

В.Ю. Розов, С.Ю. Реуцький, К.Д. Кундіус

Захист працівників від магнітного поля повітряних ліній електропередачі 330-750 кВ при виконанні робіт без зняття напруги під навантаженням

Проблема. Однією із гострих проблем, що потребує вирішення при виконанні ремонтних робіт під напругою на лініях електропередачі (ЛЕП), є захист здоров'я працівників від електромагнітного поля високої інтенсивності. **Мета.** Метою роботи є розроблення методологічних основ захисту працівників від магнітного поля (МП) ЛЕП 330-750 кВ при виконанні ремонтних робіт без зняття напруги і під навантаженням. **Методика.** Розроблено методику розрахунку гранично допустимого коефіцієнту навантаження ЛЕП, який обмежує індукцію МП в робочій зоні ЛЕП до гранично допустимого рівня санітарних норм при заданих терміні робіт на потенціалі і мінімальній товщині захисного слою між проводами та тілом працівника. **Наукова новизна.** Створені методологічні засади захисту працівників від МП, що ґрунтуються на сумісному використанні розроблених методу режимної мінімізації навантаження і методу збільшення робочої дистанції, та розробленої методики розрахунку гранично допустимого коефіцієнту навантаження ЛЕП. **Практична значимість** Запропоновані графічні залежності гранично допустимого коефіцієнту навантаження ЛЕП в функції від необхідного часу роботи та товщини введеного додаткового захисного слою між проводами та тілом працівника, що при прийнятому гранично допустимому нормативному рівні індукції МП дозволяє оперативно визначати гранично допустимі коефіцієнти навантаження для різних типів ЛЕП 330-750 кВ. Бібл. 45, табл. 1, рис. 10.

Ключові слова: високовольтна лінія електропередачі, роботи без зняття напруги, зменшення магнітного поля.

Вступ. Виконання ремонтних робіт на високовольтних повітряних лініях електропередачі (ЛЕП) без зняття напруги є поширеним методом підвищення їх рентабельності [1-4]. Однією із гострих проблем, що потребує вирішення при виконанні таких робіт, є захист здоров'я працівників від електромагнітного поля (ЕМП) ЛЕП промислової частоти з підвищеною інтенсивністю [5-8]. Таке ЕМП може характеризуватися незалежними складовими – електричним полем (ЕП) і магнітним полем (МП) [9, 10], кожне з яких негативно впливає на здоров'я людей [11, 12]. Тому в провідних країнах світу зараз бурно розвиваються методи заміни працівників робототехнічними пристроями при виконанні робіт на потенціалі ЛЕП [13-15].

В Україні роботи на потенціалі проводів високовольтних ЛЕП виконуються працівниками вже більш 40 років, а їх технологія постійно вдосконалюється [1-4]. На сьогодні вирішена проблема захисту здоров'я робочого персоналу від негативної дії ЕП ЛЕП, що ґрунтується на використанні спеціальних захисних костюмів із електропровідного матеріалу [4]. Але в істотно гіршому стані знаходиться вирішення проблеми захисту працівників від дії МП. Ця проблема остається недостатньо проробленою як в теоретичному, так і практичному плані. Тому певним кроком в її вирішенні стала розробка авторами математичної моделі МП в зоні виконання робіт без зняття напруги під навантаженням [16], та методики його розрахунку, що ґрунтуються на результатах раніш виконаних досліджень МП різних технічних об'єктів [17-31]. Останні дослідження авторів [16] підтверджують актуальність вирішення в Україні проблеми захисту працівників від дії МП при виконанні робіт на ЛЕП без зняття напруги. Так, в [16] показано, що для типових ЛЕП 330-750 кВ, в номінальному режимі їх роботи, можливо істотне, в 1,5-1,9 разів, перевищення верхнього граничного рівня індукції МП над прийнятими в Україні та Євросоюзі нормативами [12, 32-34]. Тому актуальною є задача створення наукових засад

захисту робочого персоналу від дії МП шляхом його зменшення до безпечного рівня в зоні виконання робіт на проводах ЛЕП без зняття напруги і під навантаженням.

Метою роботи є розроблення методологічних засад захисту працівників від магнітного поля ЛЕП 330-750 кВ при виконанні ремонтних робіт без зняття напруги і під навантаженням.

Нормування граничного рівня дії МП частотою 50 Гц. В Україні граничний рівень дії (ГРД) індукції МП на робочий персонал ЛЕП регламентовано в [33] і зведено в п. 1 табл. 1. Так, для тіла працівника ГРД складає не більш 7,5 мТл при роботі до 1 години і не більш 1,8 мТл при роботі 8 годин. В інтервалі між однією і вісьма годинами, ГРД МП B_{PD} в [33, 34] визначається в функції часу за методикою, розробленою на основі санітарно-гігієнічних та біологічних досліджень, виконаних в інститутах НАМН України [35-37]. Для кінцівок працівника ГРД МП є значно більшим і складає 15 мТл (п. 1 табл. 1).

В Європі, відповідно до Директив Євросоюзу [12], ГРД за МП для працівників є більш жорстким. Так, верхній рівень ГРД для тіла, складає 6 мТл (при короткочасному впливі), а нижній – 1 мТл (при тривалому впливі). На сьогодні цей норматив [12] затверджений і в Україні [32] і його передбачається ввести у дію після припинення або скасування воєнного стану в Україні. Тому цей європейський норматив будемо вважати перспективним.

Враховуючи викладене, в якості ГРД за МП частотою 50 Гц при подальшому аналізі будемо використовувати чинні в Україні «Державні санітарні правила і норми при виконанні робіт в не вимкнених електроустановках напругою до 750 кВ включно» (п. 1 табл. 1), а для порівняння – перспективні для України директиви Євросоюзу [32], що затверджені наказом МОЗ від 13.01.2023 № 81.

ГРД індукції B_{PD} синусоїдального МП частотою 50 Гц на працівника

№ пп	Нормативний документ	Час роботи працівника (t_r) на потенціалі ЛЕП (годин)							
		≤ 1	2	3	4	5	6	7	≥ 8
		ГРД індукції МП B_{PD} при впливі на тіло/кінцівки, мТл							
1	Чинний нормативний документ: Наказ МОЗ України від 09.07.1997 № 198 «Державні санітарні правила і норми при виконанні робіт в не вимкнених електроустановах напругою до 750 кВ включно»	7,5/ 15,0	6,1/ 15,0	5,0/ 15,0	4,0/ 15,0	3,1/ 15,0	2,5/ 15,0	2,0/ 15,0	1,8/ 15,0
2	Перспективні гранично допустимі рівні дії МП на основі Директив 89/391/ЕЕС і Наказу МОЗ від 13.01.2023 № 81 «Мінімальні вимоги до охорони здоров'я та безпеки працівників, які піддаються впливу електромагнітних полів», що доповнені відміченими * значеннями B_{PD} , за діючою в Україні методикою	6,00/ 18,00	4,65*/ 18,00	3,60*/ 18,00	2,78*/ 18,00	2,15*/ 18,00	1,67*/ 18,00	1,29*/ 18,00	1,00/ 18,00

Робоча дистанція між проводами і тілом працівника та робоча індукція МП. При виконанні робіт на потенціалі ЛЕП працівник знаходиться в хиткому стані, на висоті в десятки метрів [4], і в якості опори вимушений використовувати проводи ЛЕП (рис. 1), що призводить до безпосереднього контакту через захисний костюм різних частин його тіла з проводами. При цьому, без прийняття спеціальних заходів, практично

весь час знаходження працівника на потенціалі ЛЕП і під навантаженням, дистанція між його тілом і поверхнею проводів є мінімальною і визначається тільки товщиною захисного костюму (≈ 2 мм). Цей факт змушує при подальшому аналізі враховувати значення робочої індукції МП, що відповідає мінімальній відстані (2 мм) між тілом працівника і проводом ЛЕП при експозиції на весь час виконання працівником робіт на потенціалі.



Рис. 1. Типове положення тіла працівника при виконанні робіт на потенціалі ЛЕП, де в якості опори він використовує проводи, що знаходяться під навантаженням

Індукція МП, що діє на працівника при виконанні робіт на потенціалі проводів ЛЕП і під навантаженням, досліджена авторами в [16], а їх основні результати представлені на рис. 2, 3. Так, на рис. 2, наведені результати верифікованого розрахунку максимального значення індукції МП різних ЛЕП при виконанні робіт за технологією, прийнятою в НЕК «Укренерго». Вони підтверджують необхідність істотного зменшення індукції їх МП [16]. Так, відповідно до чинних санітарних норм України [33] (п. 1 табл. 1), індукцію МП ЛЕП 330 кВ при номінальному струмі її навантаження необхідно зменшувати з 11,5 до 7,5 мТл при роботі на потенціалі до 1 години (рис. 2). Відповідно норм Євросоюзу [12, 32] при роботі до 1 години потрібно зменшення B_{PD} не тільки для ЛЕП 330 кВ, а також і для ЛЕП 750 кВ, $N=4$. Зменшення індукції МП для всіх ЛЕП необхідно також при t_r більш двох годин.

Що стосується ГРД МП для кінцівок працівника, що відповідно до табл. 1 складає 15-18 мТл, то особливих проблем з його забезпеченням для всіх ЛЕП, що розглядаються, не виникає.

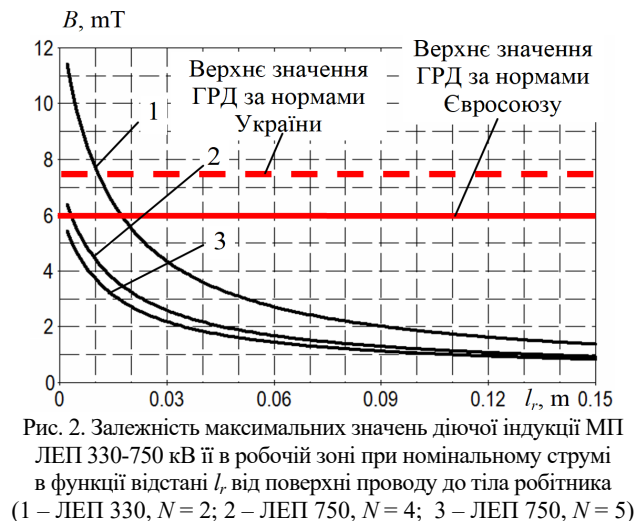


Рис. 2. Залежність максимальних значень діючої індукції МП ЛЕП 330-750 кВ її в робочій зоні при номінальному струмі в функції відстані l_r від поверхні проводу до тіла робітника (1 – ЛЕП 330, $N=2$; 2 – ЛЕП 750, $N=4$; 3 – ЛЕП 750, $N=5$)

Вибір методів зменшення індукції МП при виконанні робіт на потенціалі проводів ЛЕП під навантаженням. Для зменшення МП ЛЕП при виконанні робіт на потенціалі ЛЕП можливе застосування таких відомих методів [38, 39], як екранування і захист відстанню.

Екранування широко застосовується при роботах на потенціалі ЛЕП для зменшення ЕП за допомогою екрануючих костюмів, які виконані із електропровідного матеріалу [2-4]. Їх використання є обов'язковим. Але, як показано в [40-43], такі костюми не екранують МП промислової частоти. Цей висновок також експериментально підтверджений авторами на лабораторній установці (рис. 4), що складається із джерела регульованого МП 50 Гц з індукцією 0-0,6 мТл і магнітометру із виносним датчиком, закріпленим в робочій зоні. Вимірювання індукції МП проводились при відсутності та наявності захисного костюму екрануючого комплексу ЕК-1 [4] з товщиною матеріалу 2 мм, яким накривався датчик. Результати експерименту підтвердили відсутність будь якого ефекту екрану-

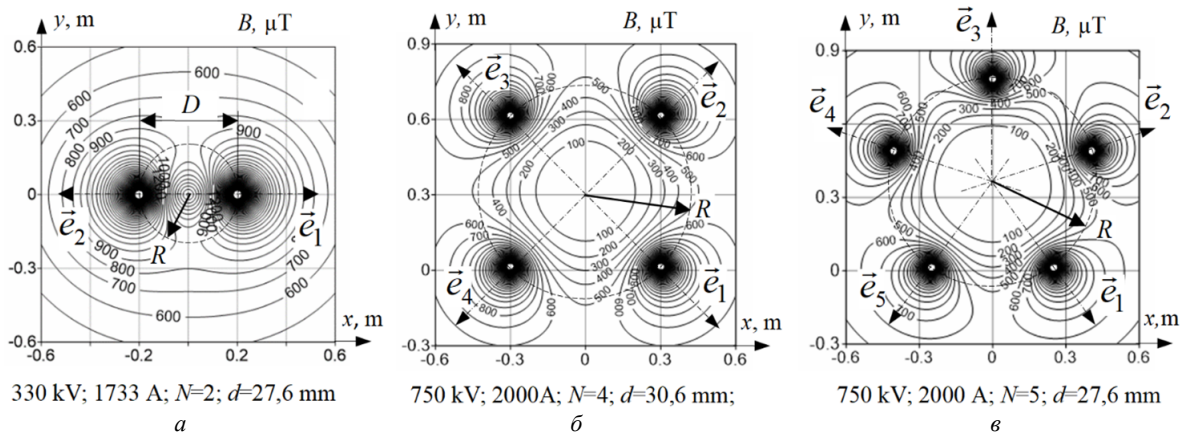


Рис. 3. Характер розподілу індукції МП в робочих зонах ЛЕП 330-750 кВ поблизу розщеплених проводів їх фаз



Рис. 4. Експериментальні дослідження ефекту екранування МП промислової частоти захисним костюмом комплексу індивідуального екрануючого ЕК-1

Тому збільшення мінімальної робочої дистанції між тілом працівника і поверхнею проводів ЛЕП є ефективним методом зменшення впливу МП на працівника. Практично це може бути досягнуто шляхом введення між проводами і тілом працівника додаткового матеріалу необхідної товщини (2-15 мм), що не деформується під вагою працівника. В якості такого матеріалу може виступати, наприклад, спеціальний захисний костюм з підвищеною товщиною (10-15 мм), або спеціальні накидки на проводи ЛЕП відповідної товщини. Так, при збільшенні робочої дистанції від тіла працівника до проводів ЛЕП 330 кВ з 2 мм до 15 мм, і відпо-

вання МП захисним костюмом. Однак цей результат був цілком очікуваним, так як відповідно до [44], тільки для реалізації незначного (в 1,2-1,5 рази) екранування МП частотою 50 Гц, необхідно використання масивних металевих електропровідних (магнітостатичних) екранів, що на потенціалі проводів ЛЕП є практично неможливим. Тому застосування методів екранування для зменшення МП на потенціалі ЛЕП в подальшому не розглядається.

Захист відстанню широко використовується для зменшення потенційного електромагнітного поля [10, 45], яке спадає при віддаленні від джерела. Потенційним є і МП ЛЕП, яке поблизу її проводів інтенсивно зменшується при віддаленні від проводу з градієнтом біля 0,4 мТл/мм (рис. 3).

відного збільшення l_r , індукція МП (рис. 2) зменшується практично вдвічі – з 11,5 мТл до нормативного рівня 6 мТл. Таким чином, захист відстанню, що заснований на збільшенні робочої дистанції до проводів ЛЕП, є ефективним методом захисту персоналу від МП при виконанні робіт на потенціалі. Але для його практичної реалізації необхідне впровадження нових технологічних операцій і спеціальних захисних засобів.

Зменшення МП ЛЕП шляхом зменшення робочого струму I_r ЛЕП [16] назовемо методом режимної мінімізації навантаження ЛЕП. Він може бути реалізований на час ремонту ЛЕП з відповідним зменшенням як робочого струму, так і пропорційної йому індукції МП. Цей метод є переважним, так як для його реалізації необхідні тільки узгоджені із споживачами організаційні заходи, що передбачають планове відключення окремих споживачів на час ремонту. Ефективність використання методу режимної мінімізації навантаження ЛЕП для зменшення їх МП може бути виражена через коефіцієнт навантаження (k_r) ЛЕП, який визначається як співвідношення між робочим (I_r) і номінальним (I_n) струмами ЛЕП:

$$k_r = I_r / I_n, \quad 0 \leq k_r \leq 1. \quad (1)$$

Тому метод режимної мінімізації навантаження ЛЕП, що реалізується шляхом зменшення на термін ремонту коефіцієнту навантаження (1) ЛЕП, може бути рекомендований як основний метод захисту робочого персоналу від МП ЛЕП при виконанні ремонтних робіт на їх потенціалі. В разі, коли використання основного методу захисту не досягає поставленої мети, разом з ним рекомендується використання додат-

кового методу збільшення робочої дистанції до проводів ЛЕП на основі використання спеціальних захисних засобів – захисного костюму з збільшеною товщиною його матеріалу (5-15 мм), або захисних накидок товщиною 3-13 мм для гарантованого збільшення відстані між тілом працівника і проводами ЛЕП.

Визначення умов для забезпечення захисту робочого персоналу від МП ЛЕП. Для захисту здоров'я персоналу від дії МП необхідно гарантовано обмежити рівень індукції МП B_R на тілі (кінцівках) працівника до граничного рівня B_{PD} , який є функцією часу t_r . Тоді умови захисту працівника можна визначити як:

$$B_R(I_r) \leq B_{PD}(t_r), \quad (2)$$

де t_r – час роботи працівника на потенціалі ЛЕП.

Як показано авторами в [16], максимальні значення індукції МП B_R в робочій зоні ЛЕП концентруються по осях \vec{e} симетрії N підвісу розщеплених проводів її фаз (рис. 3). Індукція МП у точці спостереження P (рис. 5) залежить від відстані l від поверхні тіла працівника (на якій локалізована точка спостереження P), до осі найближчого проводу ЛЕП, коли ось x співпадає із напрямом \vec{e} .

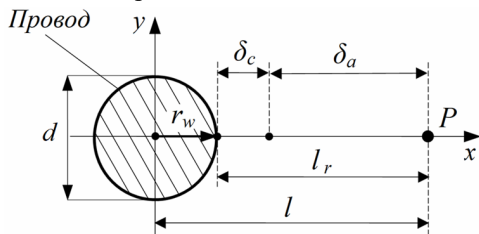


Рис. 5. До визначення відстані l від осі проводу ЛЕП до точки спостереження P

Індукція МП також залежить від таких параметрів ЛЕП, як кількість N розщеплених проводів фази, їх радіус r_w , та відстань D між розщепленими проводами фази. При цьому відповідно до рис. 5:

$$l = r_w + l_r = r_w + \delta_c + \delta_a, \quad (3)$$

де l_r – відстань від поверхні проводу до тіла працівника; δ_c – товщина тканини стандартного захисного костюму комплексу екрануючого ЕК-1 (2 мм); δ_a – товщина додаткового захисного слою при використанні спеціальних захисних засобів.

Визначимо умови реалізації співвідношення (2) при використанні методу режимної мінімізації навантаження, та методу збільшення робочої дистанції для 3-х різних типів ЛЕП (рис. 3), параметри яких відповідають реальним (ЛЕП1 330 кВ, $I_n = 1733$ А, $N=2$, $r_w = 14$ мм, $D = 400$ мм; ЛЕП2 750 кВ, $I_n = 2000$ А, $N=4$; $r_w = 15,4$ мм, $D = 600$ мм; ЛЕП3 750 кВ, $I_n = 2000$ А, $N=5$, $r_w = 14$ мм, $D = 500$ мм).

Для цього знайдемо гранично допустимі коефіцієнти навантаження (k_{rD}) ЛЕП, які дозволяють обмежити індукцію МП в їх робочій зоні до гранично допустимого рівня санітарних норм B_{PD} . Значення k_{rD} знайдемо шляхом використання запропованої авторами в [16] математичної моделі МП в робочій зоні ЛЕП з урахуванням умови (2) та вимог санітарних норм з гранично допустимого рівня дії індукції B_{PD} . В результаті отримаємо наступні розрахункові співвідношення, що дозволяють визначити гранично допустимі коефіцієнти навантаження k_{rD} для різних (рис. 3) ЛЕП:

$$k_{rD(N=2)} \leq \frac{B_{PD}}{I_n} \left[\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{(l+R)}{l(l+2R)} \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$k_{rD(N=4)} \leq \frac{B_{PD}}{I_n} \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{(l+R)^3}{(l+R)^4 - R^4} \right] \right)^{-1}; \quad (5)$$

$$k_{rD(N=5)} \leq \frac{B_{PD}}{I_n} \left[\frac{\mu_0}{10\pi} \left(\frac{1}{l} + \frac{2(l+R-R\cos(2\pi/5))}{(l+R-R\cos(2\pi/5))^2 + (R\sin(2\pi/5))^2} + \frac{2(l+R-R\cos(4\pi/5))}{(l+R-R\cos(4\pi/5))^2 + (R\sin(4\pi/5))^2} \right) \right]^{-1}; \quad (6)$$

$$R = \frac{D}{2\sin(\pi/N)}. \quad (7)$$

На основі співвідношень (1-7), та п. 1 табл. 1, на рис. 6 побудовані графічні залежності k_{rD} для випадку $\delta_a = 0$.

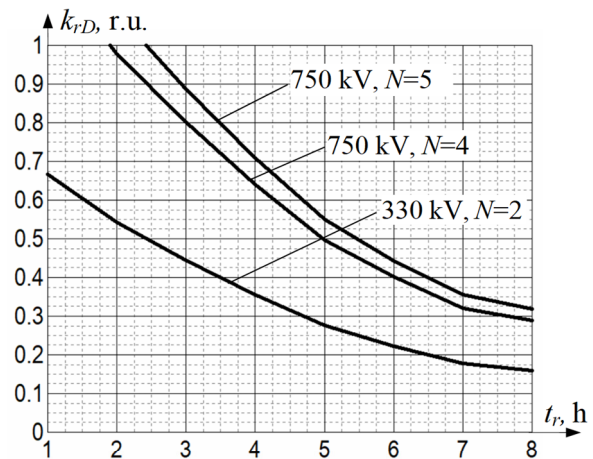


Рис. 6. Гранично допустимий коефіцієнт навантаження k_{rD} різних ЛЕП при $\delta_a = 0$ в залежності від терміну виконання t_r робіт на потенціалі ЛЕП 330-750 кВ за чинними нормативами України

Із рис. 6 слідує, що найгірша ситуація складається для ЛЕП 330 кВ. Її гранично допустимий коефіцієнт навантаження k_{rD} вже при $t_r = 1$ год повинен складати менше 0,67, при $t_r = 4$ год – 0,36, а при $t_r = 8$ год – 0,16. Але практичне досягнення низьких коефіцієнтів навантаження ($k_r < 0,5$) може бути проблематичним, і особливо, при великому обсязі ремонтних робіт на ЛЕП, виконання яких потребує значного часу.

Для ЛЕП 750 кВ із великою кількістю розщеплених проводів ($N=4; 5$) і при $t_r = 1$ год, k_{rD} ЛЕП (рис. 6) складає біля одиниці, при $t_r = 4$ год – 0,65-0,7, а при 8 год – біля 0,29-0,32. Для цих ЛЕП використання методу режимної мінімізації навантаження може бути достатнім при $k_{rD} \geq 0,5$ і $t_r < 5$ годин.

Спільне використання методу режимної мінімізації навантаження і методу збільшення робочої дистанції може бути доцільним для ЛЕП 330 кВ при $t_r > 1$ год, і ілюструється кривими на рис. 7, побудованими відповідно до співвідношень (1-7) і п. 1 табл. 1.

Так, при введенні додаткової дистанції $\delta_a = 5$ мм коефіцієнт k_{rD} для цієї ЛЕП може бути збільшений у

всьому діапазоні t_r до 30 %, при $\delta_a = 10$ мм – до 60 %, а при $\delta_a = 15$ мм – практично вдвічі. Це підтверджує високу ефективність методу збільшення робочої дистанції. Сумісне використання запропонованих методів також може бути доцільним при великій трудомісткості робіт на потенціалі ЛЕП, або при неможливості істотного зменшення коефіцієнту k_{rD} методом режимної мінімізації навантаження.

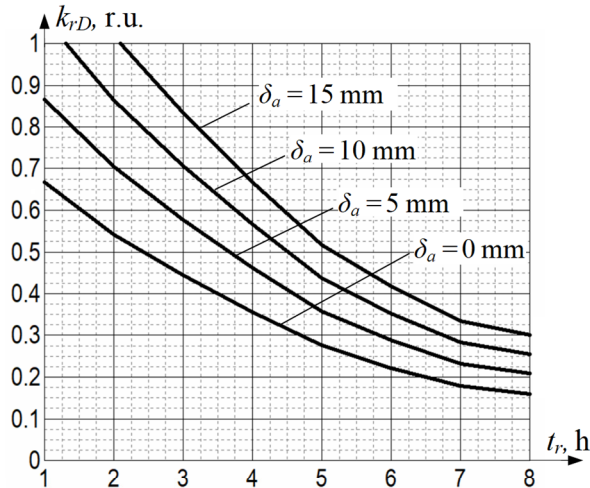


Рис. 7. Гранично допустимий коефіцієнт навантаження k_{rD} ЛЕП 330 кВ ($N=2$) в разі введення додаткової робочої дистанції δ_a за чинними нормативами України

Сукупність запропонованих вище методів зменшення діючого на працівника МП, та розробленої методики розрахунку гранично допустимого коефіцієнту навантаження k_{rD} ЛЕП, а також виконання сформульованої умови (2), складає методологію захисту працівників від магнітного поля ЛЕП.

Тепер зробимо оцінку ефективності використання розглянутої методології захисту працівників для зменшення індукції МП ЛЕП до більш жорстких норм Євросоюзу [12]. Але в [12] передбачено нормування тільки верхнього (6 мТл) і нижнього (1 мТл) ГРД індукції МП і відсутнє нормування при різних термінах роботи працівників (між 1 і 8 годинами), як це зроблено у [33, 34]. Для виконання вказаної оцінки доповнимо норматив [12] значеннями ГРД індукції МП в функції часу роботи персоналу t_r за методикою НАМН України, що використана в [33, 34].

Так, як слідує з аналізу чинних нормативів України [33, 34], що розроблені інститутами НАМН України, залежність $B_{PD} = f(t_r)$ в них виражається експоненціальною функцією:

$$B_{PD} = be^{-at_r}, \quad (8)$$

яка, відповідно до даних п. 1 табл. 1, представлена у вигляді кривої 1 на рис. 8.

Використаємо (8) для визначення можливої залежності $B_{PD} = f(t_r)$ для реалізації нормативів Євросоюзу. Така залежність при $a = 0,2560$, $b = 7,7503$ представлена у вигляді кривої 2 на рис. 8, а розраховані на її основі значення B_{PD} , що відмічені зірочками, зведені до п. 2 табл. 1. Очевидно, що при імplementації в Україні нормативів Євросоюзу [12, 33], залежність $B_{PD} = f(t_r)$ потребує уточнення на основі останніх досліджень НАМН України.

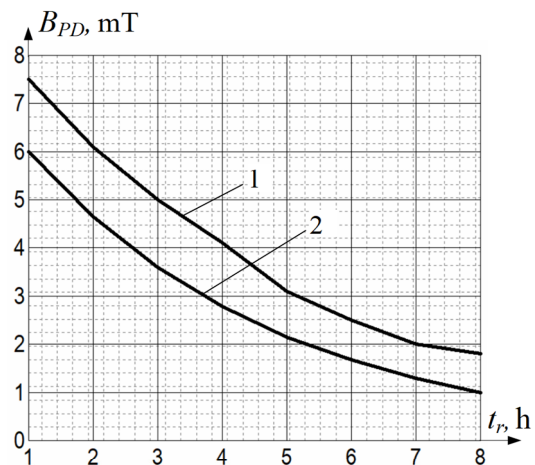


Рис. 8. Залежність граничного рівня індукції МП B_{PD} для тіла працівника від часу t_r відповідно до чинних 1 [33] та перспективних 2 [12, 32] санітарних норм

Побудовані відповідно до даних п. 2 табл. 1 залежності $k_{rD} = f(t_r)$ при $\delta_a = 0$ для нормативів Євросоюзу представлені на рис. 9. Їх аналіз показує, що для найгіршого випадку (ЛЕП 330 кВ) вже при $t_r = 1$ год, коефіцієнт k_{rD} ЛЕП повинен складати не більш 0,53, при $t_r = 4$ год – 0,25, а при $t_r = 8$ год – 0,09. Тому виконання нормативів Євросоюзу (п. 2 табл. 1) без використання додаткових методів збільшення робочої дистанції може бути проблематичним.

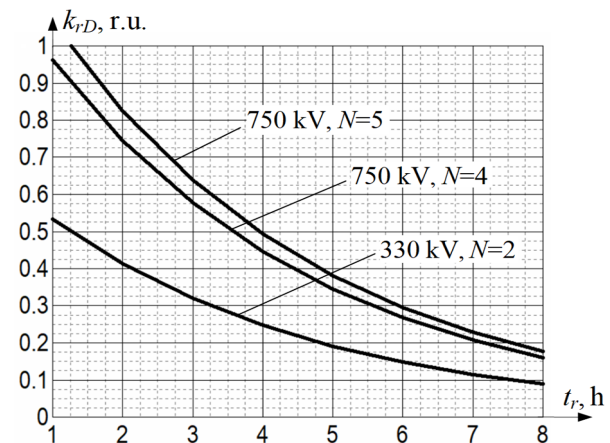


Рис. 9. Гранично допустимий за перспективними нормативами Євросоюзу (п. 2 табл. 1) коефіцієнт навантаження k_{rD} різних ЛЕП в залежності від терміну виконання t_r робіт на потенціалі ЛЕП 330-750 кВ при $\delta_a = 0$

Результати забезпечення нормативів Євросоюзу [12, 32] при використанні додаткового методу захисту відстанню представлені на рис. 10.

Тут гранично допустимі коефіцієнти навантаження k_{rD} визначені відповідно до (1-8) та п. 2 табл. 1 при δ_a від 0 до 15 мм. Їх аналіз показує, що для найгіршого випадку (ЛЕП 330 кВ) можливе досягнення нормативного значення B_{PD} вже при $k_{rD} = 0,5$ для $t_r < 4$ год, і $\delta_a = 15$ мм. Отримані результати підтверджують можливість виконання і норм Євросоюзу (п. 2 табл. 1) при використанні розроблених методів захисту робітників від МП ЛЕП.

Представлені на рис. 6, 7, 9, 10 графічні залежності дозволяють оперативно, в робочих умовах, реалізовувати розроблену методологію захисту працівників від МП ЛЕП 330-750 кВ при запровадженні як чинних санітарних нормативів України, так Директив Євросоюзу.

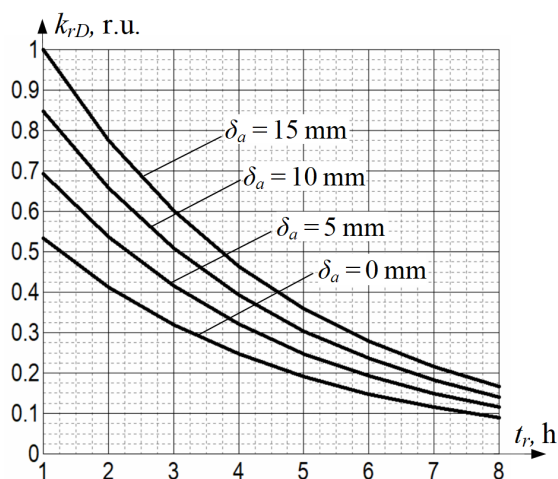


Рис. 10. Гранично допустимий за перспективними нормативами Євросоюзу (п. 2 табл. 1) коефіцієнт навантаження k_{rD} для ЛЕП 330 кВ в залежності від терміну виконання t_r робіт на потенціалі в разі введення додаткової робочої дистанції δ_a

Висновки.

1. Показано, що практично впродовж всього часу виконання працівником робіт на потенціалі проводів ліній електропередачі за технологією НЕК «Укренерго», зберігається мінімальна (≈ 2 мм) дистанція між тілом працівника і поверхнею проводів, яка визначається товщиною захисного костюму ЕК-1. Ця обставина повинна враховуватися при визначенні діючої на працівника індукції магнітного поля під час виконання робіт на потенціалі ліній електропередачі.

2. Запропоновані такі методи зменшення магнітного поля в робочій зоні ліній електропередачі, як метод режимної мінімізації її коефіцієнту навантаження на термін ремонту, та метод збільшення робочої дистанції шляхом введення між проводами і тілом працівника додаткового матеріалу певної товщини (2-15 мм), використання яких дозволяє зменшити індукцію магнітного поля при виконанні робіт на потенціалі ліній електропередачі до безпечного рівня.

3. Розроблено методику розрахунку гранично допустимого коефіцієнту навантаження ліній електропередачі, 330-750 кВ, використання якої дозволяє обмежити індукцію магнітного поля в їх робочих зонах до гранично допустимого рівня санітарних норм при заданому терміні робіт на потенціалі і заданій товщині додаткового захисного слою між проводами та тілом працівника.

4. Створені методологічні засади захисту працівників від магнітного поля при виконанні ремонтних робіт без зняття напруги під навантаженням на лініях електропередачі 330-750 кВ, що ґрунтуються на сумісному використанні розроблених методу режимної мінімізації коефіцієнту навантаження і методу збільшення робочої дистанції, та розробленої методики розрахунку гранично допустимого коефіцієнту навантаження при умові обмеження рівня магнітного поля до нормативного. Їх реалізація дозволяє зменшити індукцію магнітного поля в робочій зоні ліній електропередачі до гранично допустимого значення відповідно до як чинних, так і перспективних санітарних норм.

5. Отримані результати можуть скласти наукову основу для розробки нормативних документів Мінергерго, що регламентують правила безпечної роботи

персоналу за магнітним полем при виконанні ремонтних робіт на лініях електропередачі 330-750 кВ без зняття напруги і під навантаженням.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
2. СОУ-Н ЕЕ 20.666:2007 Інструкція з виконання робіт під напругою на ПЛ 110-750 кВ. К.:ОЕП «ГРІФРЕ», 2007.
3. Собчук В.С., Собчук Н.В. *Технології робіт під напругою*. Вінниця: ВНТУ, 2006. 101 с.
4. Казанський С.В. *Експлуатація електричних систем: Обслуговування електричних мереж під робочою напругою*. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 237 с.
5. *The International EMF Project. Radiation & Environmental Health Protection of the Human Environment World Health Organization*. Geneva, Switzerland. 1996. 2 p. Режим доступу: www.who.int/initiatives/the-international-emf-project (Дата звернення: 04.01.2024).
6. *IEEE Guide for Maintenance Methods on Energized Power Lines, in IEEE Std 516-2021*. 2022, pp. 1-159. doi: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2022.9678146>.
7. Stam R. *Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)*. National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, Welfare and Sport, 2018. 18 p. doi: <https://doi.org/10.21945/rivm-document-electromagnetic-fields>.
8. Göcsei G., Németh B., Tarcsa D. Extra low frequency electric and magnetic fields during live-line maintenance. *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2013, pp. 100-104. doi: <https://doi.org/10.1109/eic.2013.6554212>.
9. Нестеренко А.Д. *Введение в теоретическую электротехнику*. Київ: Наукова думка, 1969. 351 с.
10. Шимони К. *Теоретическая электротехника (перевод с немецкого)*. М.: Мир, 1964. 774 с.
11. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz). *Health Physics*, 2010, vol. 99 no. 6, pp. 818-836. Режим доступу: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf> (Дата звернення: 04.01.2024).
12. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). *Official Journal of the European Union*, 2013, L 179, pp. 1-21. (Table B2) Режим доступу: <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:EN:PDF> (Дата звернення: 04.01.2024).
13. Alhassan A.B., Zhang X., Shen H., Xu H. Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 118, art. no. 105862. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105862>.
14. Wu G., Cao H., Xu X., Xiao H., Li S., Xu Q., Liu B., Wang Q., Wang Z., Ma Y. Design and Application of Inspection System in a Self-Governing Mobile Robot System for High Voltage Transmission Line Inspection. *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2009, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918256>.
15. Nguyen V.N., Jenssen R., Roverso D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 99, pp. 107-120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.016>.
16. Rozov V.Y., Reutsky S.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Approximate method for calculating the magnetic field of 330-750 kV high-voltage power line in maintenance area under volt-

- age. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 5, pp. 71-77. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.12>.
17. Chunikhin K.V., Grinchenko V.S. Normalization of double-circuit overhead line magnetic field inside Khrushchev building. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 38-41. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.06>.
18. Грінченко В.С. Зниження магнітного поля трифазних ліній електропередачі градчастим електромагнітним екраном. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 4, С. 29-32. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.029>.
19. Tkachenko A. O. Determination of analytical calculation error of magnetic field of high-voltage cable lines with two-point bonded cable shields caused by non-uniform current distribution in the shields. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 3, pp. 27-31. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.3.04>.
20. 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.
21. Пелевин Д.Е. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон. *Технічна електродинаміка*, 2014, № 5, С. 14-16.
22. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylanskiy B.B. Method of adjustment of three circuit system of active shielding of magnetic field in multi-storey buildings from overhead power lines with wires triangular arrangement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 1, pp. 21-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.1.03>.
23. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylanskiy B.B. Synthesis of an effective system of active shielding of the magnetic field of a power transmission line with a horizontal arrangement of wires using a single compensation winding. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 15-21. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.03>.
24. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Kolomiets V.V., Kobylanskiy B.B. Overhead power lines magnetic field reducing in multi-story building by active shielding means. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 23-29. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.04>.
25. Rozov V., Grinchenko V., Tkachenko O., Yerisov A. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields. *2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 2018, pp. 358-361. doi: <https://doi.org/10.1109/MMET.2018.8460425>.
26. Rozov V.Y., Kvytsynskiy A.A., Dobrodeyev P.N., Grinchenko V.S., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Study of the magnetic field of three phase lines of single core power cables with two-end bonding of their shields. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 4, pp. 56-61. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.4.11>.
27. Розов В.Ю., Пелевин Д.Е., Левина С.В. Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях. *Електротехніка і електромеханіка*, 2013, № 6, С. 72-76.
28. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Simulation of the magnetic field in residential buildings with built-in substations based on a two-phase multi-dipole model of a three-phase current conductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 87-93. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13>.
29. Krasnozhon A.V., Buinyi R.O., Dihtyaruk I.V., Kvytsynskiy A.O. 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. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 6, pp. 55-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.08>.
30. Reutskiy S., Zhang Y., Lu J., Pubu C. A Novel Method for Linear Systems of Fractional Ordinary Differential Equations with Applications to Time-Fractional PDEs. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2024, vol. 139, no. 2, pp. 1583-1612. doi: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2023.044878>.
31. Reutskiy S., Zhang Y., Lin J., Lu J., Xu H., He Y. A novel B-spline method to analyze convection-diffusion-reaction problems in anisotropic inhomogeneous medium. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2020, vol. 118, pp. 216-224. doi: <https://doi.org/10.1016/jenganabound.2020.06.013>.
32. Про затвердження Мінімальних вимог до охорони здоров'я та безпеки працівників, які піддаються впливу електромагнітних полів. Наказ МОЗ України від 13.01.2023 № 81. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0184-23#Text> (Дата звернення: 04.01.2024).
33. Про затвердження Державних санітарних правил і норм при виконанні робіт в невиконаних електроустановках напругою до 750 кВ включно. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.07.1997 № 198. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0198282-97#Text> (Дата звернення: 04.01.2024).
34. Про затвердження Державних санітарних норм та правил при роботі з джерелами електромагнітних полів (ДСНП 3.3.6.096-2002). Наказ МОЗ України від 18.12.2002 № 476. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text> (Дата звернення: 04.01.2024).
35. Сердук А.М. Взаимодействие организма с электромагнитными полями как фактором окружающей среды. К.: Наукова думка, 1977. 228 с.
36. Dumanskyi V.Y., Koziariv I.P., Ivakhno O.P. Electromagnetic fields as an eco-hygienic problem of our time. *Environment & Health*, 2021, vol. 100(3), pp. 44-48. doi: <https://doi.org/10.32402/dovkil2021.03.044>.
37. Назаренко В.І. Індукція магнітного поля промислової частоти як чинник професійного ризику на теплових електростанціях. *Український журнал з проблем медицини праці*, 2007, № 4, С. 18-26. doi: <https://doi.org/10.33573/ujoh2007.04.018>.
38. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2003, vol. 2, pp. 1016-1021. doi: <https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304685>.
39. Bravo-Rodríguez J., Del-Pino-López J., Cruz-Romero P. A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 7, art. no. 1332. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071332>.
40. Gocsei G., Nemeth B., Tamus Z.A., Kiss I. Face protection investigation against electric field on live line workers. *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2012, pp. 535-539. doi: <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2012.6251527>.
41. Malgesini R., Valagussa C., Villa A., Carraro R., De Dona G., Milanello C.D., Parizia A.A. Conductive clothing for live line working. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934340>.
42. Göcsei G., Németh B., Kiss I., Berta I. Shielding efficiency of conductive clothing in magnetic field. *Journal of Electrostatics*, 2013, vol. 71, no. 3, pp. 392-395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.01.001>.
43. Gocsei G., Nemeth B., Kiss I., Berta I. Health effects of magnetic fields during live-line maintenance. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934329>.
44. Bavastro D., Canova A., Freschi F., Giaccone L., Manca M. Magnetic Field Mitigation at Power Frequency: Design Principles and Case Studies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 2009-2016. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2369813>.
45. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Pielievina K.D. External magnetic field of urban transformer substations and methods of its normalization. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 5, pp. 60-66. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.5.10>.

REFERENCES

1. *Electrical installation regulations*. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (Ukr).
2. *SOU-N EE 20.666:2007. Instructions for performing live work on 110-750 kV power lines*. Kyiv, OEP GRIFRE Publ., 2007. (Ukr).
3. Sobchuk V.S., Sobchuk N.V. *Technologies of works under tension*. Vinnytsia, VNTU Publ., 2006. 101 p. (Ukr).
4. Kazanskij S.V. *Operation of electrical systems. Maintenance of electrical networks under working voltage*. Kyiv, NTUU «KPI» Publ., 2016. 237 p. (Ukr).
5. *The International EMF Project. Radiation & Environmental Health Protection of the Human Environment World Health Organization*. Geneva, Switzerland. 1996. 2 p. Режим доступу: www.who.int/initiatives/the-international-emf-project (Дата звернення: 04.01.2024).
6. *IEEE Guide for Maintenance Methods on Energized Power Lines, in IEEE Std 516-2021*. 2022, pp. 1-159. doi: <https://doi.org/10.1109/ieecstd.2022.9678146>.
7. Stam R. *Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)*. National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, Welfare and Sport, 2018. 18 p. doi: <https://doi.org/10.21945/rivm-document-electromagnetic-fields>.
8. Göcsei G., Németh B., Tarcsa D. Extra low frequency electric and magnetic fields during live-line maintenance. *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2013, pp. 100-104. doi: <https://doi.org/10.1109/eic.2013.6554212>.
9. Nesterenko A.D. *Introduction to Theoretical Electrical Engineering*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1969. 351 p. (Rus).
10. Shimoni K. *Theoretical Electrical Engineering* (Translation from German). Moscow, Mir Publ., 1964. 774 p. (Rus).
11. ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz). *Health Physics*, 2010, vol. 99 no. 6, pp. 818-836. Available at: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf> (accessed 04 January 2024).
12. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). *Official Journal of the European Union*, 2013, L 179, pp. 1-21. (Table B2) Available at: <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:EN:PDF> (accessed 04 January 2024).
13. Alhassan A.B., Zhang X., Shen H., Xu H. Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 118, art. no. 105862. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105862>.
14. Wu G., Cao H., Xu X., Xiao H., Li S., Xu Q., Liu B., Wang Q., Wang Z., Ma Y. Design and Application of Inspection System in a Self-Governing Mobile Robot System for High Voltage Transmission Line Inspection. *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2009, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2009.4918256>.
15. Nguyen V.N., Janssen R., Roverso D. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, vol. 99, pp. 107-120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.016>.
16. Rozov V.Y., Reutskiy S.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Approximate method for calculating the magnetic field of 330-750 kV high-voltage power line in maintenance area under voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 5, pp. 71-77. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.12>.
17. Chunikhin K.V., Grinchenko V.S. Normalization of double-circuit overhead line magnetic field inside Khrushchev building. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 38-41. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.06>.
18. Grinchenko V.S. Mitigation of three-phase power line magnetic field by grid electromagnetic shield. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 4, pp. 29-32. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.029>.
19. Tkachenko A. O. Determination of analytical calculation error of magnetic field of high-voltage cable lines with two-point bonded cable shields caused by non-uniform current distribution in the shields. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2017, no. 3, pp. 27-31. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.3.04>.
20. Rozov V.Y., Reutskiy S.Y., Pelevin D.Y., Yakovenko V.N. The research of magnetic field of high-voltage AC transmissions lines. *Technical Electrodynamics*, 2012, no. 1, pp. 3-9. (Rus).
21. Pelevin D.Y. The methods of reducing of the magnetic fields of overhead power lines outside security zones. *Technical Electrodynamics*, 2014, no. 5, pp. 14-16. (Rus).
22. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylanskiy B.B. Method of adjustment of three circuit system of active shielding of magnetic field in multi-storey buildings from overhead power lines with wires triangular arrangement. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 1, pp. 21-28. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.1.03>.
23. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Voloshko O.V., Kolomiets V.V., Kobylanskiy B.B. Synthesis of an effective system of active shielding of the magnetic field of a power transmission line with a horizontal arrangement of wires using a single compensation winding. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 6, pp. 15-21. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.6.03>.
24. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Kolomiets V.V., Kobylanskiy B.B. Overhead power lines magnetic field reducing in multi-story building by active shielding means. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 23-29. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.04>.
25. Rozov V., Grinchenko V., Tkachenko O., Yerisov A. Analytical Calculation of Magnetic Field Shielding Factor for Cable Line with Two-Point Bonded Shields. *2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 2018, pp. 358-361. doi: <https://doi.org/10.1109/MMET.2018.8460425>.
26. Rozov V.Y., Kvytsynskiy A.A., Dobrodeyev P.N., Grinchenko V.S., Erisov A.V., Tkachenko A.O. Study of the magnetic field of three phase lines of single core power cables with two-end bonding of their shields. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no. 4, pp. 56-61. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.4.11>.
27. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Levina S.V. Experimental research into indoor static geomagnetic field weakening phenomenon. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2013, no. 6, pp. 72-76. (Rus).
28. Rozov V.Y., Pelevin D.Y., Kundius K.D. Simulation of the magnetic field in residential buildings with built-in substations based on a two-phase multi-dipole model of a three-phase current conductor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 5, pp. 87-93. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.5.13>.
29. Krasnozhan A.V., Buinyi R.O., Dihtyaruk I.V., Kvytsynskiy A.O. 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. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 6, pp. 55-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.6.08>.
30. Reutskiy S., Zhang Y., Lu J., Pubu C. A Novel Method for Linear Systems of Fractional Ordinary Differential Equations with Applications to Time-Fractional PDEs. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2024, vol. 139, no. 2, pp. 1583-1612. doi: <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.044878>.
31. Reutskiy S., Zhang Y., Lin J., Lu J., Xu H., He Y. A novel B-spline method to analyze convection-diffusion-reaction problems in anisotropic inhomogeneous medium. *Engineering*

Analysis with Boundary Elements, 2020, vol. 118, pp. 216-224. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.06.013>.

32. *On the approval of Minimum requirements for health and safety of workers exposed to electromagnetic fields*. Ministry of Health of Ukraine. Order on January 13, 2023 no. 81. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0184-23#Text> (accessed 04 January 2024).

33. *On the approval of State sanitary rules and norms for the performance of work in non-switched off electrical installations with a voltage of up to and including 750 kV*. Ministry of Health of Ukraine. Order on July 09, 1997. no. 198. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0198282-97#Text> (accessed 04 January 2024).

34. *On approval of State sanitary norms and rules for working with sources of electromagnetic fields (DSNiP 3.3.6.096-2002)*. Ministry of Health of Ukraine. Order on December 18, 2002. no. 476. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text> (accessed 04 January 2024).

35. Serdyuk A.M. *Interaction organism with electromagnetic fields as the environmental factors*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1977. 228 p. (Rus).

36. Dumanskyi V.Y., Koziarin I.P., Ivakhno O.P. Electromagnetic fields as an eco-hygienic problem of our time. *Environment & Health*, 2021, vol. 100(3), pp. 44-48. doi: <https://doi.org/10.32402/dovkil2021.03.044>.

37. Nazarenko V.I. Magnetic field induction of industrial frequency as a factor of professional hazard at thermal power stations. *Ukrainian journal of Occupational Health*, 2007, no. 4, pp. 18-26. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.33573/ujoh2007.04.018>.

38. Conti R., Giorgi A., Rendina R., Sartore L., Sena E.A. Technical solutions to reduce 50 Hz magnetic fields from power lines. *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2003, vol. 2, pp. 1016-1021. doi: <https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304685>.

39. Bravo-Rodríguez J., Del-Pino-López J., Cruz-Romero P. A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 7, art. no. 1332. doi: <https://doi.org/10.3390/en12071332>.

40. Göcsei G., Nemeth B., Tamus Z.A., Kiss I. Face protection investigation against electric field on live line workers. *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2012, pp. 535-539. doi: <https://doi.org/10.1109/ELINSI.2012.6251527>.

41. Malgesini R., Valagussa C., Villa A., Carraro R., De Dona G., Milanello C.D., Parizia A.A. Conductive clothing for live line working. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934340>.

42. Göcsei G., Németh B., Kiss I., Berta I. Shielding efficiency of conductive clothing in magnetic field. *Journal of Electrostatics*, 2013, vol. 71, no. 3, pp. 392-395. doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2013.01.001>.

43. Göcsei G., Nemeth B., Kiss I., Berta I. Health effects of magnetic fields during live-line maintenance. *2014 11th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM)*, 2014, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/ICOLIM.2014.6934329>.

44. Bavastro D., Canova A., Freschi F., Giaccone L., Manca M. Magnetic Field Mitigation at Power Frequency: Design Principles

and Case Studies. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 2009-2016. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2369813>.

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

Надійшла (Received) 26.01.2024
 Прийнята (Accepted) 19.03.2024
 Опублікована (Published) 20.06.2024

Розов Володимир Юрійович¹, д.т.н., проф., чл.-кор. НАНУ,
 Реуцький Сергій Юрійович¹, к.т.н., с.н.с.,
 Кундіус Катерина Дмитрівна¹, доктор філософії,
¹ Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного
 НАН України,
 61046, Харків, вул. Пожарського, 2/10,
 e-mail: vyurozov@gmail.com (Corresponding Author);
 sergiyreuetskiy@gmail.com; kundiuickateryna@ukr.net

V.Yu. Rozov¹, S.Yu. Reutskiy¹, K.D. Kundius¹

¹ Anatolii Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering
 Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine,
 2/10, Pozharskogo Str., Kharkiv, 61046, Ukraine.

Protection of workers against the magnetic field of 330-750 kV overhead power lines when performing work without removing the voltage under load.

Problem. One of the acute problems that needs to be solved when performing repair work under voltage on power transmission lines (PTLs) is the protection of workers' health from high-intensity electromagnetic fields. **Goal.** The purpose of the work is to develop the methodological foundations for the protection of workers from the magnetic field (MF) of the 330-750 kV PTL during repairing work without removing the voltage and under loading. **Methodology.** A methodology for calculating the maximum allowable PTL loading factor has been developed. It limits the flux density of the MF in the working area of the power transmission line to the maximum permissible level of sanitary standards for the given period of work at the potential and the minimum thickness of the protective layer between the wires and the worker's body. **Originality.** Methodological principles for protecting workers from magnetic fields have been created. They are based on the joint use of the developed method of mode load minimization and the method of increasing the working distance, and the developed method of calculating the maximum allowable loading factor of PTLs. **Practical value.** The graphic dependence of the maximum allowable loading factor of the PTL is proposed as a function of the required working time and the thickness of the introduced additional protective layer between the wires and the body of the worker. It allows one quickly determines the maximum allowable loading factors to conform the accepted limit-allowable normative level of flux density of MF for various types of PTLs 330-750 kV. References 45, tables 1, figures 10.

Key words: high-voltage power line, work on wires without removing the voltage, reducing the magnetic field.

How to cite this article:

Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Kundius K.D. Protection of workers against the magnetic field of 330-750 kV overhead power lines when performing work without removing the voltage under load. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 4, pp. 70-78. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.4.09>