

5. Полукаров, Ю.О. Дослідження впливу виробничих чинників зварювального виробництва на стан охорони праці [Текст] / Ю.О. Полукаров // Проблеми охорони праці в Україні: зб. наук. праць. – К.: ННДІОП, 2005. – Вип. 9. – С. 55-62.

Стаття надійшла до редакції 26.12.2016р.

УДК 687.174:621.039

DOI: 10.20535/2079-5688.2017.32.91656

Л.Д. Третякова, д.т.н., проф., **Л.О. Мітюк**, к.т.н., доц. (КПІ ім. Ігоря Сікорського)

СПОСОБИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ПРАЦІВНИКІВ ВІД ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ

L.D. Tretiakova, L.O. Mitiuk (National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»)

MEANS FOR IMPROVING WORKERS PROTECTION AGAINST EFFECTS OF POWER FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS

У статті розглянуто питання удосконалення захисту електротехнічних працівників від впливу електромагнітного поля промислової частоти. Для визначення можливих ризиків здійснено експериментальні дослідження рівнів напруженості електричного і магнітного полів електроустановок напругою 110–750 кВ. Проаналізовано діючі обмеження у міжнародних і вітчизняних нормативних документах. Запропоновано новий екрануючий комплект з використанням новітнього композиційного текстильного матеріалу.

Ключові слова: вплив електромагнітного поля промислової частоти; нормативні параметри; екрануючий комплект.

В статье рассмотрены вопросы усовершенствования защиты электротехнических работников от воздействия электромагнитного поля промышленной частоты. Для определения возможных рисков проведены экспериментальные исследования уровней напряженности электрического и магнитного полей электроустановок напряжением 110–750 кВ. Проанализированы действующие ограничения в международных и отечественных нормативных документах. Предложен новый экранирующий комплект с использованием инновационного композиционного текстильного материала.

Ключевые слова: влияние электромагнитного поля промышленной частоты; нормативные параметры; экранирующий комплект.

This article investigates the means for improving protection of electrical workers against the effects of power frequency electromagnetic fields. Possible risks have been identified in experimental studies exploring voltage of electric and magnetic fields produced by 110–750 kV electrical installations. Current restrictions specified in both international and local regulatory instruments have been analyzed. A new conductive clothing using novel composite textile material

has been proposed.

Keywords: *effects of power frequency electromagnetic fields; regulatory parameters; conductive clothing*

Вступ. Джерелами потужних електромагнітних полів (ЕМП) промислової частоти є повітряні лінії, відкриті розподільчі пристрої, устаткування трансформаторних підстанцій напругою 110–750 кВ. Параметри ЕМП та обсяг іонів, зумовлених короною проводів та арматурою повітряних ліній, залежать від класу напруги, конструктивних особливостей і геометричних розмірів опор і проводів. У ході експлуатації електричних мереж певні обсяги профілактично-ремонтних та після аварійних робіт можуть здійснюватися під напругою: профілактика масляних вимикачів, перевірка та налагодження систем релейного захисту, перевірка ізоляції комутаційних кіл, виміри опору заземлювальних пристроїв, перевірка та заміна ізоляторів. Потреба у виконанні таких робіт спричинена обмеженою кількістю або відсутністю резерву окремих елементів системи, а також неможливістю тривалого відключення споживачів електроенергії. Під час виконання робіт на елементах і поблизу зовнішніх електроустановок під напругою, працівники перебувають у зоні підвищеного впливу ЕМП промислової частоти.

Мета роботи. Розробка способів і засобів індивідуального захисту працівників від впливу електромагнітного поля промислової частоти з метою забезпечення допустимих нормативних показників.

Аналіз сучасного стану питання. Механізм впливу ЕМП на людину зумовлено утворенням внутрішніх ЕМП і пов'язаних з ними електричних струмів, значення яких залежать від електричних і магнітних властивостей органів і тканин людини, орієнтації тіла щодо векторів напруженості електричного (ЕП) і магнітного (МП) полів, а також від відстані до електроустановок, тривалості впливу і наявності засобів захисту. Напруженість ЕП пропорційна напрузі устаткування і обернено пропорційна відстані до предмета впливу. Зовнішнє ЕП впливає на заряди в тілі людини, що спричиняє струми у внутрішніх тканинах і додаткові внутрішні МП. Вимірні значення струмів, які протікають через тіло працівника, котрий знаходиться у відкритому розподільчому пристрої 500 кВ і має контакт із землею (через взуття) або із заземленими частинами устаткування, становить 130...250 мкА. Під час знаходження працівника на опорі лінії 500 кВ на рівні проводу струм досягає 500...600 мкА [1].

Напруженість зовнішнього МП пропорційна струму, який протікає по струмовідних частинах електроустановок, і обернено пропорційна відстані до них. Величина струму в діючих електроустановках має тенденцію до постійного змінення, тому вплив МП не є постійним. У разі потрапляння людини під вплив зовнішнього змінного МП у тілі виникають узгоджені елементарні струми, які утворюють власні МП. Найнебезпечнішим є випадок, коли вертикальна складова вектора напруженості МП перетинає грудну

клітину. Так, МП з рівнем напруженості 100 А/м зумовить протікання струму через життєво важливі органи людини зі щільністю 120 мкА/м² (70 мкА). ЕП промислової частоти характеризується слабким проникненням у тіло людини, в той час для МП тканини людини практично прозорі.

Тривалі дослідження показали, що максимальний струм у тілі людини, який індукований впливом ЕП, є набагато більшим, ніж струм, зумовлений змінним МП. Однак нині результатами низки зарубіжних досліджень підтверджено біологічну активність впливу МП промислової частоти, яка залежить від інтенсивності та тривалості дії, має кумулятивний і прихований період впливу з пролонгацією в часі на подальші покоління. За результатами досліджень рекомендовано передбачати обмежувальні заходи в зоні впливу МП. International Commission on non-ionizing Radiation Protection розробила перші нормативні документи з регламентації впливу МП.

Нині у світовій практиці немає однозначних норм з обмеження впливу ЕМП частотою 50 Гц. Вплив ЕМП на людину та його нормативне обмеження визначено стандартами The International Electrotechnical Commission (IEC) [2]. Найбільш обґрунтованими і повними є Норми CEU ENV50166, запропоновані Технічним комітетом *European Committee for Electrical Standardization* (CENELEC), що є правовим документом для захисту працівників від впливу ЕМП на робочих місцях. У нормативних документах передбачено обмеження значень таких показників: щільність індукційного струму (J), питома поглинена потужність (SAR) і щільність потоку енергії (S), для яких визначено відповідні контрольовані рівні.

У загальному випадку параметром, що визначає ступінь впливу ЕМП промислової частоти на організм, є щільність наведеного в тілі людини струму. За результатами експериментальних медично-біологічних досліджень встановлено гранично припустиму щільність наведеного струму в тілі людини (табл. 1).

Таблиця 1

Біологічні ефекти від впливу ЕМП

Щільність струму, j , мА/м ²	Біологічні ефекти впливу
1 – 10	Мінімальні ефекти, що не становлять небезпеки
10 – 100	Виражені ефекти: зорові й з боку нервової системи
100 – 1000	Стимуляція збудливих структур (м'язова й нервова) тканини, можливий несприятливий вплив на здоров'я
>1000	Можлива екстрасистоляція, фібриляція серця (гостре ураження)

У більшості міжнародних стандартів для встановлення припустимих рівнів параметрів ЕМП прийнято, як безпечну для організму, щільність струму у 10 мА/м², яку використовують для визначення граничних параметрів ЕМП, що підлягають контролю. Визначення рекомендованих або нормативних значень до окремих категорій здійснюють через впровадження коефіцієнтів

запасу. За промислових частот коефіцієнти запасу приймають від 2,5 до 10 під час визначення умов праці на виробництві або норм для населення. Перевищення нормованих рівнів у реальних виробничих умовах, але не вище еквівалентних рівнів, можливе за відповідного часового обмеження їх дії та застосуванні засобів захисту.

Результати досліджень. Для змінного струму промислової частоти за базове значення прийнято щільність струму в 10 мА/м^2 , якому відповідають напруженості ЕП $E = 20 \text{ кВ/м}$ і МП $H = 4 \text{ кА/м}$ відповідно.

Значення потоку енергії $S_{\text{п}}$, яке поглинається тілом працівника, котрий знаходиться в зоні впливу ЕП, визначають за формулою:

$$S_{\text{п}} = P_{\text{п}} \cdot t_{\text{доп}} = SAR \cdot m_{\text{п}} \cdot t_{\text{доп}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{п}}$ – поглинена потужність, Вт; SAR – значення щільності поглинутої потужності, Вт/кг; $m_{\text{п}}$ – маса тіла працівника, кг; $t_{\text{доп}}$ – допустимий час перебування в ЕМП, год. SAR за загального опромінення тіла працівника встановлено на рівні $0,4 \text{ Вт/кг}$, для локального опромінення кінцівок – 10 Вт/кг (голова) і 20 Вт/кг (рук і ніг).

В Україні діє низка Норм і Правил, які встановлюють вимоги щодо працівників, котрі займаються виготовленням, експлуатацією, обслуговуванням і ремонтом струмовідних частин електроустановок [3, 4]. На підставі санітарно-гігієнічних досліджень визначено межу шкідливої дії, тобто такого впливу ЕМП, за якого в організмі людини відбуваються зміни життєвих процесів, що виходять за межі припустимих відхилень. Встановлено допустимий рівень щільності потоку енергії w залежно від тривалості впливу ЕМВ впродовж робочої зміни (табл. 2).

Таблиця 2

Гранично допустима щільність потоку енергії ЕМП

Тривалість впливу ЕМП на працівника, год	8	7	6	5	4	3	2	1	0,5	0,25	0,20
Щільність потоку енергії, мкВт/см ²	25	29	33	40	50	67	100	200	400	800	1000

Нині як критерій безпеки для працівників, котрі перебувають в ЕМП промислової частоти, використовують показники напруженості поля в місці знаходження. Зазвичай у виробничих умовах використовують вимірювальні прилади, які вимірюють напруженість поля, а не струм через людину або енергію, поглинену тілом.

Характеристики ЕП і МП з певними допущеннями [5] можна визначити за формулами:

$$E = \frac{J}{k \cdot f}; \quad B = \frac{J}{\pi \cdot R \cdot \gamma \cdot f}; \quad H = \frac{B}{\mu}, \quad (2)$$

де E – напруженість ЕП, В/м; B – магнітна індукція, Тл; H – напруженість ЕП,

A/m ; k – коефіцієнт ; f – частота, Гц; R – радіус об'єкту, м; γ – провідність об'єкту, $1/\text{Ом}$; μ – магнітна проникність середовища.

Рівень напруженості ЕП, що створюють повітряні лінії, залежить від конструкційно-будівельних параметрів: діаметру і кількості проводів, відстані між ними, висоти їх над поверхнею землі. Найбільше значення напруженості ЕП реєструють під час перебування працівника безпосередньо під проводами у центрі між опорами. За мірою віддалення від осі лінії і ближче до опор рівні напруженості поля знижуються. Рівень напруженості МП залежить від навантаження лінії. Оскільки навантаження здатне неодноразово змінюватися впродовж доби і сезонів року, то розміри зони підвищеного рівня МП також змінюються. Кабельні лінії створюють дещо більші напруженості, ніж ПЛ, проте напруженість ЕМП зменшується швидше при віддаленні від кабелю, і зона відчутного поля зазвичай не перевищує декількох десятків метрів. Кабелі і повітряні лінії середньої напруги (6 – 10 кВ) через відносно малу відстань між фазами створюють невисокі напруженості ЕМП, тому їх впливом усередині приміщень можна знехтувати. ЕМП трансформаторів та інших електроустановок систем електропостачання змінюється обернено пропорційно відстані до об'єкту опромінення.

У ході експериментальних досліджень з використанням аналізатора поля EFA – 3 (фірма «Wandel & Goltermann», Німеччина) визначено параметри ЕМП електроустановок промислової частоти (табл. 3).

Таблиця 3

Напруженості електричного і магнітного полів промислової частоти, які створюють лінії електропередач і підстанції

Рівень напруги, кВ	Місце заміру електромагнітного поля	Значення напруженості ЕП, E , (кВ/м)	Значення напруженості МП, H , (кА/м)
500	Під ПЛ середньої фази	6...10	35...40
220–330	Під ПЛ	6...8,5	28...36
220–330	На відстані 150 м від ПЛ	2,3...4,5	3,2...4,1
110	Під ПЛ	0,45...0,75	12...16
35	Під ПЛ	0,2...0,3	0,8...8,2
220–330	Відкриті електричні підстанції	0,18...0,42	0,1...0,2

Сучасні системи електропостачання промислової частоти перенавантажені нелінійними джерелами і споживачами, що зумовлює наявність вищих гармонік у фазних струмах і відповідно наявність ЕМП вищих гармонік. Результати експериментальних вимірів реєструють наявність високого рівня з третьої до п'ятнадцятої гармонік (табл. 4).

Гармонічний склад напруженості електричного поля повітряної лінії

Номер гармоніки	Напруженість електричного поля, В/м		
	ПЛ 500 кВ	ПЛ 220–330 кВ	ПЛ 110 кВ
1	8300	4700	1080
3	63,1	26,8	30,4
5	50,4	29,1	6,4
7	9,1	5,8	5,3
9	1,6	1,1	1,1

Наявність струмів вищих гармонік створює додатковий рівень напруженості, який визначається за формулою:

$$E = \sqrt{E_{(1)}^2 + E_{(3)}^2 + \dots + E_{(n)}^2}, \quad (3)$$

де $E_{(1)}$ – напруженість ЕП основної частоти; $E_{(3)}$ – напруженість ЕП частотою 150 Гц; $E_{(n)}$ – напруженість ЕП частотою ($n \cdot 50$) Гц; n – номер вищої гармоніки, $n = 15$.

Визначено, що фактичний рівень напруженості біля повітряних ліній з урахуванням вищих гармонік збільшується до 4,5 % порівняно до основної частоти.

За максимальної напруженості ЕМП струм через тіло працівника сягав 180...230 мкА, за мінімальної – 30...40 мкА. Під час робіт у ВРП 500 кВ максимальне значення струму у тілі працівника зафіксовано 250 мкА, середнє – 130 мкА, у ВРП 750 кВ відповідно – 350 мкА, і 180 мкА.

Такі показники суттєво перевищують допустимі норми і потрібно вживати заходи щодо їх зниження. До таких заходів належать вирішення техніко-організаційних питань та застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Відповідно до стандартів ІЕС умови праці і норми з напруженості ЕМП промислової частоти на робочих місцях поділяють на три категорії. Робота в умовах першої категорії (до 6,1 кВ/м і 1,6 кА/м) передбачає обов'язкову інформація працівників про небезпеку впливу ЕМП. Друга категорія робіт (до 12,3 кВ/м, 3,20 кА/м) обов'язково пов'язана з заходами щодо обмеження тривалості впливу ЕМП. Третя (19,6 кВ/м і 4,8 кА/м і вище) вважається небезпечною, що передбачає обов'язкове застосування ЗІЗ з попередженням: «небезпечна робота». Для населення базові значення напруженості у більшості зарубіжних рекомендацій приймають у 2,5 рази меншими, ніж на робочих місцях.

До основних принципів захисту працівників від впливу ЕМП промислової частоти відносять заходи організаційного характеру: обмеження часу перебування в зоні впливу ЕМП, уточнення розмірів санітарно-захисних зон, за якими інтенсивність випромінювання не перевищує гранично допустимих

норм, а також комплекти ЗІЗ (захисний одяг, взуття, ЗІЗ рук голови та очей), які обмежують вплив ЕМП через екранування.

Найвний екрануючий одяг виготовляють з бавовняного полотна з мікродротом [6]. У структурі такої тканини тонкий мідний дріт скручений з бавовняними нитками, які захищають від зовнішніх впливів і одночасно є ізоляцією. У ході виконання технологічних операцій працівник в екрануючому комплекті змінює своє положення відносно зовнішнього ЕМП. Екрануючий матеріал може розтягуватися чи стискатися, що призводить до зміни опору струму розтікання за його поверхнею та опору між захисним одягом і тілом працівника. Ненадійними елементами такого комплекту є шолом, шкарпетки та рукавички. У ході експлуатації їх поверхні ушкоджуються, відповідно втрачають захисні властивості. За таких умов напруженість ЕМП на незахищених ділянках і струм, який проходить через тіло працівника, можуть суттєво перевищувати допустимий рівень.

Запропоновано виготовляти захисний екрануючий одяг з композиційних текстильних двошарових та тришарових матеріалів. Для обмеження впливу ЕМП матеріал повинен мати високу електропровідність і магнітну проникність. Використаний двошаровий матеріал складається з нетканого поліпропіленового полотна (внутрішній шар) та з вуглецево-волокнистого матеріалу (зовнішній шар). У тришаровому матеріалі для внутрішнього шару використано неткане поліестерове полотно, середній шар складає вуглецево-волокнистий матеріал, а зовнішній шар – бавовняна або поліефірна тканина з поверхневою густиною до 60 г/м^2 . Поліпропіленове полотно має електричний опір $10^8 \dots 10^{10} \text{ Ом}$ і використано як ізоляційний шар. Вуглецеві волокна мають електричний опір в межах $(12 \dots 25) 10^{-2} \text{ Ом}$ і є струмопровідними частинами матеріалу. Третій шар можна використовувати для підвищення механічних характеристик одягу і запобігання ушкодженню струмопровідного шару.

Щільність потоку енергії $W_{\text{п}}$, яка проникає і поглинається одиницею поверхні, дорівнюватиме

$$W_{\text{п}} = W_0(1 - \rho), \quad (4)$$

де $W_0 = w \cdot S_{\text{еф}}$ – падаюча на тіло людини енергія ЕМП; $S_{\text{еф}}$ – ефективна поверхня тіла людини; ρ – коефіцієнт відбиття на рівні повітря–шкіра становить $0,75 \dots 0,85$ за частоти 50 Гц. У ході використання щільність поглинутої енергії не повинна перевищувати допустимих значень.

Захист працівника в екрануючому комплекті відбувається у такий спосіб: під час проходження хвилі через перший струмопровідний шар відбувається часткове поглинання і віддзеркалення хвилі. Далі хвиля, проходячи через шар нетканого матеріалу, частково поглинається і відбувається подальше її ослаблення.

Індивідуальні екрануючі комплекти призначено для захисту від дії ЕМП працівників, які здійснюють роботи у відкритих електроустановках напругою 110–330 кВ. Запропоновані різновиди захисного одягу складаються з костюму (подовжена куртка та штани) або комбінезону прямого силуету з каптуром. Під час розробки екрануючих комплектів потрібно враховувати нерівномірний розподіл напруженості за поверхнею тіла працівника. Напруженість ЕП на поверхні тіла людини може перевищувати напруженість зовнішнього ЕП до 17 разів, при чому найбільший рівень перевищення фіксують на поверхні голови (до 17 разів), на плечах (до 10 разів), і тільки на лінії талії перевищення напруженості ЕП знижується до 1 разу [7]. До конструктивних особливостей захисного одягу належить відсутність кишень, застібок, гудзиків і фурнітури, що виступають, через які можливо зачепитися в обмеженому просторі за рухомі частини аварійно-рятувального устаткування (рис. 1).

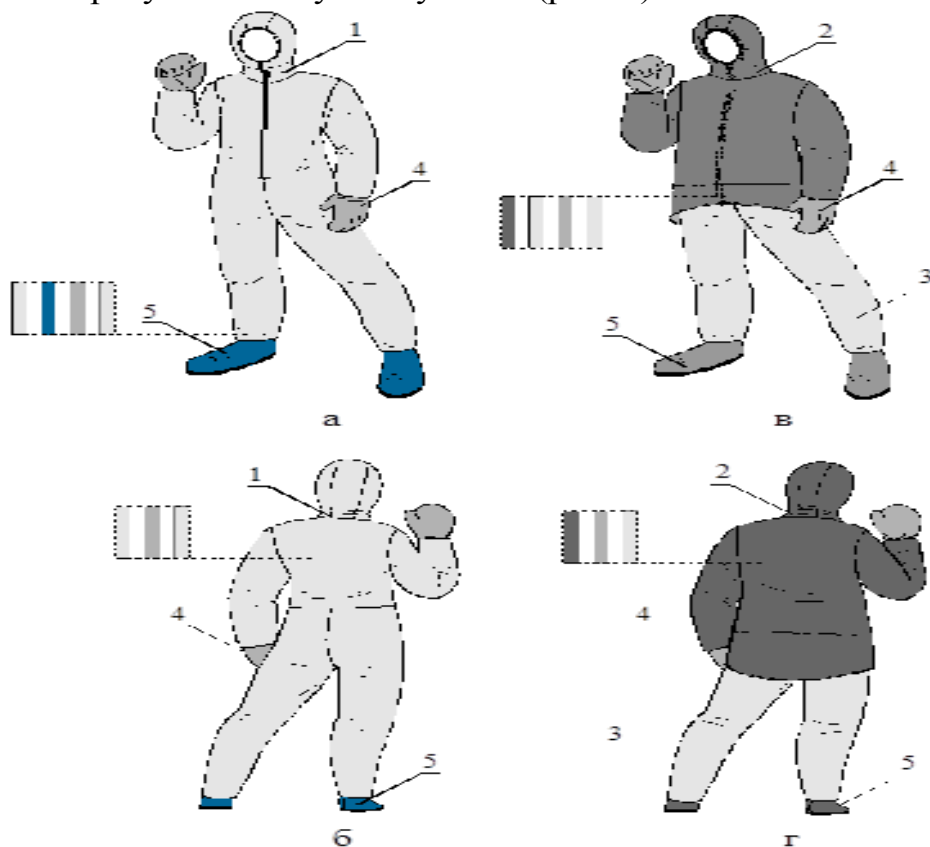


Рис. 1. Проектно-конструктивні рішення виробів екранувальних комплектів: вид спереду (а, в) і ззаду (б, г) з зональним розташуванням пакетів матеріалу: 1 – комбінезон; 2 – куртка; 3 – штани; 4 – рукавички; 5 –взуття

Конструкцією комбінезонів і курток передбачено каптури зі щільним приляганням до обличчя. Мінімальний ризик забруднення працівника, легкість в одяганні та зніманні куртки і комбінезону досягнуто застосуванням центральної подвійної закритої застібки на тасьму «блискавку» для захисту щитоподібної залози, грудної клітини та черевної порожнини. У куртці

запропоновано суцільнокроєний рукав, що скоротить навантаження на лінію пройми і дасть змогу працівнику вільно підіймати та опускати руки. Застосовано фіксатор для великого пальця у рукавах куртки і комбінезону та штрипки по низу штанів для фіксації деталей виробу під час руху. Захисний комплект одягають на білизну, а для гарного контакту тіла людини зі струмопровідною основою, передбачено струмопровідні манжети одягу, які щільно охоплюють руки вище кистей. Забезпечено сумісність такого захисного одягу з засобами індивідуального захисту рук (рукавичками), та ніг (шкіряні черевики або чоботи зі струмопровідного матеріалу), призначеними для спільного використання. Поверх каптура можна використати каску з ізолювального матеріалу зі струмопровідним напиленням. Під час використання комплекту усі його елементи з'єднано струмопровідними тасьмами. Для захисту працівника у вологу погоду розроблено накидку з полівінілхлорид-пластикату. Ефективність екранувального комплекту визначається коефіцієнтом екранування, який показує у скільки разів знижується струм, що протікає через людину під впливом ЕМП. Випробування дослідного зразку в лабораторних умовах показали зниження струму не менш як у чотири рази.

Висновки

1. Чинні в Україні норми щодо впливу електромагнітного поля промислової частоти обмежують щільність струму во внутрішніх органах працівника на рівні 10 мА/м^2 , якому відповідають напруженість електричного поля 20 кВ/м і напруженість магнітного поля 4 кА/м .

2. Діючі стандарти потребують удосконалення і доповнення з урахуванням новітніх розробок міжнародних організацій. Так, наприклад, чинні вимоги щодо обмеження магнітного поля промислової частоти носять тимчасовий характер і потребують подальшого вивчення та нормативно-правового визначення.

3. Запропоновано новий вид екрануючого комплекту, виготовленого з двошарового композиційного матеріалу, який порівняно з наявними має покращені захисні властивості, високий рівень надійності та ефективності.

Список використаних джерел

1. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках [Текст] / П.А. Долин; Знак. – М., 2003.– 440 с.

2. IEC 62226-1:2004. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body. – Part 1: General.

3. ДСНіП 476-2002. Державні санітарні норми і правила під час роботи з джерелами електромагнітних полів. – К.: Держстандарт, 2002. – 18 с.
4. ДСанПіН 198-97. Державні санітарні норми і правила при виконанні робіт в невимкнених електроустановках напругою до 750 кВ включно. – К.: Держстандарт, 1997. – 38 с.
5. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів лінії електропередавання. Методика. – К.: Міністерство палива та енергетики України, 2008. – 33 с.
6. Кутин, В.М. Защитные свойства экранирующих комплектов для работ под напряжением на линиях электропередач 330–750 кВ [Текст] / В. М. Кутин, Е. А. Бондаренко; Электричество. – 1993, № 11. – С. 20–26.
7. Щерба, А.А. Моделирование и анализ электрических полей энергетических объектов [Текст] / А.А. Щерба, М.М. Резинкина; Наукова думка. – К., 2008. – 247 с.

Стаття надійшла до редакції 31.01.2017р.