

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНЯХ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ПЕРСОНАЛУ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Вступ

Для забезпечення умов праці з мінімально допустимим рівнем опромінювання персоналу атомних електричних станцій (АЕС) необхідно заздалегідь передбачати використання спеціального обладнання та засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Відповідно до рекомендацій ІАЕА [1] і державних нормативних документів для захисту персоналу АЕС створюють багатоступеневу систему універсального захисту. ЗІЗ повинні мінімізувати або повністю виключати вплив усіх шкідливих чинників на працівника. Під час практичної діяльності використовують комплекти, до складу яких входять більш як десять видів ЗІЗ: захисний одяг і взуття, засоби захисту органів дихання, очей, голови, органів слуху та ін. Забезпечуючи захист від визначених шкідливих і небезпечних факторів (зовнішнього іонізуючого випромінювання, твердих і рідких радіоактивних речовин, електричного струму, різноманітних розчинів хімічних речовин), вони створюють додаткові негативні впливи на працівника та устаткування, яке обслуговується. Матеріали, які застосовують для виготовлення засобів захисту (полівінілхлорид (ПВХ), поліпропілен, поліетилен, поліефір та їх модифікації), є діелектриками. Опір таких матеріалів перебуває в межах $10^{11} \dots 10^{16}$ Ом, що призводить до накопичення на їхніх поверхнях електричних зарядів. Комплекти ЗІЗ – це неоднорідні багатошарові пакети, накопичення зарядів відбувається між усіма шарами і безпосередньо на тілі людини. Технологічний одяг, виготовлений з бавовняної тканини, мішаної з поліестром, легко заряджається до 20 кВ [2]. Особливо це небезпечно в теплий період року за низької вологості повітря, коли заряди впродовж тривалого періоду утримуються на поверхневих і внутрішніх шарах одягу. Під час робіт в ізолювальному захисному одязі і взутті, що має гумову підшви, на їхніх поверхнях утворюється електростатичне поле (ЕСП) з потенціалами від 8 до 25 кВ, а на тілі людини – 2...8 кВ [3].

Постановка завдання

Тіло людини, як елемент перебування в електромагнітному полі, можна представити структурною електричною схемою з нелінійними елементами [4, 5]. Така модель описує ефект провідності електричного струму, поляризації тканин і органів, здатність накопичувати заряди і створювати джерело електрорушійної сили з напруженістю $E_{ст}$ на тілі людини (рис. 1).

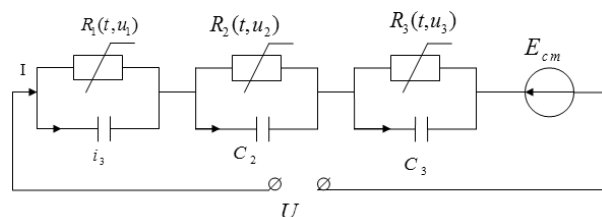


Рис. 1. Модель електричної схеми тіла людини

Статична електрика становить реальну загрозу здоров'ю та життю працівників. Наявність зарядів на людині негативно впливає на її самопочуття, створюючи дискомфорт і умови до виникнення захворювань. Однак найбільшу небезпеку має мимовільний іскровий розряд. Накопичення електричних зарядів на тілі людини зумовлює виникнення іскрового розряду через його порівняно високу провідність. Потріскування та іскріння одягу характеризує статичний розряд більш як 5 кВ. Статична електризація на поверхнях працівника з подальшим розрядом на землю, або заземлене устаткування, або електричний розряд з незаземленого устаткування через тіло людини спричиняє болісні та нервові відчуття, супроводжуючись мимовільними різкими рухами, в результаті яких можуть бути падіння і травми (забиті місця). Окремі органи і тканини в тілі людини чутливі до іскрових розрядів уже в діапазоні 100...150 В.

Електризація матеріалів часто перешкоджає нормальному технологічному процесу. На сучасних енергооб'єктах повсюдно встановлено електронні засоби керування та вимірювання, які особливо чутливі до впливу завад, створених зовнішніми ЕСП. Незважаючи на те, що електростатичний заряд не містить великої кількості енергії, висока різниця потенціалів сприяє утворенню струмів, достатніх і для миттєвого виходу з ладу чутливих електронних компонентів, і для внутрішнього молекулярного пошкодження їхніх кристалічних ґраток. Такі процеси призводять до зміни властивостей, параметрів і скорочення терміну експлуатації мікросхем. Для виробів мікроелектроніки статичний заряд 5...10 кВ є руйнівним. Дослідження, здійснені на різних об'єктах, показали, що більш як 50% можливих перенапружень, які призвели до пошкодження електронних пристроїв для діагностики, керування, зберігання та передачі інформації або неправильного їх спрацювання, пов'язано з ЕСП, які утворилися на захисних засобах – одязі, рукавичках, респіраторях [6].

Мета статті – аналіз результатів експериментальних досліджень процесів, які обумовлюють утворення електростатичного поля поблизу працівника у захисному комплекті.

Об'єкт дослідження – безпека застосування комплектів індивідуального захисту в умовах впливу ЕСП.

Предмет дослідження – системний аналіз електростатичного поля та його параметрів в межах моделі “працівник – ЗІЗ – виробниче середовище”.

Систематизація та аналіз результатів вимірювань

Електризація полімерних матеріалів відбувається під час контакту двох поверхонь з різними діелектричними постійними: поверхневого матеріалу з металом або діелектриком, внутрішніх неоднорідних шарів одягу між собою, білизною і тілом працівника. Іншим способом утворювання статичних зарядів є індукція, зумовлена перебуванням працівника біля сильного зовнішнього ЕСП [7, 8].

Механізм поляризації в різних речовин неоднаковий. Перенесення зарядів здійснюється вільними або слабкозв'язаними електронами та іонами. Хімічна будова макромолекул полімерів, зокрема фізико-хімічна структура і склад поверхневого шару, а також умови експлуатації виробів впливають на діелектричні властивості матеріалів. У полярних речовин (ПВХ, полієфіру) відбувається іонна поляризація, у неполярних (поліетилену, поліпропілену) – так звана високовольтна поляризація, за якої електрорушійна сила поляризації сумірна з напругою зовнішнього електричного поля. Статична електрика – поверхнєве явище, виникнення якого залежить від багатьох факторів; подвійного шару зарядів Гельмгольца; внутрішніх домішок у полімері; наявністю різних видів поверхневих забруднень і плівок води.

Стандартні методи контролю за ймовірним рівнем поляризації полягають у визначенні поверхневого ρ_s і об'ємного ρ_v опорів [9]. Для визначення параметрів поверхневого опору матеріалів ЗІЗ за різних температур і вологості, які можуть спостерігатися в промислових умовах, проведено виміри двоточковим методом. Дослідження поверхневого опору здійснено за температур від мінус 20°C до +60°C, що відповідає реальним умовам експлуатації ЗІЗ на АЕС (рис. 3, 4). Поверхневі струми можуть складатися з об'ємними, і вимірюваний поверхневий опір виявляється залежним і від об'ємного опору зразка, і від поверхневого струму витоку.

Електропровідність полімерних матеріалів великою мірою визначається наявністю в композиції різного виду пластифікаторів і модифікаторів, серед яких: солі вольфраму та рідкоземельних елементів, двоокис титану та цинку [10, 11], силан, вуглецеві волокна, які є джерелами вільних електронів і іонів. Слабкозв'язані електрони виникають під час іонізації макромолекул і молекул домішок під впливом тепла, зовнішнього іонізуючого випромінювання та електричного поля.

З підвищенням температури електропровідність полімерів зростає внаслідок збільшення рухливості іонів або виникнення хімічних перетворень макромолекул. Наприклад, у ПВХ-пластикатах, виготовлених за композиції без модифікаторів (ПВХ С-70, диетилгексилфталат, смола, парафін) різко зростає провідність з підвищенням температури [12]. Для модифікованих ПВХ-пластикатів, до складу яких входять пігменти, баймод, двоокис титану, для двошарових матеріалів (нетканий полієфір з ПВХ-покриттям), матеріалів з поліпропілену зміна опору менш суттєва (рис. 2).

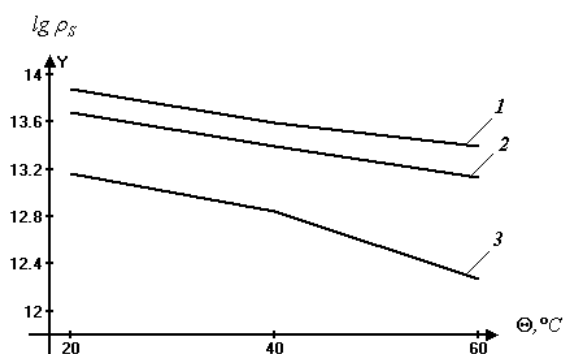


Рис. 2. Залежність $\lg \rho_s$ від температури:
 1 – поліпропілен; 2 – матеріал з ПВХ-покриттям;
 3 – модифікований ПВХ завтовшки 0,5 мм

Під час зниження температури менш як 0°C провідність матеріалів (рис. 3) зростала, що можна пояснити частковим руйнуванням поверхневого шару матеріалу та збільшенням плівок води на поверхні.

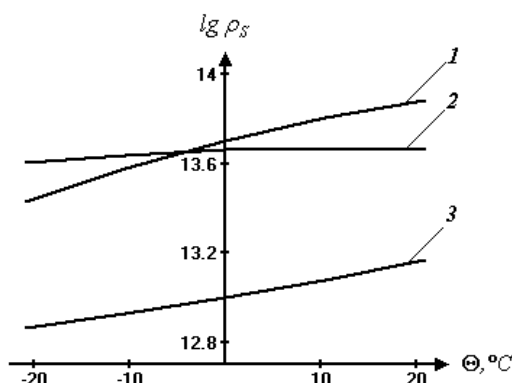


Рис. 3. Залежність $\lg \rho_s$ від температури:
 1 – поліпропілен; 2 – матеріал з ПВХ-покриттям;
 3 – модифікований ПВХ

Процес старіння, який для розглянутих матеріалів знаходиться в межах двох-трьох років, призводить до змінення електричного опору [13]. Вплив процесу старіння на опір матеріалів досліджувався в кліматичній камері (гігростад ГСМ-1) упродовж 325 годин, що відповідає натурним вимірам упродовж 12180 годин. Дослідження здійснювалися відповідно до вимог стандарту [14] за нормальних кліматичних умов: $\theta=22\dots24^\circ\text{C}$, відносна вологість – 60%. Процес старіння полімерних матеріалів призводить до зростання провідності (рис. 4)

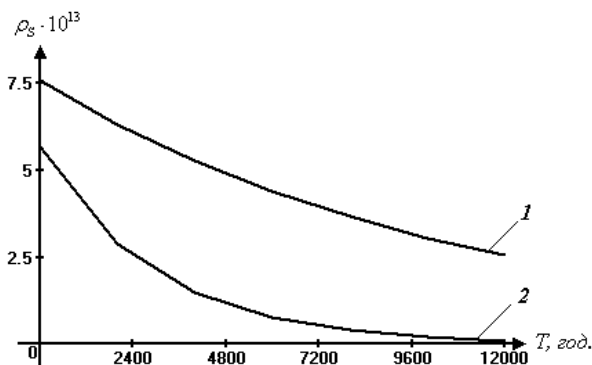


Рис. 4. Залежність ρ_s від часу:
 1 – поліпропілен; 2 – модифікований ПВХ

Зміна вологості W суттєво впливає на опір матеріалів, що досліджувалися (табл. 1).

Таблиця 1

Поверхневий опір матеріалів для засобів індивідуального захисту

Вид матеріалу	Поверхневий опір за W=60%, Ом	Поверхневий опір за W=100%, Ом
ПВХ-пластикат без антистатичних модифікаторів	$(2,11...5,72) \cdot 10^{13}$	$5,68 \cdot 10^9$
ПВХ-пластикат з вольфрамовим модифікатором	$1,43 \cdot 10^{13}$	$2,35 \cdot 10^{11}$
ПВХ-пластикат з модифікатором з рідкоземельними елементами	$3,17 \cdot 10^{11}$	$6,51 \cdot 10^9$
Поліетер з ПВХ-покриттям з поліуретановим модифікатором	$7,92 \cdot 10^{13}$	$1,62 \cdot 10^{10}$
Поліетилен	$5,16 \cdot 10^9$	$1,32 \cdot 10^9$
Поліпропілен	$4,32 \cdot 10^{11}$	$3,82 \cdot 10^9$
Фільтрувальний матеріал з вуглецевими волокнами	$1,64 \cdot 10^8$	$2,62 \cdot 10^3$

Складнощі, зумовлені специфікою праці з відкритими джерелами зовнішнього іонізуючого β - і γ - випромінювання, яке існує на АЕС, не дали змогу отримати достовірну експериментальну інформацію з їхнього впливу на змінення опору. З даних, наведених у [15], випливає, що опромінювання призводить до зростання електропровідності. Так, для поліетилену низького тиску провідність збільшується в 1 000 разів, ПВХ – у 100 під час γ -випромінювання низьких енергій. Провідність поліпропілену і поліетилену залежить від тривалості опромінювання, у таких полімерів зі збільшенням терміну опромінювання провідність спочатку зменшується, а потім зростає. У ПВХ електропровідність практично не залежить від часу опромінювання. На провідність полімерів впливають ультрафіолетові промені. У [16] наведено залежності зміни провідності зразків з ПВХ під впливом ультрафіолетових променів. Опір вихідного зразка ПВХ-пластикату під час опромінювання впродовж 8 годин зменшився з $1 \cdot 10^{13}$ Ом до $1 \cdot 10^{11}$ Ом.

Таким чином, виміри, які здійснюються у лабораторних умовах за температури 20...22°C та вологості 40...60% не можуть враховувати всього різноманіття зміни зовнішніх факторів (полів іонізуючого випромінювання, температури, вологості, впливу ультрафіолетових променів та ін.), можливостей контакту працівника в захисному одязі з різними речовинами та твердими тілами (діелектриків і провідників), які мають різну природу полімеризації. Механічне і теплове навантаження, яке виникає в процесі трудової діяльності, впливає на поверхні матеріалів, у деяких випадках такий вплив супроводжується руйнуванням іонних шарів і структури полімерного матеріалу. Лабораторні зразки зазвичай ретельно очищені, що суттєво впливає на рівень поверхневого опору. Методики вимірювання не враховують наявності неминучих зовнішніх ЕСП, характеру контактів під час тертя і ступеня обробки поверхонь, що контактують.

Розподіл незмінного в часі ЕСП поблизу людини описується диференціальним рівнянням для скалярного електричного потенціалу [17]:

$$\operatorname{div}(-\varepsilon_0 \operatorname{grad} \varphi) = 0, \quad (1)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – постійна діелектрична проникність вакууму.

Інформація з розподілення електричних зарядів і потенціалів по поверхні захисних засобів дає змогу визначення напруженість ЕСП і електричну енергію, накопичену в об'ємі V з напруженістю $E = \{E_x, E_y, E_z\}$:

$$E = -(\operatorname{grad} \varphi), \quad (2)$$

$$W_e = 0,5 \cdot \varepsilon_0 \int_V (E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) dV. \quad (3)$$

Вимірювання цих параметрів здійснено в умовах Південноукраїнській АЕС вимірником параметрів ЕСП ИПСП-1. Дослідження виявили, що у процесі роботи під час руху працівника відбувається нерівномірне накопичення зарядів на поверхнях і у внутрішніх шарах захисного одягу, рукавичках і взутті – від $2 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ Кл/м². Найбільша щільність фіксувалася в ділянці

грудної клітини на пілочці одягу, рукавах і штанах. Зростання заряду, відповідно до [18], повинно відбуватися за експоненціальним законом, однак практичні виміри це не фіксували. Величина максимального заряду залежить від ступеня обробки поверхні, що зумовлено зменшенням площі реального контакту, який відбувається, вологості зовнішнього середовища. Під час зростання вологості було зареєстровано зменшення заряду на поверхні одягу (рис. 5).

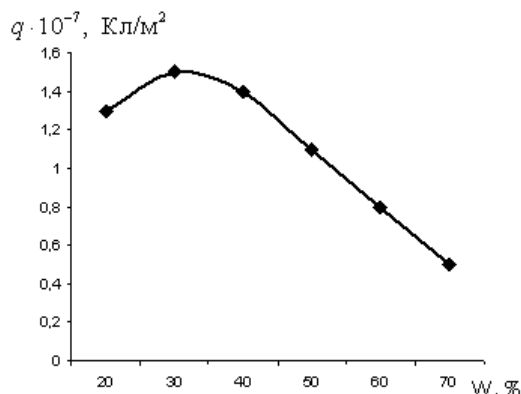


Рис. 5. Залежність поверхневої густини зарядів на поверхні ізолювального одягу з ПВХ-пластикату від вологості

В умовах високої вологості поверхневий опір виявляється визначальним чинником щодо збільшення струмів витоку, а отже до зменшення електризації матеріалу.

Поверхнева щільність і потенціал на поверхні змінюються в часі, що обумовлює виникнення іскрового розряду. Вимірювання за неоднорідними шарами одягу показало, що найбільший потенціал накопичується на зовнішній поверхні (рис. 6), набагато менші потенціали зафіксовано на внутрішніх шарах.

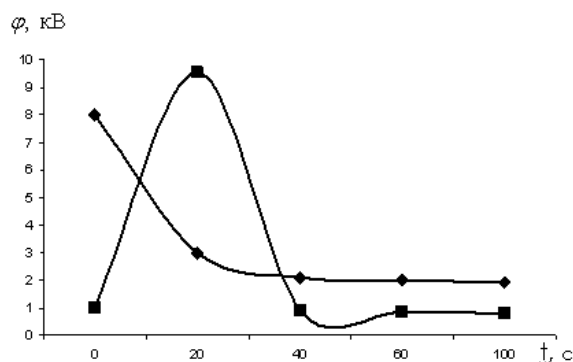


Рис. 6. Залежність поверхневого потенціалу від часу:

- 1 – на зовнішній поверхні ізолювального одягу з двошарового матеріалу з ПВХ-покриттям;
- 2 – на тілі працівника

Механізм розряду за наявності поверхневої провідності і виникнення струму витоку експериментально дослідити важко, що пов'язано з високою швидкістю розряду впродовж часу $\tau_p = 0,01 \dots 100$ с.

У разі, коли на багатьох сучасних підприємствах існує реальна небезпека здоров'ю і навіть життю працівників від ЕСП, які утворюються на ЗІЗ і тілі працівника, для визначення параметрів поля і умов виникнення іскрових розрядів оцінка електричних показників тільки за величиною опору є явно недостатньою. Це зумовлено низкою чинників, серед яких можна виокремити:

- особливості конструкції ЗІЗ, які утворюють неоднорідне діелектричне середовище із сукупністю мікроеклекцій, що зумовлює неоднорідність ЕСП на поверхневих і внутрішніх шарах захисних засобів;
- нерівномірність накопичення зарядів на поверхні та внутрішніх шарах захисного одягу;
- перерозподіл зарядів під впливом зовнішнього ЕСП, іонізуючого випромінювання або інших чинників;
- швидкість контакту, змінність електричних властивостей дотичних матеріалів, температур

і вологості зовнішнього середовища, утворення забруднення.

Для вирішення завдань адекватної оцінки параметрів ЕСП доцільно використовувати метод математичного моделювання [12], який дає змогу врахувати більшість чинників, що впливають на рівень безпеки, і розробити матеріали та конструкції ЗІЗ для мінімізації негативного впливу ЕСП на працівників і електронне устаткування.

Висновки

1. Значення поверхневого і об'ємних опорів матеріалів ЗІЗ змінюються в широкому діапазоні під впливом зовнішніх виробничих і кліматичних чинників, що не дає змоги однозначно оцінити параметри електростатичного поля на поверхнях засобів індивідуального захисту та небезпеку мимовільного іскрового розряду.
2. Для оцінки придатності матеріалів і виробів до використання в умовах сучасного виробництва на АЕС важливо мати інформацію з густини зарядів на поверхнях захисних засобів та устаткування, що дасть змогу адекватно оцінити рівень безпеки виробничого персоналу.

Література

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Personal protective equipment. IAEA-PRTM-5, Vienna, 2004. – 69 p.
2. Smallwood J. Standardization of electrostatic test methods and electrostatic discharge prevention measures for the world market / J. Smallwood // J. Electrostatics, 2005. – № 63. – P. 501–508.
3. Chubb J. N. Measurement of tribo and corona charging features of materials for assessment of risks from static electricity / J. N. Chubb // Trans. IEEE Ind. Appl., Nov/Dec 2000. – № 36 (6). – P. 1515–1522.
4. Standard IEC 61340-3-1: Methods for simulation of electrostatic effects – Human body model (HBM). Component testing, 2002. – 18 p.
5. Маліновський А.А. Теоретичні засади побудови узагальненої моделі тіла людини як елемента електричного кола / А.А. Маліновський, Л.О. Никонець, М.Й. Олійник, Н.Г. Мальцева, Ю.Л. Шелех // Новини енергетики, 2008. – № 5. – С. 41–46.
6. Kathirgamanathan P. Measurements of incendivity of electrostatic discharges from textiles used in personal protective clothing / P. Kathirgamanathan, M.J. Toohey, J. Haase, P. Holdstock, J. Laperre, G. Schmeer-Lioe // J. Electrostatics, 2000. – Vol. 49. – P. 51–70.
7. Василюк Ю.И. Защита полимеров от статического электричества. / Ю.И. Василюк – Л.: Химия, 1975. – 192 с.
8. Luttgens G. Electrostatic hazards. / G. Luttgens, N. Wilson – Oxford, Linacre House, 1997. – 163 p.
9. ДСТУ EN 1149–1. Одяг захисний. Електростатичні властивості. Частина 1. Поверхневий опір (метод вимірювання і вимоги). – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 12 с.
10. Xu P. Application of nanosol on the antistatic property of polyester / P. Xu, W. Wang, S.L. Chen // Melland International, 2005. – № 11. – P. 56–59.
11. Получение и свойства поливинилхлорида / Под. ред. Е.Н. Зильбермана. – М.: Химия, 1968. – 431 с.
12. Третьякова Л.Д. Моделирование электростатического поля на складных поверхнях диэлектрических материалов / Л.Д. Третьякова, О.Д. Подольцев // Вісник НТУ “ХП”. Тематичний випуск “Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування”. – 2010. – № 2. – С. 129–135.
13. Щерба А.А. Моделирование и анализ электрических полей энергетических объектов / А.А. Щерба, М.М. Резинкина. – К.: Наукова думка, 2008. – 247 с.
14. ГОСТ 9.708. Полимерные материалы. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение. – М.: ГКС. 1990. – 80 с.
15. Static Electrification, Fundamental Concepts, Hazards and Applications. Book Renewals // J. Electrostatics, (1977/1978). – No 4. – P. 85–93.
16. Wong Y.W.H. Selected applications of nanotechnology in textiles / Y.W.H. Wong, C.W.M. Yuen // Autex. research, 2006. – Vol. 6. – No 1. – P. 58–63.
17. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 3. / К.С. Демирчян, Л.П. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – С–Петербург, Изд. дом “Питер”, 2004. – 376 с.
18. Сажин Б.И. Электропроводность полимеров. / Б.И. Сажин – М.–Л.: Химия, 1964. – 116 с.