_{\xi})^2} - \frac{x_p - x_{\xi}}{(x_p - x_{\xi})^2 + (y_p + y_{\xi})^2} \right], \quad (5.1)$$

$$E_{\xi}(P) = \frac{U_{\xi}}{\ln\left(\frac{2y_{\xi}}{r}\right)} \left[\frac{y_P - y_{\xi}}{(x_P - x_{\xi})^2 + (y_P - y_{\xi})^2} - \frac{y_P + y_{\xi}}{(x_P - x_{\xi})^2 + (y_P + y_{\xi})^2} \right], \quad (5.2)$$

де U – діюче значення напруги кожної фази, В;

r – радіус проводу, м;

$x_{\xi}^{\pm}, y_{\xi}^{\pm}$ – координати перетину проводом фази $\xi \in A, B, C$ площини, перпендикулярної до осі ПЛ, відповідно до рисунка 5.1, м;

x_P, y_P – координати точки спостереження в площині, перпендикулярній осі до ПЛ, м.

5.3.2.2 Діючи значення кожної з двох компонент вектора напруженості електричного поля в точці спостереження P обчислюють, використовуючи компоненти вектора напруженості $E_{x,\xi}, E_{y,\xi}$, за формулами:

$$E_x(P) = \sqrt{E_{x,A}^2 + E_{x,B}^2 + E_{x,C}^2 - E_{x,A}E_{x,B} - E_{x,A}E_{x,C} - E_{x,B}E_{x,C}}, \quad (5.3)$$

$$E_y(P) = \sqrt{E_{y,A}^2 + E_{y,B}^2 + E_{y,C}^2 - E_{y,A}E_{y,B} - E_{y,A}E_{y,C} - E_{y,B}E_{y,C}}. \quad (5.4)$$

5.3.2.3 Діюче значення напруженості електричного поля ПЛ у точці спостереження P обчислюють за формулою:

$$E_x(P) = \sqrt{(E_x(P))^2 + (E_y(P))^2}. \quad (5.5)$$

Примітка. Для простору, який обмежений проєкціями крайніх проводів ПЛ на землю, значення напруженості електричного поля, що визначене за формулою (5.5), повинно бути збільшено на 25 %.

5.3.2.4 Під час розрахунку напруженості електричного поля ПЛ із розщепленими проводами в рівняннях (5.1), (5.2) використовують еквівалентний радіус r_e , який обчислюють за формулою:

$$r_e = \left(M \cdot r \cdot a^{M-1} \right)^{\frac{1}{M}}, \quad (5.6)$$

де M – кількість проводів в розщепленні кожної із фаз;

r – радіус одного проводу, м;

a – радіус кола, по якому розташовують проводи розщепленої фази, м.

5.3.3 Розрахунок діючого значення напруженості електричного поля багатоколової ПЛ виконують наступним чином.

5.3.3.1 Діючи значення компонент вектора напруженості електричного поля, викликаного кожною фазою, в точці спостереження P , обчислюють як суму компонент векторів напруженості електричного поля, викликаного напругою кожного n -го кола фази $\xi \in A, B, C$:

$$E_{x,A}(P) = \sum_{n=1}^N \frac{U_{A,n}}{\ln\left(\frac{2y_{A,n}}{r}\right)} \left[\frac{x_P - x_{A,n}}{(x_P - x_{A,n})^2 + (y_P - y_{A,n})^2} - \frac{x_P - x_{A,n}}{(x_P - x_{A,n})^2 + (y_P + y_{A,n})^2} \right], \quad (5.7)$$

$$E_{x,B}(P) = \sum_{n=1}^N \frac{U_{B,n}}{\ln\left(\frac{2y_{B,n}}{r}\right)} \left[\frac{x_P - x_{B,n}}{(x_P - x_{B,n})^2 + (y_P - y_{B,n})^2} - \frac{x_P - x_{B,n}}{(x_P - x_{B,n})^2 + (y_P + y_{B,n})^2} \right], \quad (5.8)$$

$$E_{x,C}(P) = \sum_{n=1}^N \frac{U_{C,n}}{\ln\left(\frac{2y_{C,n}}{r}\right)} \left[\frac{x_P - x_{C,n}}{(x_P - x_{C,n})^2 + (y_P - y_{C,n})^2} - \frac{x_P - x_{C,n}}{(x_P - x_{C,n})^2 + (y_P + y_{C,n})^2} \right], \quad (5.9)$$

$$E_{y,A}(P) = \sum_{n=1}^N \frac{U_{A,n}}{\ln\left(\frac{2y_{A,n}}{r}\right)} \left[\frac{y_P - y_{A,n}}{(x_P - x_{A,n})^2 + (y_P - y_{A,n})^2} - \frac{y_P + y_{A,n}}{(x_P - x_{A,n})^2 + (y_P + y_{A,n})^2} \right], \quad (5.10)$$

$$E_{y,B}(P) = \sum_{n=1}^N \frac{U_{B,n}}{\ln\left(\frac{2y_{B,n}}{r}\right)} \left[\frac{y_P - y_{B,n}}{(x_P - x_{B,n})^2 + (y_P - y_{B,n})^2} - \frac{y_P + y_{B,n}}{(x_P - x_{B,n})^2 + (y_P + y_{B,n})^2} \right], \quad (5.11)$$

$$E_{y,C}(P) = \sum_{n=1}^N \frac{U_{C,n}}{\ln\left(\frac{2y_{C,n}}{r}\right)} \left[\frac{y_P - y_{C,n}}{(x_P - x_{C,n})^2 + (y_P - y_{C,n})^2} - \frac{y_P + y_{C,n}}{(x_P - x_{C,n})^2 + (y_P + y_{C,n})^2} \right], \quad (5.12)$$

де N – кількість кіл кожної фази;

$U_{\xi,n}$ – діюче значення напруги фази $\xi \in A, B, C$ n -го кола ПЛ, В;

$x_{\xi,n}, y_{\xi,n}$ – координати перетину проводом кола з номером n фази $\xi \in A, B, C$ площини, перпендикулярної до осі ПЛ, м.

5.3.3.2 Діючі значення кожної з двох компонент вектора напруженості електричного поля в точці спостереження P обчислюють, використовуючи обчислені діючі значення компонент вектора напруженості електричного поля кожної фази, за формулами (5.3) і (5.4).

5.3.3.3 Діюче значення напруженості електричного поля ПЛ у точці спостереження P обчислюють за формулою (5.5).

5.4 Розрахунок індукції магнітного поля повітряної лінії електропередавання

5.4.1 Обчислення діючих значень магнітної індукції ПЛ потрібно виконувати для площини, проведеної нормально до напрямку траси ПЛ через точку максимального наближення проводів до землі (як правило, посередині прогону) за таких умов:

– проводи ПЛ – система нескінченно довгих паралельних прямолінійних провідників нескінченно малого діаметра, які віддалено від землі на відстань, визначену проектними рішеннями, але не меншу від унормованої згідно з главою 2.5 ПУЕ;

– струми в проводах є синусоїдними функціями часу, однаковими за амплітудою і в різних фазах змішеними на кут $2\pi/3$ рад.

- допустима кількість розщеплень проводів фаз – до 5;
- МП ПЛ за межами проводів є потенційним і має дві просторові компоненти;
- навколишній простір є вільним від струмопровідних елементів і феромагнітних мас і не містить джерел МП;
- грозозахисні троси в розрахунковій схемі не враховують;
- відносна магнітна проникність повітря μ дорівнює одиниці;
- фазовий зсув відповідних струмів фаз багатоколових ПЛ відсутній.

5.4.2 Розрахунок діючого значення індукції МП ПЛ виконують відповідно до рисунку 5.2 за наведеними нижче формулами.

5.4.2.1 Діючі значення компонент вектора індукції МП кожної фази $\xi \in A, B, C$ в точці спостереження $P = (x_P, y_P)$ обчислюють за формулами:

$$B_{x,\xi}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} I_\xi \frac{y_P - y_\xi}{(x_P - x_\xi)^2 + (y_P - y_\xi)^2}, \quad (5.13)$$

$$B_{y,\xi}(P) = -\frac{\mu_0}{2\pi} I_\xi \frac{x_P - x_\xi}{(x_P - x_\xi)^2 + (y_P - y_\xi)^2}, \quad (5.14)$$

де I_ξ – діюче значення струму в кожній із фаз ξ, A ;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна стала, Гн/м;

x_P, y_P – координати точки спостереження P у площині, перпендикулярній до осі ПЛ, м;

x_ξ, y_ξ – координати перетину провідником фази $\xi \in A, B, C$ площини, перпендикулярної до осі ПЛ, м.

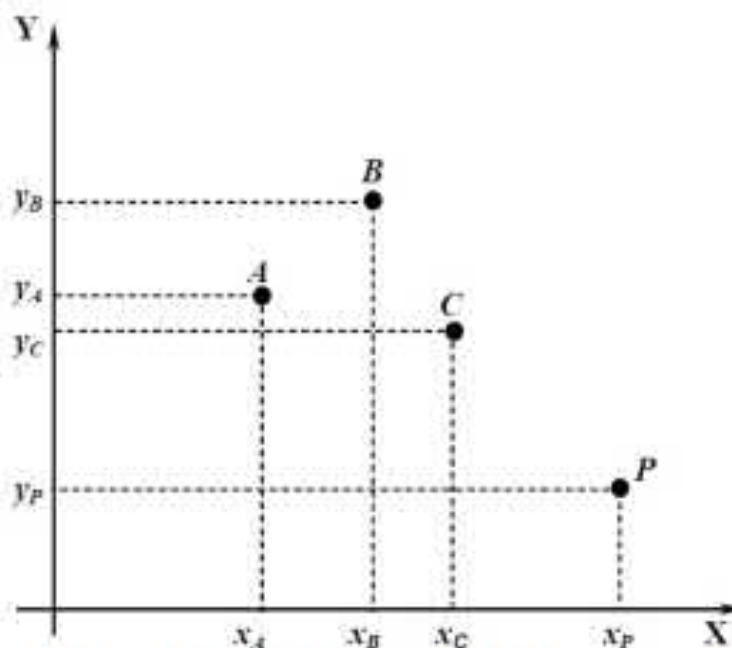


Рисунок 5.2 – Схема розташування проводів ПЛ

5.4.2.2 Діючі значення кожної з двох компонент вектора індукції МП у точці спостереження P обчислюють за формулами:

$$B_x(P) = \sqrt{B_{x,A}^2 + B_{x,B}^2 + B_{x,C}^2 - B_{x,A}B_{x,B} - B_{x,A}B_{x,C} - B_{x,B}B_{x,C}}, \quad (5.15)$$

$$B_y(P) = \sqrt{B_{y,A}^2 + B_{y,B}^2 + B_{y,C}^2 - B_{y,A}B_{y,B} - B_{y,A}B_{y,C} - B_{y,B}B_{y,C}}. \quad (5.16)$$

5.4.2.3 Діюче значення індукції МП ЛЕП у точці спостереження P обчислюють за формулою:

$$B_d(P) = \sqrt{(B_x(P))^2 + (B_y(P))^2}. \quad (5.17)$$

5.4.3 Розрахунок діючого значення індукції МП багатоколової ПЛ виконують таким чином.

5.4.3.1 Діючі значення компонент вектора індукції МП, викликаного кожною фазою $\xi \in A, B, C$ в точці спостереження $P = (x_p, y_p)$, обчислюють як суми компонент векторів індукції МП, викликаного струмом кожного кола, за формулами:

$$B_{x,A}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{I_n(y_p - y_{An})}{(x_p - x_{An})^2 + (y_p - y_{An})^2}, \quad (5.18)$$

$$B_{x,B}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{I_n(y_p - y_{Bn})}{(x_p - x_{Bn})^2 + (y_p - y_{Bn})^2}, \quad (5.19)$$

$$B_{x,C}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{I_n(y_p - y_{Cn})}{(x_p - x_{Cn})^2 + (y_p - y_{Cn})^2}, \quad (5.20)$$

$$B_{y,A}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{I_n(x_p - x_{An})}{(x_p - x_{An})^2 + (y_p - y_{An})^2}, \quad (5.21)$$

$$B_{y,B}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{I_n(x_p - x_{Bn})}{(x_p - x_{Bn})^2 + (y_p - y_{Bn})^2}, \quad (5.22)$$

$$B_{y,C}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{I_n(x_p - x_{Cn})}{(x_p - x_{Cn})^2 + (y_p - y_{Cn})^2}, \quad (5.23)$$

де N – кількість КЛ;

I_n – діюче значення струму кожного n -го кола, А;

x_{ξ}, y_{ξ} – координати перетину проводом кола з номером n фази ξ площини, перпендикулярної до осі ПЛ, м.

5.4.3.2 Діюче значення кожної із двох компонент вектора індукції МП кожної фази в точці спостереження P обчислюють за формулами (5.15) і (5.16), використовуючи обчислені діючі значення компонент вектора магнітної індукції.

5.4.3.3 Діюче значення індукції МП багатоколової ПЛ у точці спостереження P обчислюють, використовуючи формулу (5.17).

5.5 Розрахунок індукцій магнітного поля кабельної лінії електропередавання

5.5.1 Обчислення діючих значень індукції МП КЛ виконують для площини, проведеної нормально до напрямку траси КЛ через точку найменшого заглиблення кабелів за таких умов:

– кабелі КЛ – система нескінченно довгих паралельних проводів нескінченно малого діаметра зі струмами, які віддалено від поверхні землі на глибину, визначену проектними рішеннями, але не меншу в нормованій в ПУЕ;

– струми в кабелях є синусоїдними функціями часу, однаковими за амплітудою і в різних фазах КЛ зміщеними на кут $2\pi/3$ рад;

– магнітне поле КЛ за межами проводів є потенціальним і вектор індукції має дві просторові компоненти;

– оточуючий простір має відносну магнітну проникність, яка дорівнює одиниці, вільний від струмопровідних елементів і феромагнітних мас і не містить джерел МП;

– розрахунок індукції МП КЛ виконують без урахування струмів у екранах, вплив яких здійснюють введенням коригувальних коефіцієнтів m , які залежать від параметрів кабелю, наведених у таблиці 5.1.

5.5.2 Діюче значення індукції МП трифазної трипроводної КЛ, зображеної на рисунку 5.3, обчислюють за наступними формулами.

5.5.2.1 Діючі значення компонент вектора індукції кожної фази $\xi \in A, B, C$ у точці спостереження $P = (x_P, y_P)$ обчислюють за формулами:

$$B_{x\xi}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} I_{\xi} \frac{y_P - y_{\xi}}{(x_P - x_{\xi})^2 + (y_P - y_{\xi})^2}, \quad (5.24)$$

$$B_{y\xi}(P) = -\frac{\mu_0}{2\pi} I_{\xi} \frac{x_P - x_{\xi}}{(x_P - x_{\xi})^2 + (y_P - y_{\xi})^2}, \quad (5.25)$$

де I_{ξ} – діюче значення струму в кожній із фаз ξ , А;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна стала, Гн/м;

x_P, y_P – координати точки спостереження в площині, перпендикулярній до осі КЛ, м;

x_{ξ}, y_{ξ} – координати перетину провідником фази $\xi \in A, B, C$ площини, перпендикулярної до осі КЛ, м.

5.5.2.2 Діючи значення кожної з двох компонент вектора індукції в точці спостереження P обчислюють за такими формулами:

$$B_x(P) = \sqrt{(B_{x,A})^2 + (B_{x,B})^2 + (B_{x,C})^2 - B_{x,A}B_{x,B} - B_{x,A}B_{x,C} - B_{x,B}B_{x,C}}, \quad (5.26)$$

$$B_y(P) = \sqrt{(B_{y,A})^2 + (B_{y,B})^2 + (B_{y,C})^2 - B_{y,A}B_{y,B} - B_{y,A}B_{y,C} - B_{y,B}B_{y,C}}. \quad (5.27)$$

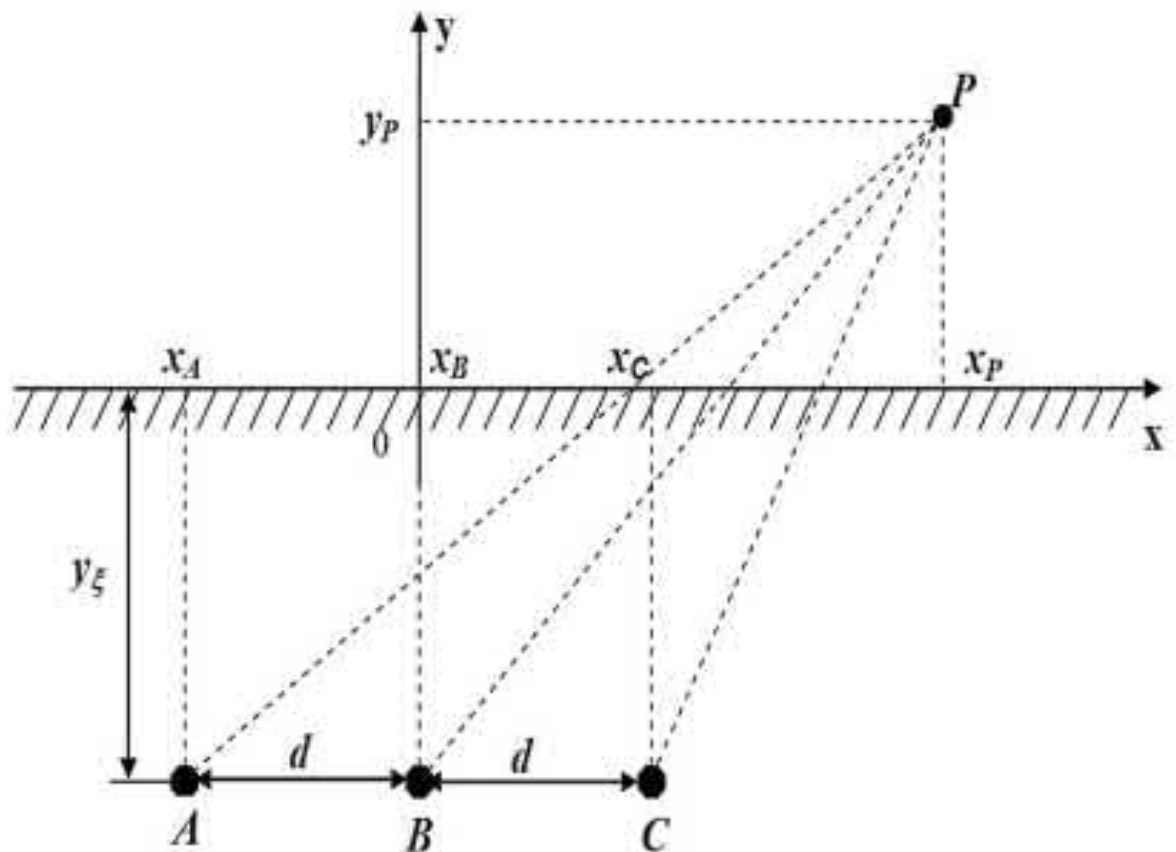


Рисунок 5.3 – Схема розташування кабелів КЛ

Таблиця 5.1 – Значення коригувального коефіцієнта m , який характеризує ослаблення магнітного поля трифазної кабельної лінії, виконаної однофазними кабелями із замкненими по кінцях лінії екранами

Відстань між осями кабелів d, м	Переріз екрана S, мм²	Розташування кабелів КЛ у горизонтальній площині			Розташування кабелів КЛ у кутах рівностороннього трикутника		
		Внутрішній діаметр екрана кабелю, мм					
		25	50	70	25	50	70
0,1	25	0,99	0,99	1	0,99	1	1
	50	0,95	0,97	0,97	0,96	0,98	0,99
	70	0,90	0,95	0,96	0,93	0,97	0,98
	100	0,82	0,89	0,91	0,88	0,93	0,95
	150	0,70	0,78	0,82	0,78	0,86	0,90
	200	0,59	0,68	0,74	0,69	0,79	0,84
0,2	25	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99	1
	50	0,90	0,93	0,95	0,94	0,96	0,97
	70	0,84	0,88	0,90	0,89	0,93	0,95
	100	0,73	0,80	0,83	0,81	0,87	0,90
	150	0,59	0,66	0,71	0,68	0,77	0,81
	200	0,48	0,56	0,60	0,57	0,67	0,73
0,5	25	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,99
	50	0,85	0,89	0,90	0,90	0,93	0,94
	70	0,77	0,81	0,84	0,83	0,87	0,90
	100	0,65	0,70	0,74	0,72	0,78	0,82
	150	0,50	0,56	0,59	0,57	0,64	0,68
	200	0,40	0,45	0,48	0,46	0,53	0,58
Примітка. Для проміжних значень перерізу екрана кабелів і відстаней між осями коефіцієнт m обчислюють способом інтерполяції.							

5.5.2.3 Діючи значення індукції МП КЛ у точці спостереження P обчислюють за формулою (5.17).

5.5.3 Якщо проектними рішеннями передбачено протікання струмів у екранах однофазних кабелів, то значення індукції МП КЛ визначають таким чином.

5.5.3.1 Для врахування МП струмів в замкнених екранних контурах вводиться коригувальний коефіцієнт m , який залежить від параметрів кабелю. Значення коефіцієнта m беруть із даних таблиці 5.1.

5.5.3.2 Діючи значення кожної з двох компонент вектора індукції в точці спостереження P з урахуванням МП струмів у екранах обчислюють за формулами:

$$B_x(P) = m \sqrt{(B_{x,A})^2 + (B_{x,B})^2 + (B_{x,C})^2 - B_{x,A}B_{x,B} - B_{x,A}B_{x,C} - B_{x,B}B_{x,C}}, \quad (5.28)$$

$$B_y(P) = m \sqrt{(B_{y,A})^2 + (B_{y,B})^2 + (B_{y,C})^2 - B_{y,A}B_{y,B} - B_{y,A}B_{y,C} - B_{y,B}B_{y,C}}, \quad (5.29)$$

де $B_{x,\xi}, B_{y,\xi}$ – діючи значення компонент вектора індукції кожної фази $\xi \in A, B, C$, обчислені за формулами (5.24), (5.25);

m – коригувальний коефіцієнт, який залежить від параметрів кабелю, беруть з даних табл. 5.1.

5.5.3.3 Діючи значення індукції МП КЛ у точці спостереження P обчислюють за формулою (5.17).

5.5.4 Розрахунок діючого значення індукції МП декількох КЛ, розташованих у одному кабельному каналі.

5.5.4.1 Діючи значення компонент вектора індукції МП, викликаного кожною фазою $\xi \in A, B, C$ в точці спостереження $P = (x_P, y_P)$, обчислюють як суми компонент векторів індукції МП, викликаного струмом кожної КЛ, за формулами:

$$B_{x,A}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{m_n I_n (y_P - y_{An})}{(x_P - x_{An})^2 + (y_P - y_{An})^2}, \quad (5.30)$$

$$B_{x,B}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{m_n I_n (y_P - y_{Bn})}{(x_P - x_{Bn})^2 + (y_P - y_{Bn})^2}, \quad (5.31)$$

$$B_{x,C}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{m_n I_n (y_P - y_{Cn})}{(x_P - x_{Cn})^2 + (y_P - y_{Cn})^2}, \quad (5.32)$$

$$B_{y,A}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{m_n I_n (x_P - x_{An})}{(x_P - x_{An})^2 + (y_P - y_{An})^2}, \quad (5.33)$$

$$B_{y,B}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{m_n I_n (x_P - x_{Bn})}{(x_P - x_{Bn})^2 + (y_P - y_{Bn})^2}, \quad (5.34)$$

$$B_{y,C}(P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{n=1}^N \frac{m_n I_n (x_P - x_{Cn})}{(x_P - x_{Cn})^2 + (y_P - y_{Cn})^2}, \quad (5.35)$$

де N – кількість КЛ в одному кабельному каналі;
 I_n – діюче значення струму кожної n -ої КЛ, А;
 m_n – коригувальний коефіцієнт n -ої КЛ, який враховує МП струмів у екрані КЛ, залежить від параметрів кабелю; його беруть із даних таблиці 5.1, у випадку відсутності струмів в екранах $m_n = 1$;

x_{in}, y_{in} – координати перетину кабелем КЛ із номером n фази ζ площини, перпендикулярної до осі КЛ, м.

5.5.4.2 Діючі значення компонент МП декількох КЛ у точці спостереження P обчислюють за формулами (5.26) і (5.27), використовуючи діючі значення компонент вектора магнітної індукції, обчислені за формулами (5.30) – (5.35).

5.5.4.3 Діюче значення індукції поля КЛ у точці спостереження P обчислюється за формулою (5.17).

5.6 Вимоги до оформлення результатів розрахунку

5.6.1 Результати розрахунків можна подавати як у табличній, так і в графічній формах.

5.6.2 Обсяги і якість розрахунків мають бути достатніми для підготовки санітарно-гігієнічного висновку щодо безпеки (небезпеки) пропонованого для будівництва і експлуатації об'єкта.

Додаток А
(обов'язковий)

**ГРАНИЧНО ДОПУСТИМІ ЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО
ПОЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ**

**Таблиця А.1 – Гранично допустимі значення напруженості електричного
поля ліній електропередавання**

Найменування територій, на яких регламентується рівень електричного поля промислової частоти	Діюче значення напруженості ЕП
У середині житлових будинків	0,5 кВ/м
На території житлової забудови	1 кВ/м
У населеній місцевості, поза зоною житлової забудови (землі в межах міста з урахуванням перспективного розвитку на 10 років, приміські та зелені зони, землі селищ міського типу в межах селищної межі і сільських населених пунктів в межах цих пунктів), а також на території городів і садів	5 кВ/м
На територіях перетину ПЛ з автомобільними шляхами I – IV категорії	10 кВ/м
У ненаселеній місцевості (незабудована територія, яку відвідують люди і яка є доступною для транспорту, сільськогосподарських машин)	15 кВ/м
У важкодоступній місцевості (не доступній для транспорту, сільськогосподарських машин) та на ділянках, спеціально відгороджених для унеможливлення доступу населення	20 кВ/м

Додаток Б
(довідковий)

**ТИМЧАСОВІ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМІ РІВНІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ, ЯКЕ
УТВОРЮЄТЬСЯ ПІДЗЕМНИМИ КАБЕЛЬНИМИ ЛІНІЯМИ ЗМІННОГО
СТРУМУ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ**

Таблиця Б.1 – Тимчасові гранично допустимі рівні магнітного поля, яке утворюється підземними кабельними лініями змінного струму промислової частоти

Найменування територій, на яких регламентується рівень МП промислової частоти	Тимчасові гранично допустимі рівні МП промислової частоти на висоті 0,5 м від поверхні землі або від підлоги
У середині житлових приміщень	0,5 мкТл
На віддалі 50 см від стін житлових приміщень і побутових електричних приладів	3 мкТл
На території житлової забудови	10 мкТл
У населеній місцевості, поза зоною житлової забудови (землі в межах міста з урахуванням перспективного розвитку на 10 років, приміські та зелені зони, землі селищ міського типу, у межах селищної зони і сільських населених пунктів), а також на території городів і садів	20 мкТл
У ненаселеній місцевості (незабудована територія, яку відвідують люди і яка є доступною для транспорту, сільськогосподарських машин)	50 мкТл

Додаток В
(довідковий)

**ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО
І МАГНІТНОГО ПОЛІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ
В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

В.1 Порядок виконання вимірювань електричного поля ліній електропередавання в умовах її експлуатації.

В.1.1 Вимірювання електричного поля необхідно виконувати в умовах експлуатації ЛЕП для перевірки отриманих результатів розрахунку. Як контрольовану характеристику електричного поля ЛЕП, використовують діюче значення напруженості електричного поля.

В.1.2 Прилади для вимірювань

Вимірювання діючого значення напруженості електричного поля ЛЕП потрібно виконувати за допомогою приладів, які пройшли метрологічну атестацію та мають свідоцтво про періодичну повірку.

Для вимірювання діючого значення напруженості електричного поля ЛЕП рекомендовано використовувати прилади, зазначені в додатку Е.

Для вимірювання відстані від осі ЛЕП слід використовувати оптичні засоби для вимірювання або рулетки з діелектричного матеріалу довжиною понад 10 м з нанесеними сантиметровими поділками.

В.1.3 Не дозволено виконувати вимірювання напруженості електричного поля ЛЕП за наявності атмосферних опадів, грози, а також за температури та вологості повітря, які перевищують допустимі робочі параметри приладу.

В.1.4 Вибір точок вимірювань

Вимірювання треба виконувати на рівних ділянках, вільних від інших ЛЕП, дерев, будівель та інших споруд.

Лінія, уздовж якої розташовано точки вимірювань, повинна проходити через точку проєкції найбільшого провисання проводу до поверхні землі, перпендикулярно до ЛЕП (рисунок В.1).

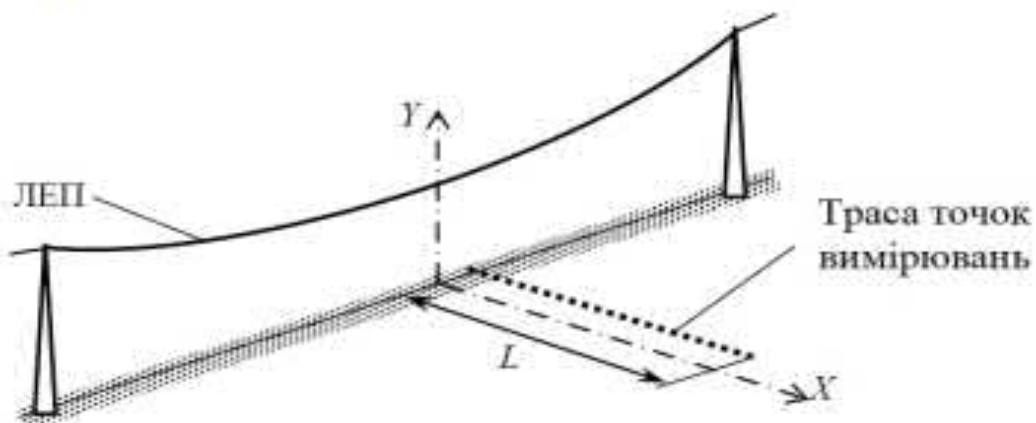


Рисунок В.1 – Схема розташування ЛЕП і траси точок вимірювань.

В.1.5 Визначення положення точок вимірювань

Довжина L від проекції крайнього проводу залежить від напруги ЛЕП і становить не менше 1,5 відстані до границі санітарно-захисної зони.

Інтервали між точками вимірювання повинні становити:

- під ЛЕП і на відстанях, менших ніж 10 м від проекції крайнього проводу, – не більше 1 м;
- на відстанях, більших ніж 10 м від проекції крайнього проводу до границі санітарно-захисної зони ЛЕП, – не більше ніж 2 м;
- за межами санітарно-захисної зони ЛЕП – не більше 5 м.

В.1.6 Визначення напруженості електричного поля в точках вимірювань

Напруженість електричного поля в i -й точці вимірювання визначається за результатами вимірювання напруженості електричного поля у двох ортогональних положеннях датчика приладу за формулою:

$$E_i = \sqrt{E_{xi}^2 + E_{yi}^2}, \quad (\text{В.1})$$

де E_{xi}, E_{yi} – виміряні значення компонент напруженості електричного поля в i -й точці вимірювань у разі положення датчика по осях X, Y .

В.1.7 Підготовка до проведення вимірювань електричного поля ЛЕП

В.1.7.1 Визначити параметри ЛЕП згідно з технічною документацією (кількість і положення проводів на опорі, висоту підвісу проводів у точці найбільшого провисання, номінальну напругу, для багатофазових ЛЕП – порядок чергування фаз).

В.1.7.2 Вибрати систему координат, до якої буде прив'язано результати вимірювань згідно з рисунком В.1.

В.1.7.3 Скласти схему вимірювань електричного поля ЛЕП, вибравши розташування точок вимірювань згідно з В.1.4, та інтервали між точками вимірювання згідно з В.1.5.

В.1.7.4 Нанести трасу точок вимірювань на землю, позначивши вибрані точки вимірювання та проекції крайніх проводів ЛЕП.

В.1.7.5 Підготовку приладу для вимірювання електричного поля виконати відповідно до інструкції з експлуатації приладу.

В.1.8 Проведення вимірювань електричного поля ЛЕП

В.1.8.1 Встановити датчик приладу в точці вимірювання на висоті 1,8 м над рівнем землі і зорієнтувати його в одному з напрямків (X, Y) вибраної системи координат, наприклад по осі X . Відповідно, прилад буде вимірювати одну компоненту напруженості електричного поля E_{xi} .

В.1.8.2 Зафіксувати виміряне значення напруженості електричного поля E_{xi} .

В.1.8.3 Повторюючи процедуру згідно з В.1.8.1, і В.1.8.2, провести вимірювання компоненти напруженості електричного поля E_{yi} .

В.1.8.4 Повторюючи процедуру згідно з В.1.8.1 – В.1.8.3, провести вимірювання напруженості електричного поля E_{xi}, E_{yi} в усіх точках вимірювання.

Примітка. У разі використання приладу з трикомпонентним датчиком за В.1.8.2 фіксують напруженість електричного поля E_{xi}, E_{yi} , а за В.1.8.3 – не виконується.

В.1.8.5 За результатам вимірювань у кожній точці обчислити напруженість електричного поля E_i за формулою (В.1).

В.1.8.6 За результатами вимірювань складається протокол із зазначенням параметрів ЛЕП, схеми розташування точок вимірювання і результатів вимірювань у цих точках діючого значення напруженість електричного поля E_u , E_v , E_r .

В.2 Порядок виконання вимірювань магнітного поля ліній електропередавання в умовах їхньої експлуатації

В.2.1 Вимірювання магнітного поля необхідно виконувати в умовах експлуатації ЛЕП для перевірки отриманих результатів розрахунку. Як контрольовану характеристику МП ЛЕП, використовують діюче значення індукції МП.

В.2.2 Прилади для вимірювань

Вимірювання діючого значення індукції МП ЛЕП треба виконувати за допомогою приладів, які пройшли метрологічну атестацію і мають свідоцтво про періодичну повірку.

Для вимірювання діючого значення індукції МП ЛЕП рекомендовано використовувати прилади, зазначені у додатку Е.

Для вимірювання відстані рекомендовано використовувати рулетки з діелектричного матеріалу довжиною понад 10 м з нанесеними сантиметровими поділками.

В.2.3 Забороняється виконувати вимірювання діючого значення індукції МП ЛЕП за температури та вологості повітря, які перевищують допустимі робочі параметри приладу.

В.2.4 Вибір розташування точок вимірювань

Вимірювання потрібно виконувати на рівних ділянках, вільних від інших ЛЕП, будівель та інших споруд.

Для ПЛ лінія розташування точок вимірювань повинна проходити через точку проєкції найбільшого провисання проводу (середина між опорами), перпендикулярно до ПЛ (див. рисунок В.1).

Для КЛ лінія розташування точок вимірювань повинна проходити перпендикулярно до прямолінійної ділянки КЛ, вільної від підземних комунікацій.

В.2.5 Визначення положення точок вимірювань

Для ПЛ довжина L (рисунок В.1) від проєкції крайнього проводу залежить від напруги ЛЕП і становить не менше 2 відстаней до границі санітарно-захисної зони.

Для КЛ довжина L від проєкції крайнього проводу становить не менше ніж 10 м.

Інтервали між точками вимірювання повинні становити:

для ПЛ:

– під ПЛ і на відстанях менших ніж 10 м від проєкції крайнього проводу, – не більше ніж 1 м;

– на відстанях, більших ніж 10 м від проєкції крайнього проводу до границі санітарно-захисної зони ПЛ, – не більше ніж 2 м;

– за межами санітарно-захисної зони ПЛ – не більше ніж 5 м;

для КЛ:

– над КЛ і на відстанях, менших ніж 10 м від проєкції крайнього кабелю, – не більше ніж 0,5 м;

– на відстанях, більших ніж 10 м від проєкції крайнього кабелю – не більше ніж 2 м.

В.2.6 Визначення магнітного поля в точках вимірювань

Магнітне поле в i -й точці вимірювання визначають за результатами вимірювання компонент індукції МП у двох ортогональних положеннях датчика магнітометра за формулою

$$B_i = \sqrt{B_{xi}^2 + B_{yi}^2}, \quad (\text{В.2})$$

де B_{xi}, B_{yi} – виміряні значення компонент індукції магнітного поля в i -й точці вимірювань у разі положенні датчика магнітометра по осях X, Y .

В.2.7 Підготовка до проведення вимірювань магнітного поля ЛЕП

В.2.7.1 Визначити параметри ЛЕП згідно з технічною документацією (кількість і положення проводів, для ПЛ – висоту підвішування проводів у точці найбільшого провисання, для КЛ – глибину прокладання кабелю, для багатоколових ЛЕП – порядок чергування фаз).

В.2.7.2 Вибрати систему координат, до якої буде прив'язано результати вимірювань згідно з рисунком В.1.

В.2.7.3 Скласти схему вимірювань МП ЛЕП, вибравши трасу точок вимірювань згідно з В.2.4 та інтервали між точками вимірювання згідно з В.2.5.

В.2.7.4 Нанести розташування точок вимірювань на землю, позначивши вибрані точки вимірювання та проекції крайніх проводів ЛЕП.

В.2.7.5 Підготовку магнітометра виконувати відповідно до інструкції з експлуатації приладу.

В.2.8 Проведення вимірювань магнітного поля ЛЕП

В.2.8.1 Встановити датчик магнітометра в точці вимірювання (для ПЛ – на висоті 1,8 м, для КЛ – на висоті 0,5 м над рівнем землі) і зорієнтувати його в одному з напрямків (X, Y) вибраної системи координат, наприклад по осі X . Відповідно магнітометр буде вимірювати одну компоненту діючого значення індукції МП B_{xi} .

В.2.8.2 Зафіксувати виміряне значення індукції магнітного поля B_{xi} та зафіксувати час у момент вимірювання для подальшої синхронізації виміряного МП зі струмом навантаження ЛЕП.

В.2.8.3 Повторюючи процедуру згідно з В.2.8.1 і п. В.2.8.2, виконати вимірювання компоненти індукції МП B_{yi} .

В.2.8.4 Повторюючи процедуру згідно з В.2.8.1 – В.2.8.3, виконати провести вимірювання компонент індукції МП B_{xi}, B_{yi} в усіх точках вимірювання.

Примітка. У разі використання приладу з трикомпонентним датчиком за В.2.8.2 фіксують індукцію МП B_{xi}, B_{yi} , а за В.2.8.3 – не виконують.

В.2.8.5 За результатами вимірювань у кожній точці розрахувати індукцію МП B_i за формулою (В.2).

В.2.8.6 За результатами вимірювань складають протокол з зазначенням параметрів ЛЕП, схеми траси точок вимірювання і результатів вимірювань у цих точках діючого значення індукції МП B_{xi}, B_{yi} і B_i .

Додаток Г
(довідковий)

**ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО І МАГНІТНОГО ПОЛІВ
ТРИФАЗНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ**

Г.1 Приклади розрахунку електричного поля повітряної лінії електропередавання

Г.1.1 Розрахувати напруженість електричного поля ПЛ 330 кВ на висоті 1,8 м від поверхні землі посередині прогону. Проводи ПЛ розташовано горизонтально, як показано на рисунку Г.1, відстань між осями фаз становить 8,3 м. Фази розщеплено: кількість проводів у фазі $M = 2$, радіус проводу $r = 0,0125$ м, відстань між розщепленими проводами $\alpha = 0,4$ м.

Г.1.1.1 За формулою (5.6) обчислюють еквівалентний радіус розщеплених проводів r_e .

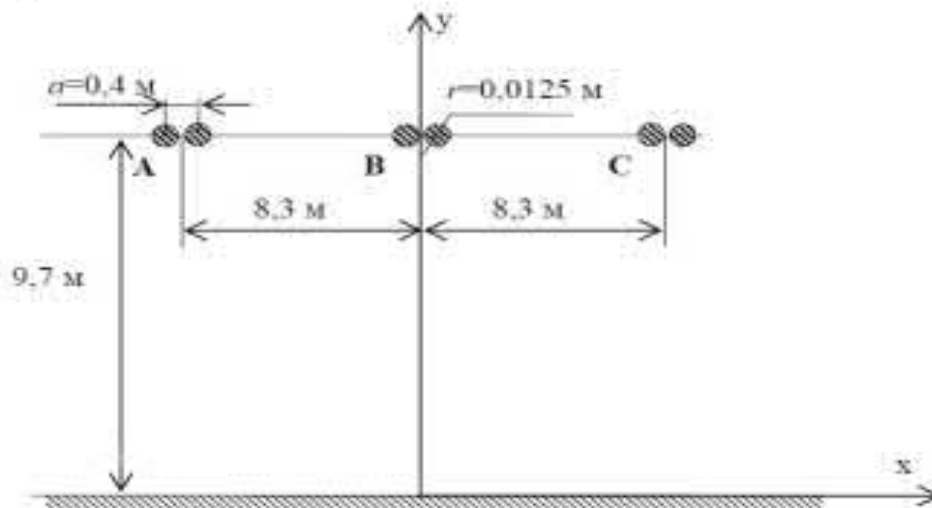


Рисунок Г.1 – Розташування проводів ПЛ 330 кВ.

Г.1.1.2 За формулами (5.1), (5.2) обчислюють діючі значення компонент вектора напруженості електричного поля ПЛ кожної фази А, В, С.

Г.1.1.3 За формулами (5.3), (5.4) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора напруженості електричного поля ПЛ у точці спостереження Р.

Г.1.1.4 За формулою (5.5) обчислюють діюче значення напруженості електричного поля ПЛ в точці спостереження Р.

Г.1.1.5 Будують графік розподілу діючого значення напруженості електричного поля ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі (рисунок Г.2).

Г.1.1.6 На рисунку Г.2 як приклад наведено графік розподілу діючого значення напруженості електричного поля ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі, отриманий за результатами вимірювань згідно з В.1 (додаток В) цієї Методики. Вимірювання виконували за допомогою вимірювального приладу напруженості ближнього поля NFM-1. Як видно з рисунка, поза межами охоронної зони ПЛ результати розрахунків і вимірювань співпадають.

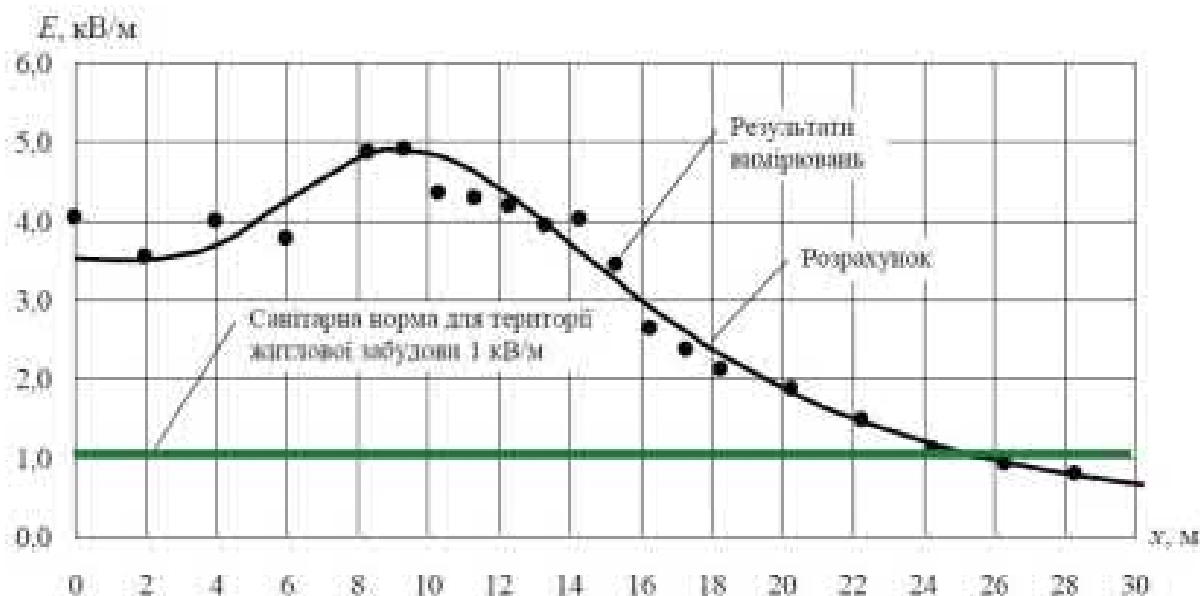


Рисунок Г.2 – Розподіл діючого значення напруженості електричного поля ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі.

Г.1.2 Розрахувати напруженість електричного поля двоколової ПЛ 330 кВ зі стандартним розташуванням фаз на висоті 1,8 м від поверхні землі посередині прогону. Розташування проводів ПЛ та порядок чергування фаз показано на рисунку Г.3. Фази розщеплені: кількість проводів у фазі $M = 2$, радіус проводу $r = 0,0125$ м, відстань між розщепленими проводами $a = 0,2$ м.

Г.1.2.1 За формулою (5.6) обчислюють еквівалентний радіус розщеплених проводів r_e .

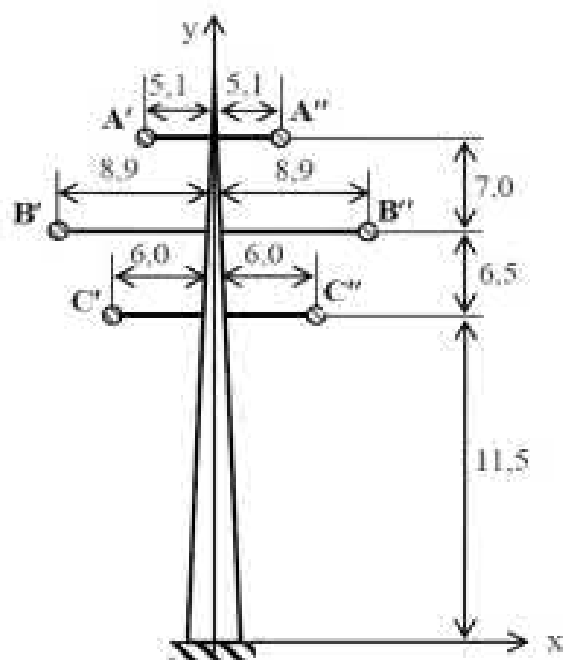


Рисунок Г.3 – Розташування проводів двоколової ПЛ 330 кВ.

Г.1.2.2 За формулами (5.7) – (5.12) обчислюють діючі значення компонент вектора напруженості електричного поля ПЛ кожної фази А, В, С.

Г.1.2.3 За формулами (5.3), (5.4) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора напруженості електричного поля ПЛ у точці спостереження P .

Г.1.2.4 За формулою (5.5) обчислюють діюче значення напруженості електричного поля ПЛ у точці спостереження P .

Г.1.2.5 Будують графік розподілу діючого значення напруженості електричного поля ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі (рисунок Г.4).

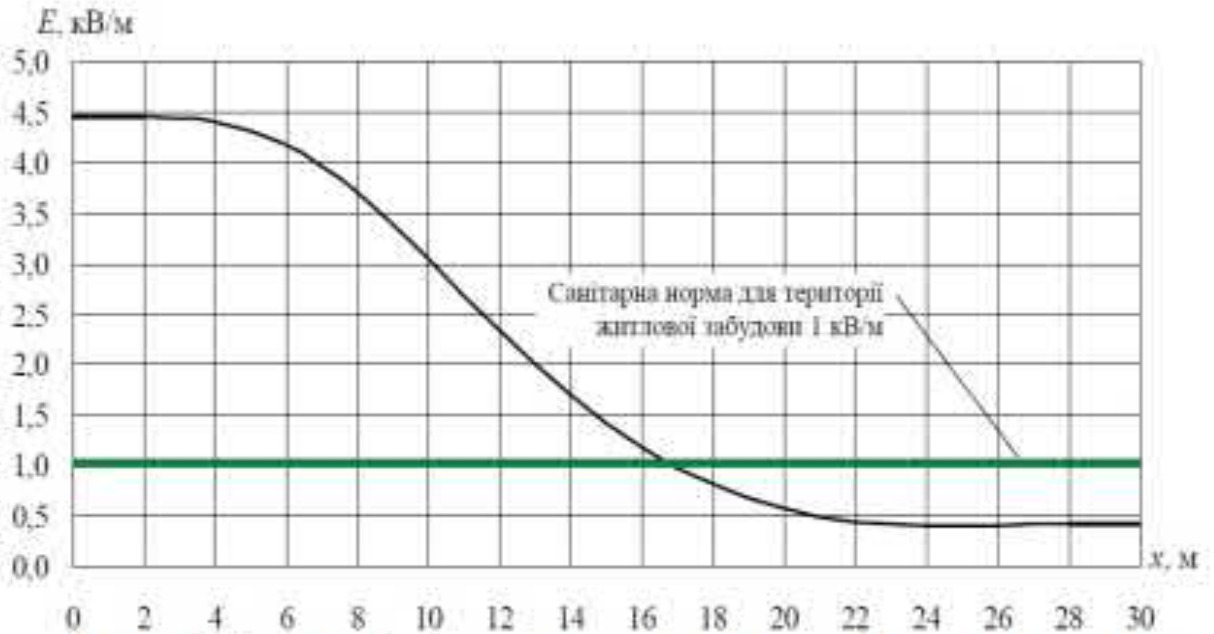


Рисунок Г.4 – Розподіл діючого значення напруженості електричного поля двоколової ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі.

Г.1.3 Розрахувати напруженість електричного поля двоколової ПЛ 330 кВ на висоті 1,8 м від поверхні землі посередині прогону. Фази А'' і С'' другого кола поміняли місцями. Розташування проводів ПЛ та порядок чергування фаз показано на рисунку Г.5. Фази розщеплено: кількість проводів у фазі $M=2$, радіус проводу $r=0,0125$ м, відстань між розщепленими проводами $a=0,2$ м.

Г.1.3.1 За формулою (5.6) обчислюють еквівалентний радіус розщеплених проводів $r_{\text{екв}}$.

Г.1.3.2 За формулами (5.7) – (5.12) обчислюють діючі значення компонент вектора напруженості електричного поля ПЛ кожної фази А, В, С.

Г.1.3.3 За формулами (5.3), (5.4) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора напруженості електричного поля ПЛ у точці спостереження P .

Г.1.3.4 За формулою (5.5) обчислюють діюче значення напруженості електричного поля ПЛ у точці спостереження P .

Г.1.3.5 Будують графік розподілу діючого значення напруженості електричного поля ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі (рисунок Г.6). Як видно з рисунків Г.4 і Г.6, розташування проводів фаз суттєво впливає на значення напруженості електричного поля під проводами ПЛ.

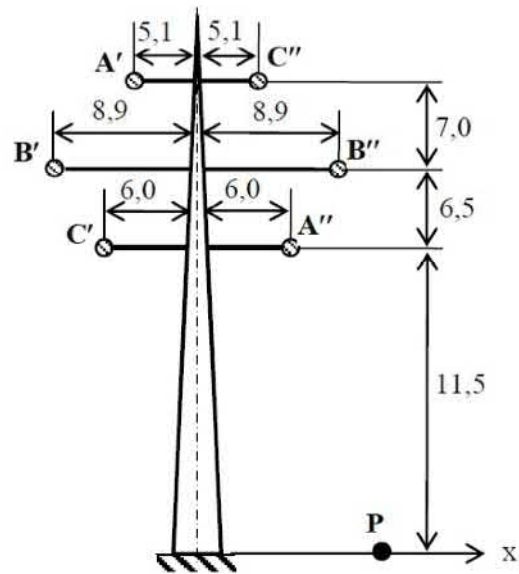


Рисунок Г.5 – Розташування проводів двоколової ПЛ 330 кВ.



Рисунок Г.6 – Розподіл діючого значення напруженості електричного поля двоколової ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі.

Г.2 Приклади розрахунку магнітного поля повітряної лінії електропередавання

Г.2.1 Розрахувати індукцію МП на висоті 1,8 м від поверхні землі, утвореного ПЛ 330 кВ у місці максимального наближення проводів до землі (11 м). Проводи ПЛ розташовано так, як показано на рисунку Г.7. Діюче значення струму фази $I = 100$ А.

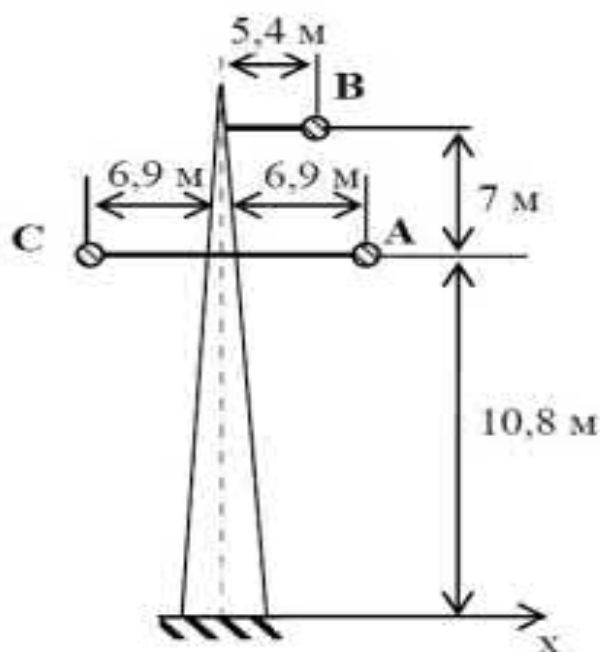


Рисунок Г.7 – Розташування проводів ПЛ 330 кВ.

Г.2.1.1 За формулами (5.13), (5.14) обчислюють діючі значення компонент вектора індукції МП кожної фази А, В, С.

Г.2.1.2 За формулами (5.15), (5.16) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора індукції МП у точці спостереження P .

Г.2.1.3 За формулою (5.17) обчислюють діюче значення індукції МП ПЛ у точці спостереження P .

Г.2.1.4 Будують графік розподілу діючого значення індукції МП, утвореного струмами ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі (рисунок Г.8).

Г.2.1.5 Як приклад на рисунку Г.8 наведено графік розподілу діючого значення індукції МП, утвореного струмами ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі, отриманий за результатами вимірювань, проведених згідно з В.2 (додаток В) цієї Методики. Вимірювання виконували за допомогою трикомпонентного магнітометра EMF-828.

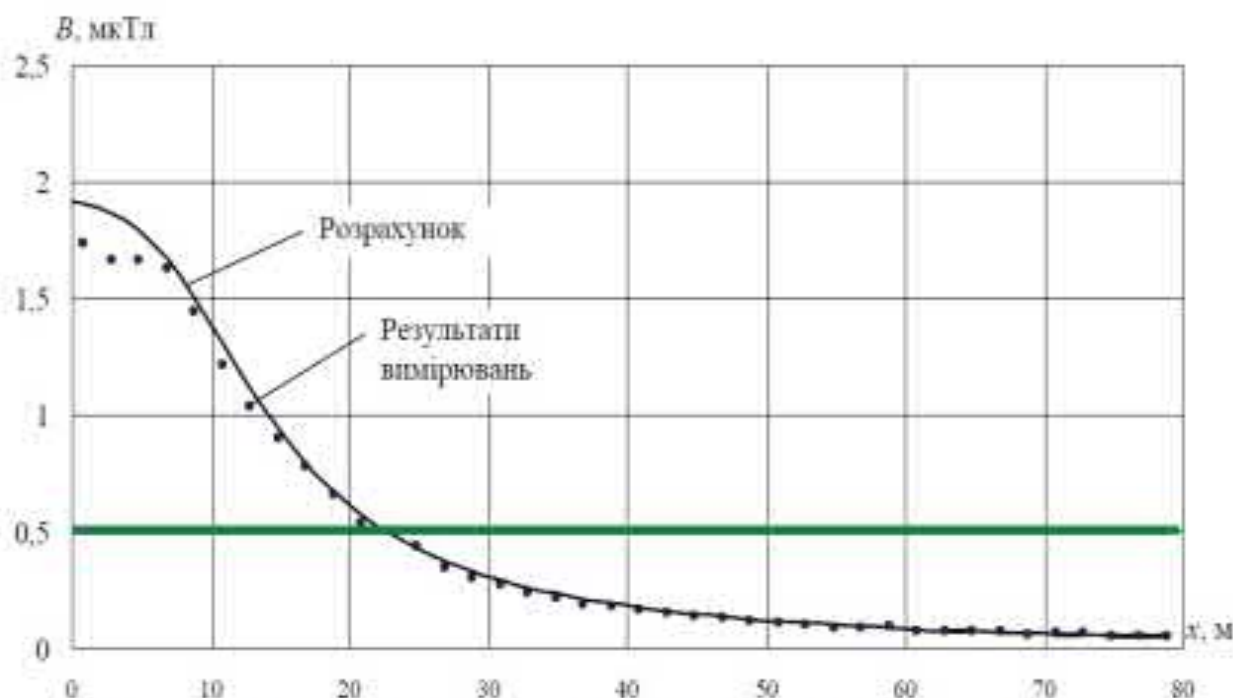


Рисунок Г.8 – Розподіл діючого значення індукції магнітного поля ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі.

Г.2.2 Розрахувати індукцію МП на висоті 1,8 м від поверхні землі, утвореного ПЛ 330 кВ посередині прогону у місці максимального наближення проводів до землі (11,5 м). Проводи ПЛ розташовано горизонтально, відстань між осями фаз становить 8 м. Діюче значення струму фази $I = 141$ А.

Г.2.2.1 За формулами (5.13), (5.14) обчислюють діючі значення компонент вектора індукції МП кожної фази А, В, С.

Г.2.2.2 За формулами (5.15), (5.16) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора індукції МП у точці спостереження Р.

Г.2.2.3 За формулою (5.17) обчислюють діюче значення індукції МП ПЛ у точці спостереження Р.

Г.2.2.4 Будують графік розподілу діючого значення індукції МП, утвореного струмами ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі (рисунок Г.9).

Г.2.2.5 На рисунку Г.9 як приклад наведено графік розподілу діючого значення індукції МП, утвореного струмами ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі, отриманий за результатами вимірювань, проведених згідно з В.2 (додаток В) цієї Методики. Вимірювання виконували за допомогою трикомпонентного магнітометра EMF-828.

Г.2.3 Розрахувати індукцію МП на висоті 1,8 м від поверхні землі, утвореного двофазовою ПЛ 330 кВ зі стандартним розташуванням фаз посередині прогону в місці максимального наближення проводу до землі (11,5 м). Проводи ПЛ розташовано так, як показано на рисунку Г.3. Діюче значення струму фази $I = 1000$ А.

Г.2.3.1 За формулами (5.18) – (5.23) обчислюють діючі значення компонент вектора індукції магнітного поля кожної фази А, В, С.

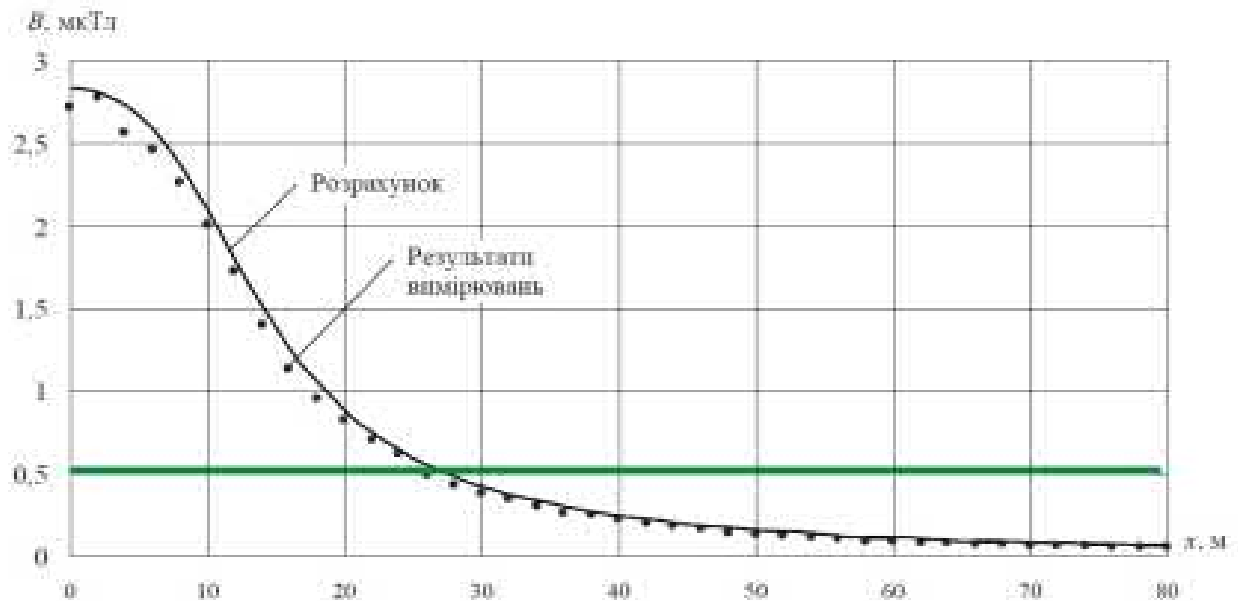


Рисунок Г.9 – Розподіл діючого значення індукції магнітного поля ЛЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі.

Г.2.3.2 За формулами (5.15), (5.16) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора індукції МП у точці спостереження P .

Г.2.3.3 За формулою (5.17) обчислюють діюче значення індукції МП двоколової ЛЛ у точці спостереження P .

Г.2.3.4 Будують графік розподілу діючого значення індукції МП, утворюваного струмами двоколової ЛЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі (рисунок Г.10).

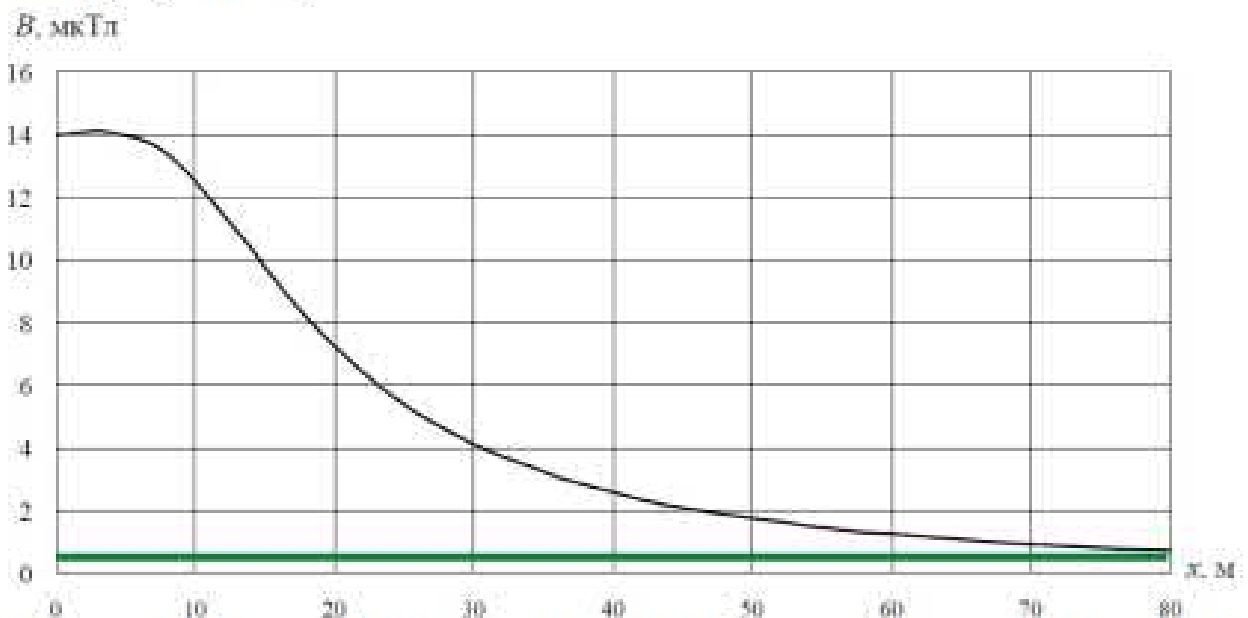


Рисунок Г.10 – Розподіл діючого значення індукції магнітного поля двоколової ЛЛ 330 кВ зі стандартним чергуванням фаз посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі.

Г.2.4 Розрахувати індукцію МП на висоті 1,8 м від поверхні землі, утвореного двоколовою ПЛ 330 кВ посередині прогону в місці максимального наближення проводів до землі (11,5 м). Фази А" і С" другого кола поміняли місцями. Розташування проводів фаз ПЛ показано на рисунку Г.5. Діюче значення струму фази I = 1000 А.

Г.2.4.1 За формулами (5.18) – (5.23) обчислюють діючі значення компонент вектора індукції МП кожної фази А, В, С.

Г.2.4.2 За формулами (5.15), (5.16) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора індукції МП у точці спостереження Р.

Г.2.4.3 За формулою (5.17) обчислюють діюче значення індукції МП двоколової ПЛ у точці спостереження Р.

Г.2.4.4 Будують графік розподілу діючого значення індукції МП, утвореного струмами двоколової ПЛ 330 кВ посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі (рисунок Г.11). Як видно з рисунків Г.10 і Г.11, зміна місця розташування проводів фаз другого кола суттєво впливає на величину максимального значення індукції МП під проводами ПЛ.

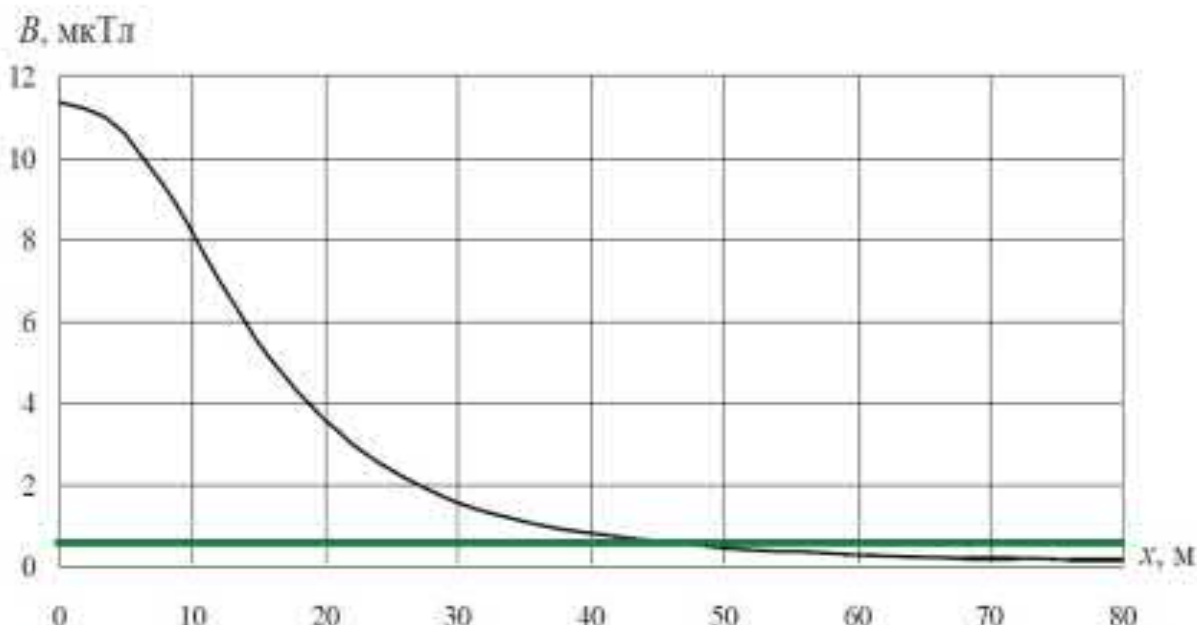


Рисунок Г.11 – Розподіл діючого значення індукції магнітного поля двоколової ПЛ 330 кВ з перефазуванням другого кола посередині прогону на висоті 1,8 м від поверхні землі.

Г.3 Приклади розрахунку магнітного поля кабельної лінії електропередавання

Г.3.1 Розрахувати індукцію МП на висоті 0,5 м від поверхні землі, утвореного КЛ. Кабелі розташовано у вершинах рівностороннього трикутника на глибині 0,7 м. Відстань між геометричними осями кабелів становить 0,5 м. Діюче значення струму кожної фази КЛ – 94 А. В екранах кабелів струми відсутні.

Г.3.1.1 За формулами (5.24), (5.25) обчислюють діючі значення компонент вектора індукції кожної фази А, В, С.

Г.3.1.2 За формулами (5.26), (5.27) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора індукції в точці спостереження P .

Г.3.1.3 За формулою (5.17) обчислюють діюче значення індукції МП КЛ у точці спостереження P .

Г.3.1.4 Будують графік розподілу діючого значення індукції МП, утворюваного струмами КЛ на висоті 0,5 м від поверхні землі (рисунок Г.12).

Г.3.1.5 На рисунку Г.12 як приклад наведено графік розподілу діючого значення індукції магнітного поля КЛ на висоті 0,5 м від поверхні землі, отриманий за результатами вимірювань, проведених згідно з В.2 (додаток В) цієї Методики. Вимірювання виконували за допомогою трикомпонентного магнітометра EMF-828.

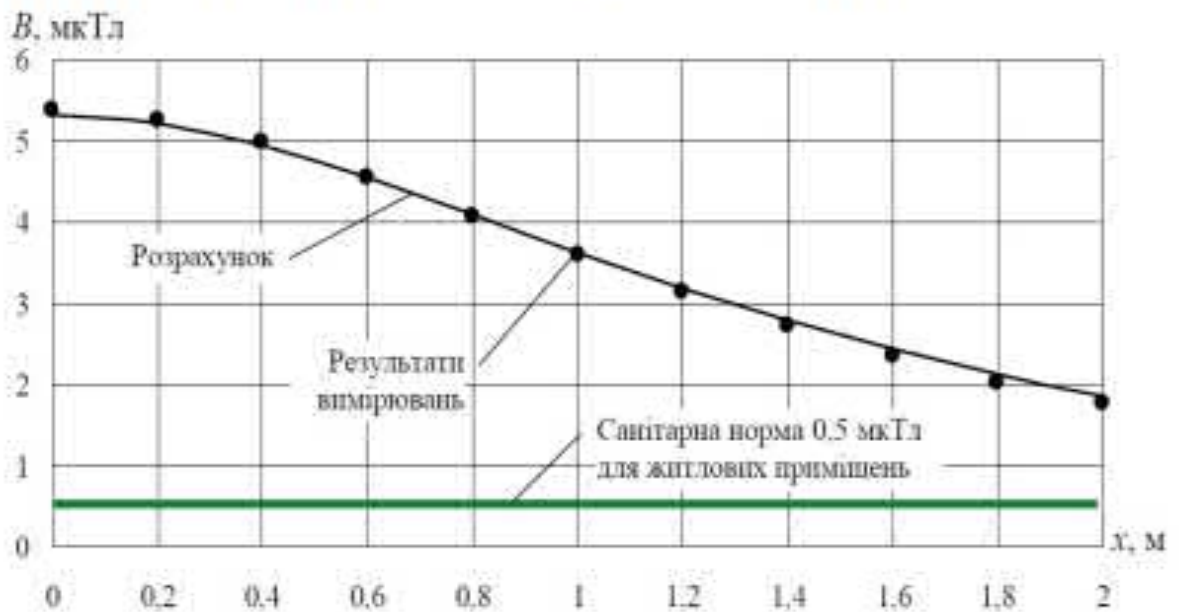


Рисунок Г.12 – Розподіл діючого значення індукції магнітного поля КЛ на висоті 0,5 м від поверхні землі.

Г.3.2 Розраховувати індукцію МП на висоті 0,5 м від поверхні землі, утворюваного КЛ. Кабелі прокладено горизонтально в землі в одній площині паралельно поверхні землі, глибина прокладання кабелю становить 0,7 м. Відстань між геометричними осями кабелів становить 0,5 м. Діюче значення струму кожної фази КЛ – 94 А. В екранах кабелів струми відсутні.

Г.3.2.1 За формулами (5.24), (5.25) обчислюють діючі значення компонент вектора індукції кожної фази А, В, С.

Г.3.2.2 За формулами (5.26), (5.27) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора індукції в точці спостереження P .

Г.3.2.3 За формулою (5.17) обчислюють діюче значення індукції МП КЛ у точці спостереження P .

Г.3.2.4 Будують графік розподілу діючого значення індукції МП, утворюваного струмами КЛ на висоті 0,5 м від поверхні землі (рисунок Г.13).

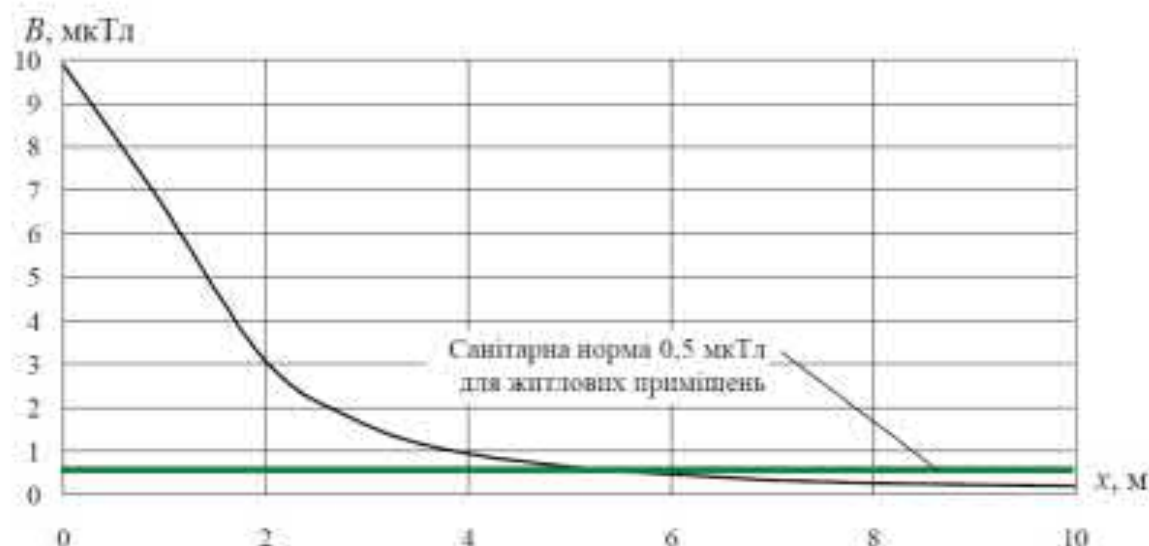


Рисунок Г.13 – Розподіл діючого значення індукції магнітного поля КЛ на висоті 0,5 м від поверхні землі.

Г.4 Приклади розрахунку магнітного поля двох КЛ, розташованих у одному кабельному каналі

Г.4.1 Розрахувати індукцію МП на висоті 0,5 м від поверхні землі, утвореного двома КЛ 110 кВ, розміщеними в одному кабельному каналі. Кабелі розташовано у вершинах рівностороннього трикутника на глибині 1,5 м, як показано на рисунку Г.14. Відстань між геометричними осями кабелів становить 0,25 м, відстань між КЛ – 0,7 м. Максимальне діюче значення струму кожної фази КЛ – 300 А. В екранах кабелів струми відсутні.

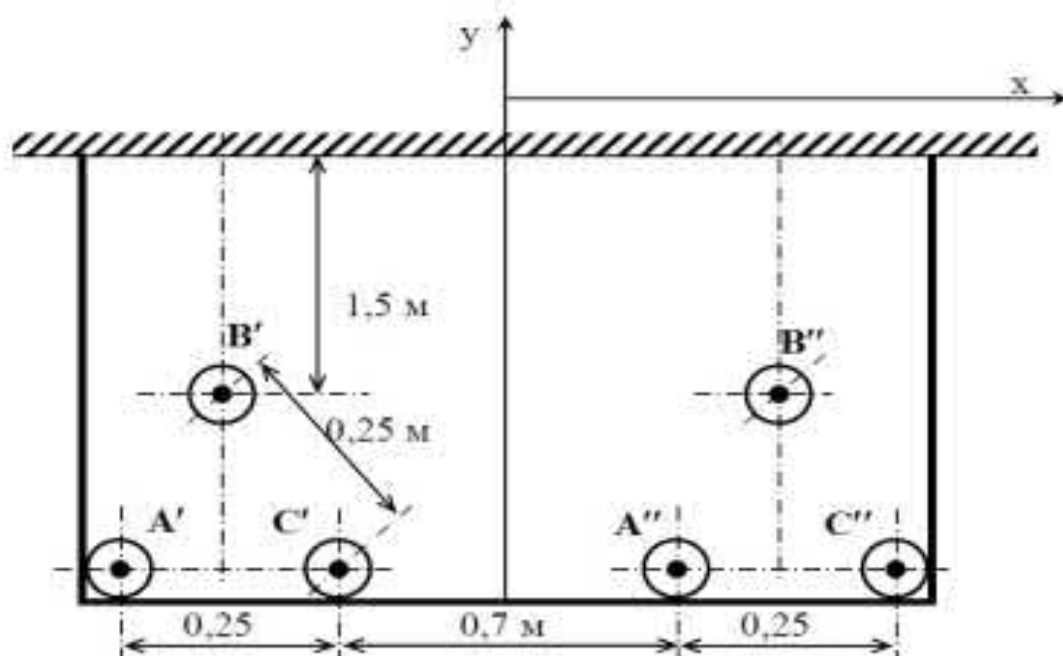


Рисунок Г.14 – Розташування проводів КЛ 110 кВ, розміщених в одному кабельному каналі зі стандартним чергуванням фаз.

Г.4.1.1 За формулами (5.30) – (5.35) обчислюють діючі значення компонент вектора індукції кожної фази А, В, С.

Г.4.1.2 За формулами (5.26), (5.27) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора індукції в точці спостереження P .

Г.4.1.3 За формулою (5.17) обчислюють діюче значення індукції МП КЛ у точці спостереження P .

Г.4.1.4 Будують графік розподілу діючого значення індукції МП, утворюваного струмами двох КЛ, розташованих у одному кабельному каналі, на висоті 0,5 м від поверхні землі (рисунок Г.15).

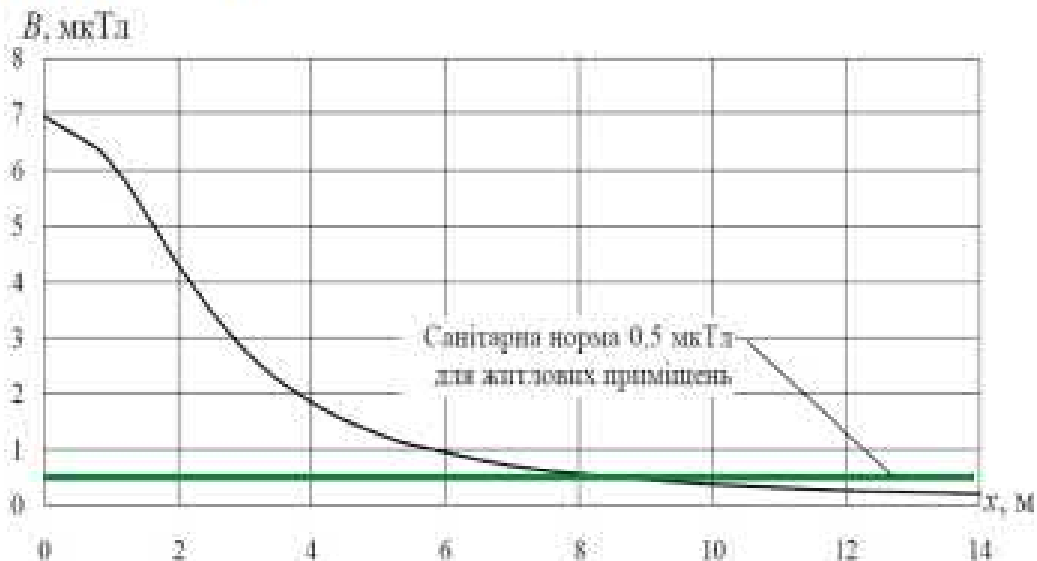


Рисунок Г.15 – Розподіл діючого значення індукції магнітного поля на висоті 0,5 м від поверхні землі, утворюваного двома КЛ 110 кВ зі стандартним чергуванням фаз, розміщених в одному кабельному каналі.

Г.4.2 Розрахувати індукцію МП на висоті 0,5 м від поверхні землі, утворюваного двома КЛ 110 кВ, розташованими в одному кабельному каналі. Кабелі розташовано у вершинах рівностороннього трикутника на глибині 1,5 м, КЛ виконана з розташуванням кабелів фаз, так як показано на рисунку Г.16. Відстань між геометричними осями кабелів становить 0,5 м, відстань між КЛ – 0,7 м. Максимальне діюче значення струму кожної фази КЛ – 300 А. В екранах кабелів струми відсутні.

Г.4.2.1 За формулами (5.30) – (5.35) обчислюють діючі значення компонент вектора індукції кожної фази А, В, С.

Г.4.2.2 За формулами (5.26), (5.27) обчислюють діючі значення кожної з двох компонент вектора індукції в точці спостереження P .

Г.4.2.3 За формулою (5.17) обчислюють діюче значення індукції МП КЛ у точці спостереження P .

Г.4.2.4 Будують графік розподілу діючого значення індукції МП, утворюваного струмами двох КЛ, розташованих у одному кабельному каналі, на висоті 0,5 м від поверхні землі (рисунок Г.17). Як видно з рисунків Г.15 і Г.17, розподіл індукції МП на висоті 0,5 м від поверхні землі двоколової КЛ суттєво залежить від розташування кабелів фаз.

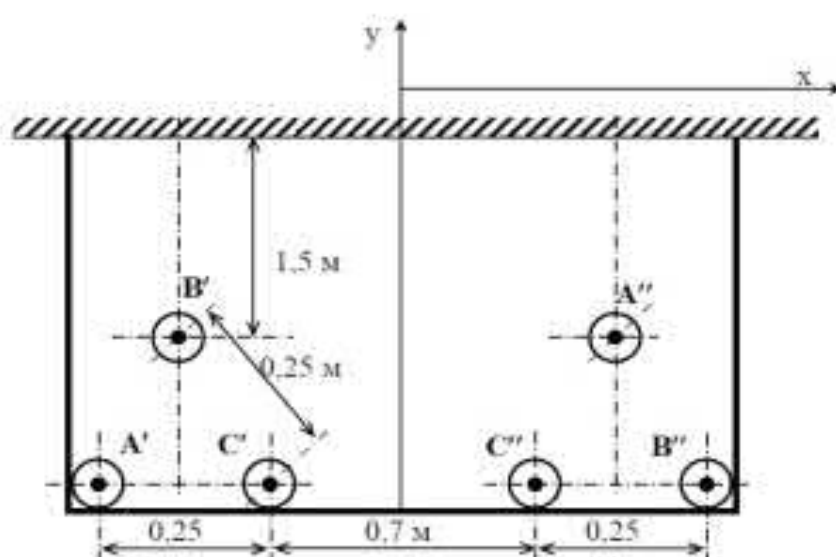


Рисунок Г.16 – Розташування проводів КЛ 110 кВ з перефазуванням однієї з КЛ, розміщених в одному кабельному каналі.

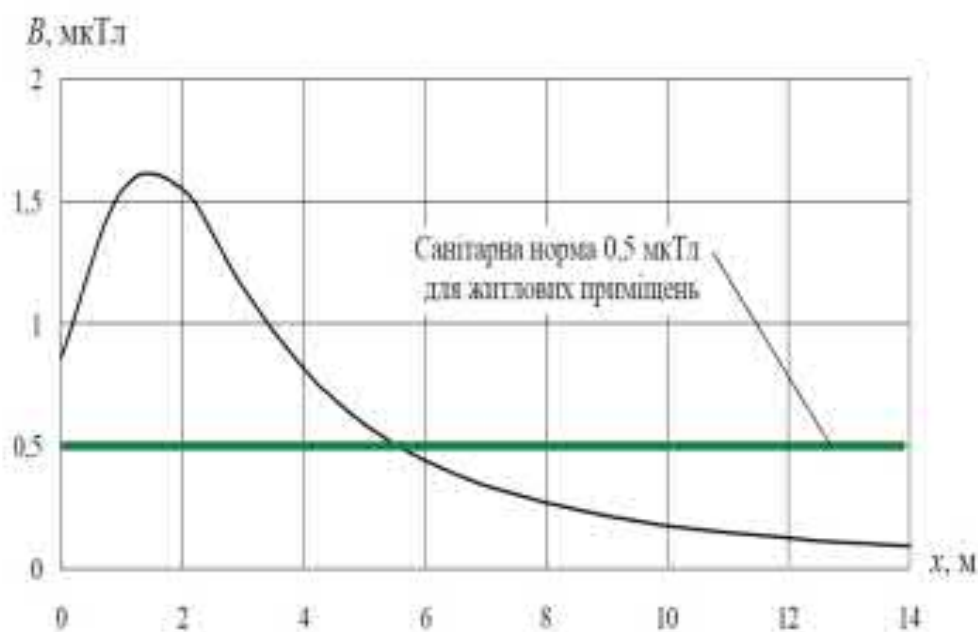


Рисунок Г.17 – Розподіл діючого значення індукції магнітного поля на висоті 0,5 м від поверхні землі, утвореного двома КЛ 110 кВ з перефазуванням однієї з двох КЛ, розміщених в одному кабельному каналі.

Додаток Д
(довідковий)

НАЙБІЛЬШІ ЗНАЧЕННЯ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ ПІДЗЕМНИХ КАБЕЛЬНИХ
ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НА ВИСОТІ 0,5 м ВІД ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

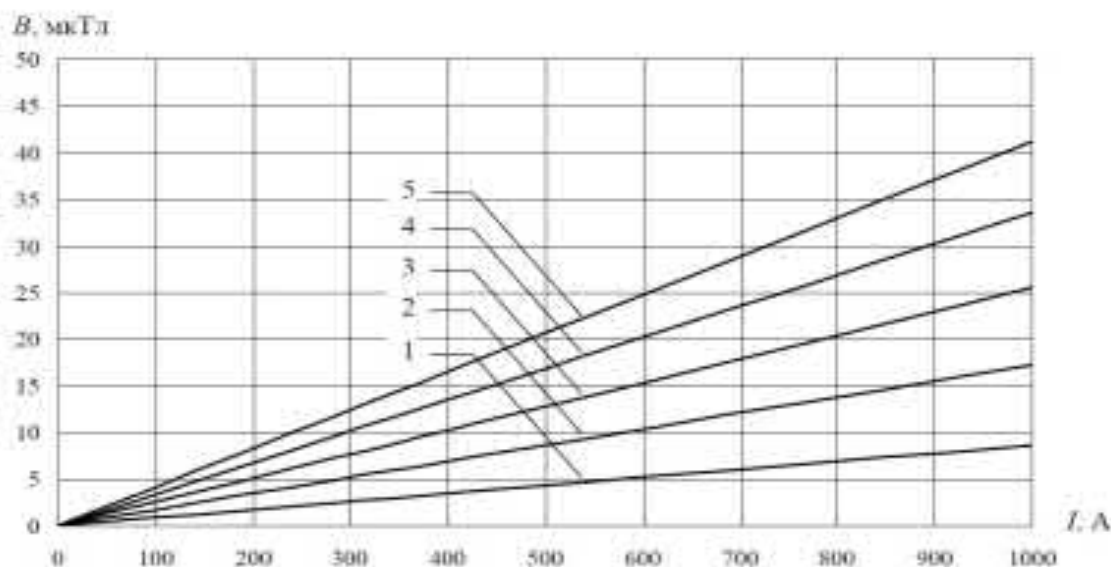


Рисунок Д.1 – Найбільші значення магнітної індукції підземних КЛ з розташуванням одножильних кабелів у горизонтальній площині на глибині 1,5 м на висоті 0,5 м над поверхнею землі за відстані d між осями кабелів:
1 – $d = 0,1$ м; 2 – $d = 0,2$ м; 3 – $d = 0,3$ м; 4 – $d = 0,4$ м; 5 – $d = 0,5$ м

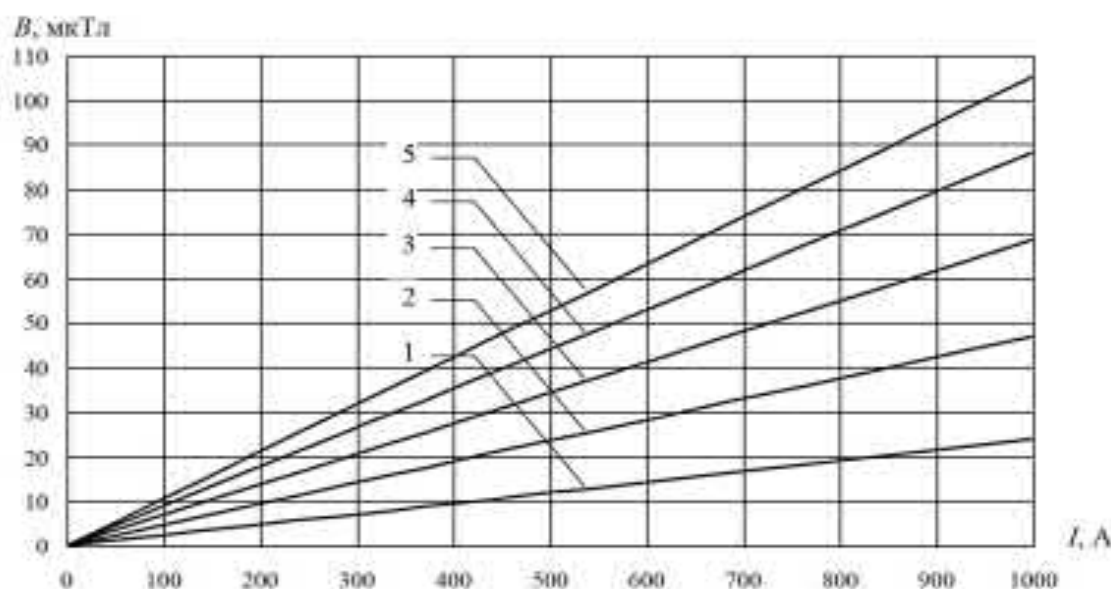


Рисунок Д.2 – Найбільші значення магнітної індукції підземних КЛ з розташуванням одножильних кабелів у горизонтальній площині на глибині 0,7 м на висоті 0,5 м над поверхнею землі за відстані d між осями кабелів:
1 – $d = 0,1$ м; 2 – $d = 0,2$ м; 3 – $d = 0,3$ м; 4 – $d = 0,4$ м; 5 – $d = 0,5$ м

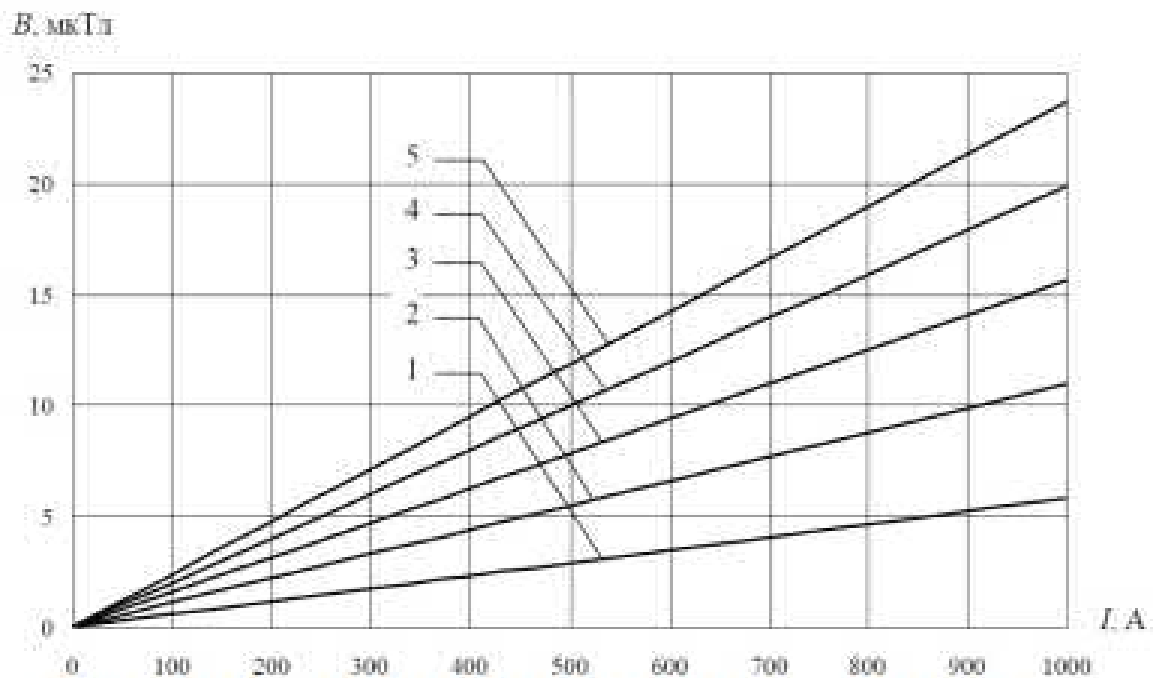


Рисунок Д.3 – Найбільші значення магнітної індукції підземних КЛ з розташуванням одножильних кабелів у вершинах рівностороннього трикутника на глибині 1,5 м на висоті 0,5 м над поверхнею землі за відстані d між осями кабелів:

1 – $d = 0,1$ м; 2 – $d = 0,2$ м; 3 – $d = 0,3$ м; 4 – $d = 0,4$ м; 5 – $d = 0,5$ м

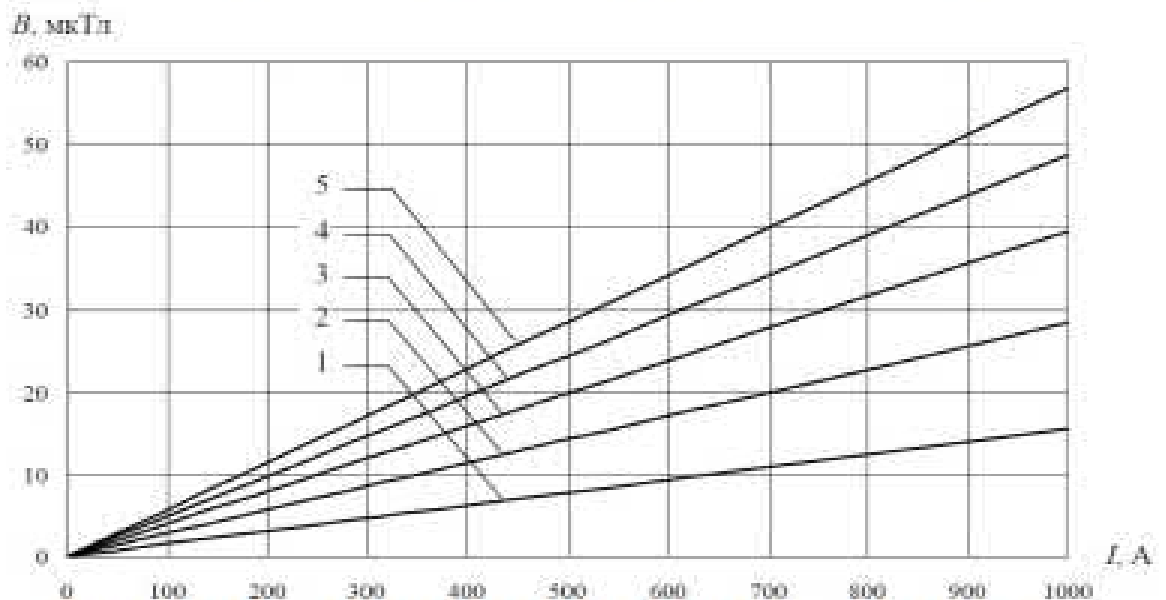


Рисунок Д.4 – Найбільші значення магнітної індукції підземних КЛ з розташуванням одножильних кабелів у вершинах рівностороннього трикутника на глибині 0,7 м на висоті 0,5 м над поверхнею землі за відстані d між осями кабелів:

1 – $d = 0,1$ м; 2 – $d = 0,2$ м; 3 – $d = 0,3$ м; 4 – $d = 0,4$ м; 5 – $d = 0,5$ м

Додаток Е (довітковий)

ПЕРЕЛІК ПРИЛАДІВ, РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА МАГНІТНОГО ПОЛІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Е.1 Вимірювач параметрів електричного та магнітного полів трикомпонентний АТ-003 – прилад, наявний у Державному реєстрі України засобів виміральної техніки.

Основні характеристики:

- трикомпонентний (ізотропний) датчик, вимірює повний вектор;
- діапазон частот – від 5 Гц до 400 кГц;
- діапазон вимірювання ЕП – від 5 до 1000 В/м;
- діапазон вимірювання МП – від 0,1 до 10 мкТл;
- похибка становить 15%.

Виробник – ТОВ «НТМ-Защита» (Російська Федерація).

Переваги – прилад внесено до Державного реєстру України засобів виміральної техніки.

Недоліки – невеликі верхні межі вимірювань, низька точність, висока вартість.

Е.2 Вимірювач електромагнітного поля промислової частоти ВЕ-50

Основні характеристики:

- трикомпонентний (ізотропний) датчик, вимірює повний вектор;
- діапазон частот – від 49 до 51 Гц;
- діапазон вимірювання ЕП – від 50 до 50 000 В/м;
- діапазон вимірювання МП – від 10 до 5000 мкТл;
- похибка становить 20%.

Виробник – ТОВ «НТМ-Защита» (Російська Федерація).

Переваги – широкі межі вимірювань ЕП.

Недоліки – низька точність, недостатня нижня межа вимірювання МП, висока вартість.

Е.3 Вимірювач магнітного поля EMF-828

Основні характеристики:

- трикомпонентний датчик, вимірює окремі компоненти;
- діапазон частот – від 30 до 300 Гц;
- діапазон вимірювання МП – від 0,05 до 20 000 мкТл;
- похибка становить 4%.

Виробник – «Lutron Electronic» (Тайвань).

Переваги – широкі межі вимірювань, висока точність, зручний і надійний прилад, низька вартість.

Е.4 Аналізатор електричного і магнітного полів ME 3030B

Основні характеристики:

- однокомпонентний;
- діапазон частот – від 16 Гц до 2000 Гц;
- діапазон вимірювання ЕП – від 0,001 до 2 кВ/м;
- діапазон вимірювання МП – від 0,01 до 2 мкТл;
- похибка становить 3 %.

Виробник – GIGAHERTZ SOLUTIONS (Germany).

Переваги – зручний і надійний прилад, низька вартість.

Недоліки – обмежений верхній діапазон вимірювань.

Е.5 Вимірювач електромагнітного поля Narda NBM-550 з ізотропним датчиком електричного і магнітного полів ЕНР-50F

Основні характеристики:

- трикомпонентний (ізотропний) датчик, вимірює повний вектор;
- діапазон частот – від 1 Гц до 400 кГц;
- діапазон вимірювання ЕП – від 0,005 до 100 000 В/м;
- діапазон вимірювання МП – від 0,003 до 10 000 мкТл;
- похибка становить 6%.

Виробник – «Narda Safety Test Solutions» (Німеччина).

Переваги – дуже широкі межі вимірювань, висока чутливість, висока точність, є можливість спектрального аналізу, портативний прилад.

Недоліки – висока вартість.

Е.6 Аналізатор напруженості електромагнітного поля E300 550 з ізотропним датчиком електричного і магнітного полів ЕНР 150

Основні характеристики:

- трикомпонентний (ізотропний) датчик, вимірює повний вектор;
- діапазон частот – від 1 Гц до 150 кГц;
- діапазон вимірювання електричного поля – від 0,01 до 110 000 В/м;
- діапазон вимірювання магнітного поля – від 0,1 до 10 000 мкТл;
- похибка становить від 6 до 9%.

Виробник – «Coliy Technology GmbH» (Німеччина).

Переваги – широкі межі вимірювань, висока точність, портативний прилад.

Недоліки – висока вартість.

Е.7 Для вимірювань ЕП та МП ЛЕП можна використовувати і інші прилади, які мають необхідні метрологічні характеристики та пройшли метрологічну атестацію.

Долаток Ж
(довідковий)

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Том 3. – М.: Питер, 2006. – 377 с.
2. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.
3. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.Н. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока // Технічна електродинаміка. – 2012. – №1. – С. 3-9.
4. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилкогина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5 – С. 11-13.
5. В.Ю. Розов, А.А. Квицинский, П.Н. Добродеев, В.С. Гринченко, А.В. Ери-сов, А.О. Ткаченко. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №4 – С. 56-61.
6. Moro, F. and Turri, R. Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment // Progress In Electromagnetics Research B. –2012. – Vol. 37. – Pp.343-364.
7. ANSI/IEEE Std. 644-1994: IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines. Institute for Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York (1994).

ДОДАТОК В
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ
В1

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ДУ «ІТПМ НАН України»



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор НТЦЕ

В.А. Лучников

А К Т



Ми, що нижче підписалися, від Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (ДУ «ІТПМ НАН України») вчений секретар Пилюгіна О.Ю. і провідний науковий співробітник Реуцький С.Ю. з одного боку, та від Відокремленого підрозділу «Науково-технічний центр електроенергетики» Державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НТЦЕ) головний інженер Квицинський А.О. та заступник начальника науково-технічного відділу виробничо-технічного управління Майстренко І.О. з іншого боку, склали цей акт про наступне.

Розроблені ДУ «ІТПМ НАН України» в рамках Цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічне, нормативне та інформаційне забезпечення створення гнучкої та адаптивної об'єднаної енергетичної системи України» («Об'єднання-2») наукові положення верифікованої методики розрахунку індукції магнітного поля трифазних ліній електропередачі прийняті НТЦЕ за основу при розробленні нової редакції нормативного документу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України (Міненерговугілля) «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика» (на заміну СОУ-Н ЕЕ 20.179: 2008). Проект нормативного документу направлений в Міненерговугілля на затвердження та планується до введення в дію у 2016 році.

Від ДУ «ІТПМ НАН України»
Вчений секретар

О.Ю.Пилюгіна

Провідний науковий співробітник

С.Ю.Реуцький

Від НТЦЕ
Головний інженер

А.О.Квицинський

Заступник начальника науково-технічного відділу виробничо-технічного управління

І.О.Майстренко

COU-Н ЕЕ 20.179:2008



МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА
ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

НАКАЗ

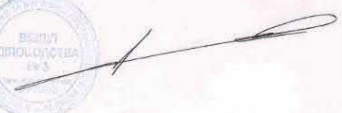
«07» 07 2008 м. Київ № 423

Про внесення змін до нормативного документа «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика»

З метою визначення оцінки впливу ліній електропередавання на довкілля під час проектування, будівництва та експлуатації

НАКАЗУЮ:

1. Внести зміни до нормативного документа «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика» (далі – Методика), затвердженого наказом Міненерговугілля від 22.10.2008 № 512, виклавши його у редакції, що додається.
2. Об'єднано енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики» (Котельников О. О.) внести цей наказ до реєстру нормативних документів Міненерговугілля України.
3. Державному підприємству «Національна енергетична компанія «Укренерго» (Ковальчук В. В.) забезпечити видання та розповсюдження необхідної кількості примірників Методики державним підприємствам, що належать до сфери управління Міненерговугілля, та господарським товариствам, щодо яких Міненерговугілля здійснює управління корпоративними правами держави, відповідно до замовлень.
4. Наказ набирає чинності через 90 днів.
5. Контроль за виконанням цього наказу покласти на заступника Міністра Светеліка О.Д.

Міністр  І. Насалик

НОРМАТИВНИЙ ДОКУМЕНТ МІНЕНЕРГОВУГІЛЛЯ УКРАЇНИ

**РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО І МАГНІТНОГО ПОЛІВ
ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ
МЕТОДИКА
(зі змінами)**

COU-Н ЕЕ 20.179:2008

Київ

Відокремлений підрозділ
«Науково-проектний центр розвитку об'єднаної енергетичної системи
України» Державного підприємства «Національна енергетична компанія
«Укренерго»

2016

COU-Н ЕЕ 20.179:2008

ПЕРЕДМОВА

- 1 ЗАМОВЛЕНО:** Міністерство енергетики та вугільної промисловості України
- 2 РОЗРОБЛЕНО:** Відокремлений підрозділ «Науково-технічний центр електроенергетики» державного підприємства «Національна енергетична компанія «Укренерго»

Державна установа «Інститут технічних проблем магнетизму Національної академії наук України»

Державна установа «Інститут гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєсва Академії медичних наук України»
- 3 РОЗРОБНИКИ:** Ю. Думанський, А. Квицинський (керівник розробки), І. Майстренко (відповідальний виконавець), Д. Пелєвін, О. Пилюгіна, С. Реуцький, В. Розов

Режим доступу: URL https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=67246

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ДУ «ІТІМ НАН України»

В.Ю. Розов

12.12.2019

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «КиївПромЕлектроПроект»

Ю.С. Громадський

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Ми, що нижче підписалися, від Державної установи «Інститут технічних проблем магнетизму НАН України» (ДУ «ІТІМ НАН України») заступник директора з наукової роботи Грінченко В.С. і завідувач лабораторії магнітних вимірювань Пелєвін Д. Є. з одного боку, та від Товариства з обмеженою відповідальністю «КиївПромЕлектроПроект» Громадський Ю.С., склали цей акт про наступне.

Розроблені в 2019 році ДУ «ІТІМ НАН України» за цільовою комплексною міждисциплінарною програмою наукових досліджень НАН України з розроблення наукових засад раціонального використання природно-ресурсного потенціалу та сталого розвитку в рамках науково-дослідної роботи «Розроблення наукових засад зменшення електромагнітного впливу на житлове середовище міських трансформаторних підстанцій (шифр ЕМП ТП)» **рекомендації** з практичної реалізації наукових засад зменшення до безпечного рівня електромагнітного впливу на житлове середовище міських трансформаторних підстанцій 10(6)/0,4 кВ **використані** Товариством з обмеженою відповідальністю «КиївПромЕлектроПроект» для розробки нормативних документів з проектування міських трансформаторних підстанцій із екологічно безпечним для населення рівнем електромагнітного поля промислової частоти.

Від ДУ «ІТІМ НАН України»

Заступник директора з наукової
роботи

В.С. Грінченко

Завідувач лабораторії магнітних
вимірювань

Д.Є. Пелєвін

Від ТОВ

«КиївПромЕлектроПроект»

Директор

Ю.С. Громадський.

СПРАВКА

про впровадження результатів докторської дисертації Пелєвіна Д.Є.

Цією справкою підтверджується, що наукові і практичні результати докторської дисертації завідувача лабораторії Інституту енергетичних машин і систем А.М. Підгорного НАН України Пелєвіна Дмитра Євгеновича в частині дослідження магнітного поля електромереж та розробки методів зменшення їх впливу, були використані при створенні систем живлення апаратури на основі запропонованих в дисертації магніточистих двожильних планарних і коаксіальних кабелів, що дозволило зменшити їх магнітне поле та забезпечити на цій основі електромагнітну сумісність з електронними системами керування різного типу об'єктами.

Головний конструктор

НВП ХАРТРОН – АРКОС



А.М. Калногуз

12.09.2024

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора
ІГЗ НАМН України ім. А. М. Марзєєва,
чл.-кор. НАМН України, д-р мед. наук,
проф.



Надія ПОЛЬКА

30.01.2026

АКТ УПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційних досліджень Д. Є. Пелевіна на тему
«Магнітне поле електромереж у житлових приміщеннях будинків
та методологія його зменшення до безпечного рівня»

Цей акт складений у тому, що результати теоретичних і експериментальних досліджень, викладених у докторській дисертації зав. лабораторією магнітних вимірювань відділу магнетизму технічних об'єктів Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України канд. тех. наук, ст. дослідника Пелевіна Д. Є. «Магнітне поле електромереж у житлових приміщеннях будинків та методологія його зменшення до безпечного рівня» використані в Інституті громадського здоров'я НАМН України ім. А. М. Марзєєва під час розробки державних медико-санітарних нормативів магнітного поля частотою 50 Гц для населення України.

Завідувач лабораторії
безпеки фізичних факторів,
д-р мед. наук

Вадим ДУМАНСЬКИЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ



Заступник директора з наукової роботи
Інституту енергетичних машин і систем
ім. А.М. Підгорного НАН України,
проф. НАН України д.т.н., проф.
Андрій КОСТИКОВ
01442 2026

АКТ

*про використання результатів дисертаційної роботи
Пелєвіна Дмитра Євгеновича на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук*

Ми, що нижче підписалися, представники відділу магнетизму технічних об'єктів Інституту енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України (ІЕМС НАН України) завідувач відділу магнетизму технічних об'єктів д.т.н. проф. Борис КУЗНЕЦОВ і старший науковий співробітник к.т.н. Олександр ТКАЧЕНКО склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Пелєвіна Д.Є. впроваджені при вирішенні проблем зменшення до безпечного рівня електромагнітного поля електромереж в рамках виконання в ІЕМС НАН України наступних фундаментальних і прикладних наукових досліджень: «БАЗИС» № ДР 0110U007341, 2011 – 2015 рр.; «ВИТОК» № ДР 0115U002008, 2015 – 2019 рр.; «ВПЛИВ» № ДР 0115U005281, 2016 – 2020 рр.; «СИНТЕЗ» № ДР 0113U001381, 2013 – 2017 рр.; «Метод-К» № ДР 0116U002817, 2016 – 2018 рр.; «РЕШТКА» № ДР 0117U006243, 2017 рр.; «П-23-21/ОСМА» № ДР 0121U111836, 2021 – 2022 рр.; «ВИТОК-П» № ДР 0120U100470, 2020 – 2024 рр.

Результати виконаних Пелєвіним Д.Є. досліджень, в тому числі запропоновані ним методи моделювання магнітного поля електромереж та методологія його нормалізації, мають істотне значення для практичного вирішення актуальної і соціально значимої проблеми захисту здоров'я населення від негативної дії магнітного поля.

Завідувач відділу
магнетизму технічних об'єктів
ІЕМС НАН України, д.т.н. проф.

Борис КУЗНЕЦОВ

Старший науковий співробітник відділу
магнетизму технічних об'єктів
ІЕМС НАН України, к.т.н

Олександр ТКАЧЕНКО