

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

ПЕЛЄВІН ДМИТРО ЄВГЕНОВИЧ



УДК 621.316:621.3.013

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

спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2026

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у відділі магнетизму технічних об'єктів Інституту енергетичних машин і систем імені А.М. Підгорного Національної академії наук України

Опоненти:

доктор технічних наук, професор

Клепиков Володимир Борисович

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Подольцев Александр Дмитриевич,

Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, головний науковий співробітник відділу електроживлення технологічних систем;

доктор технічних наук, професор

Островерхов Микола Якович,

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, професор кафедри теоретичної електротехніки.

Захист відбудеться «09» липня 2026 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Ректорський корпус (аудиторія 38).

З дисертацією та рефератом можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2 та за посиланням:

<https://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/vr/archives/8168>

Про дату та місце захисту громадськість проінформовано «08» червня 2026 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Володимир ІВАХНО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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), яка реалізує, постійно діючий Міжнародний проект з ЕМП (The International EMF Project), 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). 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, 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.

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 у житлових приміщеннях групою електромереж. 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 електричним полем (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 магнітного поля, 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 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 магнітних моментів системи підвісу проводів та підвищення порядку її власної просторової гармоніки.

7. Набув подальшого розвитку і удосконалення метод синтезу САЕ МП вбудованих трансформаторних підстанцій (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 дво жильних планарних і коаксіальних кабелів, що застосовуються у внутрішніх електромережах живлення (ВЕЖ) житлових приміщень, та системах кабельного електрообігріву (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 дво жильних планарних і коаксіальних нагрівальних кабелів;
- запропоновано методику синтезу ЛЕП з удосконаленим 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 (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 двожилвильних планарних і коаксіальних кабелів для забезпечення їх електромагнітної сумісності;

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

– Інституті 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 осьової 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 модифікований метод синтезу систем активного екранування МП ТП при малих відстанях від підстанції до житлового приміщення;

– математичні моделі МП двожилвильних 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 нормалізації сумарного МП на її основі.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертації, результати та висновки обговорено на: міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2014 р.); міжнародних симпозиумах «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки «SIEMA»», (м. Харків, 2017 – 2025 рр., 9 доповідей); 2-му семінарі з інженерної оптимізації «WEO 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» (Київ, 2021 р., 2022 р.); семінарах «Магнітне поле технічних об'єктів. Проблеми моделювання та вимірювання» Наукової Ради НАН України «Наукові основи електроенергетики» (м. Харків, 2013 – 2024 рр., 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, наведено відомості щодо зв'язку роботи з науковими програмами, стисло викладено отримані результати, висвітлено наукову новизну, практичне значення результатів, відзначено методи досліджень, особистий внесок здобувача, висвітлено кількість наукових праць і обсяг дисертації.

У першому розділі 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 магнітного поля (МП) 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 ТП, системи кабельного електрообігріву (СКЕ) житлових приміщень та внутрішні електромережі 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.

У другому розділі 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 ЕП охоронних зон, та обґрунтовано необхідність збільшення їх розміру для законодавчого обмеження діючого значення індукції МП на безпечному для населення рівні 0,5 мкТл. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена незначна ефективність екранування МП промислової частоти ЛЕП стінами житлових будинків, в тому числі залізобетонних.

Побудову математичної моделі МП ЛЕП виконаємо при наступних припущеннях: простір навколо ЛЕП вільний від феромагнітних та електропровідних елементів; проводи фаз ЛЕП є нескінченими прямолінійними паралельними один одному струмовими нитками; трифазні струми ЛЕП синусоїдальні і симетричні із фазовим зсувом 120 ел. градусів; МП системи струмів ЛЕП квазістаціонарне, потенційне і має дві просторові компоненти $H(x, z) = H_x(x, z)e_x + H_z(x, z)e_z$, де z – вертикальна, а x – горизонтальна компоненти, ортогональні до осі проводів.

Математична модель МП ЛЕП. Аналіз МП ЛЕП виконаємо для найгіршого випадку, коли його величина максимальна - поблизу точки максимального провисання проводів ЛЕП, де вони можуть бути прийняті паралельними поверхні Землі. Тоді МП можна вважати плоскопаралельним, а його горизонтальною компонентою H_x , спрямованою паралельно проводам ЛЕП, можна знехтувати.

В умовах квазістаціонарності напруженість МП $dH(t)$, що викликана струмом $i(t)$, який протікає по лінійному відрізку провідника dl , визначається законом Біо-Савара:

$$d\vec{H}(t) = \frac{i(t)}{4\pi R^3} (d\vec{l} \times \vec{R}). \quad (2.1)$$

Тоді вектор напруженості МП від струму, що протікає по лінії L дорівнює:

$$\vec{H}_0(P, t) = \frac{i(t)}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3}. \quad (2.2)$$

Для трифазної ЛЕП результуючий вектор напруженості МП в точці спостереження P (рис. 2,1) може бути визначений на основі (2.2) як:

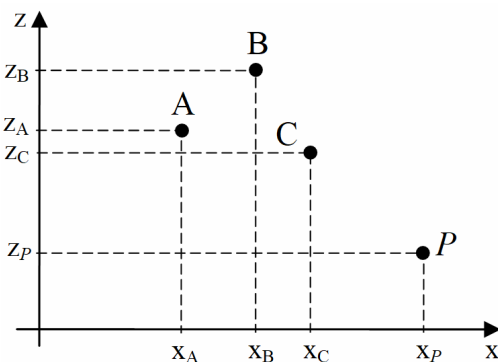


Рисунок 2.1 – Проводи фаз ЛЕП і точка спостереження P

$$\vec{H}(P, t) = \left(\vec{H}_A(P) - \frac{1}{2} \vec{H}_B(P) - \frac{1}{2} \vec{H}_C(P) \right) \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\vec{H}_B(P) - \vec{H}_C(P) \right) \cos(\omega t). \quad (2.3)$$

Вирази, аналогічні (2.3), справедливі для кожної просторової складової вектору напруженості. Наприклад, для просторової компоненти x можна записати:

$$H_x(P,t) = \left(H_{A,x}(P) - \frac{1}{2}H_{B,x}(P) - \frac{1}{2}H_{C,x}(P) \right) \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} (H_{C,x}(P) - H_{B,x}(P)) \cos(\omega t). \quad (2.4)$$

Усереднивши скалярну функцію $H_x(P,t)$ за період $T=2\pi/\omega$, і перейшовши до індукції $B=\mu_0 H$ отримаємо діюче значення складової x індукції МП:

$$\tilde{B}_x(P) = \sqrt{\frac{1}{2} [B_{A,x}^2 + B_{B,x}^2 + B_{C,x}^2 - B_{A,x}B_{B,x} - B_{A,x}B_{C,x} - B_{B,x}B_{C,x}]}. \quad (2.5)$$

Операція усереднення для визначення діючого значення індукції МП повинна виконуватися відповідно до (2.3-2.5) стосовно кожної просторової компоненти вектору напруженості (індукції) МП. Співвідношення (2.1, 2.2, 2.4, 2.5) являють собою математичну модель МП ЛЕП, що може застосовуватися при будь-якій кількості її струмопроводів, у тому числі багатокілових ЛЕП. Запропонована модель, на відміну від відомих, включає лише вимірювані величини, що спрощує її практичне використання.

Метод розрахунку індукції МП. У прийнятих умовах квазістаціонарності, МП лінійного струму величиною i , що проходить через точку з координатами (x_0, y_0) , може бути визначено через скалярний магнітний потенціал:

$$U_m(x, z, t) = -\frac{i(t)}{2\pi} \arctg\left(\frac{z - z_0}{x - x_0}\right), \quad (2.6)$$

і, відповідно, вектор індукції МП має просторові компоненти:

$$B_x(x, z, t) = -\mu_0 \frac{\partial U_m}{\partial x} = -\frac{\mu_0 i(t)}{2\pi} \frac{z - z_0}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2}, \quad (2.7)$$

$$B_z(x, z, t) = -\mu_0 \frac{\partial U_m}{\partial z} = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi} \frac{x - x_A}{(x - x_A)^2 + (z - z_A)^2}. \quad (2.8)$$

Тоді для усереднених компонентів вектора індукції МП ЛЕП з урахуванням виконання співвідношення (2.4), отримуємо вирази, аналогічні (2.5):

$$\tilde{B}_x(x, z) = \sqrt{\frac{1}{2} [B_{A,x}^2 + B_{B,x}^2 + B_{C,x}^2 - B_{A,x}B_{B,x} - B_{A,x}B_{C,x} - B_{B,x}B_{C,x}]}, \quad (2.9)$$

$$\tilde{B}_z(x, z) = \sqrt{\frac{1}{2} [B_{A,z}^2 + B_{B,z}^2 + B_{C,z}^2 - B_{A,z}B_{B,z} - B_{A,z}B_{C,z} - B_{B,z}B_{C,z}]}, \quad (2.10)$$

де, на відміну від (2.5), його можна записати у явному вигляді:

$$B_{A,x}(x, z) = -\frac{\mu_0 I_{m,A}}{2\pi} \frac{z - z_A}{(x - x_A)^2 + (z - z_A)^2}, \quad B_{A,z}(x, z) = \frac{\mu_0 I_{m,A}}{2\pi} \frac{x - x_A}{(x - x_A)^2 + (z - z_A)^2}. \quad (2.11)$$

Усереднене значення індукції сумарного МП знаходимо за формулами (2.9, 2.10). Тоді шуканий модуль діючого значення індукції МП дорівнює

$$|\tilde{B}(x, z)| = \sqrt{[\tilde{B}_x(x, z)]^2 + [\tilde{B}_z(x, z)]^2}. \quad (2.12)$$

Отримані співвідношення (2.9-2.12) для однокової трифазної ЛЕП можуть бути значно спрощені і представлені як:

$$\tilde{B}(x, z) = \frac{\mu_0 I_d}{2\sqrt{2}\pi} \sqrt{\left(\frac{D_{AB}}{R_A R_B}\right)^2 + \left(\frac{D_{AC}}{R_A R_C}\right)^2 + \left(\frac{D_{BC}}{R_B R_C}\right)^2}, \quad (2.13)$$

де D_{AB}, D_{AC}, D_{CB} – міжфазні відстані, R_A, R_B, R_C – відстані від проводів фаз до точки спостереження P .

Запропонована математична модель (2.1-2.5) та метод розрахунку (2.6-2.13) верифіковані на лабораторному макеті ЛЕП (рис. 2.2 *а*), та на діючих ЛЕП 110-330 кВ (рис. 2.2 *б*).

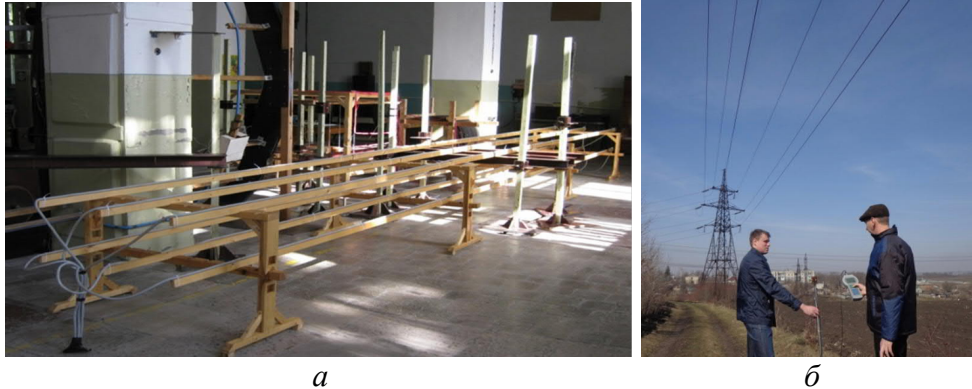


Рисунок 2.2 – Лабораторний макет ЛЕП 100А (*а*), та експериментальні дослідження розподілу МП діючої ЛЕП 330 кВ (*б*)

Відхилення результатів розрахунку та лабораторного експерименту не перевищує 5 %, а натурального - 10%.

На основі розробленої математичної моделі МП ЛЕП та запропонованого методу розрахунку, за участю дисертанта і на замовлення ДП НЕК «Укренерго», розроблено верифіковану методику розрахунку МП ЛЕП, яку впроваджено наказом Міненерговугілля від 01.07.16 № 423 в нормативному документі СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 «Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання» Методика (зі змінами 2016 р.). Ця методика вже біля 10 років широко і успішно використовується в енергетичній галузі України.

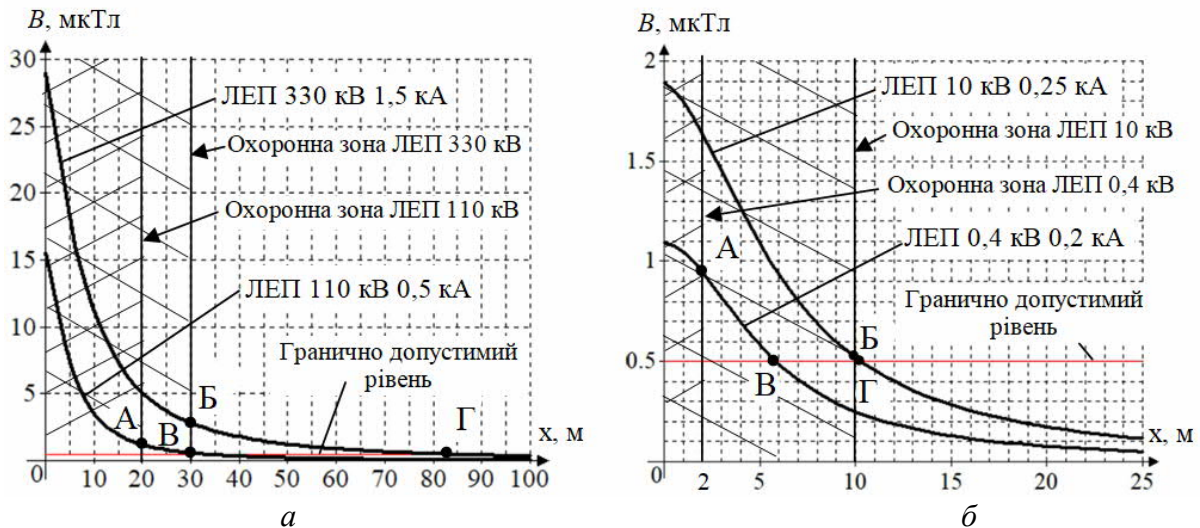


Рисунок 2.3 – Узагальнені результати експериментальних досліджень розподілу індукції МП діючих повітряних ЛЕП 0,4-330 кВ, приведених до номінальних режимів їх роботи.

На основі розробленої методики (2.3-2.13) при гранично допустимому (нормативному) рівні індукції МП в житловій зоні 0,5 мкТл (ПУЕ, 2017, табл. 2.3.2), а також і з урахуванням законодавчо визначених за ЕП охоронних зон ЛЕП, автором визначено та експериментально обґрунтовано розподіл МП

поблизу реальних ЛЕП 0,4-330 кВ (рис. 2.3). Як видно з рис. 2.3, має місце перевищення в 1,5-5,6 разів нормативу 0,5 мкТл за границями діючих охоронних зон ЛЕП. Це складає небезпеку для здоров'я населення і обумовлює необхідність перегляду розміру охоронних зон ЛЕП з урахуванням їх не тільки ЕП, а і МП.

Розглянута вище методика розрахунку розроблена автором при припущенні, що простір навколо ЛЕП вільний від феромагнітних та електропровідних елементів. Але досягнення мети дисертації потребує визначення МП всередині житлових будинків, що можуть мати залізобетонні феромагнітні конструкції. Автором досліджено ефективність екранування МП частотою 50 Гц будівельними конструкціями на основі чисельного моделювання і натурального експерименту. Моделювання проведено для стандартного п'ятиповерхового житлового будинку зі збірного залізобетону, який має максимальний екрануючий ефект за МП. Будинок (рис. 2.4) розташований на відстані 15 м від ЛЕП 110 кВ, 500 А. Кількісну оцінку ефективності екранування МП проведено з використанням фактору екранування $S_F = B_0/B$, де B , B_0 – діючі значення індукції МП у точці P усередині будинку та у разі відсутності будинку відповідно. Моделювання виконано в рамках двовимірної моделі з використанням програмного пакета COMSOL Multiphysics. Магнітостатична модель будинку характеризується ефективною магнітною проникністю μ_e залізобетонних стін і перекриттів, визначеною за методом Аркадьєва В.К.

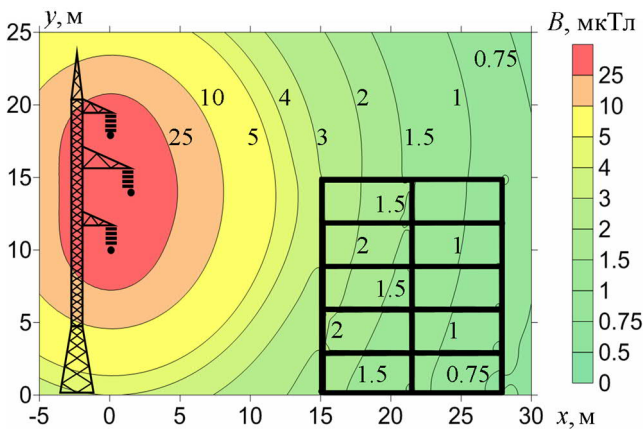


Рисунок 2.4 – До визначення фактору екранування МП ЛЕП всередині залізобетонного житлового будинку

$$\mu_e = (\mu_m - 1)K_V + 1, \quad K_V = \frac{V_F}{V_k}, \quad (2.14)$$

де V_k , V_F – зовнішній об'єм залізобетонної конструкції та об'єм феромагнітних елементів відповідно; μ_m – відносна магнітна проникність сталевий будівельної арматури (≈ 100 в.о.).

На рис. 2.4 представлено обчислений розподіл ліній рівних значень індукції МП усередині та в околиці будинку. При цьому значення S_F лежить у діапазоні 1,04-1,09 в.о., що добре узгоджується з результатами проведених автором експериментальних

досліджень екрануючих властивостей різноманітних будівельних матеріалів, а також 14 панельних будинків із збірного залізобетону різних конструкцій. Результати виконаних досліджень підтверджують, що МП промислової частоти практично без ослаблення проникає скрізь стіни всіх типів житлових будинків, в тому числі залізобетонних. Це дозволяє в подальшому не враховувати вплив будівельних конструкцій на рівень МП всередині житлових будинків.

У третьому розділі 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. Запропоновано методи удосконалення підвісу про-

водів ЛЕП шляхом симетрування їх просторового розташування з підвищенням порядку p їх осьової 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, а також рекомендації з удосконалення геометрії підвісу проводів двоколових ЛЕП для зменшення їх МП.

Структурні методи зменшення МП ЛЕП не потребують використання додаткових функціональних елементів (систем екранування), що робить їх економічно привабливими. Як витікає із співвідношень (2.14), до структурних методів можна віднести метод захисту відстанню (збільшення відстані від ЛЕП від до точки спостереження), а також метод зменшення міжфазної відстані D між проводами. Метод захисту відстанню довгий час був найбільш поширеним методом зменшення МП ЛЕП, але в сучасних умовах підвищення вартості земельних ділянок, його прагнуть уникати. Метод зменшення відстані D між проводами високовольтних ЛЕП пов'язаний із використанням ізольованих проводів ЛЕП і потребує окремого розгляду.

Із структурних методів зменшення МП найменш вивченим для ЛЕП є запропонований в роботах Розова В.Ю. метод структурування (симетрування) власних джерел МП об'єкта, який полягає в формуванні такої просторової геометрії розподілу джерел його МП, яка забезпечує осьову (порядку $k = p$) і площинну (щодо площини, перпендикулярної до цієї осі) симетрію.

Для визначення умов ефективної реалізації методу симетрування джерел МП ЛЕП автором використано запропоновану ним мультидипольну модель МП ЛЕП, яка містить систему дипольних джерел МП $\vec{H}(P)$, що характеризуються магнітними моментами (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 $2L$:

$$\dot{\vec{H}}(P) = -\sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \sum_c \sum_{i=1}^N \nabla \left[\frac{(\dot{\vec{m}}_{l\alpha ci}, \vec{R}_{l\alpha ci})}{4\pi R_{l\alpha ci}^3} \right], \quad \dot{\vec{m}}_{l\alpha ci} = I_{l\alpha} \vec{S}_{l\alpha ci} = I_{l\alpha} e^{-j\varphi_\alpha} a \cdot d_{l\alpha ci} \vec{n}_{l\alpha ci} \quad (3.1)$$

де: N – кількість мікроконтурів; \vec{S}_i – вектор площі i -го мікроконтуру; \vec{n}_i – одиничний вектор, нормальний до S_i ; \vec{R}_i – радіус вектор від геометричного центру i -го мікроконтуру; c – ліва (л) або права (п) частина досліджуваної ЛЕП; α – номер фази ЛЕП; G – кількість розщеплених проводів; $d_{l\alpha ci}$ – відстань між проводами різних фаз.

Суть методу мультидипольного моделювання розглянемо на основі простішої однофазної ЛЕП (рис. 3.1). З урахуванням (3.1), мультидипольна математична модель однофазної ЛЕП (рис. 3.1) може бути описана як:

$$\dot{\vec{H}}_m(P) = -\nabla \left[\frac{(\dot{\vec{m}}_i, \dot{R}_i)}{4\pi R_i^3} \right], \quad \dot{\vec{H}}_{ЛЕП}(P) = \sum_{i=-L}^{+L} \dot{\vec{H}}_{mi}(P) = -\sum_{i=-L}^{+L} \nabla \left[\frac{(\dot{\vec{m}}_i, \dot{R}_i)}{4\pi R_i^3} \right], \quad (3.2)$$

де $\dot{H}_m(P)$ – МП елементарного мікроконтуру ЛЕП (рис. 3.1).

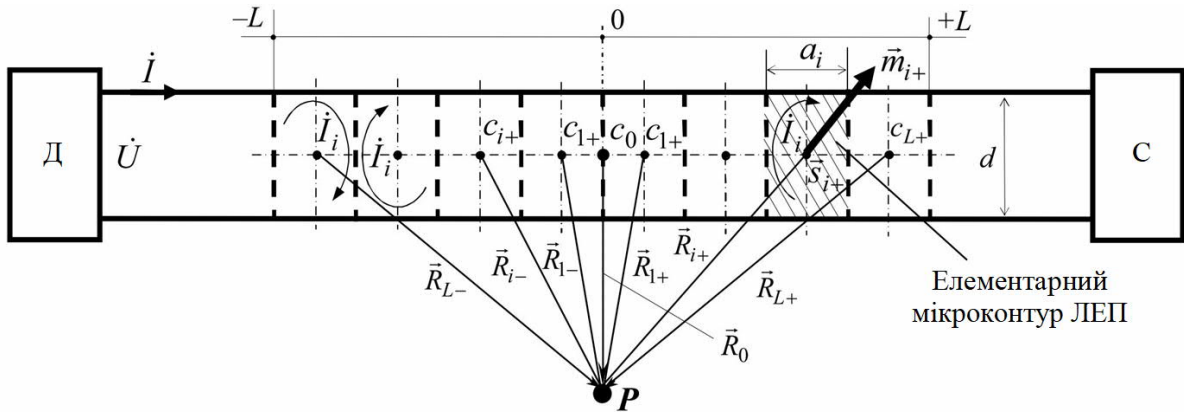


Рисунок 3.1 – Мультидипольна модель МП однофазної ЛЕП

З проведеного вище аналізу виходить, що при мультидипольному моделюванні окремі елементарні мікроконтури реальної ЛЕП можуть бути заміщені лінійкою відповідних ММ, розміщених в геометричних центрах цих елементарних мікроконтурів. Так МП трифазної трипровідної ЛЕП ($G = 1$) формується системою ММ, утворюваних контурами міжфазних струмів I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} , по яких передається електрична енергія.

При розщепленні проводів ЛЕП ($G > 1$), система її ММ буде містити збільшену в G разів кількість лінійок ММ. Тоді МП $\dot{H}_{cm}(P)$ з урахуванням (3.1) може бути описана співвідношеннями:

$$\dot{H}_{cm}(P) = -\sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \nabla \left[\frac{(\dot{m}_{l\alpha}, \dot{R}_{l\alpha})}{4\pi R_{l\alpha}^3} \right]; \quad \dot{H}_{ЛЕП}(P) = -\sum_{i=-L}^{+L} \sum_{l=1}^G \sum_{\alpha=1}^3 \nabla \left[\frac{(\dot{m}_{l\alpha}, \dot{R}_{l\alpha})}{4\pi R_{l\alpha}^3} \right], \quad (3.3)$$

Розщеплюючи проводи кожної з фаз ЛЕП ($G > 1$) можна удосконалити просторовий розподіл проводів ЛЕП шляхом симетрування їх структури, що дозволяє зменшувати рівень їх МП за рахунок векторної компенсації їх ММ.

Похибка методу мультидипольного моделювання МП визначається похибкою дипольного уявлення МП прямокутного мікроконтуру зі струмом. Автором показано, що у точках спостереження, віддалених від контуру на відстань, що перевищує 3 його габаритних розміри, модуль вектору індукції МП може бути описаний дипольною моделлю з похибкою менше 10%. Це обумовлює похибку мультидипольного моделювання і методу векторної компенсації, яка може бути обмежена на рівні 10% при віддаленні точки спостереження від проводів ЛЕП на відстань, що втричі перевищує міжфазну відстань D .

При використанні мультидипольної моделі необхідно коректно визначити струмові контури трифазної ЛЕП, що формують їх МП. В загальному випадку, при $G = 1$, МП ЛЕП формується трьома струмовими контурами (рис. 3.2 а):

$$\dot{H}(P) = -\nabla \left[\frac{([I_{AB} \vec{s}_{AB}], \vec{R}_{AB})}{4\pi R_{AB}^3} \right] - \nabla \left[\frac{([I_{BC} \vec{s}_{BC}], \vec{R}_{BC})}{4\pi R_{BC}^3} \right] - \nabla \left[\frac{([I_{CA} \vec{s}_{CA}], \vec{R}_{CA})}{4\pi R_{CA}^3} \right]. \quad (3.4)$$

Автором показано, що в разі симетрії напруги живлення, дипольна математична модель МП трифазного електричного кола (рис. 3.2 а) може бути представлена у вигляді еквівалентного двофазного електричного кола (рис. 3.2 б) і характеризується спрощеним співвідношенням:

$$\dot{H}(P) = -\nabla \left[\frac{([i_A \bar{s}_{AB}], \bar{R}_{AB})}{4\pi R_{AB}^3} \right] - \nabla \left[\frac{([i_C \bar{s}_{BC}], \bar{R}_{BC})}{4\pi R_{BC}^3} \right]. \quad (3.5)$$

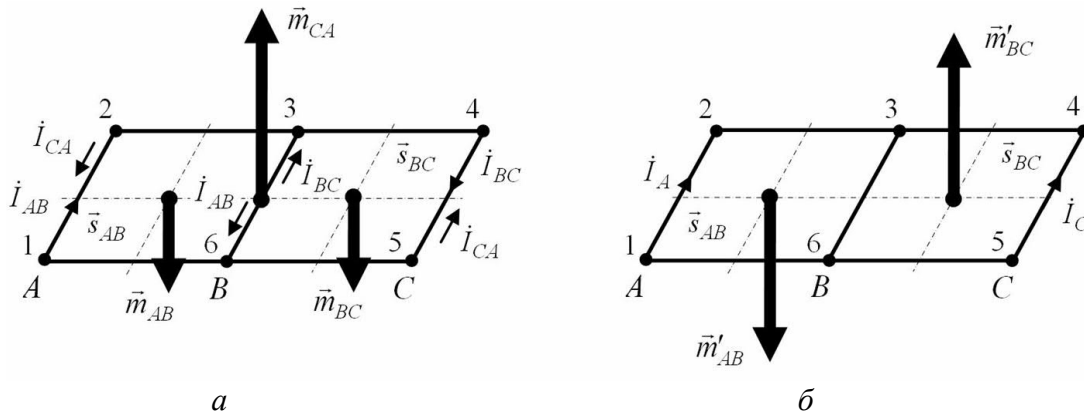


Рисунок 3.2 – Магнітні моменти трифазного електричного кола

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 (3.5) порівняно з базовою моделлю (3.4) і має багаточисельні експериментальні підтвердження.

На рис. 3.3 представлені результати порівняння розрахунку МП реальної ЛЕП 330 кВ на основі мультидипольної моделі (3.3), та за розробленою верифікованою методикою на основі рівнянь Біо-Савара (2.1-2.12). Їх співставлення з

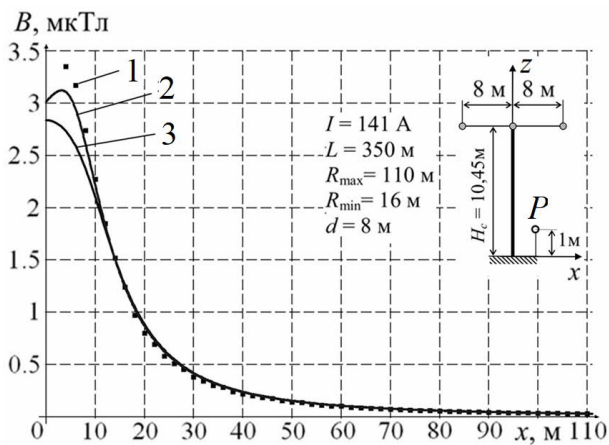


Рисунок 3.3 – Порівняння результатів розрахунку індукції МП реальної ЛЕП 330 кВ на основі двофазної мультидипольної моделі (2), на основі Біо-Савара (3), та з результатами експерименту (1)

результатами фізичного експерименту (точки на рис. 3.3) підтверджує правильність виконаного аналізу і адекватність запропонованої мультидипольної моделі ЛЕП при видаленні точки спостереження P за горизонтальну проекцію її проводів.

На основі мультидипольної моделі автором запропонований метод структурування (симетрування) підвісу проводів ЛЕП, 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 осової симетрії p і відповідної власної просторової гармоніки, що підвищує інтенсивність затухання МП. При цьому реалізується запропонований автором метод векторної компенсації МП ЛЕП, що ілюструється рис. 3.4.

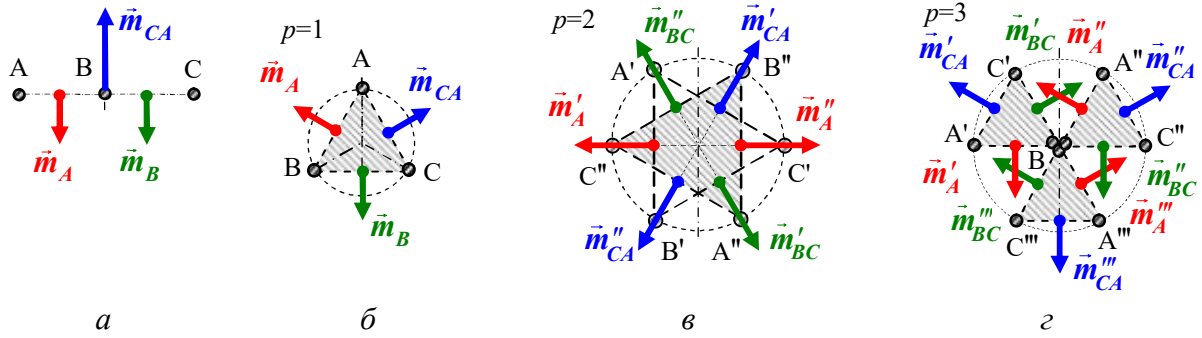


Рисунок 3.4 – Розподіл магнітних моментів \vec{m} контурів зі струмом трифазної ЛЕП при підвищенні порядку p осової симетрії підвісу її розщеплених проводів фаз, що ілюструє метод векторної компенсації МП

Результати використання методу векторної компенсації (рис. 3.5) показують, що збільшення G від 1 до 4, дозволяє зменшити індукцію МП ЛЕП під віссю ЛЕП на порядок, що робить цей метод практично привабливим.

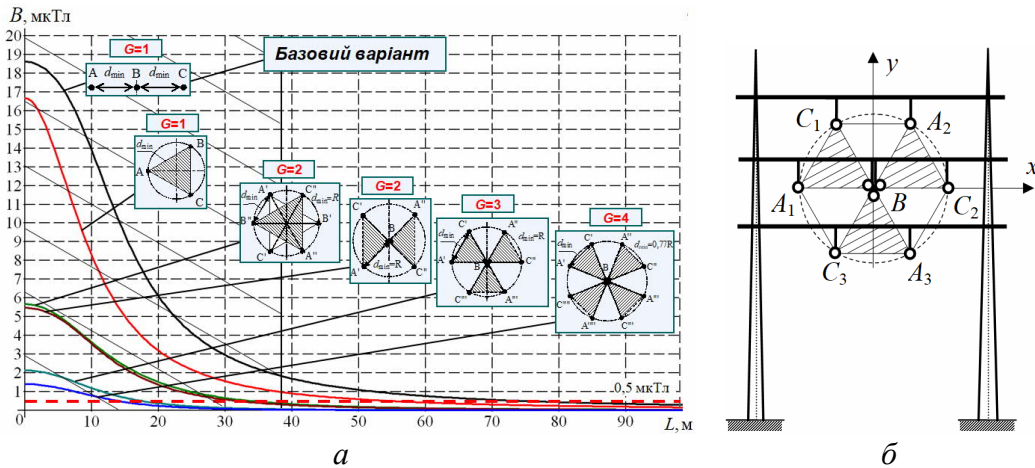


Рисунок 3.5 – Розрахований за (2.9-2.12) розподіл індукції МП ЛЕП 330 кВ біля поверхні землі при використанні методу векторної компенсації і G - 1- 4 (а) та синтезована ЛЕП з $G=3$ і зменшеним на порядок рівнем МП (б)

Визначені умови удосконалення геометрії підвісу проводів діючих двокілових ЛЕП 110-330 кВ на опорах типу «бочка» методом «перезафазування» проводів фаз А2 і С2 ЛЕП, який дозволяє зменшити МП ЛЕП в 3-6 рази.

У четвертому розділі 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 ГДР 0,5 мкТл. Побудована математична модель МП ТП, яка базується на МП його низьковольтного струмопроводу, та виконана її експериментальна верифікація. Запропоновано удосконалений метод синтезу САЕ ТП, який забезпечує зменшення рівнів МП на підлозі житлових приміщень, розташованих над ТП на малих (1,0–1,6 м) відстанях від джерела. Показана можливість нормалізації МП для ТП великої потужності (400 та (2x400) кВА) на відстані біля 1,0 м при комбінованому активно-пасивному екрануванні з допомогою як синтезованих САЕ з коефіцієнтом екранування 10-15, так і відомого пасивного U-подібного екрану із алюмінієвого листа товщиною 1,5-4 мм і коефіцієнтом екранування 2,0-5,0 од.

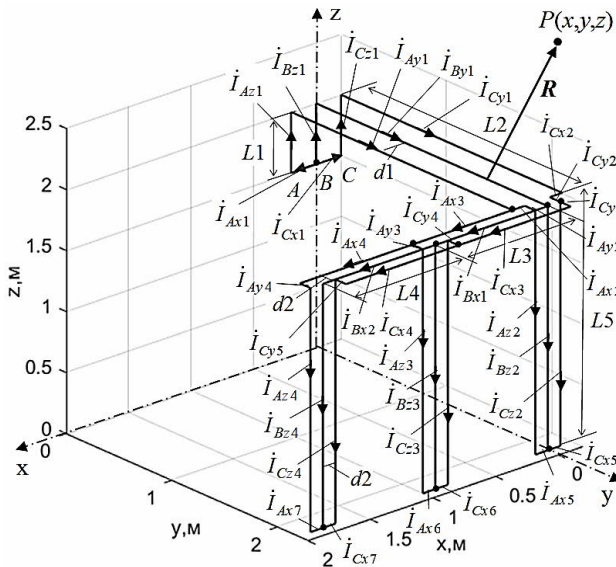


Рисунок 4.1 – Типовий трифазний низковольтний струмопровід ТП 6(10)/0,4 кВ: $d1$, $d2$ – міжфазні відстані; $L1-L5$ – довжина прямолінійних ділянок; $i_{A(x,y,z)}$, $i_{B(x,y,z)}$, $i_{C(x,y,z)}$ – струм у прямолінійних ділянках

кції МП від прямолінійних ділянок фаз А, В, С зі струмами i_A , i_B , i_C . Так, компоненти індукції МП для фази А:

$$\dot{B}_x(i_A) = \sum_n \dot{B}_{z_x}(i_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_k \dot{B}_{y_x}(i_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}), \quad (4.1)$$

$$\dot{B}_y(i_A) = \sum_n \dot{B}_{z_y}(i_{Az,n}, x_{0,n}, y_{0,n}, Z_{1,2,n}) + \sum_v \dot{B}_{x_y}(i_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}), \quad (4.2)$$

$$\dot{B}_z(i_A) = \sum_v \dot{B}_{x_z}(i_{Ax,v}, X_{1,2,v}, y_{0,v}, z_{0,v}) + \sum_k \dot{B}_{y_z}(i_{Ay,k}, x_{0,k}, Y_{1,2,k}, z_{0,k}), \quad (4.3)$$

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 ; N , K , V – кількість прямолінійних ділянок, паралельних осі Z , Y , X відповідно. Компоненти індукції для інших фаз визначаються аналогічно.

Тоді компоненти індукції МП струмопроводу та його діюче значення \tilde{B} :

$$\dot{B}_x = \dot{B}_x(i_A) + \dot{B}_x(i_B) + \dot{B}_x(i_C), \quad \dot{B}_y = \dot{B}_y(i_A) + \dot{B}_y(i_B) + \dot{B}_y(i_C), \quad (4.4)$$

$$\dot{B}_z = \dot{B}_z(i_A) + \dot{B}_z(i_B) + \dot{B}_z(i_C), \quad \tilde{B} = \sqrt{\dot{B}_x^2 + \dot{B}_y^2 + \dot{B}_z^2}. \quad (4.5)$$

Верифікація математичної моделі МП ТП виконана шляхом порівняння результатів розрахунку за (4.1-4.5) і вимірів (рис. 4.2 б) МП макету струмопроводу ТП 100 кВА (рис. 4.2 а). Їх розкид не перевищує 5 %.

Методи зменшення МП в житлових приміщеннях над вбудованими ТП.

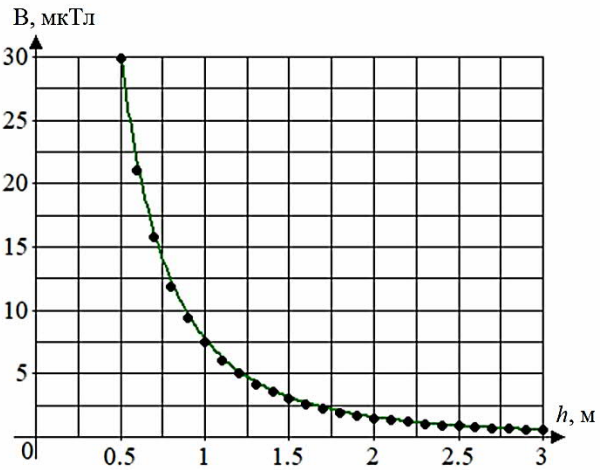
Для зменшення МП ТП теоретично можливо використання всіх відомих методів та засобів: конструктивно-технологічних методів удосконалення конструкції ТП, активного та пасивного екранування. Однак враховуючи те, що в роботі йде мова про діючі вбудовані ТП, фізичний та юридичний доступ до яких обмежений, в подальшому розглядаються тільки методи екранування, які реалізуються без втручання в конструкцію ТП.

При цьому МП у точці спостереження P визначається векторною сумою індукції від кожної з прямолінійних ділянок струмопроводу (рис. 4.1). Моделювання виконуємо при припущенні, що всі прямолінійні ділянки струмопроводу зорієнтовані паралельно координатним осям і моделюються струмовими нитками.

При побудові моделі МП струмопроводу відповідно до (2.2) спочатку визначаємо просторові компоненти індукції МП для ділянок струмопроводу (рис. 4.1), що зорієнтовані паралельно окремим координатним осям X, Y, Z . Загальна математична модель МП (рис. 4.1) представляється як векторна сума інду-



а



б

Рисунок 4.2 – Лабораторний макет струмопроводу низької напруги ТП 10/0,4 кВ, 100 кВА (а), розрахункові (—) та експериментальні (●●●) значення індукції МП струмопроводу ТП (б) в функції від висоти h точки вимірів над струмопроводом ТП.

Методи та засоби екранування МП ТП. Ефективність екранування МП частотою 50 Гц відомими простішими пасивними електромагнітними екранами (ПЕ) із мідних, алюмінієвих, або сталевих U-подібних пластин товщиною 1-4 мм, що встановлюються на стелі приміщення ТП (рис. 4.3), невелика і складає 1,5-5 одиниць. Крім того, ПЕ мають суттєву металоємність і вартість, і тому використовуються як додаткові засоби зменшення МП.

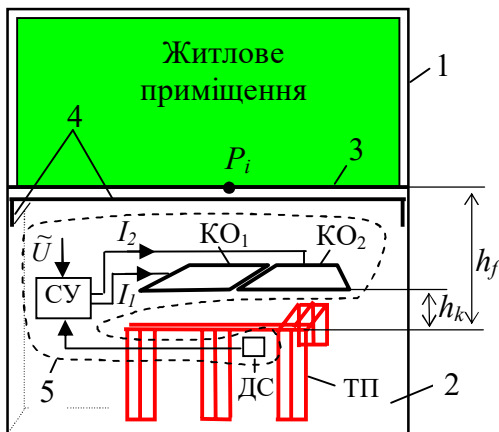


Рисунок 4.3 –Екранування МП над вбудованою в житловий будинок ТП: 1 – житловий будинок; 2 – приміщення ТП; 3 – підлога; 4 – ПЕ; 5 – САЕ

Більш ефективними і дешевими є САЕ (рис. 4.3), що реалізуються з однією чи двома компенсаційними обмотками (КО) в розімкненій структурі з датчиком струму (ДС) ТП.

Удосконалений метод синтезу САЕ МП ТП. Вихідним параметром синтезу є максимальна індукція МП ТП, що визначається в точці P_i (рис. 4.3) як:

$$\vec{B}_\Sigma = \sum_{n=1}^N \vec{B}_n(i_A) + \sum_{k=1}^K \vec{B}_k(i_B) + \sum_{m=1}^M \vec{B}_m(i_C), \quad (4.6)$$

де N, K, M – кількість прямолінійних ділянок

струмопроводу А, В, С. Тоді:

$$\dot{B}_x(P_i) = \sum_{n=1}^N \dot{B}_{x_n}(i_A) + \sum_{k=1}^K \dot{B}_{x_k}(i_B) + \sum_{m=1}^M \dot{B}_{x_m}(i_C), \quad \dot{B}_y(P_i) = \sum_{n=1}^N \dot{B}_{y_n}(i_A) + \sum_{k=1}^K \dot{B}_{y_k}(i_B) + \sum_{m=1}^M \dot{B}_{y_m}(i_C), \quad (4.7)$$

$$\dot{B}_z(P_i) = \sum_{n=1}^N \dot{B}_{z_n}(i_A) + \sum_{k=1}^K \dot{B}_{z_k}(i_B) + \sum_{m=1}^M \dot{B}_{z_m}(i_C). \quad (4.8)$$

Шуканими параметрами САЕ є технічні і геометричні параметри КО:

$$D_{coil} = \{x_i, y_i, z_i\}, \quad (4.9)$$

де x_i, y_i, z_i координати кутів КО, та амплітуди Im_k і фази φ_k струмів КО

$$I_{coil} = \{Im_k, \varphi_k\}. \quad (4.10)$$

$$F = \{D_{coil}, I_{coil}\}. \quad (4.11)$$

Індукцію МП САЕ визначаємо як векторну суму індукцій МП від прямо- лінійних ділянок КО:

$$\vec{B}_{coil}(F, P_i) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_k^K \left(i_k \sum_{n=1}^N \frac{\vec{D}_{k,n} \times \vec{R}_{k,n}}{R_{k,n}^3} \right), \quad (4.12)$$

Тоді індукція МП ТП, екранованого САЕ:

$$\vec{B}(F, P_i) = \vec{B}(P_i)_\Sigma + \vec{B}_{coil}(F, P_i). \quad (4.13)$$

А шукані параметри САЕ визначаються співвідношенням:

$$F^* = \arg \max_{P_i} \min_F |\vec{B}(F, P_i)|. \quad (4.14)$$

Для розв'язання (4.14) можуть бути використані різні методи оптимізації (стохастичні методи, генетичні алгоритми, та інші), які суттєво не впливають на результат синтезу, а визначають тільки швидкість його отримання.

Експериментальна перевірка розробленого методу синтезу. Експериментальна установка (рис. 4.4 а) складається з лабораторного макету синтезованої САЕ з макетом струмопроводу ТП 100 кВА.

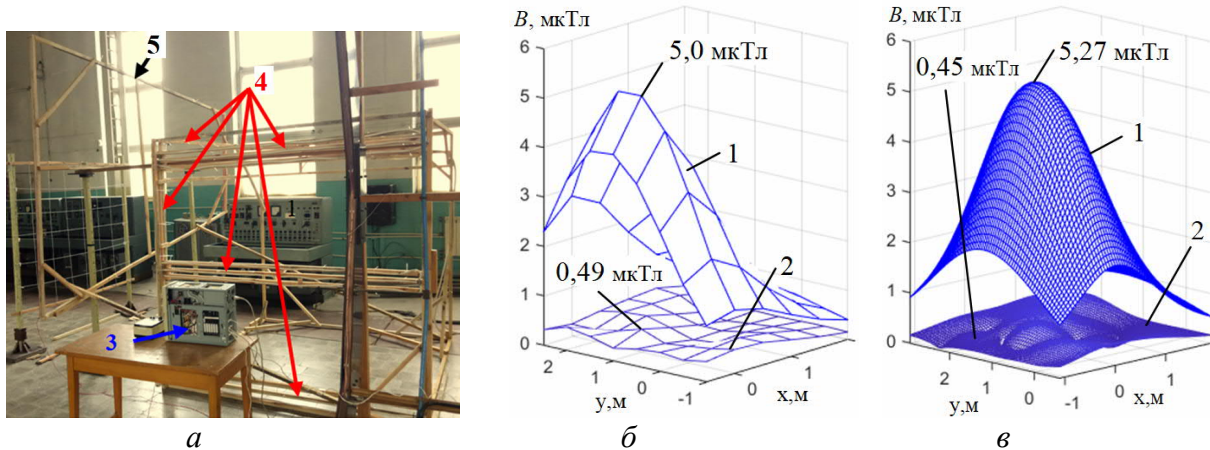


Рисунок 4.4 – Верифікація розробленого методу синтезу САЕ: а- експериментальна установка з лабораторним макетом САЕ для ТП 100 кВА (3, 5 – САЕ з КО, 4 – струмопровід ТП 0,4 кВ); б, в - результати вимірювання та розрахунку розподілу індукції МП ТП при $h_f = 1$ м (1 – МП вихідне, 2 – МП екрановане)

На рис. 4.4 б представлені результати вимірювання розподілу вихідного (1) і екранованого САЕ МП (2). Їх порівняння з результатами розрахунку (рис. 4.5 в) підтверджує коректність розробленого методу - розкид результатів не перевищує 10 %.

На рис. 4.5 побудовані залежності екранованої індукції МП ТП різної потужності в залежності від h_f . Синтезовані САЕ (криві 1-4) забезпечують нормалізацію МП для ТП 100 кВА при $h_f \geq 1,0$ м і для ТП 400 кВА при $h_f \geq 1,55$ м. Для нормалізації МП над ТП потужністю 200-400 кВА при $h_f \approx 1,0$ м необхідне сумісне використання як синтезованих САЕ, так і ПЕ з коефіцієнтом екранування 2-5 од (криві 5-8). В якості таких ПЕ можуть бути використані відомі U-подібні електропровідні екрани з листового алюмінію товщиною 2-4 мм, що розміщуються на стелі приміщення ТП відповідно до рис. 4.3.

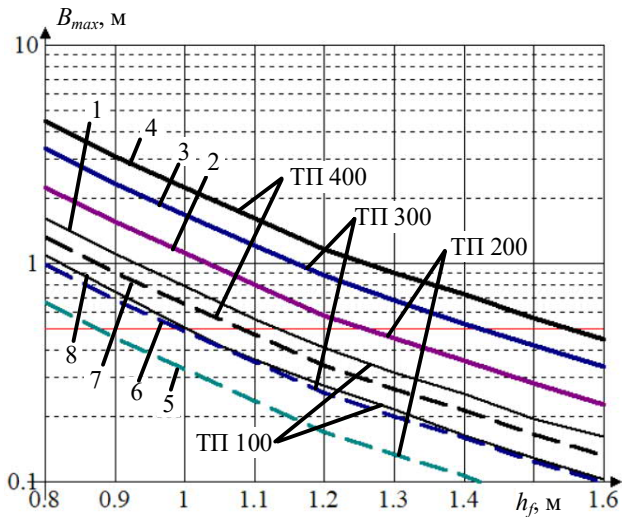


Рисунок 4.5 – Індукція МП над вбудованими ТП при окремому використанні синтезованих САЕ (1-4), та використанні САЕ сумісно з пасивними екранами (ПЕ) (5-8): 1 – САЕ з однією КО; 2-4 – САЕ з двома КО; 5-8 – САЕ з двома КО та U -подібним ПЕ

що максимально наближене до житлових приміщень. Але їх МП досліджене недостатньо. Основними елементами СКЕ (рис. 5.1 а) є резистивні нагрівальні кабелі (НК), які монтуються під поверхнею підлоги на глибині h_k . НК живляться від квартирної електромережі 220 В і розраховані на номінальний струм 10-15 А.

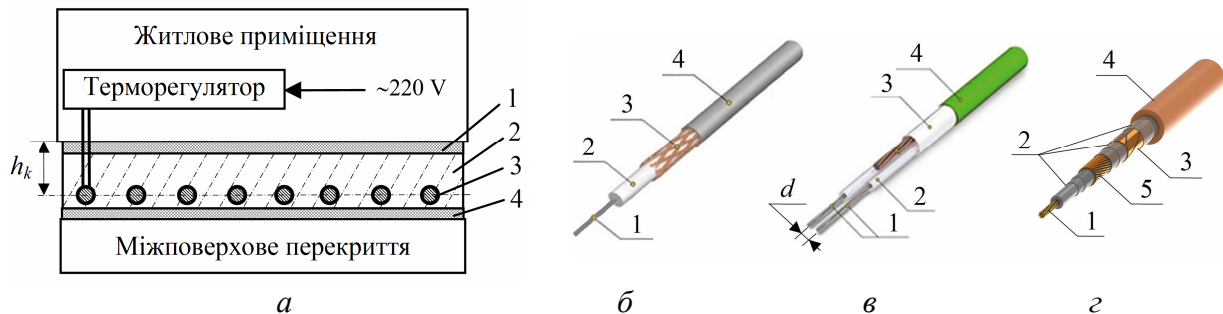


Рисунок 5.1 – Типова конструкція СКЕ (а) і конструкція її НК (одножильний (б), двожильний планарний (в), двожильний коаксіальний (г); (1, 5 – нагрівальні (струмопровідні) жили, 2 – електроізоляція, 3 – електропровідний заземлювальний екран; 4 – зовнішня електроізоляція)

Конструктивно НК виконуються одножильними або двожильними (рис. 5.1 б-г), та створюють МП різного рівня. НК монтуються під підлогою у вигляді «змійки» (меандру) із кроком 80-120 мм (рис. 5.2). Це робить розподіл МП СКЕ відмінним від МП одиночних НК.

Математичні моделі МП різних кабелів. Індукція МП одножильного НК (рис. 5.1 б) зі струмом I на відстані r визначається відомим співвідношенням:

$$B_{ок} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}. \quad (5.1)$$

Максимальне значення індукції МП двожильного планарного кабелю, жили якого розташовані в горизонтальній площині XU , розподілено по вертикальній

У п'ятому розділі досліджено МП внутрішніх електромереж (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.

СКЕ є потужним джерелом МП,

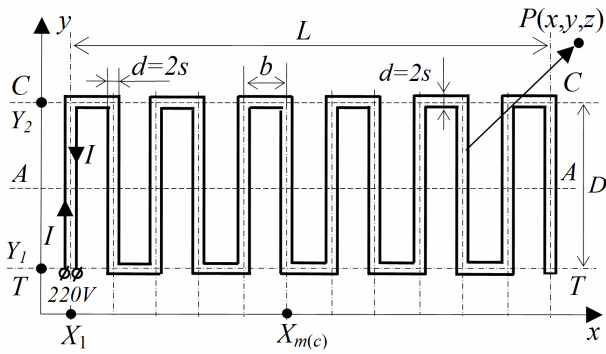


Рисунок 5.2 – Геометрія прокладання СКЕ під підлогою з двожильного НК

осі Z . При розгляді індукції тільки вздовж осі Z , на висоті r від НК, задача визначення його МП в силу симетрії суттєво спрощується. Виконуючи закон Біо-Савара та елементарні геометричні побудови, автором отримано співвідношення для розрахунку індукції МП двожильного планарного НК із відстанню між жилами d :

$$B_{DPK \max} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{Id}{\left\{r^2 + (0,5d)^2\right\}}. \quad (5.2)$$

Двожилний коаксіальний НК (рис. 5.1 з) теоретично має нульове зовнішнє МП. Однак в зв'язку з технологічними відхиленнями геометрії реального коаксіального НК від симетричної форми, вісь внутрішньої жили НК може зміщуватися на величину ексцентриситету e . Тому зовнішнє МП реального коаксіального НК буде збігатися з МП умовного двожильного планарного НК (5.2), в якому відстань між його жилами d відповідає величині ексцентриситету e . З урахуванням викладеного та (5.2), індукція МП коаксіального НК:

$$B_{DKK \max} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{Ie}{\left\{r^2 + (0,5e)^2\right\}}. \quad (5.3)$$

Внутрішня електропроводка приміщення (ВЕЖ) виконана із прокладених в стінах двожилних планарних кабелів із d біля 5 мм і струмом до 30 А. ВЕЖ створює МП, індукція якого розрахована відповідно до (5.2) на нормованій відстані від стіни 0,5 м не буде перевищувати 0,12 мкТл, що дозволяє в подальшому знехтувати впливом ВЕЖ.

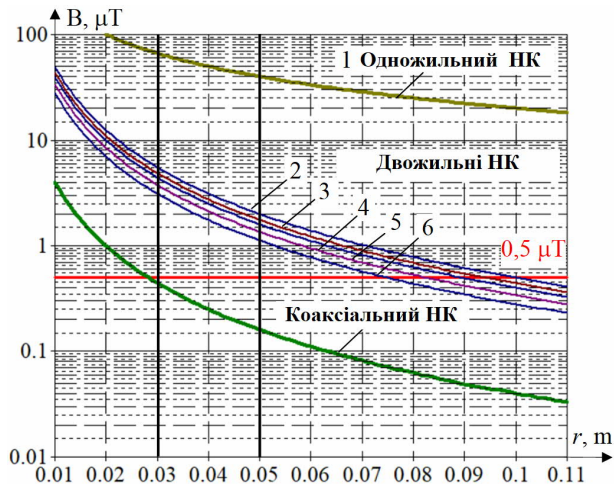


Рисунок 5.3 – Індукція МП НК на відстані r по осі Z , $I = 10$ А (планарні d : 2-2,5 мм; 3 – 2,2 мм; 4 – 2,0 мм; 5 – 1,7 мм; 6 – 1,4 мм; коаксіальний з $e = 0,2$ мм);

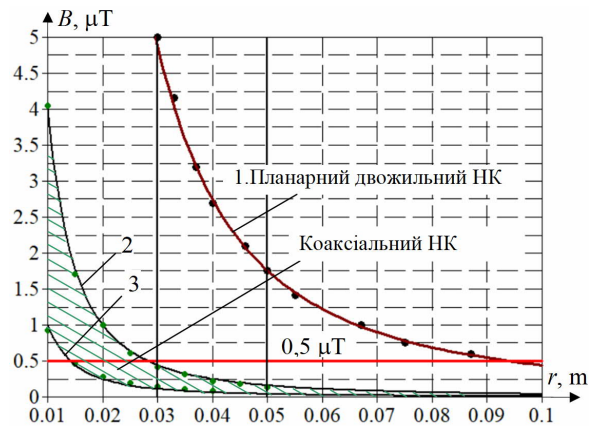


Рисунок 5.4 – Розрахункові — та експериментальні ●●● значення індукції МП планарного НК «Arnold Rak», $d = 2,2$ мм (1), та коаксіального НК «Volterm» $e = 0,2-0,05$ мм (2, 3), 10 А

Використаємо отримані співвідношення (5.1-5.3) для розрахунку індукції МП НК (рис. 5.3). Так, індукція МП одножилного НК при рекомендованій ви-

робниками глибині прокладання 0,03-0,05 м складає 40-65 мкТл, що в 80-130 разів перевищує 0,5 мкТл, що виключає їх установку в житлових приміщеннях. Індукція МП дво жильних планарних НК при h_k 0,03-0,05 м в залежності від d (рис. 5.3) складає від 2,0 до 5,5 мкТл, що також перевищує нормативний рівень 0,5 мкТл і потребує збільшення h_k до 0,1м. Індукція МП коаксіального НК при $e = 0,2$ мм і h_k 0,03-0,05 м складає від 0,16 до 0,45 мкТл і не перевищує 0,5 мкТл. Тому коаксіальні НК з ексцентриситетом на рівні $0,1d$ ($\approx 0,2$ мм), можуть безпечно експлуатуватися у житлових приміщеннях при $h_k=0,03$ м.

Результати експериментальних досліджень МП серійних планарного і коаксіального НК представлені на рис. 5.4. Їх розкид в порівнянні з результатами розрахунку не перевищує 5%.

Математична модель МП СКЕ (рис. 5.2) побудована на основі за закону Біо-Савара та принципу суперпозиції з визначенням результату у вигляді суми просторових компонент індукції МП від прямолінійних ділянок СКЕ, прокладених паралельно відповідним координатним осям. В результаті отримуємо розрахункові співвідношення для індукції МП СКЕ з НК:

$$B_x = \sum_{m=1}^{m=K/2} [BY_x(X_{2m-1} - s, Y_1 + s, Y_2 + s) + BY_x(X_{2m} + s, Y_2 + s, Y_1 + s) + BY_x(X_{2m-1} + s, Y_2 - s, Y_1 - s) + BY_x(X_{2m} - s, Y_1 - s, Y_2 - s)] + BY_x(X_K + s, Y_1 + s, Y_1 - s); \quad (5.4)$$

$$B_y = \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_y(Y_2 + s, X_{2c-1} - s, X_{2c} + s) + BX_y(Y_1 + s, X_{2c} + s, X_{2c+1} - s) + BX_y(Y_2 - s, X_{2c} - s, X_{2c-1} + s) + BX_y(Y_1 - s, X_{2c+1} + s, X_{2c} - s)] + BX_y(Y_2 + s, X_{K-1} - s, X_K + s) + BX_y(Y_2 - s, X_K - s, X_{K-1} + s) + BX_y(Y_1 - s, X_K + s, X_K - s); \quad (5.5)$$

$$B_z = \sum_{m=1}^{m=K/2} [BY_z(X_{2m-1} - s, Y_1 + s, Y_2 + s) + BY_z(X_{2m} + s, Y_2 + s, Y_1 + s) + BY_z(X_{2m-1} + s, Y_2 - s, Y_1 - s) + BY_z(X_{2m} - s, Y_1 - s, Y_2 - s)] + BY_z(X_K + s, Y_1 + s, Y_1 - s) + \sum_{c=1}^{c=K/2-1} [BX_z(Y_2 + s, X_{2c-1} - s, X_{2c} + s) + BX_z(Y_1 + s, X_{2c} + s, X_{2c+1} - s) + BX_z(Y_2 - s, X_{2c} - s, X_{2c-1} + s) + BX_z(Y_1 - s, X_{2c+1} + s, X_{2c} - s)] + BX_y(Y_2 + s, X_{K-1} - s, X_K + s) + BX_y(Y_2 - s, X_K - s, X_{K-1} + s) + BX_y(Y_1 - s, X_K + s, X_K - s). \quad (5.6)$$

$$\tilde{B}(P) = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}. \quad (5.7)$$

Використаємо співвідношення (5.4-5.7) для розрахунку індукції потенційного МП СКЕ, враховуючи, що максимальні значення індукції МП зосереджені на підлозі приміщення. Результати розрахунку розподілу МП СКЕ з промисловим зразком планарного дво жильного НК представлені на рис. 5.5 а, а на рис. 5.5 б наведені характерні графічні залежності. Максимальні значення індукції СКЕ (рис. 5.5) складають 2,16 мкТл, що перевищує нормативний рівень. Вони є більшими від МП одиночного НК (рис. 5.3) приблизно на 15% і мають місце на вершинах розкладання – по лініях ТТ та СС (рис. 5.2).

Результати розрахунку розподілу МП СКЕ з промисловим зразком коаксіального НК, виконаного відповідно до рис. 5.1 з, представлені на рис. 5.6 а, а на рис. 5.6 б наведені розраховані графічні залежності. Як видно з рис. 5.6, максимальні значення індукції СКЕ складають 0,196 мкТл, що істотно менше нормативного рівня 0,5 мкТл.

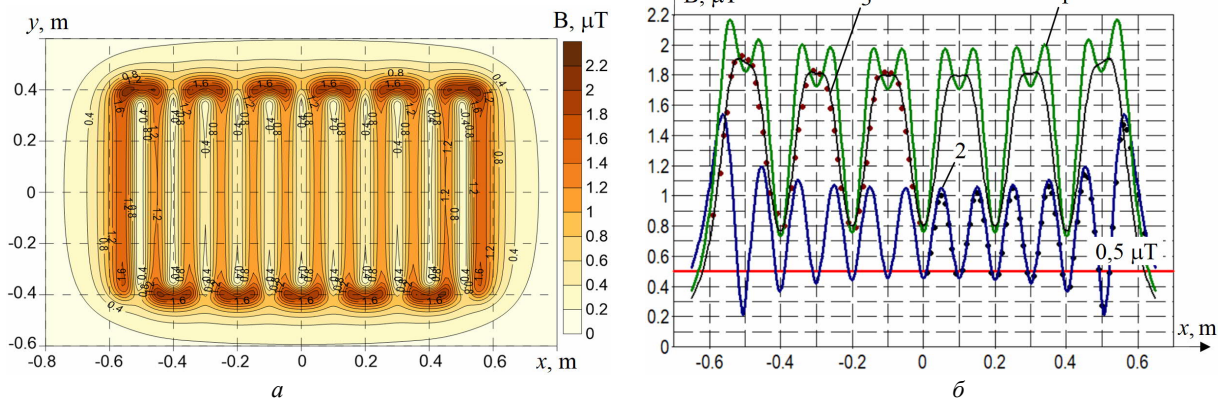


Рисунок 5.5 – Розподіл МП від СКЕ з дво жильним планарним НК типу Arnold Rak 6101-20 ЕС ($I = 10$ А, $d = 2,2$ мм), на поверхні підлоги при $h_k = 0,05$ м (СКЕ з прямокутним розкладанням НК (рис. 5.2): 1 – по лінії СС; 2 – по лінії АА); 3 – СКЕ з розкладанням НК «змійкою» (рис. 5.7) по лінії СС (рис. 5.2), (— розрахунок ●●● експеримент)

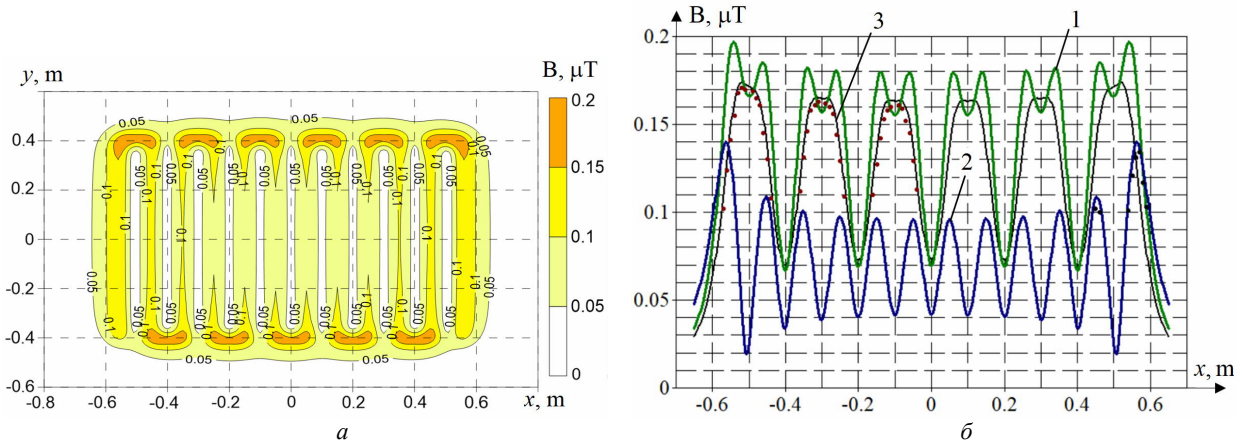


Рисунок 5.6 – Розподіл МП від СКЕ з коаксiальним НК типу «Volterm HR18» ($I = 10$ А, $e = 0,2$ мм), на поверхні підлоги при $h_k = 0,05$ м (СКЕ з прямокутним розкладанням НК (рис. 5.2): 1 – по лінії СС; 2 – по лінії АА); 3 – СКЕ з розкладанням НК «змійкою» (рис. 5.7) по лінії СС (рис. 5.2), (— розрахунок ●●● експеримент)

Експериментальні дослідження індукції МП виконувались на лабораторних макетах СКЕ (рис. 5.7) з вказаними типами НК. Результати вимірювань представлені на рис. 5.5, 5.6. Розкид результатів розрахунку та експерименту не перевищує 7%.

На основі (5.4-5.7), розраховані максимальні значення індукції, що створюються СКЕ з сучасними планарними НК, та коаксiальними НК з ексцентриситетом $e = 0,2$ мм і $e = 0,1$ мм. Результати розрахунку у вигляді графіків представлені на рис. 5.8, аналіз яких дозволяє зробити наступні висновки.

При використанні в СКЕ сучасних дво жильних НК, максимальне значення індукції МП на підлозі житлових приміщень складає 3,75-1,3 мкТл при 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. Тому безпечно використання СКЕ з сучасними дво жильними НК можливо тільки при глибини їх прокладання не менш 0,085-0,1 м, або необхідно обмежувати їх струм і, відповідно, теплову потужність СКЕ.

Використання в СКЕ коаксiальних НК з ексцентриситетом $e \leq 0,2$ мм дозволяє зменшити індукцію МП СКЕ до нормативного рівня 0,5 мкТл при гли-

бині прокладання від 0,3 м. Тому широке запровадження коаксіальних НК є ефективним шляхом вирішення проблеми зменшення можливих ризиків для здоров'я населення та забезпечення його комфортного проживання.



Рисунок 5.7 – Вимірювання розподілу індукції МП лабораторного макету СКЕ з коаксіальним НК типу «VOLTERM» на магнітовимірювальному стенді ІЕМС НАН України

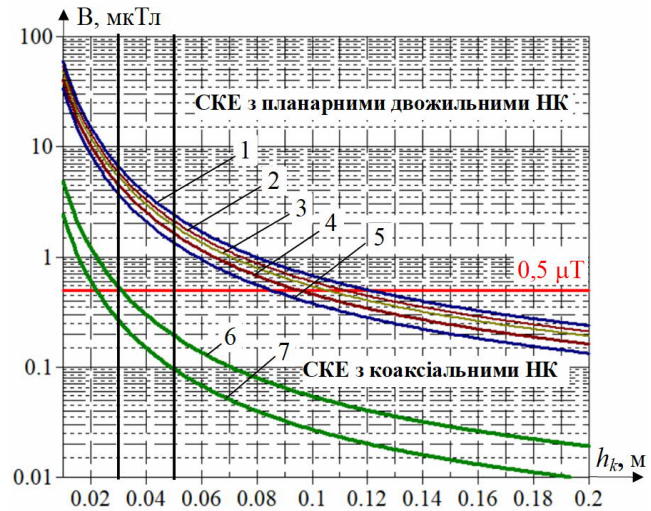


Рисунок 5.8 – Максимальні значення індукції МП СКЕ на поверхні підлоги з двожильними планарними НК (d : 1 – 2,5 мм; 2 – 2,2 мм; 3 – 2,0 мм; 4 – 1,7 мм; 5 – 1,4 мм) та коаксіальними НК (6 – $e = 0,2$ мм; 7 – $e = 0,1$ мм) при глибині їх прокладання h_k , $I = 10$ А

У шостому розділі виконані дослідження комплексного впливу зовнішніх та внутрішніх електромереж на рівень МП в житлових приміщеннях будинків. 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 та методи нормалізації МП від групи електромереж, що підтверджені результатами експерименту. Її використання дозволяє знизити необхідний коефіцієнт нормалізації K_m МП окремих електромереж на 12 - 50 % і відповідно зменшити економічні витрати на нормалізацію МП в приміщенні.

В попередніх дослідженнях автора основна увага приділялась дослідженню індивідуального впливу окремих електромереж за МП на житлові приміщення. Однак інтенсивність впливу може посилитись при наявності групи електромереж, що наближені до житлових будинків, або знаходяться всередині них. Показано, що до таких електромереж в першу чергу належать високовольтні повітряні ЛЕП, низьковольтні струмопроводи (СТП) вбудованих ТП і системи кабельного електрообігріву підлог (СКЕ) житлових приміщень.

Разом з тим, розподіл МП в житлових приміщеннях будинків за умов комплексного впливу кількох (n) електромереж (рис. 6.1) досі залишається не дослідженим. Навіть якщо вплив кожної з цих електромереж буде обмежений індукцією $\tilde{B}_{norm} = 0,5$ мкТл (нормалізований), то при їх комплексному впливі сумарна індукція МП \tilde{B}_Σ може значно перевищувати нормативний рівень 0,5 мкТл. Так, рівень \tilde{B}_Σ залежить від численних параметрів електромереж та їх

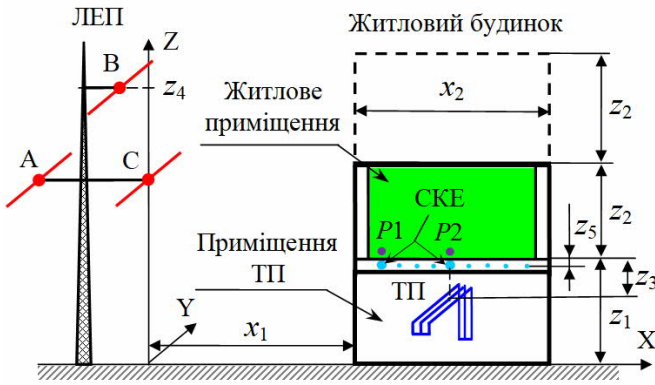


Рисунок 6.1 – Житловий будинок із вбудованою трансформаторною підстанцією як елемент електротехнічного комплексу, що складається із зовнішніх (ЛЕП) і внутрішніх (ТП, СКЕ) електромереж.

паралельно координатним осям; струми синусоїдальні, симетричні, моделюються струмовими нитками і можуть мати різний напрямок передачі потужності; в досліджуваній зоні 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 ТП трифазне тривимірне і моделюється його низьковольтним струмопроводом, МП СКЕ характеризується вертикальною компонентою z і моделюється прямолінійними відрізками дво жильних нагрівальних кабелів, що живляться від напруги 220 В.

Визначення комплексного впливу групи електромереж. 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:

$$b_{\Sigma i, \lambda, x}(P, t) = \sum_{i=1}^n \beta^i b_{\lambda, x}(P, t); \quad b_{\Sigma i, \lambda, y}(P, t) = \sum_{i=1}^n \beta^i b_{\lambda, y}(P, t); \quad b_{\Sigma i, \lambda, z}(P, t) = \sum_{i=1}^n \beta^i b_{\lambda, z}(P, t). \quad (6.1)$$

При цьому параметри досліджуваних електромереж визначаються співвідношеннями:

$$\beta^i \in (-1, +1), \quad \omega = 2\pi f, \quad f = 50 \text{ Гц}; \quad (6.2)$$

$$\lambda = (A, C, B); \quad i = 1 \equiv \text{ЛЕП}, \quad i = 2 \equiv \text{ТП}, \quad i = 3 \equiv \text{СКЕ}, \quad (6.3)$$

$$A^i \sim \sin(\omega t - \varphi_i), \quad B^i \sim \sin(\omega t + 2\pi/3 - \varphi_i), \quad C^i \sim \sin(\omega t - 2\pi/3 - \varphi_i), \quad (6.4)$$

де i , n – номер і кількість електромереж; β^i – коефіцієнт напрямку передачі.

При аналізі також враховуємо додаткові умови, що обумовлені прийнятими вище припущеннями:

$$\varphi_{\text{ЛЕП}} = 0; \quad \varphi_{\text{ТП}} = 0; \quad \varphi_{\text{СКЕ}} = \pi/6, \quad b_{\text{ЛЕП } y}(P) = b_{\text{СКЕ } x}(P) = b_{\text{СКЕ } y}(P) = 0 \quad (6.5)$$

Визначення величини впливу за МП групи електромереж на населення здійснюємо через діючі значення індукції МП $\tilde{B}^i(P)$:

поєднання і може варіюватися в межах $\tilde{B}_{\Sigma} \in (\tilde{B}_{\text{norm}}(1..n))$ з максимальним граничним значенням $n\tilde{B}_{\text{norm}}$.

Відсутність можливості визначити реальний рівень сумарного МП \tilde{B}_{Σ} змушує враховувати його максимальне значення $n\tilde{B}_{\text{norm}}$. Це може призвести до запровадження методів зменшення індукції МП з надмірною ефективністю, та викликати нераціональні економічні втрати.

При аналізі прийняті наступні припущення: напруги всіх n електромереж синхронізовані, а їх $\cos \varphi = 1$; струмопроводи зорієнтовані

$$\tilde{B}_i(P) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [b_i(P, t)]^2 dt}, \quad T = 2\pi/\omega. \quad (6.6)$$

Тоді на основі (6.1-6.3) та (6.7), отримаємо:

$$\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, x}(P, t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (b_{\Sigma i, \lambda, x}(P, t))^2 dt}, \quad \tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, y}(P, t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (b_{\Sigma i, \lambda, y}(P, t))^2 dt}, \quad (6.7)$$

$$\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, z}(P, t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (b_{\Sigma i, \lambda, z}(P, t))^2 dt}, \quad (6.8)$$

Шукане діюче значення модуля індукції МП для групи з n електромереж $\tilde{B}_{\Sigma}(P)$ визначається як середньоквадратична сума (6.7, 6.8):

$$\tilde{B}_{\Sigma}(P) = \sqrt{[\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, x}(P)]^2 + [\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, y}(P)]^2 + [\tilde{B}_{\Sigma i, \lambda, z}(P)]^2}, \quad (6.9)$$

яке відповідно до чинних нормативів не повинно перевищувати індукцію 0,5 мкТл у житловому приміщенні.

Використаємо (6.1-6.9) для визначення впливу ЛЕП, ТП та СКЕ на рівень МП в житловому приміщенні (рис. 6.1). Для цього визначимо миттєві значення просторових компонент x , y , z індукції МП окремих електромереж.

Для повітряних ЛЕП миттєві значення просторових компонент індукції їх МП можуть бути визначені відповідно до співвідношень (2.7, 2.8). Для вбудованих ТП ці миттєві значення визначаються відповідно до (4.3-4.9). Для СКЕ розглядається найгірший випадок. 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. 6.1). Тоді миттєве максимальне значення індукції МП СКЕ, яка виконана двожильним нагрівальним кабелем, при струмі $I_{СКЕ}$, визначається його просторовою компонентою z відповідно до (5.2) як:

$$b_{A,z}(r, P) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{2} \cdot I_{СКЕ} \cdot d}{[r^2 + (0,5d)^2]} \sin(\omega t - \varphi). \quad (6.10)$$

Параметри досліджуваних електромереж. В якості зовнішньої електромережі розглянемо типову повітряну ЛЕП 110 кВ, 250 А з трикутним підвісом проводів фаз, зорієнтованих паралельно осі y . Координати підвісу проводів А (-6,3 м; 7 м), В (-2,1 м; 13 м), С (0 м; 7 м), $x1=20$ м.

В якості вбудованої ТП (рис. 6.1) розглядаємо ТП потужністю 100 кВА, яку моделюємо низьковольтним струмопроводом (СТП) (рис. 4.1). Параметри СТП: $d1 = 0,16$ м, $d2 = 0,05$ м, $L1 = 0,5$ м, $L2 = 2,2$ м, $L3 = L4 = 0,9$ м, $L5 = 2$ м, номінальний струм $I = 150$ А, струми прямолінійних ділянок струмопроводу ($L1 - L5$): $I1 = I2 = I$, $I3 = I \cdot 2/3$, $I4 = I5 = I/3$.

Система СКЕ виконана із стандартних двожильних нагрівальних кабелів із відстанню між жилами 2,2 мм, має номінальний струм 10 А, $z5 = 0,05$ 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 дозволяє моделювати максимальне МП СКЕ в місці прокладання кабелю. Точки спостереження $P1$, $P2$ (рис. 6.1) знаходяться між струмопроводами ЛЕП і ТП, СКЕ. Житловий будинок (рис. 6.1) має приміщення ТП, та житлове приміщення над ТП, $z1 = 3,5$ м, $z2 = 2,5$ м, $z3 = 2,5$ м, $z4 = 13$ м. При розрахунку сумарного МП враховується, що точки спостереження $P1$, $P2$ (рис. 6.1) знаходяться між струмопроводами ЛЕП та ТП.

Дослідження комплексного впливу. Дослідження здійснюємо за співвідношеннями (6.1-6.10) шляхом комп'ютерного моделювання в програмному середовищі MATLAB за наступною методикою.

1. Встановлюємо величини початкових струмів ($I_{нач}$), ЛЕП, ТП, СКЕ, при яких кожна з цих електромереж окремо створює в приміщенні МП, діюче значення індукції якого дорівнює нормативному рівню $0,5$ мкТл

$$\tilde{B}_{ЛЕП} = \tilde{B}_{ТП} = \tilde{B}_{СКЕ} = \tilde{B}_{norm}. \quad (6.11)$$

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. У цих точках сумарна індукція буде максимальною.

2. Розраховуємо сумарне МП \tilde{B}_{Σ} , що створюється ЛЕП, ТП, СКЕ при виконанні умови (6.11), результати якого вносимо до табл. 6.1 при різних комбінаціях параметрів електромереж.

Таблиця 6.1 – Максимальне значення індукції сумарного МП ТП+ЛЕП+СКЕ \tilde{B}_{Σ} , значення $\tilde{B}_{\Sigma norm}$ та коефіцієнту K_m в функції зміні знаків струмів, і фази живлення СКЕ

№	ТП β^n , АВС	ЛЕП β^n , АВС	СКЕ β^n , фаза	\tilde{B}_{Σ} мкТл	$\tilde{B}_{\Sigma norm}$ мкТл	K_m	№	ТП β^n , АВС	ЛЕП β^n , АВС	СКЕ β^n , фаза	\tilde{B}_{Σ} мкТл	$\tilde{B}_{\Sigma norm}$ мкТл	K_m
1	+	+	+, a	0,84	0,3	1,68	13	+	+	+, a	1,09	0,23	2,18
2	+	+	-, a	0,84	0,3	1,68	14	+	+	-, a	0,91	0,28	1,82
3	+	-	+, a	1,14	0,22	2,28	15	+	-	+, a	1,12	0,22	2,24
4	+	-	-, a	0,97	0,26	1,94	16	+	-	-, a	0,79	0,32	1,58
5	+	+	+, b	0,66	0,38	1,32	17	+	+	+, b	0,77	0,33	1,54
6	+	+	-, b	0,69	0,36	1,38	18	+	+	-, b	1,09	0,23	2,18
7	+	-	+, b	1,22	0,2	2,44	19	+	-	+, b	0,87	0,29	1,74
8	+	-	-, b	0,94	0,27	1,88	20	+	-	-, b	0,87	0,29	1,74
9	+	+	+, c	0,93	0,27	1,86	21	+	+	+, c	0,96	0,26	1,92
10	+	+	-, c	0,79	0,32	1,58	22	+	+	-, c	0,81	0,31	1,62
11	+	-	+, c	0,91	0,28	1,82	23	+	-	+, c	0,74	0,34	1,48
12	+	-	-, c	1,32	0,19	2,64	24	+	-	-, c	1,11	0,23	2,22

3. Зменшуємо пропорційно струм $I_{нач}$ кожної електромережі по п. 1 методики до рівня, коли їх сумарне значення $\tilde{B}_{\Sigma 1}$ зменшиться до рівня $\tilde{B}_{norm} = 0,5$ мкТл за кожним пунктом табл. 6.1, а індукція кожної з електромереж буде складати $\tilde{B}_{\Sigma norm}$. При цьому визначаємо і заносимо до табл. 6.1 значення

індукції \tilde{B}_Σ при умові (6.11) та $\tilde{B}_{\Sigma norm}$ кожної з електромереж. Також визначаємо і фіксуємо в табл. 6.1 величини коефіцієнту нормування K_m , $K_m = \tilde{B}_\Sigma / \tilde{B}_{norm}$, $K_m \in (1 \div n)$, $\tilde{B}_{\Sigma norm} = \tilde{B}_{norm} / K_m$, що визначає необхідну величину зменшення сумарної індукції \tilde{B}_Σ для досягнення нормативного рівня. 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 виконані при дослідженні комплексного впливу двох різних електромереж в комбінаціях ЛЕП-ТП, ЛЕП-СКЕ, ТП-СКЕ.

Результати розрахунку максимального діючого значення індукції МП за (6.1-6.10) для характерних випадків відповідно до табл. 6.1 представлені у вигляді графіків на рис. 6.2.

Аналіз отриманих результатів показує, що для нормалізації комплексного впливу двох нормалізованих за МП електромереж, необхідно зменшення індукції МП кожної з них від 1,06 до 1,96 разів, а для трьох нормалізованих електромереж - зменшення від 1,32 до 2,64 разів.

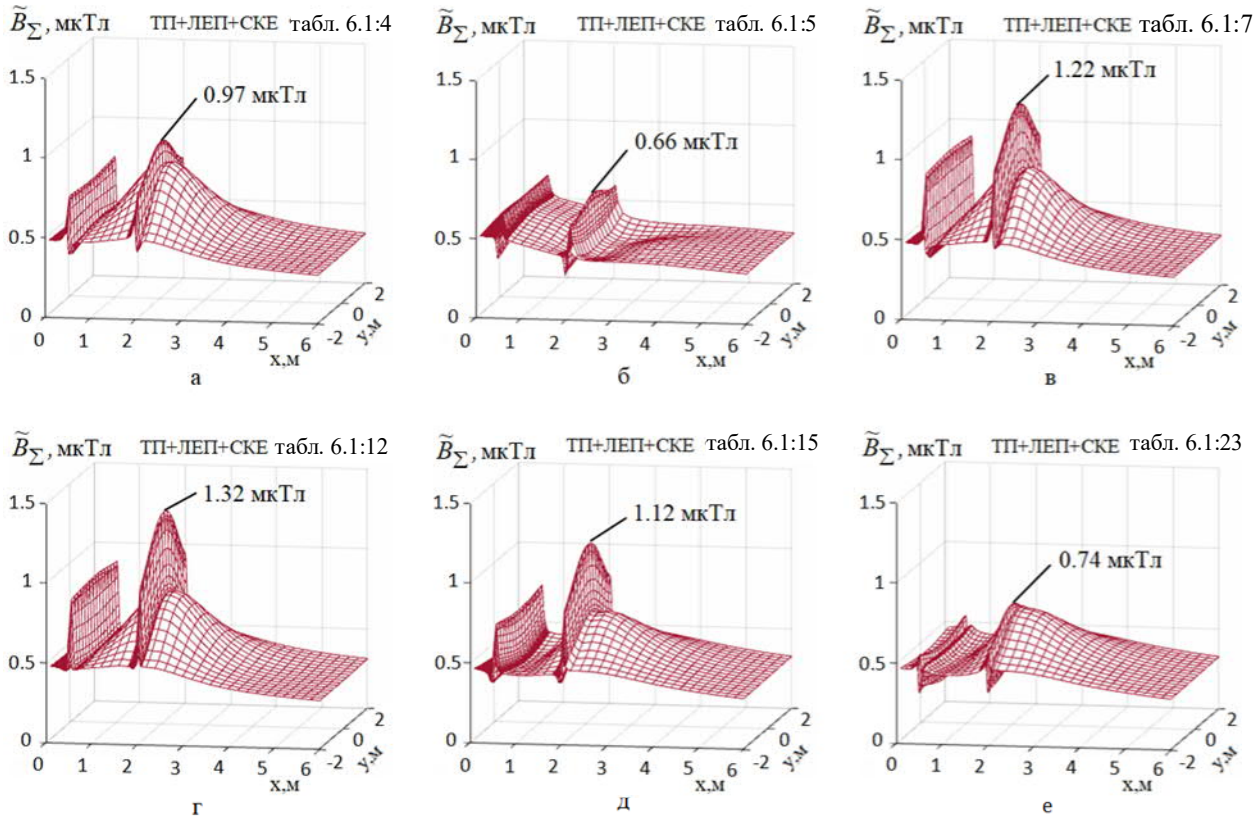


Рисунок 6.2 – Розподіл максимальних значень \tilde{B}_Σ в житловому приміщенні для характерних випадків (табл. 6.1) комплексного впливу ЛЕП, ТП, СКЕ

Більш складною є нормалізація комплексного впливу для групи електромереж, кожна з яких ще не нормалізована за МП, і перевищує 0,5 мкТл. У цьому випадку спочатку визначається необхідний початковий коефіцієнт нормалізації МП K_{mi} для кожної електромережі згідно з (6.12), а на другому етапі розраховується остаточний коефіцієнт нормалізації K_{mi} (6.12), який необхідно застосувати для нормалізації МП кожної електромережі:

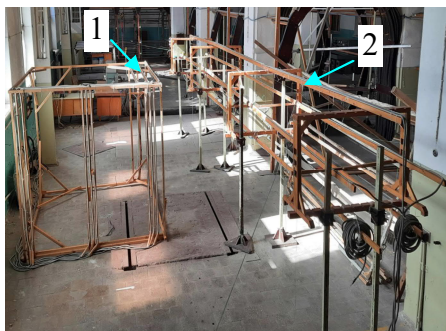


Рисунок 6.3 – Експериментальна установка для досліджень комплексного впливу ЛЕП і ТП за МП (1 - макет низьковольтного струмопроводу ТП, 150 А; 2 - макет трифазної ЛЕП, 150 А)

$$K_{mni} = \tilde{B}_i / \tilde{B}_{norm}, K_{mi} = K_{mni} K_m \quad (6.12)$$

Отримані результати моделювання за розробленими методами (6.1-6.10), були підтверджені експериментальними випробуваннями (рис. 6.3) лабораторних макетів ЛЕП, ТП, проведеними на магнітовимірювальному стенді Інституту енергетичних машин і систем ім. А.М. Підгорного НАН України. Відхилення між результатами моделювання та експерименту не перевищило 10 %.

Таким чином, теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено,

що реалізація запропонованих методів для визначення комплексного впливу реальних електромереж (повітряних ЛЕП 110 кВ, вбудованої ТП 6/10 кВ, систем кабельного електрообігріву 2,2 кВт) дозволяє зменшити необхідний коефіцієнт нормалізації K_m МП окремих електромереж на 12-56 %, та відповідно зменшити економічні витрати на нормалізацію сумарного МП.

ВИСНОВКИ

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 А2 і С2 (А1, В1, С1–С2, В2, А2) 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 від-

міну 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 100-2x400 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 (2x400) 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 дво жильних 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 ($I = 30$ 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 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., Пелевін 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., Пелевін 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., Пелевін 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. Пелевін Д.Є. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных 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. Экранирование магнитного поля промышленной частоты стенами жилых домов. *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., Reutskiy 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 належить 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 управління 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://eltechs.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 ферромагнітним каркасом житлового будинку.

18. Кузнецов Б.І., Бовдуй І.В., Пелєвін Д.Є., Волошко О.В., Винниченко О.В., Котлярів 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 «ХПИ». Серія «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика»*. Харків: НТУ «ХПИ», 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 «ХПИ». Серія: «Енергетика: надійність та енергоефективність»*. Харків: НТУ «ХПИ», 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.І 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/cgiirbis64.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., Реуцкий С.Ю., Пелєвін Д.Є., Грецьких С.В. Особенности расчета магнитного поля воздушных ЛЭП 330-750 кВ в зоне выполнения работ без снятия нагрузки. *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/Zbirka_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 симпозиуму SIEMA'2024, 24 - 25 жовтня 2024 р. Харків: НТУ «ХП», 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 розкіді струмів навантаження. *Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Тези доповідей XXVII Міжнародного симпозиуму SIEMA'2025, 30–31 жовтня 2025 р. Харків: НТУ «ХП», 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., 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 Міжнародного симпозиуму SIEMA'2025, 30–31 жовтня 2025 р. Харків: НТУ «ХП», 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.

АНОТАЦІЇ

Пелєвін Д.Є. Магнітне поле електромереж у житлових приміщеннях будинків та методи його зменшення до безпечного рівня. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.3 – 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 еле-

ктромережами, 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 електромережі 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 двожилих 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

Dmytro Pelevin. 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 $30.0 \mu\text{T}$ 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.

