

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ШУМУ НА ОПІРНІСТЬ ТІЛА ЛЮДИНИ ЕЛЕКТРИЧНОМУ СТРУМУ**Г. І. Туровська, О. В. Богданенко**

Національний університет водного господарства та природокористування

вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000, Україна. E-mail: nonna_yan@ukr.net, dyturu@mail.ru

Проведено експериментальне дослідження впливу шуму на повний електричний опір тіла людини та дано оцінку про початкові значення небезпечних напруг і відповідно підбір шумозахисного обладнання у випадку значного перевищення первинного критерію електробезпеки – порогового відчутного струму при впливі значимого чинника – шуму. Отримані електротехнічні характеристики тіла людини на імітаційній моделі дозволять сформувати блок вихідних даних для наступних моделей оцінки різних наслідків ураження електричним струмом при сумісній дії електротехнічних подразнюючих чинників та параметрів шуму, зокрема, при однополюсному, однофазному доторканні людини до фази з порушеною ізоляцією електропроводки або при замиканні фази на корпус, що в подальшому матиме практичну значимість при розробці рекомендацій щодо впровадження нових захисних пристроїв електроустановок та врахування поправок щодо впливу шуму на первинні критерії електробезпеки.

Ключові слова: електробезпека, шум, опір, електрострум, частота.**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШУМА НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ТОКУ****Г. И. Туровская, А. В. Богданенко**

Национальный университет водного хозяйства и природопользования

ул. Соборная, 11, г. Ровно, 33000, Украина. E-mail: nonna_yan@ukr.net, dyturu@mail.ru

Проведено експериментальне дослідження впливу шуму на повне електричне опір тіла людини та дано оцінку про початкові значення небезпечних напруг і відповідно підбір шумозахисного обладнання у випадку значного перевищення первинного критерію електробезпеки – порогового відчутного струму при впливі значимого фактора – шуму. Отримані електротехнічні характеристики тіла людини на імітаційній моделі дозволять сформувати блок вихідних даних для наступних моделей оцінки різних наслідків ураження електричним струмом при сумісній дії електротехнічних подразнюючих чинників та параметрів шуму, зокрема, при однополюсному, однофазному доторканні людини до фази з порушеною ізоляцією електропроводки або при замиканні фази на корпус, що в подальшому матиме практичну значимість при розробці рекомендацій щодо впровадження нових захисних пристроїв електроустановок та врахування поправок щодо впливу шуму на первинні критерії електробезпеки.

Ключевые слова: електробезопасность, шум, сопротивление, электроток, частота.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Електробезпека є одним з основних принципів, що покладені в основу організації праці. Згідно багаторічних статистичних даних [1, 2] відсоток нещасних випадків ураження електричним струмом складає, по відношенню до загального числа травм, досить незначну величину (менше 2 %), але відсоток випадків зі смертельними наслідками за окремими галузями промисловості досягає досить значних величин (15%–20%). Це свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму. Зокрема, на електроустановках напругою до 1 кВ припадає до 70–80% електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановках напругою понад 1 кВ – до 20–30%. В цілому, при чисельності населення України менше 1 % від світової, кількість смертельних електротравм перевищує 6 % від загальносвітової. Тому і виникає потреба вивчення можливих проявів електрики в будь-якій формі, особливо при застосуванні нових джерел живлення.

В сучасних реаліях промислового виробництва, що характеризується досить широкою системою електромереж, експлуатується багато нового електроустаткування, що вимагає нових схем живлення, переходу на європейські стандарти безпеки або використовується застаріле обладнання з використанням основних технічних заходів попередження електротравм при переході напруги на струмовідні час-

тини обладнання: захисне заземлення, захисне занулення, захисне вимкнення. Відповідно необхідно враховувати оцінку з ймовірністю дотикання людини до електроустановок, включення її в електричне коло в нормальному або аварійному режимах роботи електроустановок і нанесення їй шкоди з різною важкістю наслідків, а також особливості проходження електричного струму крізь тіло людини.

Аналіз наукових досліджень і публікацій свідчить, що проблеми електробезпеки успішно вирішують вчені: Л.О. Никоненко, А.А. Маліновський, Ю.Л. Шелех, В.М. Радченко, С.В. Голубов, В.М. Сидоренко [3–5]. Значним кроком, в розумінні механізму дії електричного струму на організм людини, стали роботи В.Є. Манойлова, К.А. Ажібаєва, Л.В. Гладилина, В.І. Щуцького, Є.А. Бондаренка, О.П. Кисильова, П.А. Доліна, Г. Бігельмайера, Л. Гедс, Р. Фіш та інших авторів [6, 7]. Зокрема, питаннями впливу шуму на електричну опірність тіла людини займався В.В. Кацай [8], який дослідив вплив шуму електрообладнання на електротехнічні характеристики тіла людини. Було доведено, що досить суттєвим (до 50 %) зниження опору тіла людини відбувається при впливі переривчастого непостійного шуму рівнем звуку більше 95 дБА і частотою звукового тиску в діапазоні 125–275 Гц. Авторами О.І. Сидоровим, О.Б.Тряпичиним, К.В. Зікіною, Т.Л. Єлісеєвою розроблена установка для дос-

лідження впливу шуму на первинні критерії електробезпеки. У результаті вирішена задача по визначенню залежності порогових відчутних струмів від дії різних видів і рівнів шуму (постійний шум частотою 1000 Гц). Перевагою установки є можливість плавного регулювання і збільшення прикладеної до електродів напруги за встановлений період часу.

Проте багато аспектів даної проблеми все ж таки ще потребують подальшого дослідження та практичного застосування. Зокрема, відсутні однозначні дані з небезпеки початкових значень напруг і струмів при значному варіюванні в діапазоні порогових відчутних і невідпускаючих струмів. Також значно мало приділяється уваги дослідженням, в яких умовах можливе ураження людини електричним струмом та впливу небезпечних електротехнічних і фізичних чинників на наслідки ураження. Багато електроустановок генерують досить значні рівні шуму або знаходяться у виробничих приміщеннях при наявності в них людини з генеруванням рівнів звукового тиску від обладнання при виконанні технологічних операцій. За значимістю, рівні шуму як чинник впливу на електричну опірність тіла людини можуть перевищувати електротехнічні чинники, наприклад, рід і частоту струму, напругу тощо.

Тому, враховуючи відсутність досить ґрунтовних досліджень впливу шуму на суттєвий інтегральний показник впливу електричного струму на людину – опірність тіла людини електричному струму, – нами представлена можливість обґрунтувати і вирішити наукове завдання. Це може мати практичну значимість в розробці рекомендацій при впровадженні нових захисних пристроїв електроустановок та врахування поправок щодо впливу шуму на первинні критерії електробезпеки.

Метою роботи є встановлення впливу виду та рівня шуму на повний опір тіла людини електричному струму з оцінкою електротехнічних чинників в діапазоні їх зміни.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Відомо, що найбільшої чутливості слуховий апарат людини досягає при наявності в шумі середніх і високих частот (800...4000 Гц). Тому в експерименті вимірювався постійний шум в дБ, що нормується за рівнями звукових тисків у октавних смугах частот з середньо геометричною частотою 1000 Гц. Це зумовлено також тим, що на частоті 1000 Гц рівні гучності прийняті рівними рівням звукового тиску, що є важливим в процесі трудової діяльності для розрізнення тексту в діапазоні частоти мовлення. Також досліджувався вплив непостійного шуму, зокрема переривчастого, рівень шуму якого змінюється ступінчасто на 5 дБА і більше при вимірюванні за часовою характеристикою «повільно» за «шкалою шумоміра А» (довжина інтервалів більше 1 с).

Наукові джерела стверджують, що шум 60–80 дБ створює значний психологічний вплив на людину, доходячи при тривалій дії шуму до нижньої межі початку професійної захворюваності. При рівні шуму 65–90 дБА можливий його фізіологічний вплив на людину: пульс пришвидшується, тиск крові зростає, судини звужуються, що погіршує постачання органів кров'ю. Дія шуму з рівнем 90 дБА і вище

може призвести до функціональних порушень в органах та системах організму людини: знижується слухова чутливість, погіршується діяльність шлунка та кишківника, з'являється відчуття нудоти, головний біль, шум у вухах.

Для дослідження був обраний діапазон рівнів звукового тиску 85–95 дБ (з інтервалом варіювання 5 дБ), так як на багатьох підприємствах наявні відповідні рівні звукового тиску від виробничого обладнання, інструментів. При збільшенні шуму понад 80 дБ у працівників спостерігаються вже значні фізіологічні зміни: зниження слухової активності на високих частотах (зниження чутливості), серцево-судинна недостатність, нейроендокринні розлади, зміни в сенсомоторних реакціях, координації рухів (при шумі 93–95 дБ) сповільненні при реагуванні на об'єкт, що рухається тощо. Це в свою чергу може погіршити наслідки ураження електричним струмом при порушенні людиною вимог електробезпеки або випадковому потрапленні під дію напруги дотику, індукованої напруги, струмів витoku при порушенні ізоляції електропроводки або замиканні фази на корпус обладнання.

З міркувань електробезпеки при прикладанні до живої тканини експериментатора були обрані напруги 3 В і 6 В. Так при прикладанні 9 В на електроді при повному контакті дотикання долоні сила струму перевищувала поріг відчутності та наближалася до 3 мА. Перевірка на мегомметрі М4100/1 (100 В) опору постійному струму показала, що тільки збільшення площі електродів до максимального значення 240 см² веде до отримання значення еквівалентної змінної напруги дотику, яка є початковим значенням з міркувань електробезпеки і нормативу (не більше 110 В постійної напруги). Якщо обирати інші площі електродів, то необхідно збільшувати напруги і навпаки, при цьому обґрунтовуючи їх величини. В іншому випадку порушується принцип еквівалентності впливу постійної і змінної напруги.

Для дослідження використовувалися наступні прилади та устаткування:

- Генератор звукових сигналів ГЗ-33.
- Мілівольтметр ВЗ-2А (ВМЛ -2А).
- Міліамперметр Є535.
- Вольтметр Є543.
- Міст постійного струму Р333.
- Мікроамперметр, індуктор.
- Прилад комбінований Ц4320.
- Універсальне джерело живлення «Електроніка».
- Шумоміри ШМ-1 і ВШВ-1.
- Генератор низької, середньої і високої частот.
- З'єднувальні провідники.
- Вимірювач опору заземлюючої проводки М372.

Проведемо повний факторний експеримент (ПФЕ) для визначення впливу шуму на електричну опірність тіла людини. З теорії планування експерименту відомо, що якщо аналітичну залежність, що з'єднує функцію відгуку Y з факторами X_i , знайти неможливо і вигляд функції $Y = F(X_1, \dots, X_k)$ апіорі невідомий, то цілком ймовірно використову-

вати степеневий ряд для математичною моделювання об'єкта, що досліджується.

Так як, виходячи з вимог практики, число членів степеневому ряду обмежується, апроксимуюча функція є поліном деякого ступеню. Для його повного визначення необхідно знати коефіцієнти b_0, b_i, b_{ij} і т.п. Ці коефіцієнти можна вирахувати на підставі результатів експерименту. Наприклад, задавши поєднанням деяких факторів, проводиться перший дослід ($u = 1$) і отримуємо функцію відгуку (опір тіла людини) при прийнятих значеннях факторів. Потім за іншим поєднанням факторів знову поставимо дослід.

Плануванню експерименту повинен передувати етап неформалізованих рішень – вибору області експериментування, тобто області факторного простору, вивчення якої представляє інтерес для дослідження. Межі області за кожним фактором X_i обумовлені його мінімальним і максимальним значеннями, тобто $X_{i\min} \leq X_{i\max}$.

Для зручності обробки та інтерпретації результатів експерименту доцільно всі фактори представити в безрозмірній формі. Для цього виконується операція лінійного перетворення факторного простору – операція кодування.

Крім цього, інтервал вирівнювання факторів $I_i = 0,5 (X_{i\max} - X_{i\min})$ розбивається на ряд вирівнювань, симетричних відносно центру експерименту. У випадку складання симетричних дворівневих планів всі k фактори змінюються на двох рівнях. При цьому значенням $X_{i\max}$ відповідає змінна $x_i = +1$, а значенням $X_{i\min}$ відповідає $x_i = -1$. Для кількісних факторів зв'язок між фізичними (X_i) і кодованими (x_i) значеннями факторів визначається відношенням $x_i = (X_i - \bar{X}_i) / I_i$.

У табл. 1 наведемо матрицю планування повного факторного експерименту.

Таблиця 1 – Матриця планування факторного експерименту дослідження

№ досліду	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	Y
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_8

З аналізу літературних джерел і за даними однофакторних експериментів для подальшого дослідження виділені три фактори:

- площа електродів, $S - \text{см}^2$; фактор $-X_1$;
- вихідна напруга, $U - \text{В}$; фактор $-X_2$;

- рівні звукового тиску в октавних смугах частот, $L - \text{дБ}$; фактор $-X_3$.

При цьому інші фактори фіксовані:

- частота змінної напруги, $f = 50 \text{ Гц}$;
- середньгеометрична частота звукових коливань – 1000 Гц .

У табл. 2 представлені обрані для дослідження фактори зі значеннями рівнів і інтервалів варіювання.

Таблиця 2 – Значення рівнів і інтервалів варіювання факторів

Параметри (рівні та інтервали варіювання факторів)	Фактори		
	$X_1, \text{см}^2$	$X_2, \text{В}$	$X_3, \text{дБ}$
Нижній рівень -1	20	3	85
Основний рівень 0	130	4,5	90
Верхній рівень +1	240	6	95
Інтервал варіювання	110	1,5	5

Аналіз відомих відомостей про об'єкт дослідження вказує на те, що найбільший інтерес представляють лінійні ефекти та парні взаємодії. Тому модель об'єкта дослідження має наступний вигляд:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (1)$$

Послідовність з рандомізацією двох паралельних дослідів (ПФЕ) за результатами експерименту представлено в табл. 3. Розраховані відгуки – функції трьох змінних, середні значення для 2-х паралельних дослідів експерименту.

Таблиця 3 – Послідовність проведення паралельних дослідів

№ досліду	Послідовність проведення дослідів	Робоча матриця		
		X_1	X_2	X_3
1	6;12	240	3	95
		240	3	95
2	4;11	240	6	85
		20	6	85
3	5;13	20	3	95
		20	3	95
4	2;15	240	3	85
		20	6	95
5	3;10	20	6	85
		240	3	85
6	7;16	20	6	95
		240	6	95
7	8;14	240	6	95
		20	6	85
8	1;9	20	3	85
		20	3	85

Попередньо були проведені дослідження сили струму при відсутності впливу шуму (тільки перших двох факторів) і при непостійному шумі (переривчастий шум низькочастотний (до 300 Гц) в діапазоні 65-70 дБ). Результати дослідження представлені в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати дослідження порогових відчутних струмів при впливі різних факторів

№ досліду	Напруга, В	Площа, см ²	Сила струму, мА	Сила струму при впливі шуму, мА	Приріст сили струму через тіло людини, мА
1	3	240	0,6	0,7	0,1
	6	240	1,25	1,37	0,12
2	3	240	1,25	1,38	0,13
	6	240	1,25	1,38	0,13
3	3	20	0,34	0,4	0,06
	6	20	0,1	0,2	0,1
4	3	240	0,6	0,68	0,08
	6	240	0,8	0,95	0,15
5	6	20	0,48	0,48	0
6	6	20	0,35	0,37	0,02
7	6	240	1,24	1,38	0,14
8	3	20	0,22	0,24	0,02

Результати повного факторного експерименту представлені в табл. 5.

Після проведення досліджень виконувалася статистична обробка отриманих результатів експерименту, зокрема визначалися помилки повторних (паралельних) досліджень.

Для визначення помилок при проведенні повторних дослідів використовувався критерій Стьюдента:

$$\frac{y_i - Y_{\text{сеп}}}{s} \geq t, \quad (2)$$

або

$$t_{\text{роз}} \geq t_{\text{табл}}, \quad (3)$$

де t – критерій Стьюдента, його значення для 2-х повторних дослідів і довірчої ймовірності 0,95 дорівнює 12,71 [9];

S – стандартне відхилення (оцінка середньоквадратичного відхилення випадкової величини y_i відносно її математичного очікування на основі незміщеної оцінки її дисперсії):

$$s = \sqrt{D_Y} \quad (4)$$

$$s=2693,79;$$

$$t_{\text{роз}} = \frac{15238,1 - 13333,33}{2693,79} = 0,7.$$

Умова критерію Стьюдента не виконується. Відповідно результати повторних дослідів не можна вважати помилковими.

Дисперсія відтворюваності або критерій Кохрена визначається на основі даних паралельних дослідів і характеризує однорідність дисперсії (рівну точність) у всіх дослідах. Як правило, критерієм однорідності слугує відношення максимальної дисперсії у відповідній дослідній точці плану експерименту $D_{Y_{\text{макс}}}$ до суми всіх дисперсій:

$$G = \frac{D_{Y_{\text{макс}}}}{\sum_{i=1}^N D_{Y_i}} \quad (5)$$

де

$$D_{Y_i} = \frac{\sum_1^m (y_i - Y_{\text{сеп}})^2}{m - 1} \quad (6)$$

де m – число паралельних дослідів в i -й точці.

Отримане значення G порівнюється з табличним $G_{\text{табл}}$, що визначене для числа ступенів вільності $m-1$, N при прийнятому рівні значимості 0,05.

За даними табл. 5 критерій Кохрена:

$$G = \frac{16231778}{31876013} = 0,51.$$

Табличне значення $G_{\text{табл}}$ при $m-1=1$ і $N=8$ дорівнює 0,68 [10]. Так як $G = 0,51 < G_{\text{табл}} = 0,68$, гіпотеза відтворюваності не заперечується.

При цьому дисперсія дослідів:

$$D_{Y_0} = \frac{1}{mN} \sum_{u=1}^N D_{Y_u} \quad (7)$$

$$D_{Y_0} = \frac{1}{2 \cdot 8} 31876013 = 1992250,8.$$

Визначаємо коефіцієнти регресії моделі дослідження:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N Y_u x_{0u} \quad (8)$$

$$b_0 = \frac{1}{8} (15238,1 \cdot 1 + 4622,22 \cdot 1 + 14315,79 \cdot 1 + 4395,84 \cdot 1 + 14166,65 \cdot 1 + 4365,07 \cdot 1 + 12154,16 \cdot 1 + 4545,52 \cdot 1) = 9225,42.$$

Аналогічно знайдемо:

$$b_1 = -4743,25; b_2 = -372,59; b_3 = -417,57; b_{12} = 361,11; b_{13} = 390,7; b_{23} = -85,42; b_{123} = -187,13.$$

Апроксимуючий поліном має наступний вигляд:

$$Y = 9225,42 - 4743,25X_1 - 372,59X_2 - 417,57X_3 + 361,11X_1X_2 + 390,7X_1X_3 - 85,42X_2X_3 - 187,13X_1X_2X_3.$$

Таблиця 5 – Результати повного факторного експерименту

№ досліджу	Послідовність проведення дослідів	Робоча матриця			Y^I , Ом	Y^{II} , Ом	$Y_{сер}$, Ом	D_Y
		X_1	X_2	X_3				
1	6; 12	20	3	85	13333	17142	15238	7256526
		20	3	85				
2	4; 11	240	3	85	4444	4800	4622	63211,4
		240	3	85				
3	5; 13	20	6	85	12631	16000	14315	5673126
		20	6	85				
4	2; 15	240	6	85	4363	4428	4395	2073,68
		240	6	85				
5	3; 10	20	3	95	15000	13333	14166	1388944,4
		20	9	85				
6	7; 16	240	3	95	4285	4444	4365	1259761
		240	3	95				
7	8; 14	20	6	95	15000	9302	12154	16231778
		20	6	95				
8	1; 9	240	6	95	4528	4562	4545	593,06
		240	6	95				

Вихідні дані для розрахунку дисперсії адекватності наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Дані для розрахунку дисперсії адекватності

№ досліджу	$Y_{сер}$	$Y_{роз}$	ΔY	ΔY^2
1	15238,1	15612,35	374,25	140063,06
2	4622,22	4418,81	-203,41	41375,63
3	14315,79	13941,53	-374,26	140070,54
4	4395,84	4770,11	374,27	140078,03
5	14166,65	13792,39	-374,26	140070,54
6	4365,07	4759,33	394,26	155440,94
7	12154,16	12528,83	374,67	140377,6
8	4545,52	4171,27	-374,25	140063,06

Знаходимо дисперсію адекватності:

$$D_{Y_a} = \frac{1}{N-S} \sum_{u=1}^N \Delta Y^2 \quad (9)$$

$$D_{Y_a} = 1037539,4.$$

Для перевірки гіпотези адекватності визначаємо значення критерію Фішера:

$$F = \frac{D_{Y_a}}{D_{Y_0}} \quad (10)$$

$$F = \frac{1037539,4}{1992250,8} = 0,5.$$

При числі ступенів вільності $r_1 = 8 - 7 = 1$ і $r_2 = 8(2 - 1) = 8$ згідно [10] $F_{m=5,32} > F = 0,5$.

Відповідно гіпотеза про адекватність обраної моделі не заперечується.

Визначаємо значимі коефіцієнти регресії за формулою:

$$D_{b_i} = \frac{D_{Y_0}}{N} = \frac{1992250,8}{8} = 249031,35.$$

Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_{b_i} = \sqrt{D_{b_i}} = 499,03.$$

Розрахункове значення критерію Стюдента для коефіцієнта b_0 визначаємо за формулою:

$$t_0 = \frac{b_0}{\sigma_{b_0}} = \frac{9225,42}{499,03} = 18,49.$$

Аналогічним чином визначаємо значення критерію для інших коефіцієнтів:

$$t_1 = 9,5; t_2 = 0,75; t_3 = 0,84; t_{12} = 0,72; t_{13} = 0,78; t_{23} = 0,17; t_{123} = 0,37.$$

Табличне значення критерію Стюдента, визначене за додатком 1 [9] для числа ступенів вільності $\nu = N(m - 1) = 8$, становить 12,71.

Отже, коефіцієнти регресії є значущими і модель залишається в початковому вигляді.

Таким чином, отримані значення повного опору людини дозволять оцінити можливість отримання електричної травми працівником при експлуатації електроустановки та важкість наслідків. Наприклад, визначити ступінь ураження людини при випадковому дотику до відкритих струмоведучих частин електроустановки при однофазному включенні в електричний ланцюг при режимах роботи з глухозаземленою та з ізольованою нейтраллю.

Інтерпретація отриманої математичної моделі. Експеримент підтвердив здогад про те, що значимими є не лише лінійні ефекти, але й парні взаємодії. З трьох досліджуваних факторів, що лінійно впливають на функцію відгуку, є всі три: площа електродів, напруга дотику і рівні звукового тиску. Найбільш сильно впливовим фактором є площа електродів. Але в ході експерименту отримано підтвердження і про значний вплив шуму при незначному підвищенні його рівня (на 5 дБ), що призводить до суттєвого зниження (до 15 %) значення повного опору тіла людини. Характер впливу факторів однаковий – збільшення їх значень однозначно призводить до зменшення значення відгуку (відповідно найбільше значення повного опору тіла людини отримано при нижньому рівні факторів: 20 см², 3 В і 85 дБ).

Згідно статистичної обробки результатів експерименту рівні звукового тиску (для частоти 1000 Гц) в обраному інтервалі варіювання незначно впливають на відгук, але вплив цього фактора досить сильно проявляється в парній взаємодії. Наприклад, ефект сумісної дії площі електродів і рівнів звукового тиску при витриманні їх в оптимальних межах може перевищити однофакторні лінійні ефекти.

Для нас сутність ефекту взаємодії важливою є в контексті того, що вплив одного фактора залежить на якому рівні знаходиться інший фактор. Так як $b_{13} > 0$, то до зростання відгуку буде вести одночасна зміна 1 і 3 факторів в одному напрямку і при незначущості даного коефіцієнту ми виключаємо його з моделі. Для збільшення відгуку необхідно зменшувати площу електродів, але збільшувати при цьому рівень шуму, що є неприпустимим. Коефіцієнт $b_{23} < 0$, відповідно зменшення відгуку пов'язано зі зміною 2 і 3 факторів в одному напрямку. Цей ефект взаємодії є меншим інших значимих ефектів. Пояснити це можна невеликими значеннями напруги, які були обрані свідомо з міркувань електробезпеки, та малим інтервалом варіювання

рівнів звукового тиску (не більше 10 дБ) при досить значній гучності.

ВИСНОВКИ. Створено та досліджено імітаційну комп'ютерну модель при можливості дослідження впливу кумулятивних факторів на повний електричний опір тіла людини при збільшенні напруг і оцінці можливих наслідків ураження.

Проведено повний факторний експеримент впливу шуму на електричну опірність тіла людини з встановленням характеру впливу кожного фактору на опір тіла людини та виконанням аналізу ефекту парних взаємодій.

Визначено кількісні електротехнічні характеристики тіла людини, особливо невідомі опори і ємності тіла людини та допустимі межі факторів впливу, що впливають на відгук.

Доведено вплив на опір тіла людини рівня звукового тиску і його частоти. При цьому встановлено, що переривчастий шум може робити не менш істотний вплив, ніж постійний упродовж робочої зміни (зміни відбуваються вже при рівнях звукового тиску 65–70 дБ низької частоти).

Достовірність наукових положень і висновків підтверджується коректним застосуванням математичної теорії планування експерименту, об'ємом експериментальних досліджень і задовільним збігом розрахункових даних з результатами експериментів, виконаних в лабораторних умовах.

У подальшому наші дослідження будуть спрямовані на розширення плану експерименту за рахунок введення для дослідження впливу на повний опір тіла людини інших факторів з визначенням допустимих рівнів ризику ураження електричним струмом у виробничих умовах, використовуючи для цього статистичне моделювання з отриманням достовірних значень ймовірностей перевищення порогових відчутних струмів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
2. Державна служба України з питань праці [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dsp.gov.ua/>
3. Імовірнісна модель тіла людини для сертифікації електроустановок за умовами електробезпеки / Л.О. Никонєць, А.А. Маліновський, С.В. Голубов, В.М. Радченко // Енергетика и електрифікація. – 2007. – № 5. – С. 55–58.
4. Залишковий електричний опір тіла людини / А.А. Маліновський, Л.О. Никонєць, С.В. Голубов, Ю.Л. Шелєх // Енергетика і електрифікація. – 2006. – № 3. – С. 46–49.
5. Сидоренко В.М. Інтервальна оцінка параметрів сигналу струму, напруги та миттєвої потужності при діагностуванні електричних двигунів // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2006. – Вип. 3/2006 (39), част. 1. – С. 100–105.
6. Бондаренко Є. А. Гранично допустимі значення напруг дотику та струмів промислової частоти //

Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 2. – С. 31–34.

7. Raymond M. Fish, Leslie A. Geddes. Conduction of Electrical Current to and Through the Human Body: A Review, [El. resource]. – Available at: http://www.eplasty.com/index.php?option=com_content&view=article&id=345&catid=170:volume-09-eplasty-2009.

8. Кацай В.В. Зависимости сопротивления тела человека от шума и приложенного напряжения // Электробезопасность. – 2006. – № 1. – С. 3–6.

9. Хамканов А.М. Основы планирования эксперимента. – Улан-Удэ: В, 2001. – 56 с.

10. Нечаев В.П. Теорія планування експерименту. – К.: Кондор-Видавництво, 2009. – 232 с.

IMPACT OF NOISE PARAMETERS ON THE HUMAN BODY RESISTANCE TO ELECTRIC CURRENT

H. Turovska, A. Bohdanenko

National University of Water and Environmental Engineering

vul. Soborna, 11, Rivne, 33000, Ukraine. E-mail: nonna_yan@ukr.net, dyturu@mail.ru

Purpose. Research of organism reactions to electrical irritant factors (voltage and frequency) and parameters of industrial noise to obtain statistically significant results of mathematical modeling of their joint influence as well as to estimate the risks of electric shock by its threshold values. **Methodology.** There was applied the theory of experimental design and results processing by mathematical statistics to identify internal laws, to establish quantitative correlations between electrical and noise factors and integrated index of the electric current influence on people, i.e. the electrical resistance of the body. **Results.** As a result of the experiment there were obtained the data on the complete electrical resistance of the human body as a function of three variables: the area of the electrodes, voltage and sound pressure levels, which allowed us to obtain a mathematical model predicting values of the resilience of the human body to electric current for the range of variability of variables within the threshold measurable currents and the range that goes beyond safety. **Originality.** For the first time there was received the first computer simulation model for evaluating the joint impact of electrical and noise parameters on the electrical resistance of the human body to electric current with the possibility of extrapolation for the range of freezing current. **Practical value.** There were determined the quantitative electrical characteristics of the human body, particularly the unknown resistance and capacitance of the human body and permissible limits of impact forces, allowing them to be considered when developing recommendations for the use of new electrical safety devices. The obtained data on the dangerous initial values of voltages and currents allow performing accurate evaluation of the effectiveness of noise reduction in production areas with electrical installations or the need to conduct noise protection measures. References 10, tables 6.

Key words: electrical safety, noise, resistance, electric current, frequency.

REFERENCES

1. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy, (2016), available at: www.ukrstat.gov.ua, (accessed September 10, 2016).

2. Depzhavna sluzhba Ukrainy z pytan praci, (2016), available at: <http://dsp.gov.ua>, (accessed September 15, 2016).

3. Nykonecz, L.O., Malinovskyj, A.A., Golubov, S.V. and Radchenko, V.M. (2007), "The probability model of the human body for the certification of electrical installations in terms of electrical safety", *Energetyka yelektryfikacziya*, no 5, pp. 55–58.

4. Malinovskyj, A.A., Nykonecz, L.O., Golubov, S.V. and Shelex, Yu.L. (2006), "Residual electrical resistivity of the human body", *Energetyka i elektryfikaciya*, no 3, pp. 46–49.

5. Sydorenko, V.M. (2006), "Interval estimate the current signals, voltage and instantaneous power at diagnosing electric motor", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 3, no. 39, pp. 100–105.

6. Bondarenko, Ye.A. (2011), "Maximum permissible values for touch voltages and currents of industrial frequency", *Transactions of Vinnytsia National Technical University*, no 2, pp. 31–34.

7. Fish, R.M. and Geddes, L.A. (2009), "Conduction of Electrical Current to and Through the Human Body", available at: www.eplasty.com, (accessed September 2, 2016).

8. Kaczaj, V.V. (2006), "Dependence of human body resistance on the noise and the attached voltage", *Elektrobezopasnost*, no1, pp. 3–6.

9. Khamkanov, A.M. (2001), *Osnovy planirovaniya eksperimenta* [Fundamentals of scheduling an experiment], Vostochno-Sibirsky Gosudarstvenny Tekhnologicheskyy Universitet, Ulan-Ude, Russia.

10. Nechayev, V.P. (2009), *Teoriya planuvannya eksperymentu* [The theory of scheduling an experiment], Kondor-Vydavnytstvo, Kyiv, Ukraine.

Стаття надійшла 24.11.2016.