

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

ОКУНЬ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.319.7:621.3.013:621.311.4-742

ОБМЕЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ПІДСТАНЦІЙ ВИСОКОЇ НАПРУГИ  
ЗА РАХУНОК ЗМЕНШЕННЯ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
**Шевченко Сергій Юрійович**,  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут»,  
професор кафедри передачі електричної енергії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Бржезицький Володимир Олександрович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,  
в.о. завідувача кафедри техніки та електрофізики  
високих напруг

кандидат технічних наук  
**Кравченко Юрій Володимирович**,  
ТОВ «Союзернергопроект», м. Харків,  
провідний інженер

Захист відбудеться «16» травня 2013 р. о 15 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розіслано «22» березня 2013 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Реконструкція міських підстанцій високої напруги для можливості електропостачання об'єктів різного призначення, вимагає встановлення силових трансформаторів з більшою номінальною потужністю, яке тягне за собою збільшення відведеної території для підстанції та її охоронної зони. Прилеглі будівлі після реконструкції підстанції могли знаходитися в межах зон, на яких перевищуються гранично допустимі значення електричного та магнітного полів, встановлені для населення нормативними документами України.

Сьогодні проводиться активна робота по перегляду діючих нормативних документів на граничні рівні магнітного поля з урахуванням досвіду європейських країн. Епідеміологічні дослідження показали статистичну залежність між рівнями магнітного поля і дитячою лейкемією, а спеціалізована агенція з онкологічних досліджень при Всесвітній організації охорони здоров'я класифікувала магнітне поле промислової частоти в умовах тривалого впливу як «можливо канцерогенне для організму людини». Окрім цього в декількох європейських країнах (Норвегії, Данії, Нідерландах, Швеції, а також трьох областях Італії) введено граничні (середньорічні, «дослідницькі») значення магнітного поля 0,1–0,4 мкТл. Оскільки наведені гранично допустимі значення магнітної індукції значно нижче діючих українських норм (1725 мкТл), то за межами міських підстанцій зазначені значення можуть бути перевищені.

Таким чином, вплив електромагнітного поля, створюваного міськими підстанціями високої напруги, на населення та навколишнє середовище, а також можливість застосування незатратних заходів, спрямованих на обмеження даного впливу, є актуальною науково-практичною задачею, яка і визначила напрям дисертаційних досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» в рамках госпдоговірної теми «Дослідження та розрахунок впливу на навколишнє середовище електромагнітних полів високовольтного обладнання електричних мереж» (АК «Харківобленерго», м. Харків, № ДР 0111U008463), в якій здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є визначення електромагнітної обстановки, створюваної підстанціями високої напруги, розташованих у межах міста, і обмеження впливу електромагнітного поля промислової частоти підстанцій на населення та навколишнє середовище.

У рамках поставленої мети сформульовані такі задачі:

- проаналізувати наявні методи та програмні засоби розрахунку електричних та магнітних полів, що створюються підстанціями високої напруги;
- розробити та обґрунтувати тривимірну розрахункову модель підстанції, яка дозволила б ураховувати основне підстанційне обладнання при розрахунках електричних і магнітних полів, на основі застосування чисельних методів з використанням програмних засобів;

- провести теоретичні дослідження електричних полів, які створюються типовими міськими підстанціями високої напруги, та розробити інженерний аналітичний спосіб визначення напруженості електричного поля за їх межами;

- провести теоретичні дослідження магнітних полів, які створюються типовими міськими підстанціями високої напруги, проаналізувати заходи, які дозволять зменшити величини магнітної індукції поза територією підстанцій, і оцінити ефективність їх застосування на стадії проектних робіт.

*Об'єкт дослідження* – електромагнітне поле промислової частоти електроенергетичних об'єктів високої напруги.

*Предмет дослідження* – розподіл напруженості електричних і індукції магнітних квазістатичних тривимірних полів, що створюються міськими електричними підстанціями високої напруги відкритого виконання.

**Методи дослідження** базуються на наукових положеннях теорії електромагнітного поля та теоретичної електротехніки. Для розрахунків розподілу електричного та магнітного полів використовувалися чисельні методи скінченних елементів та скінченного інтегрування, а також аналітичний спосіб на основі закону Біо–Савара–Лапласа. Урахування землі при польових розрахунках вводилося за допомогою методу дзеркальних відображень. При експериментальних дослідженнях використано метод вимірювання магнітної індукції лінії електропередавання 110 кВ.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у тому, що

- дістали подальший розвиток умови завдання струмів і напруг у проводах ошиновки підстанцій та ліній електропередавання з горизонтальним розташуванням проводів за рахунок заміни розрахунку електричного та магнітного полів в кожен момент часу за період промислової частоти трьома миттєвими станами, які відповідають максимальним значенням поблизу та на віддалені від проводів;

- на основі аналізу результатів розрахунку електричного поля ліній електропередавання високої напруги вдосконалена розрахункова модель металевих конструкцій зі складною геометрією підстанцій та повітряних ліній електропередавання за рахунок заміни таких конструкцій багатогранниками з нульовим потенціалом, що дозволило уніфікувати моделювання зазначених конструкцій;

- вперше запропоновано метод обмеження магнітного поля за межами підстанцій високої напруги шляхом симетричного чергування фаз проводів ошиновки сусідніх ланок і ярусів, що дозволяє зменшити вплив підстанції на населення та навколишнє середовище.

**Практичне значення одержаних результатів** роботи для електроенергетичної галузі:

- на основі розробленої розрахункової моделі підстанції з використанням програмних засобів проведено розрахунки електромагнітної обстановки на території та за межами типових міських підстанцій високої напруги, які можуть бути використані проектними та експлуатуючими організаціями електроенергетичної галузі під час проектування або реконструкції, а також фахівцями в області електромагнітної екології;

- розроблено аналітичний інженерний спосіб визначення напруженості електричного поля за межами підстанцій високої напруги, який дозволяє оцінювати

електричні поля на стадії проектних робіт і робити висновки про необхідність обмеження таких полів;

– обґрунтовано заходи для зменшення магнітного поля за межами підстанцій високої напруги, які можуть бути реалізовані на стадії проектних робіт та не вимагають додаткових витрат для їх реалізації.

Розроблений інженерний спосіб використовується в науковій діяльності кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» при дослідженні електромагнітної обстановки поблизу підстанцій і ліній електропередавання високої та надвисокої напруг. Результати роботи впроваджено в АК «Харківобленерго», ДПВ НДІ «Укренергомережпроект», а також у навчальний процес кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» в лекційних курсах «Проектування ліній та підстанцій», «Системоутворюючі мережі та системи» та «Техніка і електрофізика високих напруг».

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і результати, що містяться у дисертації, отримані здобувачем самостійно. Серед них: розроблення тривимірної розрахункової моделі підстанції з урахуванням підстанційного обладнання для дослідження електромагнітних полів; проведення теоретичних досліджень електромагнітної обстановки на території типових міських підстанцій високої напруги та за їх межами; аналіз заходів, що дозволяють зменшити величини магнітної індукції за межами міських підстанцій; розроблення інженерного аналітичного способу визначення напруженості електричного поля за межами міських підстанцій високої напруги. Загальне завершення по дослідженню електричних та магнітних полів, які створюються міськими підстанціями високої напруги, та напрям досліджень поставлено спільно з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на: VII, VIII і IX науково-технічних конференціях «Стан електричних мереж обленерго та основні напрямки підвищення їх ефективності» (Кореїз, АР Крим, 2010–2012 рр.); III науково-практичній конференції «Нові аспекти експлуатації та проектування розподільчих мереж. Перенапруги та блискавкозахист» (Харків, 2011 р.); XIX та XX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2011, 2012 рр.); науково-практичній конференції «Пожежобезпечні і вогнестійкі кабелі енергетичного призначення. Локальні кабельні мережі ВЕС и СЕС. Проводи ПЛ підвищеної надійності» (Харків, 2012 р.); XX Міжнародній науково-технічній конференції «Екологічна та техногенна безпека. Охорона водного та повітряного басейнів. Утилізація відходів» (Бердянськ, 2012 р.).

**Публікації:** За матеріалами дисертації опубліковано 10 робіт, в тому числі 5 статей у фахових наукових виданнях України, 1 патент України на корисну модель та 1 тези доповідей на міжнародній конференції.

**Структура та об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації складає 165 сторінок, з них 56 рисунків по тексту, 10 таблиць по тексту, 3 додатки на 8 сторінках, список використаних джерел з 185 найменувань на 22 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність та доцільність роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, вказана наукова новизна, практичне значення та реалізація результатів дисертаційних досліджень, наведено дані щодо апробації, публікацій та впровадження результатів роботи.

У першому розділі проведено аналіз робіт, присвячених програмним засобам та методам визначення величин електричних та магнітних полів промислової частоти, створюваних підстанціями високої напруги (ВН).

Показано, що, незважаючи на значну кількість робіт, переважно зарубіжних колег, які протягом довгого часу стурбовані прогнозуванням електромагнітної обстановки підстанцій різних класів напруги, в Україні дане питання потрібно першочергово вирішувати. Відзначено, що для точного визначення величин електричних і магнітних полів підстанцій ВН з урахуванням впливу підстанційного обладнання рекомендується застосовувати тривимірні розрахунки з використанням комерційних або безкоштовних програмних засобів, в основу яких покладені чисельні методи (метод скінченних елементів, метод граничних елементів, метод еквівалентних зарядів, а також гібридні методи). Наведено характеристику загальнопоширених чисельних методів розрахунку електромагнітного поля, а також програмних засобів на їх основі.

Другий розділ присвячено розробленню та обґрунтуванню розрахункової моделі підстанції ВН, а також моделей підстанційного обладнання та розрахункових умов, що дозволяють визначати рівні електричного та магнітного полів в заданих точках за відомими параметрами джерел поля. Розв'язання електромагнітної задачі в такій постановці з урахуванням зазначених факторів запропоновано розділити на чотири стадії.

*Перша стадія* включає в себе моделювання основного і допоміжного підстанційного обладнання, а також конструкцій і приміщень, розташованих на території підстанції.

Для моделювання підстанційного обладнання проведено дослідження напруженості електричного поля (ЕП) поблизу опори лінії електропередавання (ЛЕП) 110 кВ, для чотирьох розрахункових випадків.

1. У першому випадку враховувалися тільки три фази проводів ЛЕП 110 кВ (рис. 1, а). ЕП визначалося тільки провідниками із заданими потенціалами.

2. Опора представлялася цілісним багатогранником, утвореним шляхом заповнення тіла опори провідником з нульовим потенціалом. Загальний вигляд нижньої частини стояка опори наведено на рис. 1, б.

3. У кутах перетину граней по всій довжині стояка встановлювалися пояси. На рис. 1, в наведено нижню частину стояка, яка складається з чотирьох поясів. Потенціал опори стояка для цього випадку дорівнював нулю.

4. Враховувалися решітка, діафрагми і пояси опори (рис. 1, г). Потенціал, як і в попередніх двох випадках, дорівнював нулю.

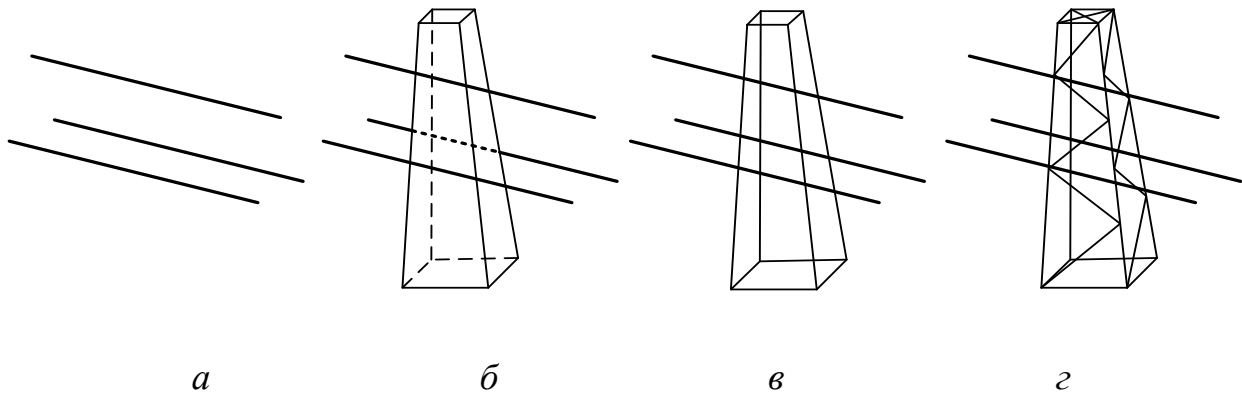


Рисунок 1 – Варіанти спрощення опори на прикладі основи стояка

За результатами дослідження встановлено, що опора викривляє ЕП, утворене проводами ЛЕП. Тому перша розрахункова модель відрізняється від інших моделей. Застосування такої моделі можливе для дуже грубої оцінки або при значному віддаленні від опори. Інші розрахункові випадки мають схожі розподіли напруженості ЕП. Найбільші розбіжності спостерігаються всередині стояка опори і на відстані від опори, яка не перевищує 1 м. Тому для дослідження ЕП поблизу опори необхідно враховувати повну конструкцію опори. При розрахунках на відстанях понад 1 м достатньо застосування другої або третьої моделі. Відмінність цих моделей полягає в тому, що поблизу опори відхилення напруженості ЕП для другої моделі йде в бік збільшення (запасу), а для третьої – у бік зменшення. Таким чином, показано, що оптимальним співвідношенням точності і часу розрахунку є друга модель, цілісний багатогранник.

Теоретичні дослідження, проведені на опорі ЛЕП 110 кВ, а також аналіз публікацій, присвячених розрахункам електричних та магнітних полів підстанцій ВН, показали, що при побудові моделі підстанції ВН її елементи, такі як металеві портали, стояки розрядників, нелінійних обмежувачів перенапруг, роз'єднувачів, вимикачів та інших пристроїв, моделюються П-подібними блоками, що складаються з паралелепіпедів, відповідно до їх дійсних розмірів. Всі ці елементи мають решітчасту структуру, яка замінюється цілісною металевою. Трансформатори, блискавковідводи, огорожі, закритий розподільний пристрій (ЗРП), приміщення загальнопідстанційного пункту управління (ЗПУ), приміщення для реакторів моделюються багатогранниками. При розрахунку ЕП перераховані елементи вважаються ідеальними провідниками, потенціал приймається рівним нулю. При розрахунку магнітного поля (МП) дані об'єкти враховуються відповідними електромагнітними параметрами матеріалів.

Опорні ізолятори та ізолюючі конструкції вищезазначеного обладнання моделюються циліндрами із заданою діелектричною проникністю  $\epsilon_r$  та магнітною проникністю  $\mu_r$ . Вплив гірлянд ізоляторів лінійних і шинних порталів нехтується, оскільки дослідження проводяться біля поверхні землі (на висоті 1,8 м) на значному віддаленні від зони впливу підвісних ізоляторів.

*Друга стадія* – врахування впливу поверхні землі та границь розрахункової області.

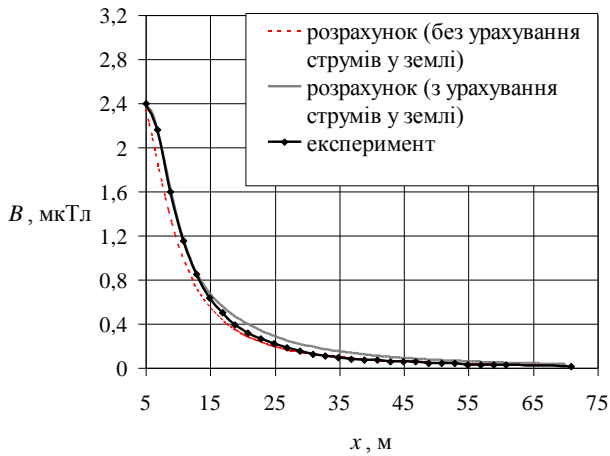


Рисунок 2 – Результати вимірювань і розрахунку МП (з урахуванням і без урахування струмів у землі) на ЛЕП 110 кВ «Залютино – тяга Шпаківка»

електромагнітної обстановки.

При вирішенні задач, які пов'язані з дослідженнями як тривимірних, так і двовимірних електричних та магнітних полів у відкритій області, виникає проблема вибору розмірів розрахункової області. Оскільки метод скінченних елементів не дозволяє розраховувати електромагнітні поля в необмеженому просторі, то для вирішення такої задачі доводиться штучно обмежувати розрахункову область, задаючи на фіктивних границях нульові граничні умови. На основі досвіду розробників програмних засобів при виборі границь області рекомендовано дотримуватися емпіричного правила: якщо досліджуваний об'єкт може бути представлено розташованим в середині сфери радіуса  $R$ , то границі розрахункової області можуть бути віддалені на відстань 4–5 радіусів  $R$  від уявного центру об'єкта.

*Третя стадія* – побудова моделей джерел, що створюють електромагнітне поле у вільному просторі.

Джерела електричного та магнітного полів на підстанції ВН – проводи ЛЕП, що заходять на підстанцію, і ошиновки з відомими потенціалами і струмами, що в них протікають. Ці елементи, які мають складну просторову конфігурацію, представляються циліндрами з радіусом, що дорівнює розрахунковому радіусу проводу. Оскільки для розглянутих типів міських підстанцій стріла провисання не перевищує в більшості випадків 1,2 метра, тому висота проводів ошиновки вважається рівною середній висоті над поверхнею землі.

Одним з основних питань при розрахунку електричних та магнітних полів підстанції є питання правильного завдання струмів і напруг у живильних проводах ЛЕП, відхідних кабельних і повітряних ЛЕП, а також проводах ошиновки підстанції. Для прояснення цього питання в роботі виведено вирази напруженості ЕП і магнітної індукції з урахуванням дзеркальних відображень струмів і зарядів та розглянута тестова плоскопаралельна задача розрахунку електричного і магнітного полів, створюваних трифазною системою проводів напругою 110 кВ з горизонтальним розташуванням фазних провідників. Відстань між проводами

При розрахунках ЕП заряджених провідників (проводів ЛЕП, ошиновки підстанції), розташованих на деякій висоті над поверхнею (землею), яка проводить, в роботі застосовувався метод дзеркальних відображень. При розрахунках МП, за аналогією з розрахунком ЕП, крім струмів у проводах, у роботі вводилися дзеркальні відображення проводів в землі з однаковими за величиною струмами, але з протилежним напрямом у кожен момент часу. Це призводить до деякого завищення результатів оцінки рівнів МП у порівнянні з експериментальними даними (рис. 2), що в підсумку посилює вимоги безпеки і тому припустимо, і чому, як правило, віддається перевага при санітарно-гігієнічній оцінці



сусідніх фаз ошиновки  $d = 2,5$  м, радіус проводу  $r = 0,01$  м та висота підвішування  $H$ , яка дорівнювала 3,6 і 11,2 м. Такі геометричні параметри проводів є близькими до параметрів ошиновок типових проектів підстанцій 110 кВ. Висота площини спостереження над поверхнею землі  $h = 2$  м.

Знаходження електричного і магнітного полів, з урахуванням перерахованих допущень і обмежень, зводиться до вирішення двовимірної квазістатичної задачі. Результируючий вектор напруженості електричного поля і магнітної індукції, годограф яких описує еліпс, трифазної ЛЕП з горизонтальним розташуванням проводів в деякій точці при завданні напруг і струмів в гармонійному вигляді становить:

$$E(t) = \sqrt{E_h^2(t) + E_v^2(t)}, \quad B(t) = \sqrt{B_h^2(t) + B_v^2(t)},$$

де  $E_h(t)$ ,  $B_h(t)$  – горизонтальні складові вектора напруженості ЕП та магнітної індукції;  $E_v(t)$ ,  $B_v(t)$  – вертикальні складові вектора напруженості ЕП та магнітної індукції.

При обчисленні МП величина струмів в лінії, зсунутих на 120 градусів, становила 210 А. Залежності миттєвих значень  $B(x,t)$  для висот 3,6 і 11,2 м зображено на рис. 3, а також додатково наведено у табл. 1 та 2 для декількох точок.

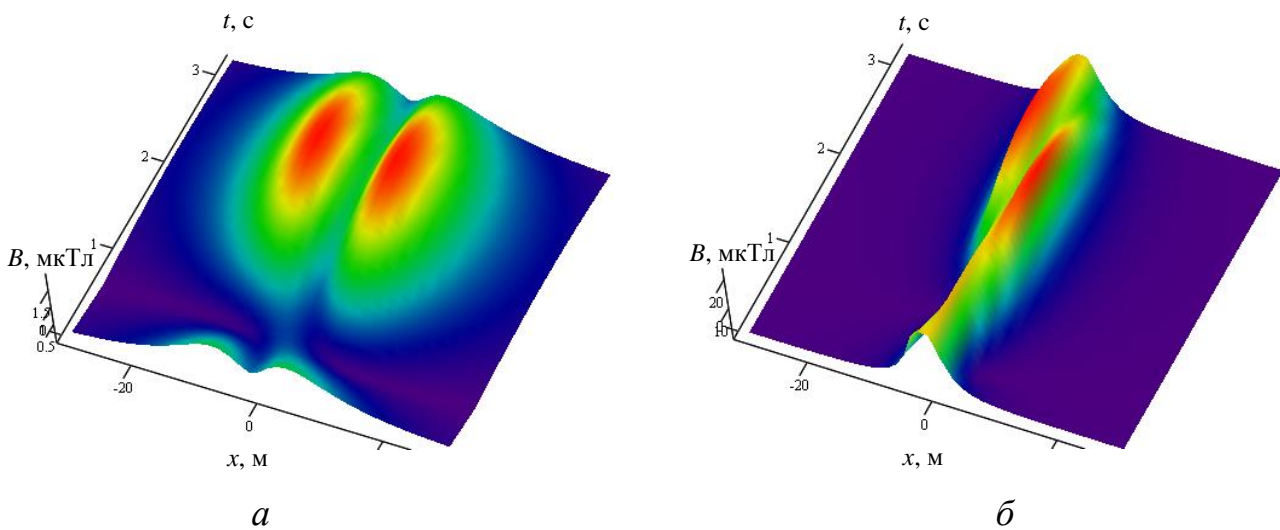


Рисунок 3 – Розподіл миттєвих значень магнітної індукції  $B(x,t)$  на висоті 2 м над поверхнею землі при висоті підвішування проводів  $H = 11,2$  м (а) і  $H = 3,6$  м (б)

Таблиця 1 – Зміна у часі магнітної індукції при  $H = 11,2$  м

Відстань від осі проекції центрального проводу	Миттєве значення магнітної індукції $B$ , мкТл, у момент часу $\omega t$ , рад						
	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{6}$	$\pi$
$x = -25$ м	0,20	0,02	0,16	0,30	0,36	0,33	0,20
$x = -5$ м	0,91	0,16	1,00	1,67	1,90	1,62	0,91
$x = 0$ м	0,62	0,42	0,62	0,89	0,99	0,89	0,62
$x = 5$ м	1,00	0,16	0,91	1,62	1,9	1,67	1,00
$x = 25$ м	0,16	0,02	0,20	0,33	0,36	0,30	0,16

Таблиця 2 – Зміна у часі магнітної індукції при  $H = 3,6$  м

Відстань від осі проекції центрального проводу	Миттєве значення магнітної індукції $B$ , мкТл, у момент часу $\omega t$ , рад						
	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{6}$	$\pi$
$x = -25$ м	0,09	0,01	0,07	0,13	0,16	0,15	0,09
$x = -5$ м	0,91	0,16	1,00	1,67	1,90	1,62	0,91
$x = -2,5$ м	18,93	9,55	7,76	17,22	23,74	24,39	18,93
$x = -1,5$ м	19,34	14,19	11,81	15,83	20,57	22,02	19,34
$x = -1$ м	19,34	16,71	14,45	15,28	18,12	19,97	19,34
$x = 0$ м	18,93	19,87	18,93	16,91	15,81	16,91	18,93
$x = 1$ м	14,45	16,71	19,34	19,98	18,12	15,28	14,45
$x = 1,5$ м	11,81	14,19	19,34	22,02	20,57	15,83	11,81
$x = 2,5$ м	7,76	9,55	18,93	24,39	23,74	17,22	7,76
$x = 5$ м	1,00	0,16	0,91	1,62	1,90	1,67	1,00
$x = 25$ м	0,07	0,01	0,09	0,15	0,16	0,13	0,07

При обчисленні ЕП потенціали на проводах ЛЕП 110 кВ приймалися рівними за абсолютною величиною фазній напрузі (середньоквадратичне значення) та зсунутими на 120 градусів. Результати розрахунку напруженості  $E(x,t)$  для висот 3,6 і 11,2 м, наведено на рис. 4.

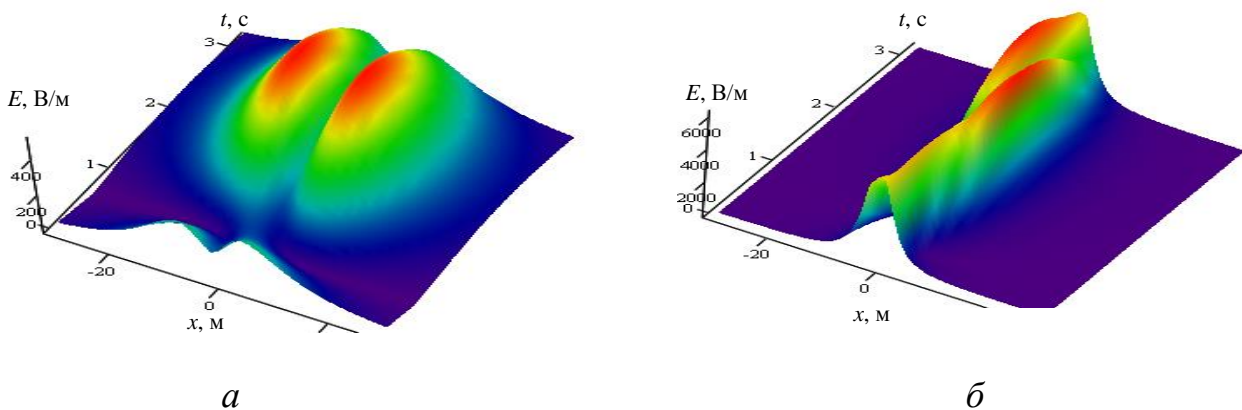


Рисунок 4 – Розподіл миттєвих значень напруженості ЕП  $E(x,t)$  на висоті 2 м над поверхнею землі при висоті підвішування проводів  $H = 11,2$  м (а) і  $H = 3,6$  м (б)

Відзначено, що максимальні величини електричного та магнітного полів за один період промислової частоти при відмінних висотах  $H$  спостерігаються в різні моменти часу. Для висоти  $H = 11,2$  м найбільші значення досягаються у момент часу  $\omega t = 2\pi/3$ . Для висоти  $H = 3,6$  м максимальні значення ЕП і МП спостерігається у моменти часу:  $\omega t = \pi/2$ , фазне значення струму (напруги) на фазі А та  $\omega t = 5\pi/6$ , фазне значення струму (напруги) на фазі С.

На основі отриманих тестових результатів зроблено висновок, що немає необхідності проводити розрахунки як електричного, так і магнітного поля на

підстанції з горизонтальним розташуванням проводів ошиновки в кожен момент часу за період промислової частоти. Для отримання максимальних значень МП необхідно визначити розподіли магнітної індукції для трьох моментів часу (при таких величинах струмів):

1) фазне значення на лівій фазі; на інших – половина фазного струму з від'ємним знаком (напрямок протилежний):  $I_C = I_\phi, I_B = -0,5 \cdot I_\phi, I_A = -0,5 \cdot I_\phi$ ;

2) аналогічно, тільки на правій фазі:  $I_A = I_\phi, I_B = -0,5 \cdot I_\phi, I_C = -0,5 \cdot I_\phi$ ;

3) рівні значення на крайніх фазах, але протилежно спрямовані; на середній фазі струм дорівнює нулю:  $I_C = (\sqrt{3}/2) \cdot I_\phi, I_B = 0, I_A = -(\sqrt{3}/2) \cdot I_\phi$ .

При розрахунках ЕП необхідно визначити розподіл напруженості поля при таких трьох величинах напруги (фаза *B* розташована по середині):

1)  $U_A = U_\phi, U_B = -0,5 \cdot U_\phi, U_C = -0,5 \cdot U_\phi$ ;

2)  $U_C = U_\phi, U_B = -0,5 \cdot U_\phi, U_A = -0,5 \cdot U_\phi$ ;

3)  $U_C = (\sqrt{3}/2) \cdot U_\phi, U_B = 0, U_A = -(\sqrt{3}/2) \cdot U_\phi$ .

*Остання стадія* процесу побудови розрахункової моделі – це формування систем диференційних рівнянь, що описують тривимірні квазістатичні електричні та магнітні поля, для їх безпосереднього розв'язання чисельним методом скінченних елементів або з використанням програмних засобів на основі даного методу.

**У третьому розділі** наведено результати теоретичних досліджень електричних полів, створюваних типовими міськими підстанціями ВН, та розроблення спрощеного способу визначення величин напруженості ЕП, створюваного за їх межами.

Для проведення теоретичних досліджень вибрано три стандартні типи понижуючих підстанцій 110/10 кВ і 110/35/10 кВ, виконаних за схемами:

– місток з віддільником в колах трансформаторів і додатковою лінією, приєднаною через два вимикачі (рис. 5, *а*);

– одна робоча, секціонована вимикачем, і одна обхідна система шин (рис. 5, *б*);

– одна робоча, секціонована вимикачем, система шин (рис. 5, *в*).

Для розв'язання системи диференційних рівнянь з відповідними граничними умовами, яка описує тривимірне ЕП, використано програмний продукт ANSOFT/ANSYS Maxwell 3D, в основі якого метод скінченних елементів. Крім даного продукту, для контролю та порівняння результатів, отриманих за допомогою Maxwell 3D, застосовано JMAG-Studio (в основі – метод скінченних елементів) та CST EM Studio (в основі – метод скінченного інтегрування).

Дослідження показали, що напруженість ЕП за межами підстанцій для всіх типів не досягає гранично допустимих значень, встановлених для населення нормативними документами України. На території підстанцій перевищення значень 5 кВ/м виявлено на території відкритого розподільчого пристрою (ВРП) 110 кВ під проводами ошиновки в місцях з найменшою висотою підвішування. У цих зонах час перебування обслуговуючого персоналу обмежено, тому не потрібно додаткових заходів для зниження величин напруженості ЕП.

У подальшому, розрахункові моделі першої та другої підстанції (рис. 5, *а* і *б*) використано для порівняння різних варіантів спрощення для виявлення впливу різного обладнання на загальну картину ЕП за межами підстанцій. Показано, що

якщо розбити ошиновку двох крайніх ланок ділянками, на яких провідники кожного ярусу не змінюють свою просторову конфігурацію по довжині цих ланок, і провести розрахунок ЕП. Для ділянки, на якій досягаються максимальні значення напруженості, розбіжність значень у порівнянні із повним тривимірним розрахунком за межами підстанції не перевищує 20 % (точність достатня для цілей проектування).

Запропоновано інженерний спосіб визначення максимальних значень напруженості ЕП за межами підстанцій. Цей спосіб полягає у тому, що ошиновка ВН розбивається на ділянки, двовимірний вид однієї з таких ділянок наведено на рис б, використовуючи план і розрізи двох крайніх ланок підстанції. За допомогою методу дзеркальних відображень та принципу суперпозиції знаходиться значення напруженості  $E$  за формулами (1)–(3) на кожній ділянці. Максимальне значення напруженості поля, вибране з значень на всіх ділянках, є кінцевим результатом розрахунку.

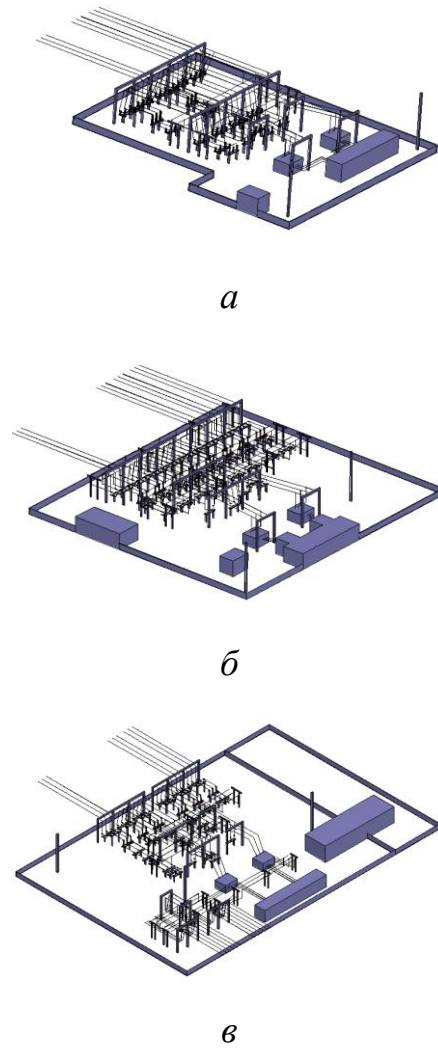


Рисунок 5 – Розрахункові моделі підстанцій 110 кВ

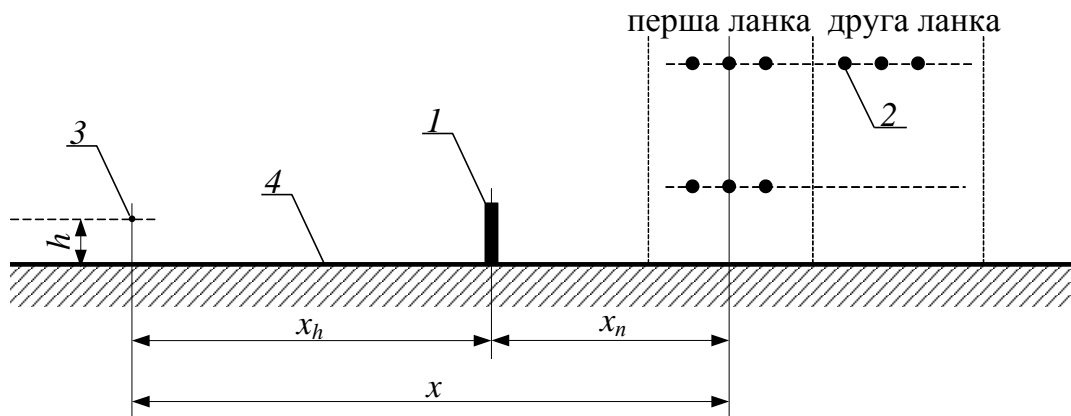
$$E = \sqrt{\left(\sum E_{v_i}\right)^2 + \left(\sum E_{h_i}\right)^2}; \quad (1)$$

$$E_{v_i} = E'_{v_i} + E''_{v_i} = \frac{C_i U_i}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left( \frac{H_i - h}{(x - xd_i)^2 + (H_i - h)^2} + \frac{H_i + h}{(x - xd_i)^2 + (H_i + h)^2} \right); \quad (2)$$

$$E_{h_i} = E'_{h_i} - E''_{h_i} = \frac{C_i U_i}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left( \frac{x - xd_i}{(x - xd_i)^2 + (H_i - h)^2} - \frac{x - xd_i}{(x - xd_i)^2 + (H_i + h)^2} \right); \quad (3)$$

де  $E'$  – напруженість ЕП, створювана реальним проводом і його дзеркальним відображенням  $E''$ ;  $E_h$  і  $E_v$  – горизонтальна та вертикальна складові вектора напруженості ЕП, В/м;  $x$  – відстань від проекції центрального проводу крайньої ланки до границі за межами підстанції, де визначають напруженість ЕП, м;  $xd_i$  – відстань від проекції  $i$ -го проводу ошиновки до проекції центрального проводу крайньої ланки, м;  $C_i$  – ємність  $i$ -го проводу ошиновки на одиницю довжини, Ф/м;

$U_i$  – напруга  $i$ -го проводу ошиновки, В;  $\epsilon_r$  – відносна діелектрична проникність середовища;  $\epsilon_0$  – діелектрична стала, яка становить  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $h$  – висота точки спостереження над поверхнею землі приймається 1,8 м;  $H_i = H_{pid_i} - \frac{2}{3}f_i$  – середня висота підвішування  $i$ -го проводу над землею, м;  $H_{pid_i}$  – висота кріплення  $i$ -го проводу на опорі або на підстанційному обладнанні, м;  $f_i$  – стріла провисання  $i$ -го проводу, м.



1 – огорожа, 2 – проводи ошиновки, 3 – точка спостереження, 4 – поверхня землі  
Рисунок 6 – Розрахункова схема розташування проводів ошиновки двох крайніх ланок на одній з ділянок

Наведено приклади розрахунку максимальних значень напруженості ЕП на відстані 30 м від огорожі типових підстанцій ВН.

У четвертому розділі наведено результати теоретичних досліджень магнітних полів, створюваних типовими підстанціями ВН, та аналіз заходів, що дозволяють зменшити величини магнітної індукції за межами цих підстанцій.

Для проведення теоретичних досліджень вибрано дві стандартні підстанції 110/10 кВ, виконаних за схемами:

– місток з віддільником у колах трансформаторів і додатковою лінією, приєднаною через два вимикачі (рис. 7, а);

– два блока лінія – трансформатор з вимикачами і неавтоматичною перемичкою з боку ліній (рис. 7, б).

При дослідженнях тривимірних МП, створюваних розглянутими підстанціями, в роботі також використано програмний продукт ANSOFT/ANSYS Maxwell 3D (модуль Magnetostatic). Результати, отримані за допомогою тривимірного методу скінченних елементів, порівнювалися з результатами аналітичного розрахунку на основі закону Біо–Савара–Лапласа.

Проведені дослідження показали, що величини магнітної індукції за межами і на території розглянутих підстанцій не досягають граничних значень, встановлених нормативними документами України (1725 мкТл). На відстані 30 м від огорожі максимальні значення склали 0,2 мкТл для підстанції за схемою «містка» (з правого боку) та 0,17 мкТл для підстанції за схемою «блок лінія – трансформатор» (з лівого

боку). Наведені величини магнітної індукції перевищують граничні значення для населення в деяких європейських країнах (Швеція та Італія). Це свідчать про наявність навіть на таких відстанях потенційної небезпеки за межами типових підстанцій ВН. Тому в роботі розглянуто можливість та недоліки застосування стосовно до підстанцій, розташованих у межах міста, наявних загальновідомих шляхів зменшення рівнів МП, які створюються різними електроенергетичними об'єктами (повітряними та кабельними лініями).

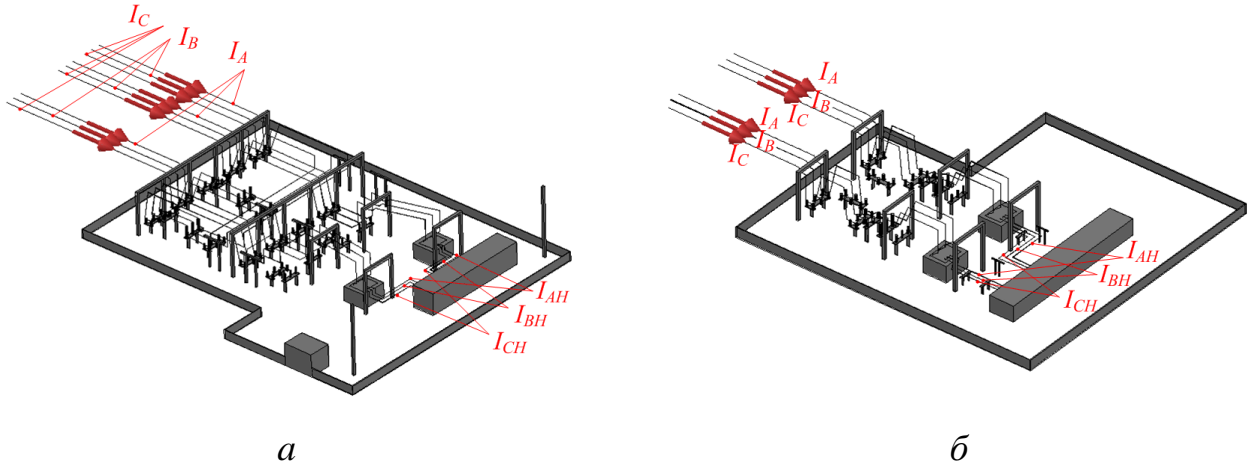


Рисунок 7 – Розрахункові моделі підстанцій 110/10 кВ за схемами «місток» (а) та «блок лінія – трансформатор» (б)

Запропоновано метод обмеження МП шляхом симетричного чергування фаз проводів двох сусідніх ошиновок. У результаті проведеного аналізу можливостей використання даного методу (табл. 3–5), на прикладі плоскопаралельної задачі (рис. 8 і 9), обґрунтовано незатратні заходи щодо зменшення величин магнітної індукції, створюваних за межами підстанцій ВН. Це:

- а) чергування фаз («С-В-А»–«А-В-С») проводів ошиновки ВРП ВН сусідніх ланок;
- б) чергування фаз («С-В-А»–«А-В-С») проводів сусідніх ошиновок низької напруги (НН) на ділянці від силового трансформатора до входу у ЗРП;
- в) одночасне застосування 1 і 2 заходів, тобто чергування фаз («С-В-А»–«А-В-С») сусідніх ошиновок НН та ошиновки ВРП ВН сусідніх ланок.

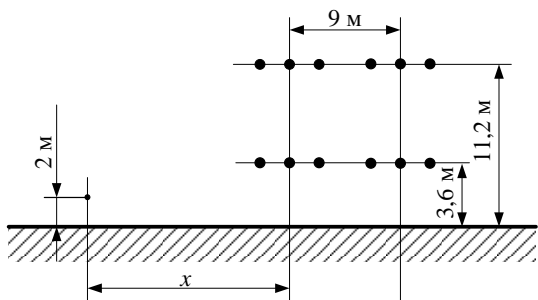


Рисунок 8 – Схема розташування проводів ошиновки ВРП ВН у сусідніх ланках

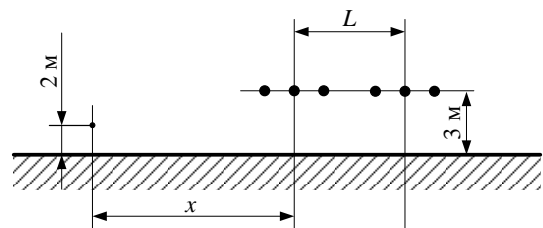


Рисунок 9 – Схема розташування проводів ошиновки НН

Таблиця 3 – Порівняння варіантів зменшення МП шляхом чергування фаз ошиновки ВРП ВН однієї ланки (X позначає 210 А, x – 105 А, • – -105 А, ● – -210 А)

Струми у проводах фаз I, А	$B_{max}$ , мкТл	$B$ , мкТл на відстані $x$ від проекції проводу центральної фази, м						
		-60	-40	-20	0	20	40	60
X •• X ••	25,520	0,055	0,145	0,760	17,790	0,840	0,153	0,058
X •• • x x	23,400	0,027	0,068	0,249	16,108	0,261	0,071	0,028
X •• -----	1,700	0,041	0,107	0,505	0,890	0,550	0,110	0,043
----- X ••	24,470	0,014	0,038	0,258	16,930	0,290	0,041	0,014
X •• •• X	23,030	0,027	0,066	0,218	16,354	0,292	0,074	0,029
X •• x x •	25,740	0,057	0,15	0,806	17,510	0,795	0,147	0,056

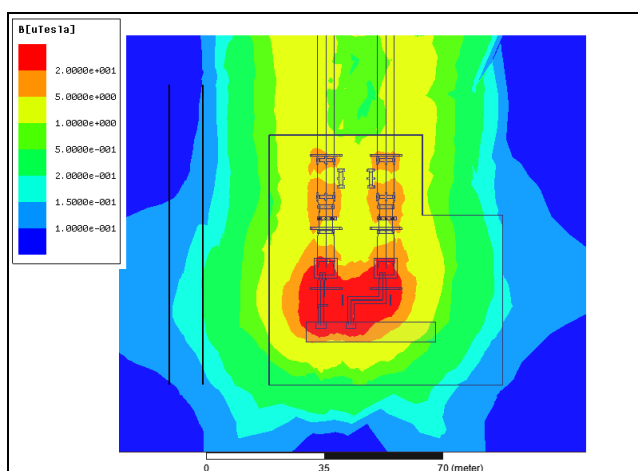
Таблиця 4 – Порівняння варіантів зменшення МП шляхом чергування фаз ошиновки ВРП ВН сусідніх ланок (X позначає 210 А, x – 105 А, • – -105 А, ● – -210 А)

Струми у проводах фаз I, А	$B_{max}$ , мкТл	$B$ , мкТл на відстані $x$ від проекції проводу центральної фази, м							
		0	10	20	30	40	50	60	70
X •• X •• -----	2,600	1,520	2,075	0,760	0,342	0,180	0,110	0,073	0,052
X •• X •• X •• X ••	27,710	14,376	4,400	1,180	0,475	0,245	0,147	0,098	0,070
X •• X •• X •• -----	26,710	16,775	4,070	1,080	0,430	0,220	0,132	0,088	0,062
----- X •• X ••	25,470	14,430	2,390	0,390	0,133	0,064	0,040	0,024	0,017
X •• X •• • x x • x x	23,220	14,630	0,841	0,404	0,208	0,116	0,072	0,048	0,035
X •••• X -----	3,250	1,990	0,910	0,320	0,110	0,046	0,024	0,014	0,009
----- X •••• X	23,660	18,970	1,775	0,199	0,049	0,018	0,008	0,005	0,003
X •••• X X •••• X	23,980	20,854	2,617	0,523	0,160	0,064	0,032	0,019	0,013
X •••• X • x x x x •	23,600	17,120	1,056	0,127	0,062	0,028	0,015	0,009	0,006

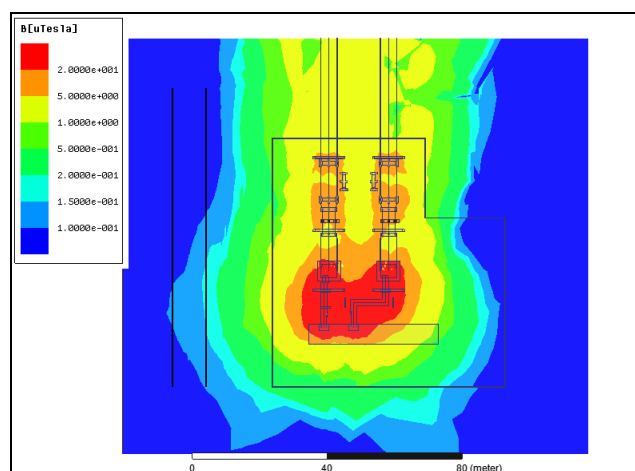
Перераховані заходи використано для демонстрації можливостей зменшення тривимірного МП за межами підстанції 110/10 кВ, виконаної за схемою “блок лінія – трансформатор”. Результати застосування заходів для зменшення величин магнітної індукції на даній підстанції представлено графічно на рис. 10 (в-г) і додатково зведено у табл. 6. Допоміжні лінії проведено на відстані 20 і 30 м від огорожі підстанції.

Таблиця 5 – Порівняння варіантів зменшення МП шляхом чергування фаз ошиновки НН (X позначає 2300 А, х – 1150 А, • – -1150 А, ● – -2300 А)

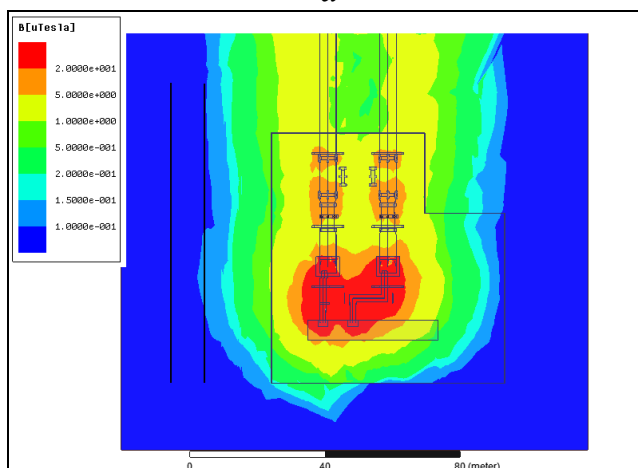
Струми у проводах фаз I, А	$B_{max}$ , мкТл	$B$ , мкТл на відстані $x$ від проєкції проводу центральної фази, м							
		0	10	20	30	40	50	60	70
$L = 9$ м X •• X ••	380,900	335,370	8,260	1,360	0,470	0,220	0,130	0,080	0,060
$L = 5$ м X •• X ••	372,950	308,450	9,400	1,550	0,520	0,240	0,140	0,090	0,066
$L = 9$ м X •• ● X X	377,750	346,240	5,970	0,670	0,170	0,060	0,028	0,015	0,010
X ••	377,350	338,650	7,105	1,015	0,316	0,140	0,078	0,050	0,036
$L = 9$ м X •••• X	377,600	345,480	6,030	0,680	0,170	0,061	0,028	0,016	0,010



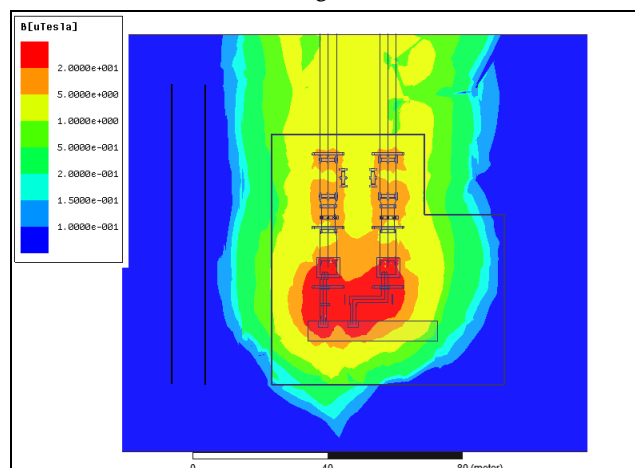
а



б



в



г

а – стандартна фазировка; б – чергування фаз ошиновки ВРП ВН; в – чергування фаз ошиновки НН; г – чергування фаз ошиновки НН і ошиновки ВРП ВН

Рисунок 10 – Розподіл магнітної індукції на території підстанції та за її межами для різних варіантів чергування фаз

Реалізація запропонованих заходів дозволила зменшити значення магнітної індукції на відстані 30 м від огорожі підстанції (в 4,4 рази при одночасному



чергуванні фаз ошиновки НН і ошиновки ВРП ВН) та значно обмежити область 0,1 мкТл (до 17 метрів) у порівнянні зі стандартною фазировкою, яка прийнята в експлуатації.

Таблиця 6 – Реалізація заходів для зменшення МП за межами підстанції 110/10 кВ, виконаної за схемою «блок лінія – трансформатор»

Захід	$B$ , мкТл на відстані 30 м	Кратність зменшення МП на відстані 30 м	$B$ , мкТл на відстані 20 м	Кратність зменшення МП на відстані 20 м
без застосування заходів	0,146	1	0,204	1
чергування фаз ошиновки ВРП ВН	0,106	1,4	0,164	1,24
чергування фаз ошиновки НН	0,077	1,9	0,110	1,85
чергування фаз ошиновки НН і ошиновки ВРП ВН	0,033	4,4	0,074	2,75

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішена науково-практична задача, яка полягає в визначенні електромагнітної обстановки, створюваної підстанціями ВН, та обґрунтуванні незатратних заходів, спрямованих на обмеження впливу електромагнітних полів промислової частоти на населення та навколишнє середовище.

Основні висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у такому:

1. У результаті здійсненого аналізу чисельних методів та програмних засобів, які використовувалися при дослідженнях електричних та магнітних полів, створюваних підстанціями різних класів напруги, встановлено, що для точного визначення величин магнітної індукції і напруженості ЕП необхідно враховувати вплив підстанційного та допоміжного обладнання. Відмінність результатів розрахунків ЕП на основі повної та спрощеної моделі може досягати 50% біля стояків обладнання. Тому рекомендується застосовувати тривимірні розрахунки з використанням чисельних методів і програмних засобів на основі цих методів.

2. Розроблено та обґрунтовано розрахункову модель електричного та магнітного полів підстанції ВН, яка дозволяє враховувати джерела цих полів, підстанційне обладнання, вплив землі та границі розрахункової області. На прикладі ділянки поблизу опори ЛЕП показано доцільність і правомірність використання моделі цілісного багатогранника з нульовим потенціалом при моделюванні металевих конструкцій підстанцій та повітряних ЛЕП. Визначено, що при розрахунках квазістатичних ЕМП, створюваних проводами ошиновки підстанцій і ЛЕП з горизонтальним розташуванням проводів, немає необхідності проводити розрахунки в кожен момент часу. Запропоновано визначати розподіли МП (ЕП) для

трьох миттєвих станів, що дозволяє отримати максимальні значення магнітної індукції та напруженості ЕП на території (під проводами ошиновки) та за межами підстанцій ВН.

3. Проведені теоретичні дослідження ЕП на міських підстанціях ВН показали, що величини напруженості ЕП на території та за межами розглянутих підстанцій не досягають граничних значень (1 кВ/м), встановлених для населення чинними нормативними документами України. На основі здійснених теоретичних досліджень розроблено інженерний аналітичний спосіб розрахунку максимальних значень напруженості ЕП за межами міських підстанцій ВН, який заснований на зведенні тривимірної задачі розрахунку ЕП до двовимірної плоскопаралельної задачі поза територією досліджуваної підстанції. За допомогою розробленого способу можливо визначати напруженості за межами підстанцій ВН, розташованих у межах міста, з достовірною точністю (похибка 20%), що дозволяє вже на стадії проектування об'єктів здійснювати контроль за рівнями ЕП і при необхідності проводити їх оптимізацію.

4. Проведені теоретичні дослідження МП на міських підстанціях ВН показали, що величини магнітної індукції за межами розглянутих підстанцій не досягають граничних значень (1750 мкТл), встановлених чинними нормативними документами України. Однак у той же час дані величини перевищують граничні значення МП (0,1–0,4 мкТл) деяких європейських країн, що свідчить про наявність можливої потенційної екологічної небезпеки у зв'язку з переглядом нормативних документів.

Запропоновано метод обмеження МП, створюваного за межами підстанцій ВН, шляхом симетричного чергування фаз проводів двох сусідніх ошиновок. На основі даного методу для зменшення величин магнітної індукції обґрунтовано заходи (чергування фаз проводів ошиновки ВРП ВН у сусідніх ланках, чергування фаз проводів сусідніх ошиновок НН і спільне застосування даних заходів), які можуть бути реалізовані на стадії проектних робіт та не вимагають додаткових витрат на їх реалізацію. Реалізація запропонованих заходів на тривимірній моделі підстанції 110/10 кВ, виконаної за схемою «блок лінія – трансформатор», дозволила зменшити у 1,4–4,4 (на відстані 30 м від огорожі підстанції) та 1,25–2,75 рази (на відстані 20 м) значення магнітної індукції у порівнянні зі стандартною фазировкою, прийнятою в експлуатації.

5. Результати роботи впроваджено в АК «Харківобленерго», ДПВ НДІ «Укренергомережпроект», а також у навчальний процес кафедри передачі електричної енергії НТУ «ХПІ» в лекційних курсах «Проектування ліній та підстанцій», «Системоутворюючі мережі та системи» та «Техніка і електрофізика високих напруг».

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Окунь А.А. Анализ методов расчёта электрических полей установок высоких напряжений / С.Ю. Шевченко, А.А. Окунь // Електротехніка і електромеханіка. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 4. – С. 59–62.

*Здобувачем здійснено узагальнення загальнозживаних чисельних методів в контексті розрахунків електричних полів електроенергетичних об'єктів.*

2. Окунь А.А. Моделирование электрического поля стеклянного изолятора ВЛ 110 кВ / С.Ю. Шевченко, А.А. Окунь // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 3. – С. 136–144.

*Здобувачем виконано розрахунки напруженості електричного поля в об'ємі сухого чистого ізолятора при зміні прикладеної напруги.*

3. Окунь А.А. Анализ программных средств расчета электрических полей установок высоких напряжений / С.Ю. Шевченко, В.В. Волохин, А.А. Окунь // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 49. – С. 190–194.

*Здобувачем подано характеристику програмних засобів на основі чисельних методів.*

4. Окунь А.А. Определение магнитного поля подстанций высокого напряжения на основе метода конечных элементов / С.Ю. Шевченко, В.В. Волохин, А.А. Окунь // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2012. – № 2/4(56). – С. 35–39.

*Здобувачем запропоновано розрахункову модель підстанції високої напруги для кількісного визначення величин магнітної індукції.*

5. Окунь А.А. Исследование магнитных полей промышленной частоты городских подстанций высокого напряжения / А.А. Окунь // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 28. – С. 96–104.

6. Патент на корисну модель № 73910 Україна, МПК (2012.01) G01R 29/00. Спосіб визначення максимальних рівнів електричного поля промислової частоти за межами міських підстанцій високої напруги / Окунь О.О., Шевченко С.Ю.; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т «ХПІ». – № u 2012 03966; заявл. 02.04.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. №. 19.

*Здобувачем запропоновано аналітичний спосіб визначення напруженості електричного поля за межами міських підстанцій високої напруги.*

7. Окунь А.А. Расчет электрического поля вблизи опоры линии электропередачи высокого напряжения / С.Ю. Шевченко, А.А. Окунь // Енергетика та електрифікація. – Київ, 2011. – № 9. – С. 54–58.

*Здобувачем проведено розрахунки та аналіз результатів розрахунку електричного поля поблизу опори ЛЕП, на основі якого вдосконала розрахункова модель металевих конструкцій підстанцій та повітряних ЛЕП.*

8. Окунь А.А. Исследование электрических полей промышленной частоты типовых подстанций ВН в городской черте / С.Ю. Шевченко, А.А. Окунь // Гігієна населених місць. – Київ, 2011. – Вип. 58. – С. 199–206.

*Здобувачем проведено розрахунки електричних полів, створюваних типовими підстанціями високої напруги, на основі запропонованої розрахункової моделі.*

9. Окунь О.О. Завдання струмів і напруг при розрахунках електромагнітних полів, створюваних підстанціями високої напруги / О.О. Окунь, С.Ю. Шевченко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей

XX міжнар. наук.-практ. конф., 15–17 травня 2012 р., Харків: у 4 ч. – Ч. II / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – С. 226.

*Здобувачем запропоновано умови завдання струмів і напруг при розрахунках полів, створюваних ошиновкою та ЛЕП з горизонтальним розташуванням проводів.*

10. Okun O. A comparison of magnetic fields inside and outside high voltage urban 110 kV power substations with the exposure recommendations of the Ukrainian Regulatory Authorities [Електронний ресурс] / O. Okun, S. Shevchenko, L. Korpinen // Radiation Protection Dosimetry. – 2012. – Р. 1–13. – Режим доступу до статті: <http://rpd.oxfordjournals.org/cgi/content/full/ncs268?ijkey=2урхvCsNueQz8SH&keytype=ref>

*Здобувачем виконано розрахунки магнітного поля і проведено порівняння результатів, отриманих за допомогою чисельного та аналітичного методів.*

## АНОТАЦІЇ

**Окунь О.О. Обмеження екологічного впливу підстанцій високої напруги за рахунок зменшення рівнів електромагнітних полів. На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2012.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню впливу електромагнітних полів, створюваних міськими підстанціями високої напруги, на населення та навколишнє середовище, а також застосуванню заходів, спрямованих на обмеження даного впливу.

У роботі розроблено та обґрунтовано тривимірну розрахункову модель підстанції, яка включає в себе чисельний метод скінченних елементів, моделі підстанційного обладнання, розрахункові умови, що дозволяють розрахувати електромагнітне поле в заданих точках простору по відомим параметрам джерел поля. Визначено умови завдання струмів і напруг у проводах ошиновки та вдосконалена розрахункова модель металевих конструкцій зі складною геометрією на підстанції. На основі розрахункової моделі підстанції проведено розрахунки електромагнітної обстановки. Показано, що рівні магнітних полів за межами розглянутих типових міських підстанцій досягають граничних значень, встановлених деякими європейськими країнами та епідеміологічних досліджень. Запропоновано метод обмеження магнітного поля шляхом симетричного чергування фаз проводів сусідніх ошиновок та обґрунтовано заходи для зменшення величин магнітної індукції за межами підстанцій високої напруги, які можуть бути реалізовані на стадії проектних робіт та не вимагають додаткових витрат для реалізації. Розроблено аналітичний спосіб визначення максимальних значень напруженості електричного поля поза межами підстанцій високої напруги.

*Ключові слова:* електромагнітні процеси, техніка високих напруг, дія на людину та навколишнє середовище, системи захисту, ошиновка, підстанція високої напруги, чергування фаз.

**Окунь А.А. Ограничение экологического влияния подстанций высокого напряжения за счет снижения уровней электромагнитных полей. На правах рукописи.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2012.

Диссертационная работа посвящена исследованию влияния электромагнитных полей, создаваемых городскими подстанциями высокого напряжения, на население и окружающую среду, а также применению мероприятий, направленных на ограничение данного влияния.

В работе на основе анализа литературных источников показано, что для определения величин электрических и магнитных полей подстанций высокого напряжения рекомендуется применять полные трехмерные расчетные модели с учетом влияния подстанционного и вспомогательного оборудования, а также использовать численные методы и программные средства на основе данных методов для проведения исследований трехмерных электромагнитных полей.

Разработана и обоснована трехмерная расчетная модель подстанции, которая включает в себя модели подстанционного оборудования, источников поля, расчетные условия, которые позволяют определить уровни электрического и магнитного полей в заданных точках по известным параметрам источников поля. Получили дальнейшее развитие условия задания токов и напряжений в проводах ошиновки за счет замены расчета электрического и магнитного полей в каждый момент времени за период промышленной частоты тремя мгновенными состояниями, которые соответствуют максимальным значениям вблизи и на расстоянии от проводов. Усовершенствована расчетная модель металлических конструкций со сложной геометрией на подстанции за счет замены таких конструкций многогранниками с нулевым потенциалом. На основе разработанной расчетной модели с использованием программных средств и метода конечных элементов проведены расчеты электромагнитной обстановки на территории и за пределами типовых городских подстанций высокого напряжения, результаты которых могут быть использованы проектными и эксплуатирующими организациями электроэнергетической отрасли во время проектирования или реконструкции, а также специалистами в области электромагнитной экологии.

Показано, что уровни магнитных полей за пределами рассмотренных подстанций высокого напряжения достигают предельные значения, установленные эпидемиологическими исследованиями и нормативными документами некоторых европейских стран, что свидетельствует о наличии возможной потенциальной экологической опасности.

Предложен метод ограничения магнитного поля путем симметричного чередования фаз проводов соседних ошиновок. На основе предложенного метода обоснованы мероприятия (чередование фаз проводов ошиновки высокого напряжения в соседних ячейках, чередование фаз проводов соседних ошиновок низкого напряжения и совместное применение двух мероприятий) для снижения

магнитного поля за пределами подстанций высокого напряжения, которые могут быть реализованы на стадии проектных работ и не требуют дополнительных затрат для их реализации. Реализация предложенных мероприятий на трехмерной модели подстанции высокого напряжения, выполненной по схеме «блок линия – трансформатор», позволила уменьшить значения магнитной индукции за пределами подстанции по сравнению со стандартной фазировкой, принятой в эксплуатации.

Кроме того, на основе проведенных теоретических исследований электрического поля разработан аналитический способ определения максимальных значений напряженности электрического поля за пределами подстанций высокого напряжения, который позволяет уже на стадии проектирования объектов производить контроль над уровнями электрических полей.

*Ключевые слова:* электромагнитные процессы, техника высоких напряжений, воздействие на человека и окружающую среду, системы защиты, ошиновка, подстанция высокого напряжения, чередование фаз.

### **Okun O.O. A Restriction of the Ecological Impact of High Voltage Power Substations by Reducing Electromagnetic Field Levels. Manuscript.**

Dissertation for Candidate of Engineering Science degree of 05.09.13 speciality – Technology of strong electric and magnetic fields. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2012.

The dissertation is devoted to investigation of the impact of the electromagnetic fields, generated by urban high voltage power substations, on the humans and the environment and also application of the measures to limit this impact.

A three-dimensional computational model of the power substation, that includes the numerical finite element method, models of the substation equipment, calculation conditions that allows to calculate the electromagnetic field in a given point under known parameters of the field sources, has been developed in this work. Conditions of the voltage and current settings of the busbar wires are determined and a computational model of the metal structures with complex geometry at the substation is improved. Based on the power substation calculation model, the electromagnetic environment is calculated. It is shown that the magnetic field levels outside the typical urban power substations under study reach the exposure limit values specified by regulations of some European countries and epidemiological studies. A method of the magnetic field limiting by a symmetric phase sequence of the adjacent busbars is proposed and measures of reducing the magnetic flux density values outside the high voltage power substations, that may be implemented at the design stage and do not require additional costs for implementation, are defined. An analytical approach for determination of the electric field maximum outside territory of the high voltage substation is developed.

*Keywords:* electromagnetic processes, high voltage technology, impact on humans and environment, systems of protection, busbar, high voltage power substation, phase sequence.



Підписано до друку 27.02.2013 р. Формат 60x90 1/16.  
Папір офсетний. Друк – різнограф. Ум. друк. арк.. 0,9  
Гарнітура «Times New Roman». Наклад 125 прим.

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФОП Миронов М.В., свідоцтво В04№022953)  
м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1  
т.:7-170-354  
*www.modelist.in.ua*