

УДК 621.31+006.034

Є.А. БОНДАРЕНКО

Вінницький національний технічний університет

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИХ РІВНІВ НАПРУГ ДОТИКУ ТА СТРУМІВ

Запропоновано концепцію електробезпеки та метод визначення гранично допустимих величин напруг дотику і струмів з урахуванням енергії, яка поглинається тілом людини. Отримано їх гранично допустимі значення. Представлено залежності гранично допустимої напруги дотику від струму і часу його дії, з урахуванням енергії, яка поглинається тілом людини, для електроустановок постійного та змінного струмів.

Ключові слова: нормування, напруга дотику, граничні значення струмів, граничні значення напруг дотику, електроустановки.

Y.A. BONDARENKO

Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine

## METHOD FOR DETERMINING THE MAXIMUM ALLOWABLE TOUCH VOLTAGE LEVELS AND CURRENT

### Abstract

It is noted that the level of an electrotraumatism both in Ukraine and in other countries around the world remains high. It was determined that the typical cause of electrical injury is the sequence of events- preconditions: human mistake, failure of electrical equipment and, as a result, the adverse effects of electrical energy per person based on faults of protection means. One of the main reasons for the unsatisfactory state of the electrical safety in the world is the disparity between the established norms of acceptable parameters for humans to those applicable in the real lethal injuries and occupational diseases. Existing standards regarding the acceptable currents, voltages of a touch and duration of their action do not consider the relationship with the amount of the energy which is absorbed by the human body. In order to improve the electrical safety of the staff that interacts with electric installations, proposed the concept of the electrical safety and the method of determining the limit values for the voltages of a touch and the currents, taking into account the energy, which is absorbed by the human body. Were obtained their limit values. Submitted the dependencies of the maximum permissible touch voltage from the current and the time of his action, including the energy that is absorbed by the human body, for electrical installations of direct and alternating currents.

Keywords: normalization, voltage of a tangency, limiting values of currents, limiting values of voltage, electro installations.

### Вступ

За оцінками Міжнародного бюро праці щорічно нещасні випадки на виробництві та професійні захворювання забирають життя приблизно 2 млн. осіб і обходяться глобальній економіці в 1,25 трлн. доларів США. Статистичні дані Міжнародної Організації Праці (МОП) свідчать, що 4 % світового валового продукту недоодержують внаслідок нещасних випадків на виробництві та професійних захворювань [1].

Електротравматизм як проблема виник в останній чверті XIX століття у зв'язку з широким впровадженням електроустановок змінного струму промислової частоти, відрізняючись від інших видів травм рядом особливостей [2]:

- частка електротравм у загальному виробничому травматизмі відносно мала – 1...2 %, але у травматизмі зі смертельними наслідками досягає 15 % і більше;
- людина не може виявити наявності напруги дистанційно без спеціальних пристроїв;
- людина може отримати електротравму без безпосереднього контакту зі струмопровідними частинами (потрапляння під напругу кроку, ураження через електричну дугу);
- електричний струм діє не тільки у місці контакту, а й на весь організм у цілому, спричиняючи 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 [3], з іншого боку, іноді потерпілий виживає після дії напруги більше 1 кВ.

Дослідження в області електробезпеки, проведені в нашій країні і за кордоном, показують, що рівень електротравматизму як в промисловості, так і в побуті є недопустимо високим. При цьому щорічна кількість побутових електротравм значно перевищує виробничі, і упродовж декількох останніх десятиліть спостерігається їх зростання [4, 5, 6]. Щорічно від ураження електричним струмом в Україні

гинуть біля 1500 осіб, приблизно в 5-6 разів більше осіб одержують електротравми, що приблизно в шість разів перевищує показники в технологічно розвинених країнах [5, 6].

За кожною електротравмою, і особливо важкою, стоїть трагедія окремої людини, сім'ї, суспільства, значні матеріальні збитки і втрата трудових ресурсів, несприятливі для суспільства морально-етичні і соціально-політичні наслідки.

Однією з основних причин незадовільного стану електробезпеки у світі є недосконалість нормативної бази відносно проектування засобів захисту людей, які взаємодіють з електроустановками. Стандарт [7], що діє в Україні і Росії, а також рекомендації Міжнародної електротехнічної комісії МЕК [9] відносно допустимих струмів, напруг дотику та тривалості їх дії близькі один до одного і не враховують взаємозв'язок з кількістю енергії, яка поглинається тілом людини.

Гранично допустимі струми короткочасних (до 1 с) дій в чинних нормативах базуються на концепції запобігання фібриляції шлуночків серця. Однак смертельні наслідки ураження можуть бути зумовлені й порушеннями функцій системи дихання чи шоком, для яких достатня сила струму, що менша від сили фібриляційного струму. Фібриляційний механізм ураження, особливо в електроустановках з номінальною напругою до 1000 В, не є характерним і домінуючим. Фібриляцією зумовлені лише 7% смертельних електротравм. Розслідування багатьох випадків смертельних уражень з ретельним відтворенням їх обставин показали, що в 84 % випадків струм ураження не перевищував 20 мА, а тривалість, за якої струм такої величини зумовлював смертельні наслідки, не перевищувала 0,2-0,3 с [5]. Як видно з табл. 2, для такої тривалості допустима сила струму становить відповідно 190 та 160 мА.

Незмінність протягом багатьох років рівня електротравматизму свідчить про необхідність розробки нової концепції підвищення рівня електробезпеки з врахуванням сучасних знань.

#### Мета дослідження

Розробити нову концепцію зменшення ризику електротравматизму та методику нормування гранично допустимих рівнів напруг дотику і струмів при аварійних режимах роботи електроустановок, з урахуванням енергії, яка поглинається тілом людини.

#### Результати дослідження

Аналіз великої кількості даних по електротравматизму [3, 4] показав, що експлуатація електроустановок потенційно небезпечна, оскільки пов'язана з різними процесами, а останні – з використанням (виробленням, транспортуванням, зберіганням і перетворенням) електричної енергії, яка накопичується в устаткуванні, тілі людини й навколишньому середовищі. Неконтрольований вихід енергії у певних умовах супроводжується небажаними подіями – наслідками (електротравми, матеріальні збитки, шкода навколишньому середовищу та ін.). Закономірності у появі небажаних випадків характеризуються такими основними ознаками:

- а) електротравми можна інтерпретувати потоками випадкових подій з експоненціальним розподілом часу між їх появою;
- б) виникнення кожного конкретного випадку травми є, як правило, наслідком не окремо взятої причини, а ланцюга відповідних передумов;
- в) ініціаторами і ланками такого ланцюга стають помилки людей, відмова техніки і несприятливі для людей або техніки дії зовнішнього середовища.

Типовими причинами електротравм виявилася така послідовність подій-передумов: помилка людини, відмова електроустаткування і несприятлива для них зовнішня дія; поява небезпечного чинника (електричної енергії) в несподіваному місці і невчасно; відсутність або несправність передбачених на ці випадки засобів захисту й неточні дії людини в такій ситуації; поширення і дія небезпечних чинників на людину.

Виявлені вище фактори та передумови появи електротравм, відповідно до [8], дозволяють сформулювати концепцію електробезпеки, яка може бути подана такими твердженнями:

- функціонування системи «електроустановка – людина – середовище» не забезпечує абсолютну безпеку, так як потенційна небезпека ураження людини електричною енергією має прихований, неявний характер при певних умовах;
- для забезпечення прийнятого рівня безпечних умов взаємодії людини з електроустановками в певному середовищі раптовий, несанкціонований вихід електричної енергії з електротехнічних систем на людину не повинен перевищувати граничних значень;
- граничні або гранично допустимі значення електричної енергії, що поглинається тілом людини, повинні встановлюватися з урахуванням параметрів конкретної людини, граничних значень напруги дотику, струму, що протікає через тіло людини, роду, частоти та часу дії струму;
- дія електричної енергії на людину повинна бути обмежена у просторі та часі;
- підвищити рівень електробезпеки людини, яка взаємодіє з електроустановками, можна шляхом усунення ланцюга передумов появи електротравм: помилкові і несанкціоновані дії персоналу; погана професійна підготовка; несправності і відмови електроустаткування (низька надійність); несподівані або

такі, що перевищують допустимі межі зовнішні дії (агресивний вплив середовища, знос, старіння устаткування) і таке інше.

Відповідно до прийнятої концепції, електробезпеку в системі «електроустановка – людина – середовище» слід прийняти, як мінімальну вірогідність спричинення збитку людині внаслідок звільнення і поширення руйнівних потоків електричної енергії.

Величину енергії промислової частоти, яка поглинається тілом людини, відповідно до [11], можна отримати з виразу

$$W_{h.d.} = U_{d.} \cdot I_{h.d.} \cdot t \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

де  $U_{d.}$  – дійсне граничне значення напруги дотику, В;

$I_{h.d.}$  – допустима дійсна величина струму, що проходить через тіло людини, А;

$\varphi$  – кут зсуву фаз між ними;

$t$  – тривалість дії електричного струму на людину, сек.

Числову величину для  $W_{h.d.}$ , можна визначити за умови, що за граничні значення напруги дотику і струму беруться значення, наведені в табл.1, для нормального (неаварійного) режиму роботи електроустановок при тривалості дії 10 хвилин, виходячи з реакції відчуття. З урахуванням цієї умови

$$W_{h.d.} = 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \cdot \cos \varphi = 0,36 \cdot \cos \varphi, \text{ Дж.} \quad (2)$$

Електрична енергія розсіюється в масі тіла. Вираз (2) отриманий для допустимої енергії, яка поглинається тілом людини середньостатистичних параметрів, маса якої, відповідно [9], дорівнює 71,9 кг. У реальних умовах маса конкретної людини відрізняється від середніх величин, тому у вираз для допустимої енергії вводиться поправковий коефіцієнт  $k = m_h / 71,9$ .

$$W_{h.d.} = 0,36k \cdot \cos \varphi, \text{ Дж.} \quad (3)$$

Таблиця 1

**Гранично допустимі напруга дотику і струм, що протікають через тіло людини при нормальному (неаварійному) режимі електроустановки відповідно до ГОСТ 12.1.038-82 ССПБ [7]**

Рід струму	U, В	I, мА
	не більше	
Змінний, 50 Гц	2,0	0,3
Постійний	8,0	1,0

Аналогічно визначенню допустимої величини енергії промислової частоти, яка поглинається тілом людини, за виразом (1) та даними табл. 1, отримано вираз для допустимої енергії, яка поглинається тілом людини, при взаємодії людини з електроустановками постійного струму:

$$W_{h.d.} = 4,8k, \text{ Дж.} \quad (4)$$

Таким чином, для забезпечення безпечних умов взаємодії людини з електроустановками у певному середовищі раптовий, несанкціонований вихід електричної енергії з технічних систем на людину  $W_h$  не повинен перевищувати допустимих значень:

$$W_h \leq W_{h.d.}, \quad (5)$$

де  $W_{h.d.}$  – допустиме значення енергії, яка поглинається тілом людини, для змінного струму промислової частоти визначаються за виразом (3), а для постійного струму – за виразом (4).

Підставивши вираз (3) в (1), отримаємо залежність гранично допустимої напруги дотику у вольтах від сили електричного струму промислової частоти і часу його дії

$$U_{d.} = \frac{0,36k}{I_{h.d.} \cdot t}. \quad (6)$$

Аналогічно, підставивши вираз (4) в (1), отримаємо залежність гранично допустимої напруги дотику у вольтах від сили постійного електричного струму і часу його дії

$$U_{d.} = \frac{4,8k}{I_{h.d.} \cdot t}. \quad (7)$$

Отримані вирази (6) і (7) враховують взаємозалежність допустимої напруги дотику від кількості енергії, яка поглинається тілом людини, при його взаємодії з електроустановками промислової частоти і постійного струму, відповідно.

У табл. 2 наведена характеристика значень, що порівнює граничні напруги дотиків і струмів при аварійному режимі роботи виробничих електроустановок напругою до 1000 В з глухозаземленою або

ізолюваною нейтраллю і вище 1000 В з ізолюваною нейтраллю згідно з ГОСТ 12.1.038-82 і виразами (6) і (7).

Таблиця 2

**Гранично допустимі значення напруги дотику і величини струму, який проходить через тіло людини, при аварійному режимі роботи виробничих електроустановок згідно з ГОСТ 12.1.038-82 і пропонувані**

Рід струму	Нормована величина	Гранично допустимі значення, при тривалості дії струму t, с (не більше)											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	понад 1,0
Змінний, 50 Гц	U, В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
	I, мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6
Постійний	U, В	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40
	I, мА	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15
Запропоновані гранично допустимі значення, при тривалості дії струму t, с (не більше)													
	t, с	0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1-12 с
Змінний, 50 Гц	U, В	560	450	225	150	128	105	100	86	75	67	60	20
	I, мА	8	8	8	8	7	7	6	6	6	6	6	1,5
Постійний	U, В	750	600	400	320	270	240	230	230	200	180	160	40
	I, мА	80	80	80	50	45	40	35	30	30	30	30	12

За граничні величини змінних струмів промислової частоти прийняті найменше значення відчутного струму частотою 50 Гц - 1,5 мА для часу дії струму від 1,1-12 с, і найменші значення струму невідпускання – 6-8 мА відповідно до [6]. Час дії електричного струму промислової частоти, яка проходить через тіло людини при аварійному режимі роботи електроустановки, обмежується до 12 с. За граничні величини постійних струмів прийняті порогові значення постійного струму, при якому спостерігається відчуття підсиленого нагріву – 12 мА для часу дії струму від 1,1...12 с, та порогові значення невідпускаючого постійного струму – 30-80 мА відповідно до [12].

#### Висновки

Запропонована концепція підвищення рівня електробезпеки та метод визначення гранично допустимих величин напруг дотику і струмів з урахуванням маси реальної людини та значення допустимої енергії. Результати дослідження дають можливість підвищити рівень електробезпеки та зменшити ризик електротравматизму.

#### Література

1. Зеркалов Д. В. Охорона праці в галузі: Загальні вимоги: навчальний посібник / Зеркалов Д.В. – К. : Основа, 2011. – 551 с.
2. Бондаренко Є. А. Охорона праці : навчальний посібник / Бондаренко Є.А. – Вінниця. : ВДГУ, 1998. – 92 с.
3. Манойлов В. Е. Основы электробезопасности. – 5-е изд., перераб. и доп. / Манойлов В.Е. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.
4. Гордон Г. Ю. Электротравматизм и его предупреждение / Г.Ю. Гордон, Л.И. Вайнштейн – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
5. Маліновський А. А. Теоретичні передумови підвищення рівня електробезпеки / Маліновський А. А. // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. -техн. зб. НГУ. – 2004. – № 72. – С. 51-56.
6. Основи охорони праці : підруч. / Ткачук К.Н., Халімовський М.О. Зацарний В. В. [та ін.]; за ред. К. Ткачука і М. Халімовського. – К. : Основа, 2006 – 448 с.
7. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов: ГОСТ 12.1. 038–82 ССБТ. [Введен 1983–07–01]. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 6 с. – (Ограничение срока действия снято по протоколу № 2-92 Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации (ИУС 2-93). Переиздание (июль 2001 г.) с изменением № 1, утвержденным в декабре 1987 г. (ИУС 4-88)).
8. Бондаренко Є.А. Енергоентропійна концепція електробезпеки / Бондаренко Є.А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2012. – № 4. – С. 136-138.

9. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках / Долин П.А. – М. : Энергоатомиздат. –1984. – 484 с.
10. IEC TECHNICAL REPORT 60479-1. Effects of current on human beings and livestock. Part 1. General aspects. Third edition, 1994-09. (МЕК ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ 60479-1. Действие тока на людей и домашний скот. Часть 1. Общие аспекты. Третий выпуск, 1994-09).
11. Бондаренко Є. А. Гранично допустимі значення напруг дотику та струмів промислової частоти / Бондаренко Є. А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 2. – С. 31-34.
12. Гажаман В. І. Електробезпека на виробництві: навчальний посібник / Гажаман В.І. – К. : Друкарня журналу «Охорона праці», 1998. – 272 с.

#### References

1. Zerkalov D.V. Ohorona praci v galusi:Zahalni vumohi: navchalniy posibnyk, Osnova, 2011. – p. 551
2. Bonarenko E.A. Ohorona praci: navchalniy posibnyk, VDTU, 1998. – p. 98
3. Manoylov V.E. Osnovi elektrobezopasnosti, Energoatomizdat, 1991. – p. 480
4. Gordon G.U., Venshtein L. I. Electrotravatism I ego preduprezhdeniye, Energoatomizdat, 1986. – p. 256
5. Malinovskiy A. A. Teoretichni peredumovi pidvishchennya rivnya elektrobezpeky, Gimicha electromehanika ta avtomatika, 2004. – pp. 51-56.
6. Tkachuk K.N., Halimovskiy M. O., Zacarniy V.V. Osnovi ohoroni praci, Osnova, 2006. – p. 448
7. Predelno dopustimie urovni naprazheniya prikosnoveniya i tokov, GOST 12.1.038-82, 1985 – p. 6
8. Bondarenko E. A. Energoentropiyna koncepcia elektrobezpeku, Visnuk VDTU, 2012. – pp. 136-138
9. Dolin P. A. Osnovi tehniki bezopasnosti v electroustanovkah, Energoatomizdat, 1984. – p. 484
10. IEC TECHNICAL REPORT 60479-1. Effects of current on human beings and livestock. Part 1. General aspects. Third edition, 1994-09
11. Bondarenko E.A. Granichno dopustimi znachennya naprug dotyku ta strumiv promislovoi chastotu, Visnuk VDTU, 2011. – pp. 31-34.
12. Gazhman V. I. Electrobezpeka na virobniectvi: navchalniy posibnuk, Drukarnya zurnalu “Ohorona praci”, 1998. – p. 272