

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

## ПРОБІТ-АНАЛІЗ РИЗИКУ ЕЛЕКТРОТРАВМАТИЗМУ

*Запропоновано метод кількісного оцінювання ризику ураження електричною енергією, який базується на основі пробіт-аналізу, що дає можливість удосконалити систему захисту людини в електроустановках.*

### 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.

Рівень електротравматизму в Україні багаторазово перевищує рівень в технологічно розвинених країнах, де він після помітного спаду в сімдесятих роках минулого століття, зумовленого масовим впровадженням пристроїв захисного вимкнення, стабілізувався на рівні 5 смертельних випадків за рік на мільйон мешканців [3].

Як впливає з 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 через це пов'язаний з деяким початковим ризиком. З іншого боку, вимога повного виключення ризику аварій, загибелі людей приводить до абсурду — необхідності відмови від електрики, транспорту й багатьох інших породжень 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 під час взаємодії людини й електроустановки на різних ієрархічних рівнях.

### Результати дослідження

Як критерії, що оцінюють ефективність захисту системи «електроустановка—людина—навколишнє середовище», можна використовувати як детерміновані, так і ймовірнісні критерії.

Детерміновані критерії показують значення параметра небезпечного фактора електротравматизму, за яким визначається певний рівень ураження людей.

У відповідності з [4], одним з основних факторів, що впливає на людину, яка взаємодіє з електроустановками промислової частоти, є величина поглинутої тілом електричної енергії, гранично допустиме значення якої не повинно перевищувати 0,36 Дж для людини середньостатистичних параметрів.

Відомо, що в загальному випадку одне і теж значення небезпечного фактора (кількість поглиненої енергії) може викликати наслідки різної тяжкості у різних людей, тобто ефект ураження носить імовірнісний характер.

Тому під час визначення характеристик вірогідності (випадковості) реалізації дії електричної енергії на людину в умовах недостатніх статистик пропонується пробіт-функція. Ідея пробіт-аналізу належить американському ентомологу Ч. Бліссу, який вперше описав його в статті про вплив пестицидів на відсоток знищених шкідників [5, 6]. Ч. Блісс запропонував для обліку відсотка знищених шкідників використовувати ймовірнісний блок — «Probability unit» або «probit» («пробитий»). Спочатку необхідність введення поняття «probit» була зумовлена прагненням уникнути роботи із статистичною інформацією. У той час біологи, для яких і призначався цей метод, були мало ознайомлені із статистичною обробкою результатів експерименту. В наш час ця причина втратила своє значення, проте назви «пробіт» і «пробіт-аналіз» стали звичними термінами. На сьогодні дослідження із визначення пробіт-функції та її коефіцієнтів проведені в токсикології, фармакології і інших областях біологічних і медичних наук [7, 9]. Приклади таких досліджень є в гідротехніці, будівельній механіці, пожежній безпеці та інших сферах, відмінних від енергетики. Автором вперше робиться спроба аналізу ризику електротравматизму з позиції пробіт-метода.

Відомо, що пробіт-функція є математичною залежністю, яка пов'язує специфічні особливості негативної дії загрози на деякий об'єкт з розміром можливої шкоди. На практиці для більшості випадків загроз безпеки використовується вираз пробіт-функції, який має вигляд [7]

$$Pr = a + b \cdot \ln D, \quad (1)$$

де  $a$ ,  $b$  — коефіцієнти, які характеризують ступінь уразливості об'єкта захисту від конкретної загрози;  $D$  — «оцінка негативної дії».

Відповідно до вищесказаного, у випадку електротравмування, за параметр  $D$  приймається величина енергії, поглинутої тілом людини  $W_h$ , а параметри  $a$  і  $b$  — коефіцієнти, які враховують для кожної людини специфіку та міру небезпеки дії електричної енергії. З урахуванням цього вираз (1) набуде вигляду

$$Pr = a + b \cdot \ln(W_h). \quad (2)$$

Величину енергії  $W_h$ , яка поглинається тілом людини, можна отримати за виразом [8]

$$W_h = P_h t \quad (\text{Дж}), \quad (3)$$

де  $P_h$  — величина потужності електромагнітної енергії, яка поглинається тілом людини, Вт;  $t$  — тривалість дії електричного струму на людину, сек.

Величину потужності  $P_h$ , яка поглинається тілом людини, можна отримати за виразом

$$P_h = U_{\text{дот.}} \cdot I_h \cdot \cos \varphi, \quad (4)$$

де  $U_{\text{дот.}}$  — значення напруги дотику, В;  $I_h$  — величина струму, що проходить через тіло людини, А;  $\varphi$  — кут зсуву фаз між ними.

Якщо значення  $a$ ,  $b$  та  $W_h$  відомі, тоді за виразом (2) можна розрахувати значення пробіт-функції  $f(Pr)$ . Після того, як буде визначено значення пробіт-функції, обчислюється значення вірогідності реалізації загрози безпеці людині  $Q_i$ . Для розв'язання цієї задачі викорис-

товується функція помилок Гаусса, яку ще називають «ерік-функція», яка визначається відповідно до [7] за формулою

$$Q_i = f(Pr) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr} e^{-t^2/2} dt, \quad (5)$$

де пробіт-функція  $f(Pr)$  є верхньою межею інтеграла, а сам вираз (5) вже не містить емпіричних коефіцієнтів.

**Значення ймовірності травмування людини від дії електричної енергії  
в залежності від величини пробіт-функції**

Умовна ймовірність травматизму $Q_i, \%$	Величина пробіт-функції $Pr$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	–	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,90	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,56	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

На практиці для обчислення інтеграла (5) застосовують таблицю значень пробіт-функції [9]. Пояснимо використання табл. на прикладі. Нехай необхідно знайти вірогідність реалізації загрози безпеки людині за відомим значенням пробіт-функції,  $Pr = 5,15$ . Цьому значенню відповідає пересічення рядка «50 %» і стовпця «6 %» таблиці, за яким вірогідність реалізації загрози безпеки людини в електроустановках дорівнює 56 %. Якщо пробіт-функція приймає середні значення, наприклад,  $Pr = 5,165$ , то вірогідність реалізації загрози безпеці людині може бути визначена за виразом

$$Q(5,165) = \frac{Q(5,15) + Q(5,18)}{2} = \frac{56\% + 57\%}{2} = 56,5\%.$$

Обчислення значення ймовірності реалізації загрози безпеці людини, яка взаємодіє з електроустановками, можливе як для смертельного випадку, так і для різних рівнів втрати працездатності: незначного, легкого, середнього та важкого. В цих випадках у виразах пробіт-функцій будуть різні коефіцієнти  $a$  і  $b$ .

### Висновки

Використання системного підходу для побудови пробіт-функції забезпечує єдиний метод урахування особливостей пари «фактор—наслідки» для різних умов і створює основу для кількісного оцінювання ризику від ураження електричною енергією, що дає можливість удосконалити систему захисту людини в електроустановках. Розвиток методу пробіт-аналізу стосовно сфери електробезпеки може розглядатися як окремий напрям наукових досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондаренко С.А. Охорона праці : навч. посіб. / С. 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 // Гірничі електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. НГУ. — 2004. — № 72. — С. 51—56.
4. Бондаренко С. А. Гранично допустимі значення напруг дотику та струмів промислової частоти / С. А. Бондаренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 2. — С. 31—34.
5. Bliss C. I. The Method of Probits / C. I. Bliss // Science. — 1934. — Vol. 79, № 2037. — P. 38—39.
6. Bliss C. I. The Method of Probits — A Correction / C. I. Bliss // Science. — 1934. — Vol. 79, № 2053. — P. 409—410.
7. Ваштиев В. К. Оценка воздействия опасных факторов взрыва и пожара на людей / В. К. Ваштиев // Безопасность в техносфере : сб. стат. — Ижевск : Удмуртский университет, 2011. — № 1. — С. 72—78.
8. Кутин В. М. Защитные свойства экранирующих комплектов для работ под напряжением на линиях электропередачи 330—750 кВ / Василий Михайлович Кутин, Евгений Аркадиевич Бондаренко // Электричество. — 1993. — № 11. — С. 20—26.
9. Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере : учеб. пос. для студ. высш. учеб. заведений / Белов Петр Григорьевич. — М. : изд. центр «Академия», 2003. — 512 с.

Рекомендована кафедрою хімії та безпеки життєдіяльності

Стаття надійшла до редакції 22.05.12  
Рекомендована до друку 25.06.12

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