

Л. Д. Третьякова, д-р техн. наук

В. В. Зацарний, канд. техн. наук

І. Д. Прокопенко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: lt79@ukr.net

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ВИРОБНИЧИХ РИЗИКІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ

При виконанні робіт на активних електроустановках працівники електротехнічної промисловості стикаються з несприятливими умовами, наслідки яких можуть являти загрозу для життя і здоров'я. Найбільш небезпечні роботи під напругою та поблизу діючих електричних установок. Пропонується вдосконалення методів оцінки ризиків робочого середовища для працівників електротехнічної промисловості на основі систематичного аналізу умов праці, нормативних показників та доступних небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Пропонований ризик-орієнтований підхід, крім зазначення причин травматизму, дає можливість визначити ефективні заходи, спрямовані на запобігання нещасних випадків: виконання Директив Європейського союзу про експлуатаційну безпеку електроустановок; реконструкцію повітряних ліній; вдосконалення електричних засобів індивідуального захисту; впровадження новітніх методів навчання.

Ключові слова: електротехнічні працівники; робочі умови; несприятлива подія; індивідуальний ризик.

Л. Д. Третьякова, д-р техн. наук

В. В. Зацарний, канд. техн. наук

И. Д. Прокопенко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: lt79@ukr.net

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РИСКОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ

При выполнении работ на активных электроустановках работники электротехнической промышленности сталкиваются с неблагоприятными условиями, последствия которых могут представлять угрозу для жизни и здоровья. Наиболее опасны работы под напряжением и вблизи действующих электрических установок. Предлагается совершенствование методов оценки рисков рабочей среды для работников электротехнической промышленности на основе систематического анализа условий труда, нормативных показателей и доступных опасных и вредных производственных факторов.

Предлагаемый риск-ориентированный подход, помимо указания причин травматизма, дает возможность определить эффективные меры, направленные на предотвращение

несчастных случаев: выполнение Директив Европейского союза об эксплуатационной безопасности электроустановок; реконструкция воздушных линий; совершенствование электрических средств индивидуальной защиты; внедрение новейших методов обучения.

Ключевые слова: электротехнические работники; рабочие условия; неблагоприятное событие; индивидуальный риск.

Постановка проблеми

Електроустановки високої напруги 110–750 кВ є базовим складником об'єднаної енергосистеми України. Таке устаткування забезпечує оптимальне навантаження електричних станцій, зменшення витрат енергії порівняно з мережами нижчої напруги, надійне електропостачання споживачам. Водночас розташування та експлуатація електроустановок високої напруги створюють низку додаткових проблем під час їх обслуговування та ремонту. Одним із обмежуючих чинників будівництва нових ліній електропередавання та реконструкції наявних є їх екологічний вплив на довкілля та здоров'я людей, які обслуговують такі пристрої або постійно знаходяться в межах зон їх впливу. У ході експлуатації певні обсяги профілактично-ремонтних та аварійних робіт здійснюються під напругою. До таких робіт належить профілактика масляних вимикачів, перевірка та налагодження систем релейного захисту, перевірка ізоляції комутаційних кіл, виміри опору заземлювальних пристроїв, перевірка та заміна ізоляторів.

Під час виконання робіт у діючих електроустановках електротехнічні працівники стикаються з небажаними подіями, вплив яких може становити загрози для життя і здоров'я. Особливу небезпеку становлять роботи під напругою та поблизу електроустановок, що може призвести до: ураження електричним струмом у разі дотику до струмовідних частин; впливу електромагнітного поля (далі – ЕМП) промислової частоти; потрапляння під наведену напругу, яка виникає в аварійних режимах або переключеннях у мережах зв'язку, лініях електропередавання низької напруги та металевих конструкціях, які розташовані поблизу діючих електроустановок; потрапляння під дію напруги кроку на поверхні ґрунту; впливу акустичного шуму від трансформаторів, вітрових електричних станцій і повітряних ліній; виконання робіт на висоті у незручних робочих положеннях.

Інша категорія людей, яка піддається впливу аналогічних небезпечних і шкідливих чинників, – це населення, яке проживає поблизу діючих електроустановок зовнішнього розташування. Щорічно фіксують до п'ятдесяти сторонніх осіб, які гинуть у небезпечних зонах поблизу діючих електроустановок. Окремий вид небезпеки створюють ЕМП у зонах, розташованих поблизу повітряних ліній, які будують поряд із населеними пунктами та зонами, призначеними для сільськогосподарських робіт. Люди, які можуть перебувати у зонах впливу електричних мереж тривалий час, не знають про наявні небезпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Рекомендовані до впровадження Директиви і Міжнародні стандарти [1, 2] будують систему управління безпекою з чотирьох етапів: оцінка ризиків;

планування; реалізація; контроль. У статті безпеку працівника визначаємо як рівень захисту, за якого ризик виникнення фізичних, біологічних, соціальних або матеріальних збитків не перевищує прийнятих за експертною оцінкою допустимих значень. У тексті вказаних стандартів наголошено, що безпека у сфері стандартизації продукції і процесів впроваджена з метою зведення ризику здоров'ю працівника і довкілля до прийняттого рівня.

Аналіз статистичної інформації щодо настання нещасних випадків на підприємствах енергетичного комплексу підтверджує високий рівень травмування серед електротехнічних працівників. 2016 року сталося 67 нещасних випадків, у яких потерпілими були 71 працівник, із них сім – зі смертельним наслідком. У 2017 році зареєстровано 65 нещасних випадків, в наслідок яких травмовано 77 працівників, із них дев'ять – зі смертельним наслідком [3]. Очевидно, що результатом аналізу повинно бути, окрім означення самих причин, визначення способів їх усунення задля запобігання повторенню травмування, як профілактична складова контрольно-наглядової діяльності.

Дослідження останніх років показали, що механізм дії зовнішніх ЕМП на людину головним чином зумовлений перетворенням електромагнітної енергії в теплову. Рівень впливу залежить від електричних і магнітних властивостей одягу людини, орієнтації тіла щодо векторів напруженості електричного і магнітного полів, а також від відстані до електроустановок, тривалості дії та наявності засобів захисту. Зовнішнє електричне поле впливає на заряди в тілі людини і це призводить до протікання струмів у внутрішніх тканинах і виникнення додаткових внутрішніх магнітних полів. Виміряні значення струмів у тілі працівника, який знаходиться у відкритому розподільному 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 струми досягають 500600 мкА. У разі потрапляння людини під вплив зовнішнього змінного магнітного поля в тілі виникають узгоджені елементарні струми, які утворюють власні магнітні поля. Наприклад, магнітне поле напруженістю 100 А/м викликає протікання струму через життєво важливі органи людини до 70 мкА. Електричне поле промислової частоти характеризується слабким проникненням у тіло людини, у той же час для магнітного поля тканини людини практично прозорі [4].

Питання впливу промислових електроустановок постійного та змінного струму на довкілля та людей включено до довгострокових програм World Health Organization «WHO International EMF Project», завданням яких є вивчення та опрацювання результатів медико-біологічних досліджень, розробка рекомендацій та нормативних обмежень щодо біологічного впливу струму та ЕМП. Дослідженнями в цій галузі займається також низка міжнародних і національних організацій: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), European Committee for Electrical Standardization (CENELEC), American Conference of Governmental Industrial Hygienists

(ACGIH), Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (BFE), International Organization for Standardization (ISO).

Відповідно до положень, які містить Угода про асоціацію з Європейським Союзом (ЄС), ратифікована Верховною Радою України 16.09.2014, для мінімізації ризиків травматизму і професійних захворювань на підприємствах України передбачено впровадження Директив Європарламенту і Ради ЄС. Директивою 2004/40 від 29 квітня 2004 року впроваджено вимоги щодо безпеки та охорони здоров'я працівників і населення за наявності ризиків від дії електроустановок [5]. Цей документ містить зміни та доповнення до Директиви Ради 89/391/ЄС. Директивою 2004/40 визначено мінімальні вимоги та граничні обмеження щодо рівня впливу струму та ЕМП, що дає змогу країнам-членам підтримувати або приймати у національних документах необхідні положення щодо захисту працівників через обмеження значень робочих і гранично допустимих параметрів впливів ЕМП. Роботодавці, відповідно до Директиви, зобов'язані забезпечувати коригування показників умов праці з урахуванням нових наукових даних щодо ризиків у разі впливу ЕМП для підвищення рівня безпеки та поліпшення охорони праці працівників.

Вирішення проблеми зниження рівнів травматизму в електроустановках можливе на підставі ризик-орієнтованого методу. Як показує досвід авторів, це дає можливість запропонувати комплексний підхід під час вибору техніко-організаційних заходів і розробки нових засобів індивідуального захисту для безпечної взаємодії працівника та електроустановки на різних ієрархічних рівнях. Наразі виникають певні розбіжності в системі управління охороною праці між нормативними документами, відомчими нормативними актами, вимогами щодо застосування ризик-орієнтованих методів та методичним забезпеченням таких методів [6]. Нині поняття «професійний ризик» для електротехнічних працівників має різне тлумачення і зміст, а показники, які використовують, не піддаються зіставленню і порівняльному кількісному оцінюванню [7]. Відсутні залежності, які пов'язують ризик травмування під час виконання регламентних або аварійних робіт в електроустановках високої напруги із нормованими показниками, якими прийнято характеризувати небезпечні та шкідливі виробничі чинники (НШВЧ) на робочому місці. Тому розробка методологічної концепції оцінювання професійного ризику з урахуванням особливостей виконання робіт в електроустановках є актуальним завданням.

Мета статті – удосконалення методів оцінки виробничих ризиків електротехнічних працівників на підставі системного аналізу умов праці, нормативних показників і наявних небезпечних і шкідливих виробничих чинників.

Виклад основного матеріалу.

За результатами аналітичної обробки статистичної інформації про умови праці в діючих електроустановках встановлено, що нині більш ніж 22 % електротехнічних працівників працює в шкідливих умовах, 30 % – особливо шкідливих, а для 65 % умови праці на робочому місці не відповідають санітарно-гігієнічним нормативам. Джерелами потужних ЕМП є розподільчі

пристрої, трансформаторні підстанції зовнішнього розташування, повітряні лінії електропередавання напругою 110–750 кВ. ЕМП характеризується напруженістю електричного поля, напруженістю магнітного поля, а також щільністю об'ємного заряду іонів, викликаного короною проводів та арматури повітряних ліній. Напруженість магнітного поля пропорційна значенню струму, який протікає через струмовідні частини електроустановок, та обернено пропорційна відстані до електроустановки. Напруженість електричного поля пропорційна напрузі та обернено пропорційна відстані до предмета впливу. ЕМП характеризується безперервним розподілом у просторі з енергією, яка може перетворюватися у теплову в тілі людини. Потік енергії ЕМП, який проходить через людину, яка знаходиться нормально до напрямку розподілу енергії, визначається за формулою [8]:

$$S = [\vec{E} \cdot \vec{H}], \quad (1)$$

де E – напруженість електричного поля, В/м;
 H – напруженість магнітного поля, А/м.

Напруженість електричного поля у точці протяжних повітряних ліній за умови ($r \gg d$) можна визначити за формулою:

$$E \approx \frac{U}{4\pi \cdot r^2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot f}, \quad (2)$$

де U – напруга, В;
 f – частота, Гц;
 r – відстань від проводу до працівника, м;
 d – діаметр проводу, м;
 ε – діелектрична проникність середовища;
 $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – діелектрична стала, Ф/м.

Параметри магнітного поля можна визначити за формулами:

$$B \approx \frac{J}{\pi \cdot R \cdot \gamma \cdot f}; \quad H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu}, \quad (3)$$

де B – магнітна індукція зовнішнього магнітного поля, Тл;
 J – щільність струму, А/мм²;
 γ – провідність середовища, См;
 μ_0 – магнітна проникність вакууму,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$; μ – магнітна проникність середовища.

Дальність поширення магнітного поля залежить від величини струму, тобто від навантаження електроустановки. Оскільки навантаження електроустановок може неодноразово змінюватися і впродовж доби, і залежно від сезону року, то розміри зони підвищеного рівня магнітного поля також змінюються.

Для запобігання підвищеному впливу на серцево-судинну та нервову системи, недопущення теплового удару Директивою 2004/40 встановлено

граничні значення щільності струму, що виникає, та питомого поглинання енергії в тілі людини під дією змінного ЕМП залежно від частот джерела (табл. 1).

У Директиві також визначено відповідні робочі значення напруженості електричного і магнітного поля та щільності потоку зовнішньої енергії залежно від частоти джерела (табл. 2).

Таблиця 1

Нормативні значення щільності струму і поглиненої енергії в тілі людини

Характеристики впливу	Частотний діапазон	Максимальна щільність струму для голови і тулуба (мА/м ²)	Питома поглинена енергія		
			середнє значення для тіла людини (Вт/кг)	локальне значення (голова і тулуб) (Вт/кг)	локальне значення (руки або ноги) (Вт/кг)
Вплив у виробничих умовах	4 Гц–1 кГц	10	0,4	10	20
Вплив на населення	4 Гц–1 кГц	2	0,08	2	4

Таблиця 2

Нормативні значення напруженості електромагнітного поля

Частотний діапазон	Напруженість електричного поля, кВ/м	Напруженість магнітного поля, кА/м	Магнітне поле, мТл
До 1 Гц	42	163	200
1–8 Гц	20	163/ <i>f</i>	200/ <i>f</i>
8–25 Гц	20	20/ <i>f</i>	25/ <i>f</i>
25–820 Гц	500/ <i>f</i>	20/ <i>f</i>	25/ <i>f</i>

Разом з тим норми CENELEC допускають опромінення працівників упродовж робочої зміни до 1 280 А/м.

В Україні діє низка стандартів і норм, які встановлюють правила роботи з джерелами ЕМП [9, 10]. Нормують значення напруженості ЕМП, щільність потоку енергії залежно від часу знаходження працівника на робочому місці (табл. 3).

Таблиця 3

Гранично допустимі напруженості електромагнітного поля

Напруженість <i>E</i> , кВ/м	Напруженість <i>H</i> , кА/м	Щільність потоку енергії, w_0 , мкВт/см ²	Допустимий час знаходження на робочому місці, хв.
$E < 5,0$	$H < 1,4$	25	480
5–10	3,2–4,0	67	180
10–15	4,0–4,9	100	120
15–20	4,9–6,0	200	60
20–25	6,0–8,0	800	10
$E > 25,0$	$H > 8,0$	1 000	5

Граничні обмеження до осіб, які професійно не пов'язані з експлуатацією та обслуговуванням електроустановок, визначено у [11, 12] (табл. 4).

Таблиця 4

Обмеження електромагнітного поля для населення

Умови знаходження людей	Напруженість електричного поля, кВ/м	Напруженість магнітного поля, А/м
Усередині житлових будинків	0,5	4,0
Зона житлової забудови	1,0	8,0
Сільські населені пункти, території городів і садів	5,0	16,0

Акустичний шум від повітряних ліній електропередавання має дві складові: шипіння, що відповідає звуковій частоті до 100 Гц і кратним їй значенням; широкополосні шуми. Джерелом шуму є іонізація повітря безпосередньо навколо поверхні проводів – ефект корони, який підсилюється під час зростання вологості повітря. Рівень акустичних шумів безпосередньо пов'язаний з напруженістю електричного поля на поверхні проводів та їх кількістю у фазі і є максимальним на рівні підвісу проводів.

Суттєві шумові ефекти створюють вітрові електричні станції (ВЕС). У зв'язку з прийнятим Радою ЄС та Верховною Радою України рішень щодо інтенсифікації розвитку відновлювальних джерел енергії, передусім ВЕС, потребує розв'язання проблема захисту працівників та населення від шумових ефектів, які створюють такі електричні станції. Виходячи з вимог міжнародного стандарту [13], у країнах Євросоюзу прийнято нормативи щодо обмеження шумових ефектів від ВЕС до рівня 40–65 дБ на робочих ділянках та у населених пунктах (табл. 5).

Таблиця 5

Національні нормативи допустимого рівня шуму вітроустановок

Країна	Допустимі рівні шуму, Дб			
	Промислова зона	Змішана зона	Житлові квартали	Спальні райони
Німеччина:				
день	65	60	55	50
ніч	50	45	40	35
Нідерланди:	Не нормують			
день		50	45	40
ніч		40	35	30
Данія	Не нормують	Не нормують	40	40

Забезпечити вказані норми можливо, якщо сучасні потужні ВЕС з шумовим ефектом біля основи вежі на рівні 95–100 дБ розміщувати не ближче ніж 200–250 м від місця проживання людей. В Україні граничний рівень акустичного шуму від повітряних ліній та електроустановок не регламентовано.

Відповідно до чинних санітарних норм [14] для житлової території припустимий рівень шуму становить: уночі – 45 дБ, удень – 55 дБ. Під час будівництва повітряних ліній відповідно до державних норм [11] мінімальні межі санітарно-захисних зон на відстанях від проекції на землю крайніх фазних проводів у напрямку, перпендикулярному до повітряної лінії, приймають: за напруги до 1 кВ – 2 м; 20 кВ – 10 м; 35 кВ – 15 м; 110 кВ – 20 м; 220 кВ – 25 м; 330–500 кВ – 30 м; 750 кВ – 40 м; 1150 кВ – 55 м.

Підвищення безпеки електротехнічних працівників є складним завданням, через одночасний вплив низки НШВЧ. Роботи під напругою під час періодичних оглядів або у разі виникнення аварійних ситуацій виконують відповідно до нормативних документів. Незалежно від виду робіт можна виокремити такі однотипні дії: підготовка до виконання робіт; доставка працівників на висоту; виконання робіт із підключення захисних засобів (захисне заземлення, вирівнювання потенціалів та ін.); безпосереднє виконання робіт. Під час підготовки до виконання робіт передбачено такі заходи: визначення кліматичних умов; вимірювання показників, які нормуються (напруженість ЕМП, струм, розподіл потенціалів, рівень ізоляції); підготовка робочого майданчика; перевірка справності приладів і інструментів, підготовка працівника до роботи. Кліматичні умови визначають через вимірювання температури, вологості та швидкості вітру. Допустимими для роботи є показники, які знаходяться в межах: температура від –10 до +40 °С; вологість – не більш ніж 90 %; швидкість вітру – не більш ніж 10 м/с. Інструменти та індивідуальні засоби захисту візуально перевіряють на відсутність дефектів. Працівники одягають захисний комплект, який складається із захисного одягу, каски, рукавичок, взуття і страхового поясу. Роботи у відкритих електроустановках відбуваються на висоті від двох до шістнадцяти метрів, тому необхідно виконувати правила з охорони праці на висоті. Одним з відповідальних етапів є підняття працівників на висоту. Для цього використовують телескопічні вежі, сходи, виконані з дюралюмінієвих труб, або підвісні кабіни. Після підйому на опору працівник повинен знаходитися на безпечній відстані від проводів через можливість травмування дистанційно. Безпечна відстань визначається рівнем напруги і становить від одного до п'яти метрів. Працівники, які знаходяться на поверхні землі, не повинні наближатися до опори повітряної лінії ближче ніж на 8–10 м. Така вимога зумовлена можливістю виникнення крокової напруги, а також потраплянням у зону дії ЕМП. Роботи, які виконують на висоті, пов'язані з високим рівнем фізичних та інтелектуальних навантажень. Монтер під час виконання виробничих операцій 60 % робочого часу знаходиться у положенні «стоячи, випрямившись» і до 40 % – у положенні «зігнувшись». Проведені дослідження структури травматизму за топографічними зонами тіла монтерів показали, що найбільш травмованими є: пальці рук – 40 %; гомілка ноги – 18 %; голова – 5 %; хребет – 3 %.

Найбільший негативний вплив ЕМП повітряних ліній на людину утворюється у разі використання взуття, яке ізолює її від землі. Для працівника у захисному комплекті ємність між шарами захисного одягу становить

40–100 пФ, відносно землі – 200–400 пФ, активний опір людини, одягу і взуття перебуває в межах 10^3 – 10^7 Ом. На тілі людини виникає наведений потенціал, величина якого залежить від співвідношення ємності між землею і проводами лінії: що менше ємність на землю, то більше наведений потенціал, який може досягати до 10 кВ.

Електротехнічних працівників, які виконують роботи поблизу діючих електроустановок, потрібно захищати від впливу ЕМП і наведеного струму. Моніторинг параметрів ЕМП на робочих місцях показав, що рівні напруженості досягають суттєвих значень. Під час знаходження під серединою прольоту повітряної лінії на висоті 1,5 м експериментально зафіксовані такі значення: напруга 500 кВ – напруженість $E = (6–10)$ кВ/м, $H = (35–40)$ кА/м; напруга 220–330 кВ – $E = (6–8,5)$ кВ/м, $H = (28–36)$ кА/м; напруга 110 кВ – $E = (0,45–0,75)$ кВ/м, $H = (12–16)$ кА/м; 35 кВ – $E = (0,25–0,30)$ кВ/м, $H = (0,8–0,82)$ кА/м [15]. Результати експериментальних вимірювань указують на неоднорідність ЕМП діючих електроустановок. Наявність захисних заземлювальних пристроїв призводить до змінення розподілу поля навіть уздовж однієї лінії. Погодні умови, рельєф місцевості, наявність дерев також впливають на рівні напруженості.

Оперативне обслуговування і ремонтні роботи у зовнішніх діючих електроустановках виконують в екранувальному комплекті (окуляри, захисний одяг, шолом). Наявний екранувальний одяг виготовляють із бавовняного полотна з мікродротом [16]. У структурі такої тканини тонкий мідний дріт скручено з бавовняними нитками, які захищають від зовнішніх впливів та одночасно мають ізоляційні властивості. У ході виконання технологічних операцій працівник в екранувальному комплекті змінює своє положення відносно зовнішнього ЕМП. Відповідно до [9] такий захисний одяг можна використовувати тільки в умовах, які унеможливають доторкання до відкритих струмовідних частин електроустановок. Захисний матеріал може розтягуватися чи стискатися, що призводить до зміни опору струму розтікання за його поверхнею та опору між захисним одягом і тілом працівника. Найбільш ненадійними елементами такого комплекту є шолом, шкарпетки та рукавички. У ході експлуатації їх поверхні ушкоджуються, відповідно, втрачаються захисні властивості. За таких умов напруженість ЕМП на незахищених ділянках і струм, який проходить через тіло працівника, можуть суттєво перевищувати допустимі рівні.

В енергетиці безпеку виконання робіт забезпечують:

- рівнем кваліфікації та підготовленості працівника. До роботи допускають працівників, які мають не менше ніж третю групу з електробезпеки;
- психофізіологічними даними та станом здоров'я працівника. Під час відбору працівників існують певні вимоги щодо показників здоров'я та здійснюють психологічну експертизу;
- ступенем узгодженості технічних завдань та електроінструментів з колективними діями працівників. Роботи в діючих електроустановках завжди виконують за нарядом-допуском, який передбачає бригадний метод роботи.

Бригада складається з 4–10 працівників, тому небезпеки, пов'язані з виконанням певних робіт, впливають більш ніж на одну особу.

Комплексний вплив НШВЧ може спричинити настання несприятливої події. Ризик є адитивною функцією, тому у мультиплікативній формі, яка дає можливість оцінити одночасний вплив M чинників, запишемо:

$$R = \left\{ \sum_{i=1}^M (S_{fi}, P_{di}, D_{fdi}) \right\}, \quad (4)$$

де R – загальний індивідуальний ризик; S_{fi} – умови настання f -ої несприятливої події;

P_{di} – імовірність того, що d -й нещасний випадок станеться;

D_{fdi} – можливі наслідки d -го нещасного випадку, який станеться за f -ої несприятливої події.

Індивідуальний ризик R_i за умови (1) можна надати у вигляді [17]

$$R_i = P_f \cdot P_{d/f}, \quad (5)$$

де P_f – імовірність настання f -ої несприятливої події;

$P_{d/f}$ – імовірність настання наслідків для працівника від даної несприятливої події за наявності заходів і засобів захисту.

Імовірність несприятливої події P_f , яка може призвести до нещасного випадку, можна надати як добуток ймовірностей – настання небезпеки $P(A)$ та впливу цієї небезпеки на працівника $P(B)$:

$$P_f = P(A) \cdot P(B). \quad (6)$$

В енергетиці завжди впроваджують заходи з обмеження ризиків. Імовірності настання небезпеки $P(A)$ визначаємо під час експлуатації електроустановок за наявності заходів і засобів захисту: технічних (захисне заземлення, огорожі, ізоляція струмовідних частин, автоматичне відімкнення електроустановок у аварійних режимах тощо); організаційних (робота відповідно вимог, зазначених у наряді-допуску); відповідних засобів індивідуального захисту. Імовірність настання певного виду небезпеки (робота під напругою або поблизу діючих електроустановок, вплив ЕМП, робота на висоті, використання транспортних засобів та електроінструменту тощо) обчислюємо за тривалості виконання робіт упродовж певного розрахункового періоду

$$P(A) = \frac{\tau_i \cdot K}{T_y}, \quad (7)$$

де τ_i – тривалість робіт за наявності i -го чинника небезпеки, відповідно до наряду-допуску;

K – коефіцієнт, який визначає фактичний час знаходження в небезпечній зоні;

T_y – розрахунковий період, який прийнято в межах робочого часу впродовж року, тобто T_y дорівнює 2080 годин.

Небезпечна подія може призвести до нещасного випадку на виробництві. Запропоновано імовірність впливу небезпечної події на працівника визначати за статистичною щорічною інформацією щодо нещасних випадків [3] і розраховувати за формулою:

$$P(B) = \frac{n_{Bf}}{k \circ N}, \quad (8)$$

де n_{Bf} – кількість травмованих працівників через нещасні випадки, які спричинено f -ою подією;

k – частка працівників підприємства, яка може потрапити під вплив f -ої події впродовж року; N – загальна кількість працівників.

Наслідки зазвичай надають у термінології, що відповідає видам збитків (матеріальні, грошові, соціальні) або видам ушкоджень (фатальні, травми, професійні захворювання, доза опромінення). Імовірність виникнення наслідків P_{df} для працівника від даної несприятливої події за наявності заходів і засобів захисту можна надати як добуток ймовірностей – тяжкості наслідків $P(D)$ у результаті нещасного випадку та обмеження наслідків $P(C)$ через впровадження нових або додаткових засобів і заходів захисту [18] (засобів індивідуального захисту, додаткової ізоляції, покращення професійних навичок через новітні методи навчання тощо).

$$P_{df} = P(D) \cdot P(C). \quad (9)$$

Під час оцінки ризиків електротехнічних працівників як наслідки виокремлюємо фатальні (смертельні) випадки та нещасні випадки, які призвели до погіршення здоров'я працівників з тимчасовою втратою працездатності (травмуванням, захворюванням). Імовірність настання фатальних наслідків визначаємо за формулою:

$$P(D)_c = \frac{n_c}{n_{0f}}, \quad (10)$$

де $P(D)_c$ – імовірність фатальної травми;

n_c – кількість працівників, які загинули;

n_{0f} – кількість працівників, які постраждали від нещасних випадків, спричинених f -ою подією за розрахунковий період.

Імовірність настання нещасних випадків, які призвели до погіршення здоров'я

$$P(D)_t = \frac{n_t}{n_{0f}}, \quad (11)$$

де $P(D)_t$ – імовірність втрати тимчасової працездатності;

n_t – кількість працівників, яким завдано шкоду здоров'ю.

Таким чином, індивідуальний ризик працівника за наявної f -ої несприятливої події визначаємо за формулою:

$$R_f = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C) \cdot P(D). \quad (12)$$

Індивідуальні ризики, які потенційно впливають на працівника, визначають загальний ризик. Верхню межу загального ризику R від впливу M НШВЧ за умови незалежності настання несприятливих подій визначаємо за формулою

$$R = \sum_{f=1}^M R_f. \quad (13)$$

За наведеною методикою розраховано індивідуальні ризики, які адаптовано до професійної діяльності електротехнічних працівників (табл. 6).

Таблиця 6

Імовірності подій і наслідків, що виникають під час нещасних випадків

Несприятлива подія	Імовірність виникнення небезпеки $P(A)$	Імовірність впливу небезпеки на працівника $P(B)$	Імовірність виникнення наслідків P_{df}		Індивідуальний ризик	
			Імовірність фатальної травми $P(D)_c$	Імовірність втрати працездатності $P(D)_t$	Ризик фатальної травма R_c	Ризик втрати працездатності R_t
1	2	3	4	5	6	7
Ураження електричним струмом	0,15	$3,62 \cdot 10^{-3}$	0,32	0,68	$1,72 \cdot 10^{-4}$	$3,69 \cdot 10^{-4}$
Травмування під час руху	0,24	$2,88 \cdot 10^{-3}$	0,17	0,83	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$5,76 \cdot 10^{-4}$
Падіння з висоти	0,21	$2,51 \cdot 10^{-3}$	0,07	0,93	$3,59 \cdot 10^{-5}$	$4,64 \cdot 10^{-4}$
Травмування сторонніх осіб	0,11	$2,66 \cdot 10^{-3}$	0	1	0	$2,67 \cdot 10^{-4}$
Опромінення ЕМП	0,64	$3,98 \cdot 10^{-3}$	0,06	0,94	$1,62 \cdot 10^{-4}$	$2,32 \cdot 10^{-3}$
Підвищений рівень важкості робіт	0,52	$4,25 \cdot 10^{-3}$	0	1	0	$2,12 \cdot 10^{-3}$
Порушення режиму робіт	1,0	$1,32 \cdot 10^{-3}$	0	1	0	$1,30 \cdot 10^{-3}$

Наведені розрахунки показують, що загальний ризик серед електротехнічних працівників на діючих енергопостачальних підприємствах отримати фатальну травму становить $4,84 \cdot 10^{-4}$, тобто в середньому п'ять випадків на кожні десять тисяч працівників, а ризик травмування або втрати працездатності – $7,42 \cdot 10^{-3}$, тобто сім працівників на кожну тисячу працівників.

Очевидно, що запропонований ризик-орієнтований підхід дає можливість окрім констатування причин травмування визначити ефективні заходи із

запобігання нещасним випадкам. Запровадження вимог Директив ЄС щодо безпеки експлуатації електроустановок, реконструкція повітряних ліній, удосконалення електротехнічних засобів індивідуального захисту, впровадження новітніх методів навчання дасть можливість суттєво знизити рівень травматизму електротехнічних працівників.

Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Аналіз умов праці засвідчив, що на електротехнічних працівників одночасно впливає низка небезпечних і шкідливих виробничих чинників. За результатами аналітичної обробки статистичної інформації показників умов праці в діючих електроустановках встановлено, що нині більше ніж 22 % електротехнічних працівників працює в шкідливих умовах, 30 % – в особливо шкідливих умовах, для 65 % умови праці на робочому місці не відповідають санітарно-гігієнічним нормативам.

2. Експлуатація електроустановок високої напруги є складним технічним завданням, яке пов'язано з підвищеним рівнем небезпеки і високою імовірністю настання несприятливих подій. Особливу небезпеку становлять роботи на висоті з підвищеним рівнем навантаження, роботи під напругою і впливом електромагнітного поля. Встановлено, що такі умови праці можуть призвести до нещасних випадків серед працівників, і негативно впливають на здоров'я населення, яке перебуває в зоні впливу діючих електроустановок. 2016 року сталося 67 нещасних випадків, у яких потерпілими були 71 працівник, з них сім – зі смертельним наслідком. У 2017 році зареєстровано 65 нещасних випадків, внаслідок яких травмовано 77 працівників, з них дев'ять – зі смертельним наслідком.

3. Показана можливість вирішення питання оцінки небезпеки для електротехнічних працівників ризик-орієнтованим методом за стохастичними математичними моделями. Такий підхід корелюється з базовими положеннями Директив Європейського Союзу стосовно обмеження негативного впливу на життя і здоров'я працівників визначених небезпечних і шкідливих виробничих чинників.

4. Запропоновано методологію розрахунку ризиків під час виконання певних видів щоденних робіт, що дає можливість у подальшому визначити ефективність впровадження заходів безпеки.

5. Запропонований ризик-орієнтований підхід на підставі статистичної інформації останніх років дав змогу обчислити індивідуальні і загальні ризики травмування з різною ступенем важкості серед певних груп електротехнічних працівників. Так, загальний ризик серед електротехнічних працівників на діючих енергопостачальних підприємствах отримати фатальну травму становить $4,84 \cdot 10^{-4}$, а ризик травмування або втрати працездатності – $7,42 \cdot 10^{-3}$. Це свідчить про те, що серед десяти тисяч працівників можуть загинути п'ять і травмуватися сімдесят працівників упродовж одного року.

Список літератури

1. Про запровадження заходів щодо стимулювання вдосконалення рівня безпеки й гігієни праці працівників на робочих місцях : Директива № 89/391/ЄС від 12.06.1989.
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, ISBN 0-642-79405-7.
3. Інформаційно-аналітична довідка про рівень травматизму на енергетичних підприємствах України за 2010–2017 роки.
4. ENV 5-166, Human exposure to electromagnetic fields, CENELEC, Brussels 1995.
5. Про мінімальні вимоги щодо безпеки й гігієни праці працівників, які піддаються небезпеці впливу фізичних факторів (електромагнітних полів): Директива № 2004/40/ЄС від 29.04.2004.
6. Касьянов Н. А., Гурченко О. Н., Корневой В. И. Совершенствование методов оценки производственного риска при проведении аварийно-спасательных работ на объектах строительства. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2016. Вып. 93. С. 56–65.
7. Бондаренко Є. А. Математична модель для оцінювання ризику електротравматизму. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 5. С. 64–69.
8. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л. Теоретические основы электротехники. Том 3. С-Петербург : Изд. дом «Питер», 2004. 376 с.
9. ДСНіП 476-2002. Державні санітарні норми і правила під час роботи з джерелами електромагнітних полів. Вид. офіц. Київ : Держстандарт, 2002. 18 с.
10. ДСанПіН 198-97. Державні санітарні норми і правила при виконанні робіт в не вимкнених електроустановках напругою до 750 кВ включно. Вид. офіц. Київ : Держстандарт, 1997. 38 с.
11. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Затверджено наказом Міністерства охорони здоров'я України від 19 червня 1996 р. № 173. Вид. офіц. Київ : Держстандарт, 1996. 26 с.
12. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань. Затверджено наказом Міністерства охорони здоров'я України від 01 серпня 1996 р. № 239. Вид. офіц. Київ : Держстандарт, 1996. 18 с.
13. Про мінімальні вимоги щодо безпеки й гігієни праці під час впливу на працівників небезпечних фізичних факторів (шуму) : Директива № 2003/10/ЄС від 06.02.2003.
14. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1999. 25 с.

15. Бржезіцький В., Сулейманов В. Експериментальні дослідження електричного поля повітряної лінії електропередавання змінного струму класу 330 кВ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 2. С. 7–12.

16. Кутин В. М., Бондаренко Е. А. Защитные свойства экранирующих комплектов для работ под напряжением на линиях электропередач 330–750 кВ *Электричество*. 1993. № 11. С. 20–26.

17. Vincoli, J.W. Basic guide to system safety. / J.W. Vincol. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993. 193 p.

18. Третьякова Л., Мітюк Л. Способи удосконалення системи захисту працівників від впливу електромагнітного поля промислової частоти. *Вісник НТТУ «КПІ», серія «Гірництво»*. 2017, вип. 32, С. 93–102.

L. Tretiakova, Doctor of Technical Sciences

V. Zatsarnyi, PhD

I. Prokopenko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: lt79@ukr.net

IMPROVEMENT OF THE ASSESSMENT METHODS OF THE WORKING ENVIRONMENT RISKS FOR THE WORKERS OF ELECTRICAL ENGINEERING INDUSTRY

Objective. When performing the works in active electric installations, the workers of electrical engineering industry face adverse events, the impact of which can be a threat to life and health. The works under the voltage and near the active electric installations are the most dangerous. The purpose is to improve the methods of assessment of the working environment risks for the workers of electrical engineering industry on the basis of a systematic analysis of working conditions, normative indicators and available hazardous and harmful production factors.

Scientific novelty. The methodology of calculation of individual risks during the performance of certain types of daily works is proposed, which gives the opportunity to determine the effectiveness of implementation of the safety measures in future.

Methodology. Theoretical researches are conducted on the basis of the fundamental provisions of theoretical electrical engineering, theory of risk, methods of mathematical statistics and forecasts. **Results.** During the analysis of the working conditions in the active electric installations it has been determined that the most dangerous factors that could lead to the accidents are: electric shock in case of contact with conducting parts; influence of the electromagnetic field; falling under the induced voltage; falling under the action of step voltage on the ground surface; influence of the acoustic noise from transformers, wind power plants and air lines; performance of the works at height in uncomfortable working positions. The European Union Directives place limitations on the influence of such factors on the workers of electrical engineering industry and impose certain requirements to the

working conditions and methods of protection. The result of the analysis, in addition to revealing the reasons themselves, is the determination of the levels of risks and development of the ways of their elimination in order to avoid the further occurrence of the adverse events. On the basis of the conducted researches and calculations it has been determined that the individual risk to receive a fatal injury among the workers of electrical engineering industry at the acting power supply plants is $4.84 \cdot 10^{-4}$, that is, on average, five cases per every ten thousands of the workers, and the risk of injury or disability is $7.42 \cdot 10^{-3}$, that is seven cases per every one thousand of workers. The proposed risk-oriented approach, besides stating the causes of injuries, provides with the opportunity to identify the effective measures, aimed to prevent accidents: implementation of the European Union Directives on the operating safety of the electric installations; reconstruction of the air lines; improvement of electrical means of individual protection; introduction of the newest teaching methods.

Key words: workers of electrical engineering industry; working conditions; adverse event; individual risk.

REFERENCES

1. Council Directive 89/391 EC of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work [in Ukrainian].
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. ISBN 0-642-79405-7.
3. A research and information certificate is about the level of traumatism on the power enterprises of Ukraine from 2010 to 2017 [in Ukrainian].
4. ENV 5-166, Human exposure to electromagnetic fields, CENELEC, Brussels 1995.
5. Council Directive 2004/40/EC of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) [in Ukrainian].
6. Kasyanov, N. A., Hunchenko, O. N., Kornevoi, V. I., Sabitova, O. A. & Ulitina M.YU. (2016). The development of assess method production risk in conducting rescue operation at construction sites. *Construction, material science, mechanical engineering*, 93, 56–65 [in Russian].
7. Bondarenko E A. Mathematical model of estimation of risk of electric traumatism. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 2012, 5, 64–69 [in Ukrainian].
8. Demirchyan K. S., Nejman L. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. (2004). Theoretical bases of the electrical engineering: Part 3. Sent Petersburg, 376 [in Russian].
9. DSNiP 476-2002. State sanitary norms and rules during work with the sources of the electromagnetic fields, Kyiv, 2002. 18 p. [in Ukrainian].

10. DSPiN 198-97. State sanitary norms and rules at implementation of works in not turned off electrical systems by tension to 750kV, Kyiv, 1997, 38 p. [in Ukrainian].
11. State sanitary rules of planning and building of settlements of 01 November 1996, N. 173, Kyiv, 1996, 26 p. [in Ukrainian].
12. State sanitary norms and rules of defence of population are from influence of electromagnetic radiations of 01 August 1996, N 239, Kyiv, 1996, 18 p [in Ukrainian].
13. Council Directive 2003/10/EC of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise) [in Ukrainian].
14. DSN 3.3.6.037-99. State sanitary norms of noise, ultrasound and infra-sound productive, Kyiv, 1999, 25 p. [in Ukrainian].
15. Brzhezickyj V., Suleimanov V. (2016). Experimental researches of electric-field transmission lines of alternating current 330 kV. *Energy: economics, technology, ecology*, 2, 7–12 [in Ukrainian].
16. Kutin V.M., Bondarenko E A. (1993). Protective properties of complete sets for work on transmission lines under tension 330–750 kV. *Electricity*, 11, 20–26 [in Russian].
17. Vincoli J.W. Basic guide to system safety. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993.
18. Tretiakova L., Mitiuk L. (2017). Methods of improvement of the system of defence of workers are from influence of the electromagnetic field of industrial frequency. *Visnyk of NTUU “KPI” set “Mining”*, 32, 93–102 [in Ukrainian].

Дата надходження статті – 21.05.2018