

А.В. Красножон, Р.О. Буйний, І.В. Діхтярук, А.О. Квицинський

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДІЮЧОЇ ДВОКОЛОВОЇ ЛЕП 110 кВ «ЧТЕЦ – ЧЕРНІГІВСЬКА-330» У ЗОНІ ЖИТЛОВОЇ ЗАБУДОВИ ТА МЕТОДІВ ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ ДО БЕЗПЕЧНОГО РІВНЯ

За існуючих та перспективних електричних навантажень досліджено рівень магнітного поля двоковолової повітряної ЛЕП напругою 110 кВ «ЧТЕЦ – Чернігівська-330», яка проходить по території одноповерхової та багатоповерхової забудови у м. Чернігів. Показано, що індукція магнітного поля в зоні забудови та на межі охоронної зони може перевищувати безпечний для людини рівень, особливо у випадку роботи ЛЕП у одноколовому режимі. Визначено безпечні умови для проживання населення поблизу даної ЛЕП, зокрема, безпечну відстань від осі траси ЛЕП до місць розташування одноповерхових та багатоповерхових будинків. Показано, що застосування векторної компенсації дозволяє досягти значного зменшення рівня магнітного поля. Бібл. 16, рис. 19.

Ключові слова: повітряна ЛЕП, електричні навантаження, індукція магнітного поля, житлова забудова.

При существующих и перспективных электрических нагрузках исследовано уровень магнитного поля двухцепной воздушной ЛЭП напряжением 110 кВ «ЧТЕЦ – Черниговская-330», которая проходит по территории одноэтажной и многоэтажной застройки в г. Чернигов. Показано, что индукция магнитного поля в зоне застройки и на границе охранный зоны может превышать безопасный для человека уровень, особенно в случае работы ЛЭП в одноцепном режиме. Определены безопасные условия для проживания населения вблизи данной ЛЭП, в частности, безопасное расстояние от оси трассы ЛЭП до мест размещения одноэтажных и многоэтажных домов. Показано, что применение векторной компенсации позволяет достичь значительного уменьшения уровня магнитного поля. Библ. 16, рис. 19.

Ключевые слова: воздушная ЛЭП, электрические нагрузки, индукция магнитного поля, жилая застройка.

Вступ. Останнім часом все більше уваги приділяється питанням впливу магнітного поля на людину. Одним із потужних джерел магнітного поля промислової частоти є повітряні ЛЕП, поруч з якими можуть бути розташовані житлові будинки або офісні приміщення. Люди, які постійно проживають чи працюють поблизу ЛЕП, знаходяться в зоні дії магнітного поля. В розвинених країнах світу, таких, як США, Канада, Франція, Швеція та ін. діють достатньо жорсткі обмеження щодо рівня індукції магнітного поля промислової частоти, постійно проводиться його моніторинг в будівлях та просто неба поблизу повітряних та кабельних ЛЕП, на території підстанцій та поза їх межами. Існує ряд медичних досліджень, які свідчать про те, що магнітне поле діє на живі організми на клітинному рівні, при цьому зазначається, що тривала дія навіть слабого магнітного поля з часом призводить до різноманітних проблем зі здоров'ям [1]. Так, згідно рекомендацій Всесвітньої організації охорони здоров'я допустимим при довготривалому впливі на населення є рівень магнітної індукції 0,2-0,4 μT .

В усьому світі приділяють багато уваги проблемі зменшення рівня магнітного поля [2, 3] для мінімізації його впливу на навколишнє середовище. Окремо слід зазначити, що в Україні проблема нормування рівня магнітного поля не є вирішеною остаточно; оскільки в ПУЕ [4] міститься норма лише для магнітного поля кабельних ліній, яка становить 0,5 μT всередині житлових приміщень. У роботі [5] розглянуто проблему розрахунку наведених втрат в повітряних ЛЕП і показано, що зменшення магнітного поля також призводить до підвищення ефективності передачі електричної енергії.

Особливо актуальною проблема зменшення магнітного поля стає в умовах зростання електричних навантажень. У великих містах постійно ведеться будівництво нових мікрорайонів, споруджуються цілі

квартали та житлові комплекси з багатоповерховими та одноповерховими будинками, відповідною інфраструктурою – торгівельно-розважальними комплексами, підприємствами комерційної та комунально-побутової сфери, промисловими підприємствами тощо. В результаті цього навантаження існуючих повітряних ЛЕП, за допомогою яких здійснюється живлення таких міст та окремих районів зростає. Так, в м. Чернігів у останні 15 років ведеться активне будівництво нових житлових районів, таких, як Масани та Н. Подусівка. Живлення цих районів здійснюється через підстанції, що під'єднані до діючої двоковолової повітряної ЛЕП 110 кВ «ЧТЕЦ – Чернігівська-330», відповідно, навантаження цієї лінії за останні роки помітно зросло і в перспективі продовжуватиме зростати. Вищезазначена ЛЕП проходить крізь зону житлової забудови, в якій розташовано багатоповерхові та одноповерхові будинки. Тому виникає необхідність у визначенні безпечних умов проживання населення м. Чернігова на території, що прилягає до зазначеної ЛЕП, а також, в разі потреби, вибору методів зменшення магнітного поля до безпечного рівня.

Слід зазначити, що проблема дослідження магнітного поля повітряних ЛЕП [6, 7], а також методів його зменшення, активно вивчається в Україні та світі. Так, в роботах [8, 9] розглянуто та проаналізовано розподіл індукції магнітного поля ЛЕП в зонах житлової забудови у загальному випадку. При цьому слід зазначити, що подібний аналіз необхідно проводити також і для конкретної ЛЕП з врахуванням умов її експлуатації, поточних та перспективних навантажень, режимів роботи, віддалення житлових будинків від траси ЛЕП та межі охоронної зони, особливостей забудови у житловій зоні поблизу ЛЕП (одноповерхова, багатоповерхова) тощо.

Для дотримання умов безпечного проживання населення поблизу повітряних ЛЕП необхідно про-

© А.В. Красножон, Р.О. Буйний, І.В. Діхтярук, А.О. Квицинський

дити оцінку відстані від траси ЛЕП, на якій слід розташовувати одноповерхові та багатоповерхові будинки. Однак, такі заходи є доцільними на етапі проектування нових повітряних ЛЕП або при планування забудови вільних земельних ділянок поблизу ЛЕП. Разом з тим в містах часто має місце ситуація, коли повітряна ЛЕП уже проходить в безпосередній близькості від житлових будинків, які можуть бути розташовані навіть в охоронній зоні ЛЕП. За такої умови при значному навантаженні ЛЕП необхідно застосувати технології зменшення рівня магнітного поля на території житлової забудови.

Існує цілий ряд методів зменшення рівня магнітного поля повітряних ЛЕП, які розглянуто у роботах [10, 11]. Серед таких, що можуть бути застосовані до діючих ЛЕП, слід виділити екранування та оптимізацію геометрії підвісу провідників (метод векторної компенсації). Останній метод може бути досить ефективним, як зазначається у [10].

У випадку двоколової повітряної ЛЕП розташування фаз різних кіл на опорі зазвичай обирають однаковим у відповідності з рис. 1.

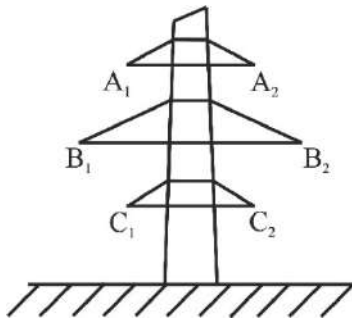


Рис. 1. Типове розташування фаз двох кіл на опорі двоколової повітряної ЛЕП

Такий варіант розташування фаз забезпечує найбільший рівень магнітного поля в просторі навколо ЛЕП. Найбільш ефективним з точки зору зменшення рівня магнітного поля є розташування фаз двох кіл у дзеркальній симетрії [10], як це показано на рис. 2.

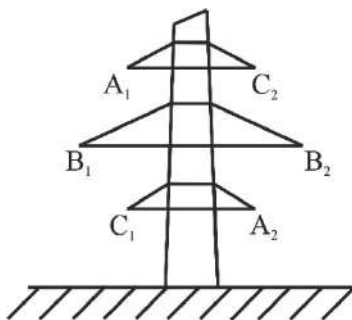


Рис. 2. Дзеркальне розташування фаз двох кіл на опорі двоколової повітряної ЛЕП

Цей метод зменшення рівня магнітного поля двоколової ЛЕП достатньо легко реалізувати на практиці, однак, його ефективність для кожної ЛЕП може виявитись різною в залежності від геометрії конкретної лінії.

Метою статті є визначення умов для безпечного проживання населення за рівнем магнітного поля вздовж траси двоколової ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Черні-

гівська-330» з урахуванням реальних режимів її роботи та розробка рекомендацій зі зменшення магнітного поля цієї ЛЕП до нормативного рівня.

Основні матеріали дослідження. Розрахунок електричного та магнітного поля повітряних та кабельних ЛЕП виконано у відповідності до методики [12], яку обґрунтовано в роботі [13].

Згідно з методикою [12], для деякої розрахункової точки $P(x_p, y_p)$ слід визначити діючі значення компонент або просторових складових вектора індукції магнітного поля від струму у кожному з фазних провідників ЛЕП за формулами:

$$B_{xA} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^2 \frac{I_k \cdot (y_p - y_{Ak})}{(x_p - x_{Ak})^2 + (y_p - y_{Ak})^2}; \quad (1)$$

$$B_{xB} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^2 \frac{I_k \cdot (y_p - y_{Bk})}{(x_p - x_{Bk})^2 + (y_p - y_{Bk})^2}; \quad (2)$$

$$B_{xC} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^2 \frac{I_k \cdot (y_p - y_{Ck})}{(x_p - x_{Ck})^2 + (y_p - y_{Ck})^2}; \quad (3)$$

$$B_{yA} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^2 \frac{I_k \cdot (x_p - x_{Ak})}{(x_p - x_{Ak})^2 + (y_p - y_{Ak})^2}; \quad (4)$$

$$B_{yB} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^2 \frac{I_k \cdot (x_p - x_{Bk})}{(x_p - x_{Bk})^2 + (y_p - y_{Bk})^2}; \quad (5)$$

$$B_{yC} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^2 \frac{I_k \cdot (x_p - x_{Ck})}{(x_p - x_{Ck})^2 + (y_p - y_{Ck})^2}; \quad (6)$$

де I_k – струм у фазі k -го кола ЛЕП, A ; x_{Ak}, y_{Ak} – координати розташування фази A k -го кола ЛЕП; x_{Bk}, y_{Bk} – координати розташування фази B k -го кола ЛЕП; x_{Ck}, y_{Ck} – координати розташування фази C k -го кола ЛЕП; μ_0 – магнітна проникність вакууму ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м).

Також у формулах (1) – (6) враховано, що ЛЕП, яку планується розглядати, є двоколовою.

Діюче значення компонент або просторових складових вектора магнітної індукції в розрахунковій точці знаходять за виразами:

$$B_x(x_p, y_p) = [B_{xA}^2 + B_{xB}^2 + B_{xC}^2 - B_{xA} \cdot B_{xB} - B_{xB} \cdot B_{xC} - B_{xC} \cdot B_{xA}]^{0.5} \quad (7)$$

$$B_y(x_p, y_p) = [B_{yA}^2 + B_{yB}^2 + B_{yC}^2 - B_{yA} \cdot B_{yB} - B_{yB} \cdot B_{yC} - B_{yC} \cdot B_{yA}]^{0.5} \quad (8)$$

Діюче значення індукції магнітного поля в розрахунковій точці знаходимо з виразу:

$$B(x_p, y_p) = \sqrt{B_x(x_p, y_p)^2 + B_y(x_p, y_p)^2}. \quad (9)$$

Повітряні ЛЕП часто проходять через зони з щільною багатоповерховою та одноповерховою забудовою, особливо у великих містах, серед яких є і м. Чернігів. Одним з таких прикладів є двоколова ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330», структурна схема якої зображена на рис. 3.

Окремі ділянки цієї ЛЕП в зонах щільної житлової забудови виконані на опорах типу У110–2 та ПБ110–2. Габарит даної ПЛІ згідно її поопорної схеми становить 7,3 м (мінімальна відстань від нижнього

проводу ЛЕП до землі). Усі необхідні для розрахунку магнітного поля ЛЕП геометричні розміри наведено на рис. 4, 5 для ділянок на опорах У110-2 та ПБ110-2 відповідно.

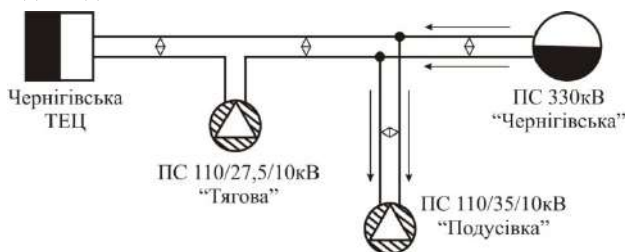


Рис. 3. Структурна схема електричної мережі з повітряною ЛЕП 110 кV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330»

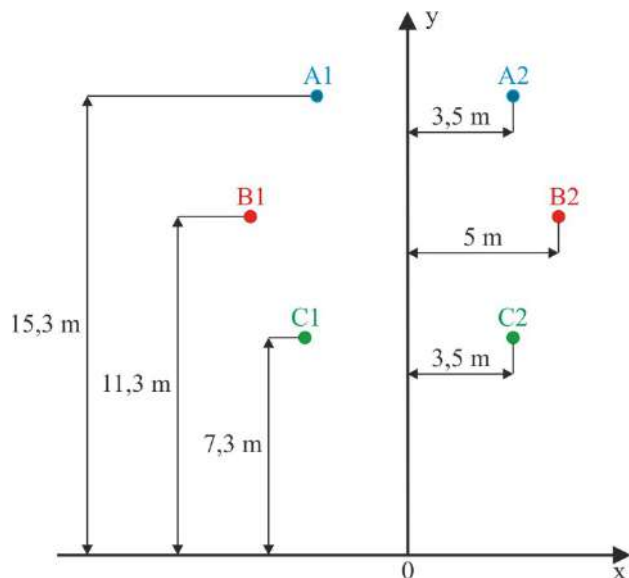


Рис. 4. Геометрична модель ділянки ЛЕП 110 кV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на опорах У110-2

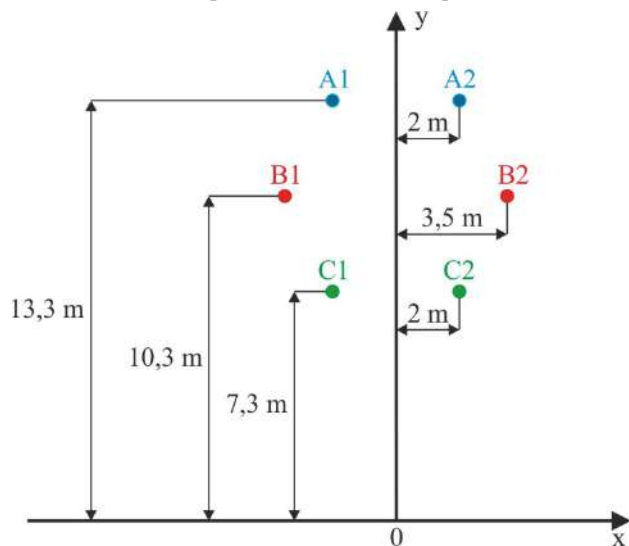
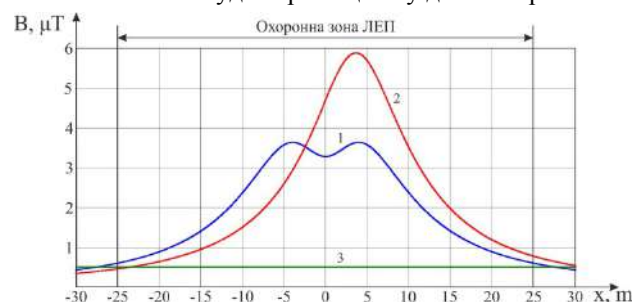


Рис. 5. Геометрична модель ділянки ЛЕП 110 кV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на опорах ПБ110-2

Розрахунок рівня магнітного поля для ділянки вищезазначеної ЛЕП, виконаної на опорах У110-2, виконано на рівні 1,8 м від поверхні землі в напрямку, перпендикулярному трасі ЛЕП. Згідно даних АТ «Чернігівобленерго» про електричні навантаження розрахунковий максимальний струм одного кола

ПЛ 110 кV складає біля 150 А, який протягом доби може несуттєво змінюватися. У разі ремонту або аварійного відключення одного кола, друге коло візьме на себе усе навантаження – біля 300 А.

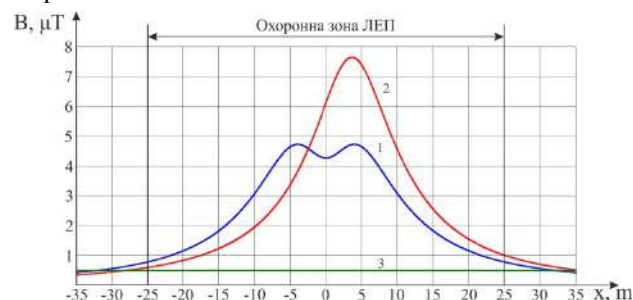
Результати розрахунку розподілу індукції магнітного поля ЛЕП вздовж координати «x» показано на рис. 6. Очевидно, що на межі охоронної зони ЛЕП (при $x = \pm 25$ м) індукція магнітного поля практично відповідає нормативному значенню 0,5 μT за умови діючого значення струму 150 А в фазах обох кіл. Однак, за умови відключення одного кола індукція на межі охоронної зони з правої сторони ЛЕП (з боку кола, що працює) становить 0,77 μT , а точка з безпечним значенням індукції знаходиться на відстані 30 м від осі траси ЛЕП. Також слід зазначити, що окремі приватні житлові будинки, зокрема, двоповерхові, розташовані практично під крайніми фазами даної ЛЕП. В такому випадку нормативне значення індукції магнітного поля буде перевищено у декілька разів.



1 – за діючого значення струму у фазах обох кіл 150 А;
2 – за відключення одного кола (діюче значення струму другого кола 300 А);
3 – лінія нормативного рівня індукції 0,5 μT .

Рис. 6. Розподіл індукції магнітного поля повітряної ЛЕП 110 кV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на рівні 1,8 м від поверхні землі вздовж координати «x» для ділянки, виконаної на опорах типу У110-2

Згідно з прогнозованим рівнем зростання навантажень на 10 років [14], струм на ділянці даної двоколової ЛЕП може збільшитись до 195 А на кожне коло. Результати розрахунку для такого випадку показано на рис. 7.



1 – за діючого значення струму у фазах обох кіл 195 А;
2 – за відключення одного кола (діюче значення струму другого кола 390 А);
3 – лінія нормативного рівня індукції 0,5 μT .

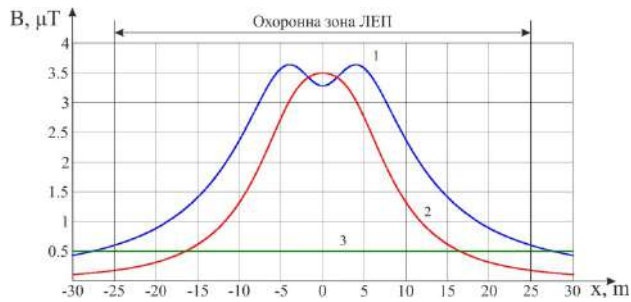
Рис. 7. Індукція магнітного поля повітряної ЛЕП 110 кV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» для ділянки, виконаної на опорах типу У110-2 за прогнозованого зростання електричних навантажень

Криві на рис. 7 свідчать про ще більший рівень індукції магнітного поля за перспективного зростання

електричних навантажень. Так, при рівномірному навантаженні обох кіл індукція на межі охоронної зони може сягати $0,77 \mu\text{T}$, а при відключенні одного кола взагалі дорівнює $1,0 \mu\text{T}$, безпечне значення індукції відповідає відстані від осі ЛЕП 32 m та 35 m відповідно, тобто за межею охоронної зони.

З вищезазначеного можна зробити висновок, що варто обмежувати в часі одноколовий режим роботи даної ЛЕП, оскільки він характеризується суттєвим підвищенням рівня магнітного поля з боку кола, яке працює.

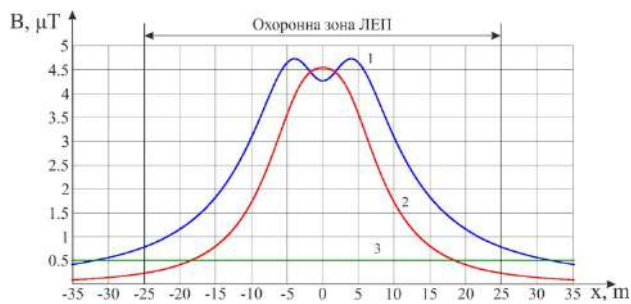
Як було зазначено вище, одним з варіантів зменшення індукції магнітного поля ЛЕП може бути застосування векторної компенсації за рахунок дзеркального розташування фаз двох кіл, результати відповідних розрахунків наведено на рис. 8, 9 (у порівнянні з традиційним варіантом розташування фаз).



- 1 – за типового розташування фаз двох кіл;
- 2 – за дзеркального розташування фаз двох кіл;
- 3 – лінія нормативного рівня індукції $0,5 \mu\text{T}$.

Рис. 8. Розподіл індукції магнітного поля повітряної ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на рівні $1,8 \text{ m}$ від поверхні землі вздовж координати « x » для ділянки, виконаної на опорах типу У110-2, при типовому та дзеркальному розташуванні фаз кіл (діюче значення струму в фазах обох кіл 150 A)

Очевидно, що безпечне значення індукції $0,5 \mu\text{T}$ при дзеркальному розташуванні фаз двох кіл і струмі фази одного кола 150 A досягається на відстані $16,5 \text{ m}$ від осевої лінії траси ЛЕП, тобто в межах її охоронної зони.



- 1 – за типового розташування фаз двох кіл;
- 2 – за дзеркального розташування фаз двох кіл;
- 3 – лінія нормативного рівня індукції $0,5 \mu\text{T}$.

Рис. 9. Розподіл індукції магнітного поля повітряної ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на рівні $1,8 \text{ m}$ від поверхні землі вздовж координати « x » для ділянки, виконаної на опорах типу У110-2, при типовому та дзеркальному розташуванні фаз кіл (діюче значення струму у фазах обох кіл 195 A)

Таким чином, навіть за прогнозованого зростання електричних навантажень, векторна компенсація

дозволить ефективно зменшити рівень магнітного поля двоколової ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» (точка з безпечним для людини рівнем індукції знаходиться в межах охоронної зони на відстані $18,3 \text{ m}$ від осі ЛЕП).

В зоні проходження даної ЛЕП на відстані 20 m від її осі симетрії знаходиться житловий багатоповерховий будинок висотою біля 20 m . На рис. 10 показано розташування будинку, а також розташування системи координат для розрахунку індукції магнітного поля на фасаді будинку вздовж координати « y ».

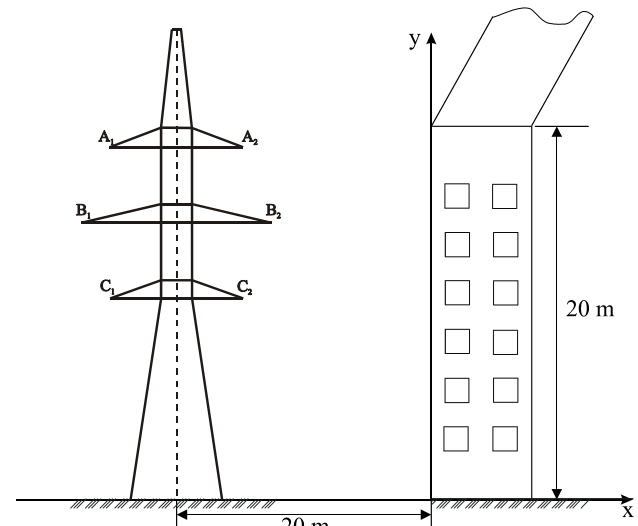
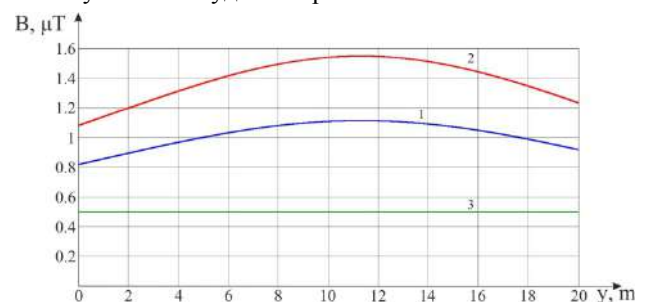


Рис. 10. Розташування багатоповерхового житлового будинку в охоронній зоні двоколової ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330»

Результати розрахунку розподілу індукції магнітного поля на фасаді житлового будинку вздовж координати « y » показано на рис. 11.

Як видно з рис. 11, на фасаді багатоповерхівки нормативне значення індукції у $0,5 \mu\text{T}$ значно перевищено більш, ніж у 2 рази при рівномірному навантаженні обох кіл, та більше, ніж у 3 рази за умови відключення одного з кіл. При цьому в [15, 16] та ряді інших досліджень зазначається, що магнітне поле проникає у житлові будинки практично без послаблення.

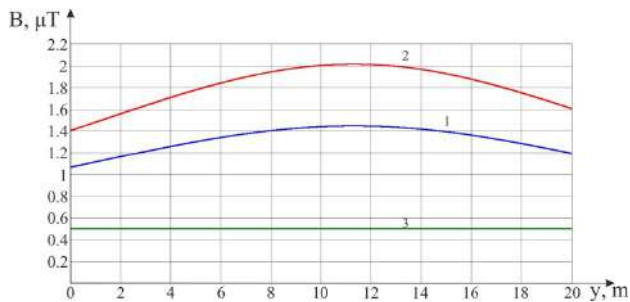


- 1 – за діючого значення струму у фазах обох кіл 150 A ;
- 2 – за відключення одного кола (діюче значення струму другого кола 300 A);
- 3 – лінія нормативного рівня індукції $0,5 \mu\text{T}$.

Рис. 11. Індукція магнітного поля повітряної ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на фасаді багатоповерхового будинку

Аналогічні графіки побудовані і для перспективних електричних навантажень (див. рис. 12).

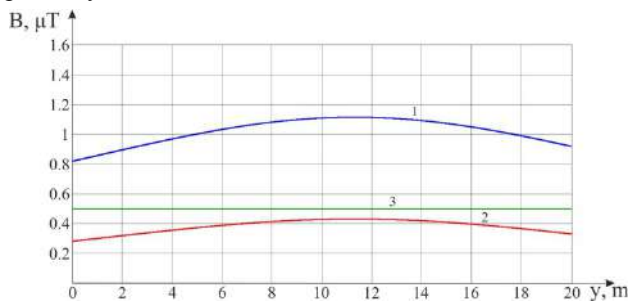
З кривої 2 на рис. 12, яка відповідає одноколовому режиму роботи, видно, що при $y = 11$ м спостерігається перевищення норми індукції магнітного поля у 4 рази. Очевидно, тут необхідно обов'язково застосовувати технології зменшення рівня магнітного поля.



- 1 – за діючого значення струму у фазах обох кіл 195 А;
- 2 – за відключення одного кола (діюче значення струму другого кола 390 А);
- 3 – рівень індукції 0,5 μT .

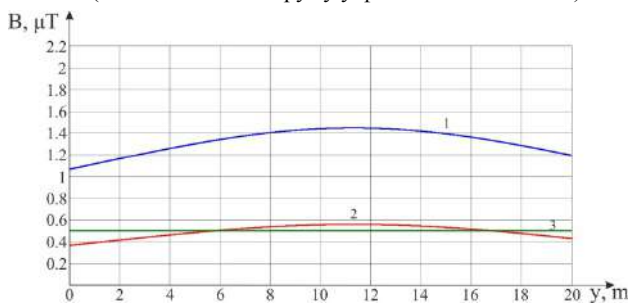
Рис. 12. Індукція магнітного поля повітряної ЛЕП 110 кВ «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на фасаді багатоповерхового будинку за прогнозованого зростання електричних навантажень

На рис. 13, 14 показано результати відповідних розрахунків за умови дзеркального розташування фаз двох кіл ЛЕП у порівнянні зі звичайним варіантом їх розташування.



- 1 – за типового розташування фаз двох кіл;
- 2 – за дзеркального розташування фаз двох кіл;
- 3 – лінія нормативного рівня індукції 0,5 μT .

Рис. 13. Індукція магнітного поля повітряної ЛЕП 110 кВ «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на фасаді багатоповерхового будинку при типовому та дзеркальному розташуванні фаз кіл (діюче значення струму у фазах обох кіл 150 А)



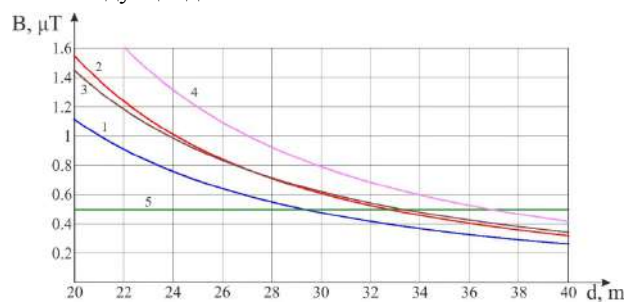
- 1 – за типового розташування фаз двох кіл;
- 2 – за дзеркального розташування фаз двох кіл;
- 3 – лінія нормативного рівня індукції 0,5 μT .

Рис. 14. Індукція магнітного поля повітряної ЛЕП 110 кВ «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на фасаді багатоповерхового будинку при типовому та дзеркальному розташуванні фаз кіл (діюче значення струму у фазах обох кіл 195 А)

Розташування фаз у дзеркальній симетрії дозволяє ефективно зменшувати магнітне поле на фасаді

житлового будинку. За струмів фазах обох кіл, рівних 150 А, перевищення нормативного значення індукції відсутнє в жодній точці, а за перспективного струму 195 А буде мати місце незначне перевищення. Очевидно, що при подальшому зростанні струму фаз (понад 195 А) векторної компенсації буде уже недостатньо і потрібно застосовувати додатково інші способи зменшення індукції, наприклад, екранування.

Якщо не застосовувати векторної компенсації, то очевидно, що необхідно визначити безпечну відстань від осі ЛЕП до фасадів багатоповерхових житлових будинків, яка буде більшою за 20 м. Результати відповідного розрахунку показано на рис. 15. Прийнято, що фасад багатоповерхового будинку може бути розташований на відстані від 20 м до 40 м, а значення індукції розраховано для точки на висоті 11,3 м, оскільки графіки на рис. 11, 12 свідчать, що саме на цій висоті індукція досягає максимального значення.



- 1 – за діючого значення струму у фазах обох кіл 150 А;
- 2 – за відключення одного кола (діюче значення струму другого кола 300 А);
- 3 – за діючого значення струму у фазах обох кіл 195 А;
- 4 – за відключення одного кола (діюче значення струму другого кола 390 А);
- 5 – лінія нормативного рівня індукції 0,5 μT .

Рис. 15. Індукція магнітного поля повітряної ЛЕП 110 кВ «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на висоті 11,3 м при зміні відстані від осі траси ЛЕП до фасаду багатоповерхового будинку

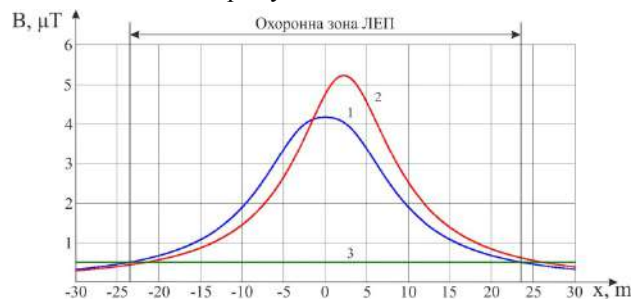
Таким чином, без застосування векторної компенсації фасад житлового будинку має бути розташований від осі ЛЕП на відстані 29 м при однаковій величині струму у фазах обох кіл 150 А. При одноколовій роботі ЛЕП зі струмом 300 А (або ж двоколової з перспективним навантаженням по 195 А в фазах обох кіл) безпечна відстань повинна становити 33 м, очевидно, що саме таке віддалення і є доцільним за поточної ситуації. За умови, якщо буде працювати лише одне коло зі струмом фази 195 А, відповідна відстань повинна становити 37 м.

Ділянка ЛЕП «ЧТЕЦ – Чернігівська-330», що побудована на опорах типу ПБ110-2, проходить переважно по приватному сектору міста, причому подекуди опори розташовані фактично на подвір'ях приватних будинків або впритул до огорожі.

Результати розрахунку індукції на такій ділянці на рівні 1,8 м в напрямку, перпендикулярному трасі ЛЕП, показано на рис. 16.

Житлові будинки на цій ділянці ЛЕП розташовано на відстані 6-10 м від її осі симетрії, очевидно, що поле в таких точках може перевищувати нормативне значення в 6-8 разів. На межі охоронної зони

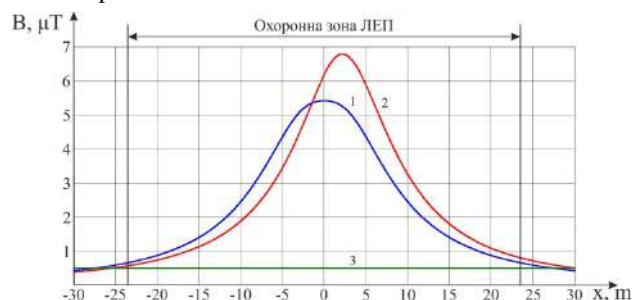
ЛЕП ($\pm 23,5$ m від початку системи координат на рис. 16) за умови рівномірного навантаження обох кіл індукція відповідає нормативному значенню, при одноколовому режимі вона становить $0,6 \mu\text{T}$, а точка з безпечним значенням індукції в цьому режимі відповідає координаті $x = 26$ m. Також слід зазначити, що всі будинки мають горища, а частина з них взагалі є двоповерховими, відповідно, індукція в таких приміщеннях буде ще більшою. Очевидно, що розташування будинків в межах охоронної зони цієї ділянки ЛЕП є неприпустимим.



- 1 – за діючого значення струму у фазах обох кіл 150 А;
2 – за відключення одного кола (діюче значення струму другого кола 300 А);
3 – лінія нормативного рівня індукції $0,5 \mu\text{T}$.

Рис. 16. Індукція магнітного поля повітряної ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на рівні 1,8 m від поверхні землі для ділянки, виконаної на опорах типу ПБ110-2

Аналогічні графіки за струму у фазі 195 А показано на рис. 17.



- 1 – за діючого значення струму у фазах обох кіл 195 А;
2 – за відключення одного кола (діюче значення струму другого кола 390 А);
3 – лінія нормативного рівня індукції $0,5 \mu\text{T}$.

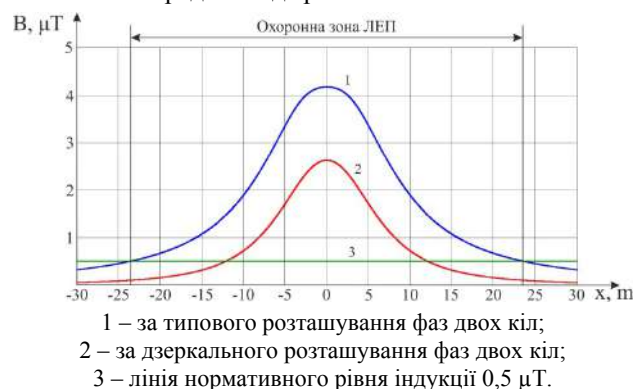
Рис. 17. Індукція магнітного поля повітряної ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» для ділянки, виконаної на опорах типу ПБ110-2 за прогнозованого зростання електричних навантажень

При двоколовому режимі роботи з рівномірним навантаженням на межі охоронної зони з правого боку буде мати місце індукція $0,65 \mu\text{T}$, а при роботі в одноколовому режимі – $0,8 \mu\text{T}$. Безпечне значення індукції спостерігається на відстані 27 m та 30 m відповідно.

Застосування векторної компенсації в даному випадку теж дозволить досягти значного покращення ситуації, що видно з на рис. 18, 19.

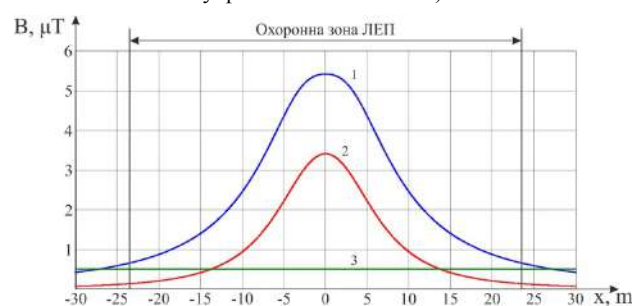
Для показаного на рис. 15 випадку безпечне значення індукції $0,5 \mu\text{T}$ маємо уже на відстані 12 m від осьової лінії траси ЛЕП, на межі охоронної зони індукція становить $0,1 \mu\text{T}$. Також слід зазначити, що для ділянки, виконаної на опорах ПБ110-2, дзеркальне розташування фаз кіл дозволяє суттєво зменшити

індукцію в усіх точках простору на рівні 1,8 m, в тому числі безпосередньо під трасою ЛЕП.



- 1 – за типового розташування фаз двох кіл;
2 – за дзеркального розташування фаз двох кіл;
3 – лінія нормативного рівня індукції $0,5 \mu\text{T}$.

Рис. 18. Розподіл індукції магнітного поля повітряної ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на рівні 1,8 m від поверхні землі вздовж координати «x» для ділянки, виконаної на опорах типу ПБ110-2, при типовому та дзеркальному розташуванні фаз кіл (діюче значення струму у фазах обох кіл 150 А)



- 1 – за типового розташування фаз двох кіл;
2 – за дзеркального розташування фаз двох кіл;
3 – лінія нормативного рівня індукції $0,5 \mu\text{T}$.

Рис. 19. Розподіл індукції магнітного поля повітряної ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» на рівні 1,8 m від поверхні землі вздовж координати «x» для ділянки, виконаної на опорах типу ПБ110-2, при типовому та дзеркальному розташуванні фаз кіл (діюче значення струму у фазах обох кіл 195 А)

З рис. 19 видно, що при струмах у фазах кожного кола 195 А зміна розташування фаз різних кіл у дзеркальній симетрії (векторна компенсація) також дозволяє ефективно зменшувати рівень магнітного поля ЛЕП, індукція досягає безпечного значення на відстані 13,8 m від центру траси ЛЕП, а на межі охоронної зони становить $0,13 \mu\text{T}$.

Результати розрахунку індукції магнітного поля за діючих струмів, отриманих в АТ «Чернігівобленерго», було перевірено за допомогою приладу ТМ-192 компанії TENMARS, який призначено для вимірювання індукції магнітного поля промислової частоти у діапазоні $0,01 - 200 \mu\text{T}$. Результати вимірювань підтверджують коректність розрахунків.

Висновки.

В роботі було розглянуто магнітне поле двоколової повітряної ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330», що проходить крізь зону житлової забудови, в різних режимах її роботи (одноколовий та двоколовий) при діючому та перспективному навантаженні, а також досліджено шляхи його зменшення до безпечного рівня.

Показано, що рівень індукції магнітного поля двоколової ЛЕП 110 kV «ЧТЕЦ – Чернігівська-330» при існуючих та перспективних навантаженнях (струм однієї фази кожного кола 150 А та 195 А відповідно, або ж 300 А та 390 А при роботі в одноколовому режимі) може перевищувати нормативний рівень 0,5 μT на межі охоронної зони до двох разів, причому особливо значний рівень магнітного поля буде спостерігатися при роботі ЛЕП в одноколовому режимі за перспективного навантаження.

Визначено, що безпечно проживання населення вздовж траси зазначеної двоколової ЛЕП досягається за умови віддалення фасадів житлових будинків від осі ЛЕП не менш, ніж на 33 м для багатоповерхових будинків та не менш, як на 27 м для одноповерхових.

При роботі у двоколовому режимі в разі перевищення нормативного рівня магнітного поля рекомендується використовувати метод векторної компенсації [10], що реалізується шляхом дзеркального розташування проводів різних кіл ЛЕП. Показано, що цей метод дозволяє ефективно зменшити рівень магнітного поля даної ЛЕП за межами її траси і, зокрема, на межі охоронної зони.

Подальше зменшення негативного впливу магнітного поля на населення в умовах підвищення електричних навантажень може бути досягнуто шляхом обмеження часу роботи двоколової ЛЕП в одноколовому режимі, який характеризується підвищеним рівнем магнітного поля з боку робочого кола, та застосуванням засобів екранування магнітного поля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Marincu A., Greconici M., Musuroi S. The electromagnetic field around a high voltage 400 kV electrical overhead lines and the influence on the biological systems. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, 2005, vol. 18, no. 1, pp. 105-111. doi: 10.2298/fuee0501105m.
2. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical Solutions To Reduce 50 Hz Magnetic Fields from Power Lines. *Proceedings of Power Tech Conference IEEE 2003*, 23-26 June, 2003, Bologna (Italy), 2003, vol. 2, 6 p. doi: 10.1109/ptc.2003.1304685.
3. Moro F., Turri R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 1042-1048. doi: 10.1109/tpwrd.2007.915212.
4. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
5. Красножон А.В., Буйний Р.О., Пентегов І.В. Розрахунок втрат активної потужності в грозозахисному тросі повітряних ліній електропередачі. *Технічна електродинаміка*, 2016, № 4, С. 23-25. doi: 10.15407/techned2016.04.023.
6. Geri A., Locatelli A., Veca G.M. Magnetic fields generated by power lines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, vol. 31, no. 3, pp. 1508-1511. doi: 10.1109/20.376316.
7. Moro F., Turri R. Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2012, vol. 37, pp. 343-364. doi: 10.2528/pierb11112206.
8. Пелевин Д.Е. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон. *Технічна електродинаміка*, 2014, № 5, С. 14-16.
9. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Яковенко В.Н. Исследование магнитного поля высоковольтных линий

электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*, 2012, № 1, С. 3-9.

10. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелевин Д.Е., Пилюгина О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*, 2013, № 2, С. 3-9.

11. Shangzun Y., Pengfei L., Ling N. Study on electromagnetic radiation of ultra-high voltage power transmission line. *International Conference on Computer Science and Information Technology*, 2008, pp. 402-406. doi: 10.1109/ICCSIT.2008.92.

12. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика (зі змінами). – К.: Міненерговугілля України, 2016. – 37 с.

13. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пилюгина О.Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*, 2014, № 5, С. 11-13.

14. Схема перспективного розвитку електричних мереж 35-110 кВ по ПАТ «Чернігівобленерго» на 2017-2027 роки. – К.: ПАТ ПТІ «Київорббуд», 2017.

15. *Regulating Power Line EMF Exposure: International Precedents*. Available at: <https://elc.uvic.ca/wordpress/wp-content/uploads/2015/01/Regulating-Power-Line-EMF-Exposure.pdf> (Accessed 02 August 2020).

16. Burnett J., Yaping P.D. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*, 2002, vol. 37, no. 8-9, pp. 769-775. doi: 10.1016/S0360-1323(02)00043-4.

REFERENCES

1. Marincu A., Greconici M., Musuroi S. The electromagnetic field around a high voltage 400 kV electrical overhead lines and the influence on the biological systems. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, 2005, vol. 18, no. 1, pp. 105-111. doi: 10.2298/fuee0501105m.
2. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical Solutions To Reduce 50 Hz Magnetic Fields from Power Lines. *Proceedings of Power Tech Conference IEEE 2003*, 23-26 June, 2003, Bologna (Italy), 2003, vol. 2, 6 p. doi: 10.1109/ptc.2003.1304685.
3. Moro F., Turri R. Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 1042-1048. doi: 10.1109/tpwrd.2007.915212.
4. *Electrical installation regulations*. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
5. Krasnozhon A.V., Buinyi R.O., Pentegov I.V. Calculation of active power losses in the grounding wire of overhead power lines. *Technical electrodynamic*, 2016, no. 4, pp. 23-25. (Ukr). doi: 10.15407/techned2016.04.023.
6. Geri A., Locatelli A., Veca G.M. Magnetic fields generated by power lines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, vol. 31, no. 3, pp. 1508-1511. doi: 10.1109/20.376316.
7. Moro F., Turri R. Accurate calculation of the right-of-way width for power line magnetic field impact assessment. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2012, vol. 37, pp. 343-364. doi: 10.2528/pierb11112206.
8. Pelevin D.Ye. The methods of reducing of the magnetic fields of overhead power lines outside security zones. *Technical Electrodynamic*, 2014, no. 5, pp. 14-16. (Rus).
9. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Yakovenko V.N. The research of magnetic field of high-voltage AC transmissions lines. *Technical Electrodynamic*, 2012, no. 1, pp. 3-9. (Rus).
10. Rozov V.Yu., Reutskyi S.Yu., Pelevin D.Ye., Pylugina O.Yu. The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level. *Technical Electrodynamic*, 2013, no. 2, pp. 3-9. (Rus).
11. Shangzun Y., Pengfei L., Ling N. Study on electromagnetic radiation of ultra-high voltage power transmission line. *Internat-*

tional Conference on Computer Science and Information Technology, 2008, pp. 402-406. doi: 10.1109/ICCSIT.2008.92.

12. *SOU-N EE 20.179:2008. Calculation of electric and magnetic fields of power lines. Method (with changes)*. Kyiv, Minenergovugillja Ukrainy Publ., 2016. 37 p. (Ukr).

13. Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Piliugina O.Yu. The method of calculation of the magnetic field of three-phase power lines. *Technical electrodynamics*, 2014, no. 5, pp. 11-13. (Rus).

14. *Scheme of perspective development of 35-110 kV electric grids on PJSC «Chernihivoblenergo» for 2017-2027*. Kyiv, PJSC PTI «Kyivorgbud», 2017. (Ukr).

15. *Regulating Power Line EMF Exposure: International Precedents*. Available at: <https://elc.uvic.ca/wordpress/wp-content/uploads/2015/01/Regulating-Power-Line-EMF-Exposure.pdf> (Accessed 02 August 2020).

16. Burnett J., Yaping P.D. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*, 2002, vol. 37, no. 8-9, pp. 769-775. doi: 10.1016/S0360-1323(02)00043-4.

Надійшла (Received) 14.09.2020

Прийнята (Accepted) 10.11.2020

Опублікована (Published) 24.12.2020

Красножон Андрій Васильович¹, к.т.н.,

Буйний Роман Олександрович¹, к.т.н.,

Діхтярук Ігор Віталійович¹, к.т.н.,

Квицинський Анатолій Олександрович², к.т.н.,

¹ Національний університет «Чернігівська політехніка»,

95, вул. Шевченко, Чернігів, 14035,

e-mail: buinyiroman@gmail.com, Dihtyaruk.ihor@gmail.com,

red_john@ukr.net

² Відділ науково-дослідного супроводу

нормативного забезпечення НЕК «Укренерго»,

11/8, вул. Дорогожицька, Київ, 04112,

e-mail: Kvytsynskyi.AO@ua.energy

A.V. Krasnozhan¹, R.O. Buinyi¹, I.V. Dihtyaruk¹,

A.O. Kvytsynskyi²

¹ Chernihiv Polytechnic National University,

95, Shevchenko Str., Chernihiv, 14035, Ukraine.

² Department of research support of regulatory support

of the NPC Ukrenenergo,

11/8, Dorohozhytska Str., Kyiv, 04112, Ukraine.

The investigation of distribution of the magnetic flux density of operating two-circuit power line 110 kV «ChTPP-Chernihiv-330» in the residential area and methods of its decreasing to a safe level.

Purpose. The problem of evaluation and analysis of magnetic flux density of overhead power lines is very relevant now, since

the magnetic field of industrial frequency can have a negative effect on human health. The analysis of the magnetic field of the operating double-circuit overhead transmission line was made in this work. This overhead line is in the residential area of Chernihiv, Ukraine. The purpose of this work is to determine safe habitation conditions as a function of the magnetic flux density along the route of two-circuit power line with the voltage 110 kV «ChTPP-Chernihiv-330». Real modes of operation are taken into account. Recommendations are given for reducing the magnetic flux density level in the residential area to a value that will not exceed the standard value. **Methodology.** Methods of electromagnetic field theory were used to calculate the magnetic field of power lines. The location of the phase wires on different types of supports of the existing power transmission line and the minimum distance between the conductors and the ground were taken into account. The current value of the current in the phases of the transmission line was taken from the Company «Chernihivoblenergo». Also, the calculation of the magnetic flux density was made for the perspective loads of the transmission line. Estimation of the value of the magnetic flux density was made for the zone of one-story and multi-story buildings near power lines. The option of uniform loading of two power transmission lines was considered and the case where the entire load is transferred along one circuit was also considered.

Results. In this work, the distribution of magnetic flux density at a height of 1.8 m in the direction perpendicular to the power transmission line for the sections built on supports of the U110-2 and PB110-2 types was obtained. The graphs show that the magnitude of the magnetic flux density at the boundary of the protection zone of the transmission line will be exceeded twice the standard value 0.5 μT for the existing and perspective loads. This problem is relevant in the case of transmission lines in single-circuit mode. The graphs of distribution of magnetic flux density on the facade of an apartment building, located at a distance of 20 m from the axis of symmetry of the transmission line, were constructed. As a result, it is shown that at a height of 11 m from the earth's surface, magnetic flux density will be 1.5-2 μT . **Practical value.** It is determined that safe habitation along the route of two-circuit power line with the voltage 110 kV «ChTPP-Chernihiv-330» can be achieved when facades of an apartment building are removed from the axis of symmetry of the transmission line at a distance of 33 m for high-rise buildings and at a distance of 27 m for one-storey buildings. Recommendations for reducing the magnetic flux density of this power transmission line have been developed. References 16, figures 19.

Key words: overhead transmission line, electric loads, magnetic flux density, residential building.