

## ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКОЮ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РОБІТ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Запропоновано сучасний підхід до удосконалення системи електробезпеки, який базується на оптимальному керуванні цією системою шляхом мінімізації сумарних соціально-економічних витрат на заходи та засоби електробезпеки, впровадження яких знизить ризик електротравматизму до допустимого рівня безпеки ураження електричною енергією.*

**Ключові слова:** оптимізація, електротравма, ризик, електрична енергія, електробезпека, захист, оцінка ризику, збитки.

### Вступ

Сучасний стан промислової безпеки та охорони праці на підприємствах, що перебувають у сфері управління Міненергівугілля України, не можна вважати задовільним: стабільно збільшується кількість небезпечних робочих місць, де в результаті застосування застарілої техніки та обладнання (в енергетиці зношеність енергетичного обладнання досягла критичного рівня) зростає ризик нещасних випадків, незадовільними є забезпечення працюючих засобами індивідуального захисту та рівень знань працівників з питань охорони праці; серйозною проблемою галузі є велика кількість енергетичних об'єктів (ліній електропередачі, трансформаторних підстанцій, розподільчих пунктів), що перебувають у власності підприємств — споживачів електроенергії, які не мають відповідної інфраструктури та матеріально-технічної бази для забезпечення необхідного рівня їх експлуатації; коефіцієнт частоти нещасних випадків зі смертельними наслідками становить близько 6 випадків на 100 тис. працюючих за рік, що значно перевищує рівень європейських країн [1]. Отже, «напруга» в управлінні системою електробезпеки є досить високою і її треба зменшувати.

Вимога абсолютної безпеки, що панувала у радянському суспільстві, навряд чи була виправдана, оскільки, з одного боку, будь-який вид людської діяльності носить імовірнісний характер і в силу цього пов'язаний з деяким початковим ризиком. Тому у вирішенні проблеми електротравматизму необхідне нове теоретичне обґрунтування на основі нового міждисциплінарного напрямку — системного аналізу, оцінки та аналізу ризику, яке б дозволило вибрати оптимальний комплекс засобів та заходів для мінімізації ризику електротравматизму на різних ієрархічних рівнях управління системою електробезпеки.

*Метою дослідження є створення сучасного підходу до удосконалення системи електробезпеки через мінімізацію ризику електротравматизму.*

### Результати дослідження

Проведені дослідження показали, що експлуатація електроустановок потенційно небезпечна, оскільки пов'язана з використанням (виробленням, транспортуванням, зберіганням і перетворенням) електричної енергії, яка накопичується в устаткуванні, тілі людини й навколишньому середовищі. Неконтрольований вихід енергії на людину у певних умовах супроводжується небезпечними подіями — електротравмами та професійними захворюваннями, які завдають значних економічних, етично-моральних проблем особі, сім'ї та суспільству [2].

Для забезпечення безпеки під час виконання робіт в електроустановках створюється система захисту, яка є сукупністю взаємопов'язаних нормативних актів, організаційних, технічних та інших відповідних заходів та засобів, призначених для зменшення збитків від небезпеки ураження людини електричною енергією.

У зв'язку з тим, що повне виключення шкоди, пов'язаної з електроустановками, нереально, за мету цієї системи електробезпеки доцільно прийняти метод оптимізації, який має принципово важливе значення в умовах України. Це викликано тим, що для створення систем безпеки вимагаються відносно великі фінансові ресурси, а можливість виділення таких ресурсів в сучасних умовах у нашій країні відсутні.

Завдання оптимізації може бути вирішено двома шляхами [3]:

1-й шлях. За заданих матеріальних витрат  $Z_{\text{lim}}$  обирається і реалізується така кількість заходів та засобів безпеки  $\{z_i\}$  з  $m$  можливих  $\{Z_m\}$ , щоб максимально знизити ризик електротравматизму  $R$

$$\begin{cases} \Delta R = f(\dots, \{z_i\}, \dots) \rightarrow \max_m; \\ z_i \leq Z_{\text{lim}}; \\ \{z_i\} \in \{Z_m\}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\Delta R$  — зниження ризику електротравматизму під час впровадження  $\{z_i\}$  заходів та засобів електробезпеки на об'єкті;  $Z_i$  — вартість впровадження  $i$ -го комплексу заходів по забезпеченню електробезпеки.

2-й шлях. Мінімізувати сумарні соціально-економічні витрати (тобто вибрати такий набір заходів та засобів електробезпеки з  $m$  можливих, впровадження яких знизить ризик електротравматизму  $R$ , до допустимого рівня безпеки —  $R_{\text{доп.}}$ )

$$\begin{cases} R = f(\dots, \{z_i\}, \dots) \leq R_{\text{доп.}}; \\ z_i \rightarrow \min_m; \\ \{z_i\} \in \{Z_m\}. \end{cases} \quad (2)$$

Перший шлях у соціальному плані найкращий, оскільки тут декларується прагнення гарантовано забезпечити безпеку на максимально можливому рівні, а аж ніяк не на рівні, який диктується «економічними міркуваннями», однак, як було сказано вище, сьогодні для нашого суспільства цей шлях, на жаль, неможливий.

Другий шлях оптимізації, в основі якого лежить економічний фактор, пов'язаний з обґрунтуванням кількісної оцінки допустимого технологічного ризику та вибору засобів та заходів щодо його досягнення. Під терміном «ризик» у нашому випадку будемо розуміти добуток ймовірності появи небезпечної події  $Q_i$  (виникнення електробезпечної ситуації) під час взаємодії людини з електроустановкою в певному середовищі та оцінки очікуваного збитку  $Y_i$  (важкість наслідків електротравми) у результаті цієї події.

Відповідно до [3] величину ймовірності появи електротравми  $Q_i$  у разі взаємодії людини з електроустановками можна отримати з виразу

$$Q_i = Q_i(\Phi) \cdot Q(\text{ГДЗ}) \cdot Q_i(\text{ІВ}) \cdot Q_i(\text{НЗ}) \cdot Q_i(\text{ВЗ}), \quad (3)$$

де  $Q_i(\Phi)$  — ймовірність появи небезпечного фактора — електричної енергії (електромагнітного поля, електричної напруги, струму та часу його дії), яка перевищувала б гранично допустимі значення для людини в  $i$ -му просторі (небезпечній зоні);  $Q(\text{ГДЗ})$  — ймовірність електротравматизму за вибраних гранично допустимих значень електричної енергії (параметрах, що її характеризують);  $Q_i(\text{ІВ})$  — ймовірність того, що вибрані гранично допустимі значення електричної енергії враховують індивідуальні властивості  $i$ -ї людини;  $Q_i(\text{НЗ})$  — ймовірність знаходження людини в  $i$ -й небезпечній зоні, де є небезпечна для людини електрична енергія;  $Q_i(\text{ВЗ})$  — ймовірність відмови  $i$ -го елемента системи захисту від ураження електрикою.

Захисні дії, в залежності від того, на який зі співмножників виразу, що визначає ймовірність появи електротравми  $Q_i$ , вони впливають (зменшують), поділяються на такі:

1. Організаційно-технічні заходи, що визначають  $Q_i(\Phi)$  контроль за станом ізоляції, параметрами безпечних режимів роботи мережі, електроустановок, захисних засобів, зовнішнього середовища, кваліфікацією персоналу, організацією безпечної експлуатації електроустановок тощо.

Технічні заходи захисту, що визначають  $Q_i(\Phi)$ : захисне заземлення (занулення); автоматичне відключення живлення (захисне відключення); вирівнювання потенціалів; застосування наднизької (малої) напруги; захисне розділення електричної мережі; захист від переходу напруги з вищої сторони на нижчу; електрозахисні засоби; грозозахист.

2. Організаційно-технічні заходи, що визначають  $Q(\text{ГДЗ})$  та  $Q_i(\text{ІВ})$ :

— установка в законодавчому порядку гранично допустимих значень для енергії, що поглина-

ється тілом середньостатистичної людини, та залежностей між нею і параметрами, які її характеризують, що необхідно для оптимізації засобів та заходів електробезпеки. Засоби захисту мають враховувати індивідуальні властивості людини для підвищення рівня безпеки. Значення гранично допустимих енергій для людини, напруг дотиків та струмів з урахуванням енергії, що поглинається тілом людини, наведені в [4].

— Організаційні заходи, що визначають  $Q_i(\text{НЗ})$ : навчання, інструктажі з електробезпеки; оформлення робіт за нарядами, розпорядженням або затвердженням переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації; підготовка робочих місць і допуск до роботи; нагляд під час виконання робіт; оформлення перерв у роботі та її закінчення.

— Технічні міри захисту, що визначають  $Q_i(\text{НЗ})$ : висота розміщення струмоведучих частин; огороження струмоведучих частин електроустановки; застосування блокувань; використання зорової, звукової та іншої інформації про небезпеку.

Покажемо можливість розв'язання задачі мінімізації сумарних соціально-економічних витрат для досягнення допустимого рівня електробезпеки.

Розв'язуючи поставлену задачу, як критерій оптимізації та обмеження використовуватимемо математичне очікування величин витрат  $M_t[Z]$  на зниження вірогідності небезпечної події  $M_t[Q]$  та математичне очікування розмірів збитків  $M_t[Y]$  електротравматизму. Вибрані показники всебічно характеризують якість системи електробезпеки на енергетичних об'єктах, оскільки їх кількісні показники складають помітну частину у загальних експлуатаційних витратах для забезпечення електробезпеки. Ось чому критерій оптимізації визначається сумою функцій  $M_t[Q]$  та  $M_t[Y]$ . Відносно обмежень припустимо, що подія відбувається рідко і значення імовірності небезпечної події  $Q$  лежать в межах від  $0,001 \dots 0,01$  (за табл. 1 подія буде відбуватися рідко [5]).

Таблиця 1

**Числовий приклад імовірності небажаного наслідку, який використовується в практиці**

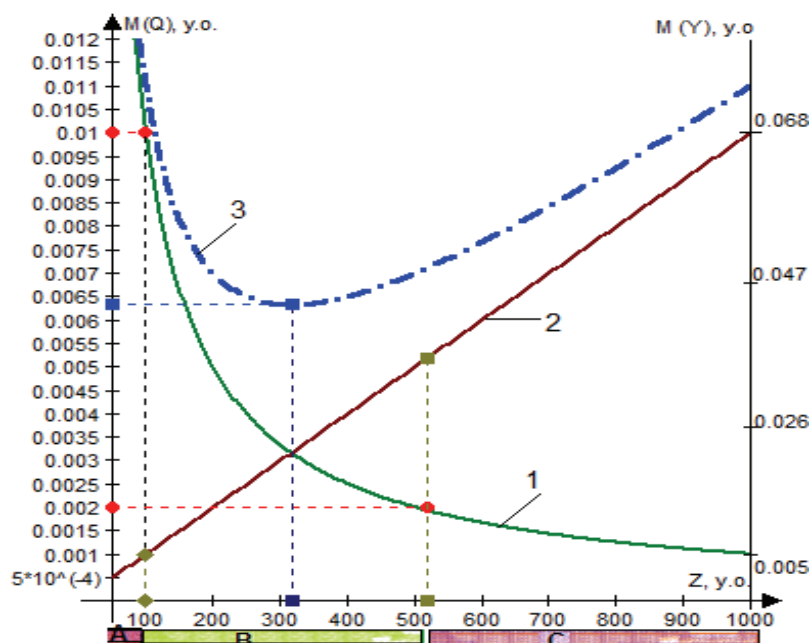
Імовірність події	Імовірнісний опис	Можливість наслідку
0,7...1	Велика можливість події	висока
0,3...0,7	Подія буде відбуватися рівномірно	середня
0,01...0,3	Подія буде відбуватися нерівномірно	низька
0,001...0,01	Подія буде траплятися рідко	дуже низька
$10^{-6} \dots 0,001$	Подія буде відбуватися дуже рідко	надто низька
$0 \dots 10^{-6}$	Подія практично не відбудеться	практично неможлива

Перша складова  $M_t[Q]$  цільової функції  $M_t[Q] + M_t[Y]$  являє собою витрати  $Z$ , які необхідні для створення та експлуатації технічних засобів захисту з належним рівнем надійності від електротравматизму. Вона суттєво впливає на величину вірогідності небезпечної ситуації  $Q(t)$  на певний момент часу  $t$ , та, відповідно [6], підпорядковується економічному закону зменшення віддачі. Цей закон для техногенної вірогідності виникнення небезпеки показаний на рисунку, де кривою 1 показана ефективність витрат на заходи захисту в залежності від величини вірогідності небезпечної ситуації. Точки на кривій 1 відповідають допустимим рівням імовірності небезпечної події. З наведеного на рисунку графіка 1 видно, що ефективність впровадження захисних заходів  $\frac{\Delta Q(t)}{\Delta Z}$  на зниження  $Q(t)$  зменшується зі збільшенням затрат на досягнення певного рівня безпеки.

Друга складова  $M_t[Y]$  цільової функції для цієї задачі, відповідно до [5], може бути визначена за формулою

$$M_t[Y] = Y_i Q(t), \quad (4)$$

де  $Y_i$  — середній розмір збитку від одного типу електротравми, можливої на енергетичному об'єкті.



Графічне представлення задачі оптимального керування електробезпекою

Збитки здоров'ю та життю персоналу, що обслуговує електроустановки, проявляються у вигляді професійних захворювань та (або) виробничого травматизму і пов'язані з величиною електричної енергії, що діє на людину, та індивідуальних властивостей її організму.

Відповідно до [5] оцінку збитку від небажаної події (електротравми) можна проводити за втраченою працездатності з виразу

$$Y_i = (1 - ROS_i) D_i, \quad (5)$$

де  $ROS_i$  — коефіцієнт втрати працездатності за шкалою Россера (табл. 2);  $D_i$  — кількість втрачених днів у році.

Таблиця 2

Шкала Россера для визначення втрати працездатності

Ступінь втрати працездатності	Рівень			
	незначний	легкий	середній	важкий
Робота не переривається	1,000	0,995	0,990	0,967
Легкі порушення здоров'я	0,990	0,980	0,973	0,932
Легкі порушення працездатності	0,980	0,972	0,956	0,912
Обмежена працездатність	0,964	0,956	0,942	0,870 (III група інвалідності)
Нездатність працювати на роботі, що високо оплачується	0,946	0,935	0,900	0,760 (II група інвалідності)
Пересування в інвалідному візку	0,875	0,845	0,680 (I група інвалідності)	0,000 (смерть)

Обмеження для нашого випадку щодо функції  $M_t[Y]$ , яка характеризує соціальний ефект від витрат  $Z$  на заходи та засоби захисту для досягнення імовірності небезпечної події  $Q(t)$  для певного часу, знаходяться в межах 0,005...0,068 в умовних одиницях. Ці значення визначені відповідно до (5) та табл. 2, якщо врахувати, що з впровадженням технічних засобів захисту, для яких значення імовірності небезпечної події  $Q(t)$  лежать в межах від 0,001...0,01 (див. табл. 1), можливі легкі порушення здоров'я (див. табл. 2). З урахуванням прийнятих обмежень, на рисунку графічно

представлена функція  $M_t[Y]$  — крива 2, яка ілюструє стан здоров'я в залежності від рівня витрат  $Z$  на засоби та заходи захисту від електротравматизму. Крива 3 на рисунку є цільовою функцією ризику  $R = M_t[Q] + M_t[Y]$ , мінімальне значення якої відповідає допустимому ризику  $R_{\text{доп}}$  для певного рівня обмежень (розвитку соціально-економічної системи суспільства).

Електробезпека в електроустановках повинна досягатися завдяки зниженню рівня ризику електротравматизму до допустимого. В залежності від ефективності витрат на засоби та заходи захисту від електротравматизму на рисунку виділені три зони А, В та С: А — зона, в якій через недостатні витрати ризик недопустимо великий; В — зона, в якій витрати на зниження ризику забезпечують рівень, що є прийнятним; С — зона надмірних витрат, які призводять до надмірно високого соціального ризику.

В Україні до теперішнього часу законодавчо не закріплені нормативні значення величини імовірності появи електротравматизму, спираючись на які можна було б проводити ефективну політику в області управління системою захисту від дії електричної енергії із застосуванням різних механізмів регулювання і контролю. В той же час стає необхідним закріплення на законодавчому рівні значень індивідуально прийнятого та допустимого ризику від електротравми та національних стандартів щодо оцінки професійного ризику електротравматизму.

### Висновки

В сучасних соціально-економічних умовах України неможливо досягнути «нульового ризику» електротравматизму. Прагнення зведення його до нуля призводить до збільшення загального ризику в суспільстві. Для покращення умов праці в електроустановках необхідно створити оптимальну систему керування електробезпекою на основі перспективного нормативно-правового, наукового та технологічного забезпечення шляхом введення показника прийнятого та допустимого ризику від ураження електричною енергією. Прийнятий ризик поєднує в собі як технічні, економічні, так і соціальні та політичні аспекти і є компромісом між рівнем безпеки та можливістю його досягнення. На прикладі розв'язання задачі показано, що для допустимого ризику, за якого вірогідність електротравматизму в певний період часу лежить в межах 0,001...0,01 і можливі легкі порушення здоров'я, значення допустимого ризику дорівнює 0,0064, а оптимальні витрати на заходи та засоби захисту від електротравматизму для прийнятих обмежень (від 100 до 500 у. о.) складають 316 умовних одиниць.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фандеев Олександр. Охорона праці ... Під напругою / Фандеев Олександр // Охорона праці. — 2012. — № 10. — С. 10—11.
2. Бондаренко Є. А. Енергоентропійна концепція електробезпеки / Є. А. Бондаренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 4. — С. 136—138.
3. Бондаренко Є. А. Математична модель для оцінювання ризику електротравматизму / Є. А. Бондаренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2012. — № 5. — С. 64—69.
4. Бондаренко Є. А. Застосування методики визначення допустимих рівнів напруг дотику та струмів для забезпечення електробезпеки / Є. А. Бондаренко // Електротехніка та електроенергетика (Запорізький національний технічний університет). — 2013. — № 1. — С. 27—31.
5. Кальки Валдис. Основные направления оценки рисков рабочей среды / Валдис Кальки, Имант Кристиньш, Жения Роя. — Рига. : SIA «Jelgavas tipografija», 2005. — 73 с.
6. Акимов В. А. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пос. / [В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов, и др.]. — М. : ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002 — 368 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.01.2014

**Бондаренко Євгеній Аркадійович** — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри електричних станцій та систем, e-mail: evgeniy.bon@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

E. A. Bondarenko<sup>1</sup>

## Optimum control of electro security at performance of works in electric installations

<sup>1</sup>Vinnytsia National Technical University

*A modern approach to the improvement of the electrical security system that is based on optimal control of the system by minimizing the total socioeconomic expenditures on electrical safety measures is suggested in the paper the implementation of which will reduce the risk of the acceptable level of the risk indicator from electrical energy defeat.*

**Keywords:** optimization, electro injury, risk, electrical energy, electrical safety.

**Bondarenko Yevgenii A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Post-Doctoral Student of the Chair of Electric Stations and Systems, e-mail: evgeniy.bon@gmail.com

Е. А. Бондаренко<sup>1</sup>

## Оптимальное управление электробезопасностью при выполнении работ в электроустановках

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Предложен современный подход к усовершенствованию системы электробезопасности, базирующийся на оптимальном управлении этой системой, путем минимизации суммарных социально-экономических затрат на мероприятия и средства электробезопасности, внедрение которых снизит риск электротравматизма к допустимому уровню безопасности поражения электрической энергией.*

**Ключевые слова:** оптимизация, электротравма, риск, электрическая энергия, электробезопасность.

**Бондаренко Евгений Аркадьевич** — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры электрических станций и систем, e-mail: evgeniy.bon @ gmail.com