

Є. А. Бондаренко, канд. техн. наук, доц.

МАТИМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ЕЛЕКТРОТРАВМАТИЗМУ

Запропоновано модель системи захисту людини від електричної енергії і викладено методологію системного аналізу оцінювання та вдосконалення електробезпеки. Методологія базується на введеному показнику ризику ураження електричною енергією.

Вступ

Електротравматизм як проблема виник в останній чверті XIX століття у зв'язку з широким впровадженням електроустановок змінного струму частотою 50/60 Гц і відрізняється від інших видів травмування низкою особливостей [1]:

- людина не може виявити наявності напруги дистанційно без спеціальних пристроїв;
- частка електротравм у загальному виробничому травматизмі відносно мала — 1...2 %, але у травматизмі зі смертельними наслідками сягає 15 % і більше;
- людина може отримати електротравму без безпосереднього контакту зі струмопровідними частинами (попадання під напругу кроку, ураження через електричну дугу);
- електричний струм діє не тільки в місці контакту, а й на весь організм у цілому і спричиняє різні види травм: електричний удар, опік, електричний знак, металізацію шкіри, електроофтальмію, механічні пошкодження;
- різке погіршення стану здоров'я потерпілого від електричного удару може спостерігатися через декілька годин, а іноді днів після нещасного випадку;

На сьогоднішній день вважають, що немає абсолютно безпечної напруги. Є випадки смертельного ураження від напруг менше 12 В [2], з іншого боку, іноді потерпілий виживає після дії напруги більше 1 кВ.

Щорічно від ураження електричним струмом в Україні гинуть біля 1500 осіб, з них — близько 300 дітей, приблизно в 5—6 разів більше осіб одержують електротравми, що майже в шість разів перевищує показники в технологічно розвинених країнах [3].

Як впливає із вищезазначеного, вирішення проблеми удосконалення захисту людей, які взаємодіють з електроустановками, має виняткову важливість для розвитку країни. По суті воно зводиться до створення ефективної системи безпеки електроустановок для попередження електротравматизму, яка базується на нормативно-правовому, науковому й технологічному забезпеченні.

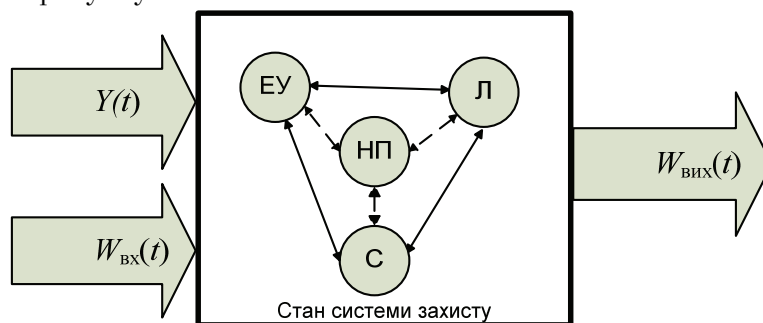
Вимога абсолютної безпеки, що панувала у радянському суспільстві, навряд чи була виправдана, оскільки, з одного боку, будь-який вид людської діяльності носить імовірнісний характер і в силу цього пов'язаний з деяким початковим ризиком. З іншого боку, вимога повного виключення ризику аварій, загибелі людей призводить до абсурду — необхідності відмови від електрики, транспорту і багатьох інших досягнень технічного прогресу. Ризик у сучасному житті принципово неусувний, й абсолютна безпека неможлива в жодній сфері людської діяльності. Тому для вирішення проблеми електротравматизму необхідне нове теоретичне обґрунтування на основі системно-структурного підходу та системного аналізу, яке б дозволило вибирати оптимальний комплекс засобів та заходів для забезпечення допустимого рівня безпеки у взаємодії людини й електроустановки на різних ієрархічних рівнях.

Результати дослідження

Системний підхід полягає в тому, що будь-який складний об'єкт розглядається як відносно самостійна система зі своїми елементами й взаємозв'язками, особливостями функціонування і розвитку для досягнення певного результату (мети). При цьому передбачається, що «системність» — це врахування не всіх факторів (що неможливо, та і не потрібно в прин-

ципі), а лише найсуттєвіших [4].

Для дослідження та вдосконалення електробезпеки автором цієї статті пропонується в загальному вигляді модель системи захисту людини від електричної енергії в електроустановках, яка показана на рисунку.



Модель об'єкта дослідження

Елементами показаної на рис. моделі системи захисту є людина (Л), електроустановка (ЕУ), зовнішнє середовище (С) і нормативно-правове забезпечення (НП). При цьому під поняттям «людина» розуміється як електротехнічний, так і не електротехнічний персонал; «електроустановка» – комплекс взаємопов'язаного устаткування і споруд, призначених для виробництва або перетворення, передачі, розподілу чи споживання електричної енергії, який включає технічні засоби електробезпеки; «зовнішнє середовище» – простір, в якому знаходиться людина та електроустановка; «нормативно-правове забезпечення» – сукупність норм, правил, положень, стандартів, інструкцій, технологічних карт та інших документів, обов'язкових для виконання, які включають організаційно-технічні заходи щодо забезпечення електробезпеки при заданій технології і встановлюють вид і технологію виконання робіт в електроустановці. Крім перелічених основних компонентів системи захисту людини в електроустановках, модель включає також взаємозв'язки між ними. Ці зв'язки показані на рисунку у вигляді стрілок, а межі, які відділяють нормативно-правове забезпечення від зовнішнього середовища, показані штриховою лінією. В моделі також використовуються такі векторні значення: $W_{\text{вх}}(t)$ – вхідна дія електричної енергії на систему за період часу t ; $W_{\text{вих}}(t)$ – вихідна дія електричної енергії з системи захисту на людину за період часу t ; $Y(t)$ – комплекс заходів та засобів щодо забезпечення безпеки людини від дії електричної енергії на цей час, впровадження яких дозволяє керувати системою захисту.

Відповідність поданої моделі підтверджується такими трьома основними аргументами:

1) вона включає і джерело небезпеки, і потенційну жертву; 2) її функціонування є експлуатація електроустановок людьми в певному середовищі; 3) в ній містяться носії всіх типів передумов електротравматизму: помилок (людина), відмов (електроустановок та технічних засобів захисту) і несприятливих дій на них ззовні (зовнішнє середовище).

Запропонована модель системи захисту є сукупністю взаємопов'язаних нормативних актів, організаційних, технічних та інших відповідних заходів та засобів, призначених для зниження збитків від небезпеки ураження людини електричною енергією. У зв'язку з тим, що повне виключення шкоди від техногенно-виробничих і природно-екологічних небезпек, пов'язаних з електроустановками, нереально, то за мету цієї системи безпеки електроустановок доцільно взяти 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:

1-й шлях. Для заданих матеріальних витрат Z_{lim} вибрати і реалізувати таку кількість заходів та засобів безпеки $\{z_i\}$ з m можливих $\{Z_m\}$, щоб максимально знизити ризик електротравматизму R :

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

де ΔR – зниження ризику електротравматизму у разі впровадження $\{z_i\}$ заходів та засобів електробезпеки на об'єкті; z_i – вартість впровадження i -го комплексу заходів зі забезпечення електробезпеки.

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

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

Перший шлях у соціальному плані найкращий, оскільки тут декларується прагнення гарантовано забезпечити безпеку на максимально можливому рівні, і 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 ймовірність появи небезпечної події Q (виникнення електронезбезпечної ситуації) у разі взаємодії людини з електроустановкою в певному середовищі й оцінку очікуваного збитку Z (важкість наслідків електротравми) у результаті цієї події.

Математично ризик R можна виразити формулою [5]

$$R = Q \cdot Z \quad (3)$$

або
$$R = \prod_{i=1}^n Q_i \cdot Z_i, \quad (4)$$

якщо може мати місце n небезпечних подій з різними ймовірностями Q_i й відповідним їм збитком Z_i протягом певного часу.

Відповідно до запропонованої моделі величину ймовірності появи електротравми Q_i від взаємодії людини з електроустановками можна отримати з виразу

$$Q_i = Q_i(\Phi) \cdot Q(\text{ГДЗ}) \cdot Q_i(\text{ІВ}) \cdot Q_i(\text{НЗ}) \cdot Q_i(\text{ВЗ}), \quad (5)$$

де $Q_i(\Phi)$ – ймовірність появи небезпечного фактора – електричної енергії (напруги, струму та часу його дії), яка перевищувала би гранично допустимі значення для людини в i -му просторі (небезпечній зоні); $Q(\text{ГДЗ})$ – ймовірність електротравматизму з вибраними гранично допустимими значеннями 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 із 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, зовніш-

нього середовища, кваліфікацією персоналу, організацією безпечної експлуатації електроустановок тощо.

Технічні заходи і засоби 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 $Q_i(\text{ІВ})$:

установлення в законодавчому порядку гранично допустимих значень для енергії, що поглинається 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, подані в [6].

3. 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.

Для апаратів захисту, що знаходяться в експлуатації більше 1,5–2 років, у розрахунок $Q_i(\text{ВЗ})$ може бути використаний вираз [7]

$$Q_i(\text{ВЗ}) = \lambda_p \cdot t, \quad (6)$$

де λ_p — робоча (апаратна) інтенсивність відмов захисту (визначається за теорією надійності технічних систем), $1/\text{г}$; t — поточний час роботи, год.

Оскільки в сучасному житті людини імовірність появи небезпечної події практично неможлива, а, отже, не може бути зведена до нуля, то багато країн при формуванні політики в галузі безпеки спираються на концепцію прийнятого ризику [5]. В основі цієї концепції лежить кількісна оцінка технологічного ризику, що встановлює гранично допустимі його значення для населення і довкілля, враховуючи техніко-економічні та соціальні можливості на певному етапі свого розвитку.

В Україні до теперішнього часу законодавчо не закріплені нормативні значення величини імовірності появи електротравматизму, спираючись на які, можна було б здійснювати ефективну політику в галузі управління системою захисту від дії електричної енергії із застосуванням різних механізмів регулювання і контролю. Зокрема, в галузі пожежної безпеки за прийнятний рівень імовірності як для персоналу, так і для населення, передбачено значення 1×10^{-6} [7]. У той же час, стає необхідним закріплення на законодавчому рівні величини індивідуально прийнятого ризику від електротравми. Числовий приклад імовірності небажаного наслідку, який використовується в практиці, відповідно до [5], наведено в табл. 1.

Числовий приклад імовірності небажаного наслідку, який використовується в практиці

Імовірність події	Імовірнісний опис	Можливість наслідку
0,7–0,1	Велика можливість події	висока
0,3–0,7	Подія буде відбуватися рівномірно	середня
0,05–0,3	Подія буде відбуватися нерівномірно	низька
0,001–0,05	Подія буде траплятися рідко	дуже низька
10^{-6} –0,001	Подія буде відбуватися дуже рідко	надто низька
0– 10^{-6}	Подія практично не відбудеться	практично неможлива

Відповідно до табл. 1, величини прийнятої імовірності події в електробезпеці можуть знаходитися у діапазоні від 10^{-6} до 10^{-3} . Зменшення ризику електротравматизму вимагає удосконалення системи захисту людини від ураження електричною енергією, а це, в свою чергу, – збільшення витрат.

Як вже відзначалося, для оцінки міри небезпеки людини, пов'язаної з електротравмою, використовується не лише частота її появи, але і важкість наслідків для індивідуума і суспільства. Враховуючи те, що більше 90 % загальної шкоди в промисловості, яка оцінюється економічними показниками, відноситься до виробничого травматизму людей, оцінку збитку від небажаної події (електробезпечної ситуації) можна проводити за втратою працездатності відповідно до [5] за виразом

$$Z_i = (1 - ROS_i) D_i, \quad (7)$$

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 (третя група інвалідності)
Нездатність працювати на роботі, що високо оплачується	0,946	0,935	0,900	0,760 (друга група інвалідності)
Пересування в інвалідному візку	0,875	0,845	0,680 (перша група інвалідності)	0,000 (смерть)

Зазначимо, що значення припустимої величини імовірності небажаної події, які рекомендуємо до використання, потрібно розглядати в рамках економічних умов, що склалися в даний час в країні. З досягненням стабілізації економічного стану в Україні величина ризику від електротравматизму може бути переглянута у бік зменшення, для цього необхідно, щоб економічні механізми управління ризиком працювали ефективніше.

Висновки

На основі запропонованої моделі системи захисту людини від електричної енергії викладено методологію системного аналізу оцінки ризику електротравматизму, що дозволить вибрати оптимальний комплекс засобів та заходів для забезпечення допустимого рівня безпеки в процесах взаємодії людини та електроустановки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондаренко Євгеній Аркадійович. Охорона праці : навчальний посібник / Є. А. Бондаренко. — Вінниця : ВДТУ, 1998. — 92 с.
2. Манойлов В. Е. Основы электробезопасности. — 5-е изд., перераб. и доп. / Владимир Евстафьевич Манойлов. — Л. : Энергоатомиздат, 1991. — 480 с.
3. Маліновський А. А. Теоретичні передумови підвищення рівня електробезпеки / А. А. Маліновський // Гірнична електромеханіка та автоматика : наук. -техн. зб. НГУ. — 2004. — № 72. — С. 51—56.
4. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. — СПб. : Политехника, 2000. — 248 с.
5. Кальки Валдис. Основные направления оценки рисков рабочей среды / Валдис Кальки, Имант Кристиньш, Жения Роя. — Рига. : SIA «Jelgavas tipogrāfija», 2005. — 73 с.
6. Бондаренко Є. А. Граничнодопустимі значення напруг дотику та струмів промислової частоти / Євгеній Аркадійович Бондаренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 2. — С. 31—34.
7. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. [Введен 1992–01–07]. — М. : Издательство стандартов, 1996. — 81 с. — (Переиздание (январь 1996 г.) с Изменением № 1, утвержденным в декабре 1993 г. (ИУС 1-95)).

Рекомендована кафедрою хімії та безпеки життєдіяльності

Стаття надійшла до редакції 3.05.12
Рекомендована до друку 25.05.12

Бондаренко Євгеній Аркадійович — доцент кафедри хімії та безпеки життєдіяльності.
Вінницький національний технічний університет, Вінниця