

Mjerne metode primjenjive za utvrđivanje količine generiranog statičkog naboja na tekstilnim materijalima

Juro Živičnjak, mag. ing. techn. text.
Prof. dr. sc. Dubravko Rogale, dipl. ing.
Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet
Prilaz baruna Filipovića 28a,
Zagreb, Hrvatska
e-mail: juro.zivicnjak@tff.unizg.hr
Prispjelo 20. 12. 2021.

UDK 677.017.57..537.221
Pregled*

Statički elektricitet je pojava koja se opisuje kao nestabilnosti električnog naboja unutar ili na površini promatranog objekta. Prethodno, statički elektricitet je dovođen u usku vezu s električnim otporom, odnosno elektrovodljivošću promatranog objekta. U novije vrijeme, električni otpor kao referentna vrijednost više nije dostatna, pogotovo zbog upotrebe višenamjenskih materijala, poput tekstilnih, koji sadrže aktivne elemente pogonjene električnom energijom. Vrijeme funkcionalnosti E-, pametnih i inteligentnih tekstilija ograničeno je kapacitetom električnog spremnika kojeg koriste, ali i njihovom udaljenošću od najbližeg izvora električne energije. Zbog toga prijenosni uređaji, poput triboelektričnog generatora (TEG) se primjenjuju za generiranje i pretvorbu elektrostatskog naboja u iskoristivu električnu energiju. Iz potrebe za detaljnijom analizom električnih svojstava tekstilnih materijala proizašao je niz istraživačkih radova koji promatraju vrijednosti napona i kapaciteta, uslijed kontaktno ili bez kontaktno elektrificiranih tekstilnih materijala. Pregledom radova objavljenih u ovom području, odabrano je nekoliko referentnih primjera kod kojih je elektrifikacija površine materijala provedena kontaktnom ili bez kontaktnom metodom, te s različitim mjernim sustavom za određivanje elektrostatskog naboja.

ključne riječi: statički elektricitet, električni naboj, tekstil, napon, kapacitet

1. Uvod

Opće je poznato da su sve tvari sastavljene od atoma, koji se sastoje od elektrona, protona i neutrona, ali samo elektroni i protoni sadrže električni naboj, koji određuje polaritet same tvari.

U elektrostatici, ravnotežnim stanjem tvari naziva se tzv. neutralno stanje materije, koje je određeno unutarnjim brojem elektrona i protona. Elektroni se pritom smatraju pokretnim dijelovima atoma, te se njihovim prijelazom s objekta na objekt izaziva energetska neravnoteža, koja nastaje zbog novonastale preraspodjele elektrona u ili na površini promatranog objekta. Opisani učinak naziva se statičkim elektricitetom i može se

pojaviti nakon izravnog kontakta između dva objekta ili zbog utjecaja električnog polja (ionizacije). Jačina učinka ovisi o elektrovodljivošću objekta, koja je određena njegovom električnom otpornosti [1-5].

Od nedavno, električni otpor kao vrijednost više nije dovoljan za određivanje elektrostatskih svojstava materijala. U novije vrijeme, električni otpor kao referentna vrijednost više nije dostatna za

*Izlaganje na 14. znanstveno-stručnom savjetovanju „Tekstilna znanost i gospodarstvo”, 26. siječnja 2022., Zagreb, Hrvatska

određivanje elektrostatskih svojstava materijala. Pogotovo uslijed povećane upotrebe višenamjenskih materijala, kao što su tekstilni, koji više nisu ograničeni svojim pasivnim svojstvima, poput: plošne mase, čvrstoće, istezljivosti, poroznosti, otpornosti na vanjske (mehaničke) uvjete, vodo- i vatro-odbojnosti i sl. već su unaprijeđeni s aktivnim elementima, koji su pogonjeni električnom energijom. Takve tekstilije stječu nazivaju E-, pametne ili inteligentne, te posjeduju nova svojstva poput elektroluminiscencije, termoregulacije, praćenja vitalnih funkcija i dr. [6-10]. Vrijeme funkcionalnosti tehnološki unaprijeđenih tekstilija i odjevnih predmeta je ograničeno kapacitetom spremnika električne energije kojeg posjeduju te udaljenošću od najbližeg izvora električne energije. Što je potaklo izradu sve većeg broja posebno dizajniranih prenosivih uređaja, koji mogu iz različitih vrsta energije, poput biomehaničke, toplinske, solarne, okolne, itd. [11-14] sakupiti energiju s tekstilnih materijala. Jedan tip takvog uređaja naziva se triboelektrični generator (TEG), koji elektrostatski naboj pretvara u iskoristivu električnu energiju. Princip rada TEG-a temelji se na ljudskom kretanju i elektrostatičkom svojstvu tekstilnih materijala koji je opisan unutar triboelektrične serije [15-16]. Primjena triboelektričnih serija u određivanju učinka TEG-a pokazala se nepouzdanom [17-20], zbog čega je nastala potreba za daljnjom analizom elektrostatskih svojstava tekstilnih materijala. Dosadašnja istraživanja u ovom području učinkovitost prate putem induciranih vrijednosti električnog napona i/ili kapaciteta uslijed kontaktne ili beskontaktne elektrifikacije [21-24], primjenom adekvatnih mjernih sustava. Pravilan odabir i broj elemenata koji se definiraju prije određene vrste ispitivanja utječu direktno na dobiveni rezultat. Zato

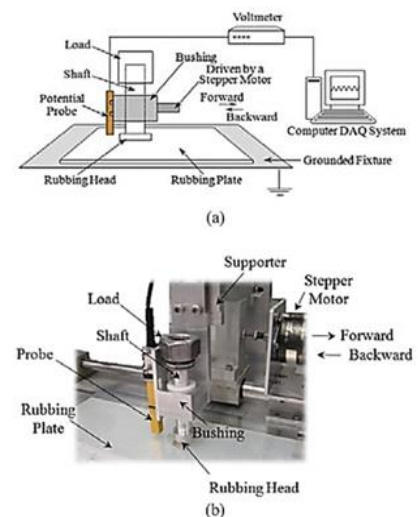
kod ispitivanja elektrifikacije, odnosno stvaranja statičkog naboja ispitna metoda ovisi o principu njegovog induciranja (kontaktna ili uslijed električnog polja), ali i sposobnostima mjernog uređaja, što će biti prikazano kroz kratki prikaz odabranih radova na ovom području.

2. Mjerne metode i izvedbe mjernih uređaja za karakterizaciju elektrostatičkih svojstva plošnih materijala

2.1. Kontaktni mjerni sustav za određivanje količine induciranoeg elektrostatskog naboja uslijed linearnog trljanja

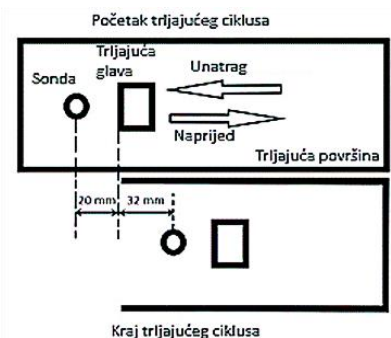
U radu "Frictional Electrification on Polymeric Flat Surfaces" [25] prikazana je metoda za određivanje elektrostatskog naboja generiranog na polimernim folijama: poliamida (PA 6.6), polipropilena (PP), politetrafluoretilena (PTFE). Metoda je izrađena s ciljem boljeg razumijevanja mehanizma nastajanja i rasipanja elektrostatskog naboja na površini polimernih materijala. Metoda se sastojala od linearnog tarnog uređaja i mjernog uređaja, voltmetra. Predloženi mjerni sustav mjerio je stvaranje (pomak unaprijed) i rasipanje (pomak unatrag) elektrostatskog naboja tijekom jednog ciklusa trljanja, pomoću sonde električnog napona (model 1017, Monroe Electronics®) koja se nalazi na kliznom ležaju (sl.1). Udaljenost trljajuće glave od sonde bila je 20 mm, a udaljenost sonde od površine o koju se vrši trljanje je 3 mm (sl.2). Klizni ležaj a samim time i trljajuća glava te sonda pogonjene su računalno upravljanim koračnim motorom, čime je omogućeno postizanje različitih iznosa pritiskne sile i brzine trljanja. Izložena površina materijalu u trljajućoj glavi bila je 10 x 20 mm, dok površina trljajuće površine

bila je 300 x 90 mm. Svi materijali korišteni prije početka ispitivanja kondicionirani su u prostoru temperature 21 °C i relativne vlažnosti 43 %. Također na početku ispitivanja ispitivani uzorci su očišćeni, te deionizirani etanolom, ioniziranim vodom i ioniziranim plinom, kako bi se uklonile sve nečistoće, ali i sav ostatak elektrostatskog naboja s materijala.



Sl.1. Skica mjernog sustava (a), slika mjernog sustava (b) Reproducirano uz dopuštenje referencije 25. Copyright © 2013, © SAGE Publications. Nepromijenjena.

Autori su eksperiment proveli u tri različite varijante, kako bi utvrdili utjecaj iznosa različitih parametara:



Sl.2. Shematski prikaz jednog trljajućeg ciklusa

- pritiskne sile (0.4, 1, 1.5, 2 N), uz konstantnu brzinu trljanja (47 mm/s), duljinu trljanja (52 mm) i broja trljajućih

ciklusa (naprijed i nazad pomaka/ciklusu, 50),

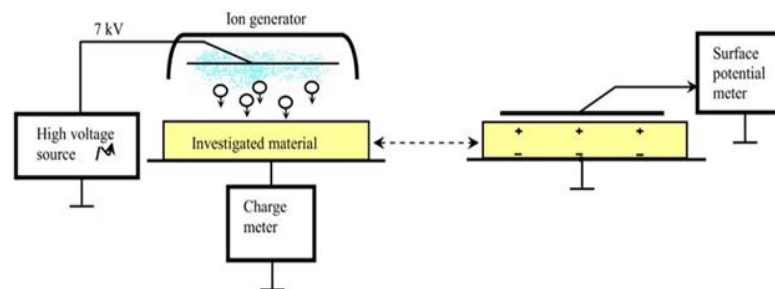
- brzine trljanja (0, 27, 47 i 95 mm/s), uz konstantnu silu pritiska (1 N), duljinu trljanja (52 mm), i broja trljajućih ciklusa (50), te vrste
- trljajuće površine (nehrđajući čelik, PA 6.6, PP, PTFE) uz konstantnu brzinu trljanja (47 mm/s), pritisnu silu (1 N), duljinu trljanja (52 mm), i broja trljajućih ciklusa (50).

Izabrani parametri nisu doveli do značajnog oštećenja ispitnog polimernog materijala i nisu uzrokovali velike vibracije na linearnom tarmnom uređaju.

Dobiveni rezultati ukazuju na povezanost između sile pritiska i morfologije samih polimera, što je uočeno u polimerima s većim udjelom amorfnih područja, poput PTFE. Gdje je veća sila pritiska, povećala i samo kontaktno područje, a time je i generirana veća količina elektrostatskog naboja. Proučavanje brzine trljanja i njezinog utjecaja u usporedbi s "nultom brzinom", tj. kontaktom i odvajanjem dviju površina, nije pokazalo značajan utjecaj. Štoviše, kada su testirani polimerni materijali trljani jedan o drugu, utvrđeno je da veća razlika unutar triboelektrične serije (PA 6.6 i PTFE) nije dovela do veće pojave elektrostatskog naboja. Unutar 30 sekundi nakon zadnjeg trljajućeg ciklusa kod svakog od eksperimenata praćena je promjena vrijednosti površinskog naboja. Zapaženo je da samo kod PA 6.6 dolazi do smanjenja količine površinskog naboja zbog male količine vlage koju sadrži (2%), koja je i dalje značajno veća od one kod PP-a i PTFE-a (0%).

2.2. Beskontaktni mjerni sustav za određivanje količine elektrostatskog naboja izazvanog visokonaponskim generatorom iona

Mjerni sustav prikazan u radu "Electrostatic Properties and



Sl.3. Shema postupka elektrifikacije i mjerenja površinskog naboja Reproducirano iz reference 26, objavljeno u otvorenom pristupu pod CC-BY 4.0 licence. Nepromijenjena.

Characterization of Specific Polymeric Materials for Building Purposes" [26] namijenjen je određivanju električnih parametara i svojstava plošnih izolacijskih materijala, kao što su razne plastične folije i ploče. Postupak elektrifikacije površine ispitivanog uzorka provodi se beskontaktno, uslijed djelovanja ioniziranih čestica zraka, što je postignuto primjenom visokonaponskog izvora (7kV) napona, koji periodično može ionizirati čestice zraka pozitivnim i negativnim nabojem (Sl.3). Količina nanesenog naboja i iznos površinskog napona praćene su putem naponskih signala zabilježenih voltmetrom koji je uz pomoć analogno-digitalnog pretvarača spojen s računalom. Računalo u realnom vremenu prati i prikazuje odnos: površinskog napona u vremenu ($V - t$); površinskog napona i količine električnog naboja ($V - Q$); električnog kapaciteta i površinskog napona ($C - V$), te volumnog otpora i površinskog napona na ispitivanom uzorku ($R - V$).

Mjerni sustav mjerenjem navedenih odnosa omogućio je izračunavanje vrijednosti kao što su:

granična vrijednost površinskog napona (V_{max}); brzina poluraspada nanesenog naboja (t_{med}); maksimalna vrijednost nanesenog naboja (Q_{max}); kapacitet sloja (C_l); energiji nanesenog naboja (W_Q); volumni otpor (R). Navedene vrijednosti daju značajan uvid u elektrostatička svojstva materijala, bez njegovog oštećenja u procesu.

Granična vrijednost površinskog potencijala (V_{max}) određuje se nakon što izračunata vrijednost kapaciteta (1) ispitivanog materijala postane duplo veća.

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (1)$$

gdje je:

ε – permitivnost ispitivanog materijala

ε_0 – permitivnost vakuuma

S – površina ispitivanog materijala

d – debljina ispitivanog materijala.

Brzina poluraspada nanesenog naboja (t_{med}) određuje se nakon što vrijednost površinskog napona (V) počinje smanjivati pa sve dok ne dosegne polovinu svoje vrijednosti.

Maksimalna vrijednost nanesenog naboja (Q_{max}) može se izračunati nakon što se dosegne V_{max} vrijednost ili kada površinski napon dosegne predodređenu vrijednost.

$$Q = \frac{U}{k} \quad (2)$$

U kojoj je vrijednost k (2) jednaka $1/C$ ukupnog kapaciteta kondenzatora (C) korištenog u operacijskom pojačalu s velikom ulaznom impedancijom, spojenog na računalo.

Kapacitet sloja (C_l) određuje se u trenutku kada vrijednost V_{max} umanjuje za pola.

Energija nanesenog naboja (W_Q) izračunava se putem vrijednosti C_l V_{max} (3).

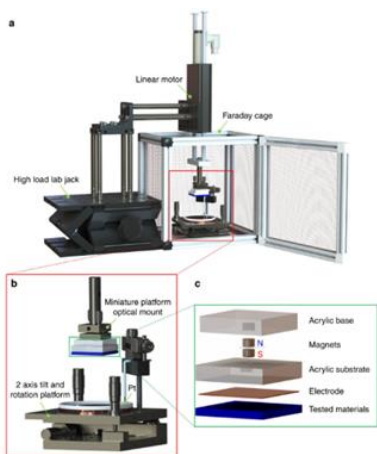
$$W_Q = \frac{C_l \cdot V_{max}^2}{2} \quad (3)$$

Volumni otpor (R) određuje se kada se postigne vrijednost V_{max} i V_{med} .

Primjenom ovog mjernog sustava postignuta je zadovoljavajuća usporedivost rezultata prilikom testiranja niza materijala namijenjenih istoj građevinskoj namjeni, no uočeno je da sve izračunate vrijednosti primarno ovise o iznosu V_{max} .

2.3. Kvantifikacija elektrostatiskog naboja unutar triboelektrične serije putem kontaktnog mjernog sustava (tekuća elektroda)

Autori rada "Quantifying the triboelectric series" [27] predložili su standardiziranu metodu za kvantifikaciju kvalitativno navedenih materijala unutar triboelektrične serije, primarno polimernih materijala. Predložena metoda provedena je pod definiranim atmosferskim uvjetima, osiguranim unutar prostora u kojem se nalazi cijeli mjerni sustav sa sl.4.



Sl.4. Cijeli mjerni sustav za mjerenje triboelektrične serije (a); Statični i pomični dio mjernog sustava b); držač uzorka (c). Reproducirano iz reference 27, objavljene u otvorenom pristupu pod Creative Commons Attribution 4.0 licence. Nepromijenjena.

Sustav je namijenjen određivanju količine zaostalog elektrostatiskog naboja tijekom uzastopnog kontakta i razdvajanja dvaju površinski očišćenih polimernih materijala. Konstrukcijski, mjerni sustav predstavlja kondenzator u kojem se razmak između dvaju

metalnih ploča (L) može podesiti sukladno debljini ispitivanog materijala (d_1). Tako da, kao i kod kondenzatora klasične izvedbe dvije elektrode razdvojene su dielektrikom, odnosno ispitnim materijalom.

Međutim, umjesto dvije odvojene metalne ploče, jedna elektroda je izravno nanosena na ispitni materijal i sastoji se od dva sloja: titana (15 nm) i bakra (< 300 nm), dok je druga elektroda živa koja je fizički odvojena. Tako direktnim nanosom metala tehnikom raspršivanja elektronskih zraka (E-beam), na jednu stranu ispitivanog uzorka i korištenjem žive u njenom tekućem stanju, autori su doskočili problematici nejednolikosti kontaktne površine na nano i mikro razini, ali i utjecaju sile pritiska koji kod kontakta dvaju krutih materijala ovisi o njihovoj tvrdoći, elastičnosti i krutosti. Eksperiment je proveden u kontroliranim uvjetima u zatvorenom prostoru, napunjenom plinom dušika visoke čistoće pri temperaturi od $20 \pm 1^\circ\text{C}$, atmosferskom tlaku i vlažnosti od 0,43 %. Korišteni mjerni instrument je Keithley 6514, koji je preko žica platine povezan s obje elektrode (bakrenog nanosa i žive). Razlučivost mjernog instrumenta za mjerenje gustoće površinskog naboja je od 10 fC do $20 \mu\text{C}$, dok za mjerenja visokih napona sadrži ulaznu impedanciju

od 200 TΩ te brzinu mjerenja od 1200 očitavanja/s.

Matematički model predložene mjerne metode prikazan je kroz jednadžbe 4-7. Gdje je pretpostavljeno da je gustoća površinskog naboja (σ_1) funkcija udaljenost (L) i vremena (t), te da je njena vrijednost bliža stvarnoj (σ_c) kada udaljenost između dviju elektroda bude puno veća od debljine materijala (d_1) i dielektrične permitivnosti samog materijala (ϵ_1) i zraka (ϵ_0).

2.4 Kontaktni i beskontaktni mjerni sustav izrađen za potrebe izvedbe vremenski ovisnog matematičkog modela generiranja elektrostatikog naboja

Do danas, značajan broj matematičkih modela je izvedeno u svrhu predviđanja stope generiranja elektrostatikog naboja tijekom rada na uređajima kao što su triboelektrični generatori (TEG). U većini izraza stopa generiranja tretira se kao konstanta, vremenski neovisna vrijednost [22-23, 28], što po svojoj prirodi ona nije [29, 30]. Zbog toga su istraživači rada "Modeling of triboelectric charge accumulation dynamics at the metal-insulator interface for variable capacitive structures: application to triboelectric nanogenerators" [24], razvili mjerni sustav kojim su testirali svoj tzv. „dynamic charge model“ i njegovo

$$E_1 = \frac{\sigma_1(L, t)}{\epsilon_1} \quad (4)$$

$$E_{air} = \frac{\sigma_1(L, t) - \sigma_c}{\epsilon_0} \quad (5)$$

$$V = \frac{\sigma_1(L, t)}{\epsilon_1} \cdot d_1 + \frac{\sigma_1(L, t) - \sigma_c}{\epsilon_0} \cdot L \quad (6)$$

$$\sigma_1(L, t) = \frac{L \cdot \sigma_c}{\frac{d_1 \cdot \epsilon_0}{\epsilon_1} + L} \quad (7)$$

σ_c - gustoću površinskog naboja
 ϵ_0 - dielektrična permitivnost zračnog raspora
 d_1 - debljina materijala

Jačina električnog polja u mediju i zraku dana je sa:

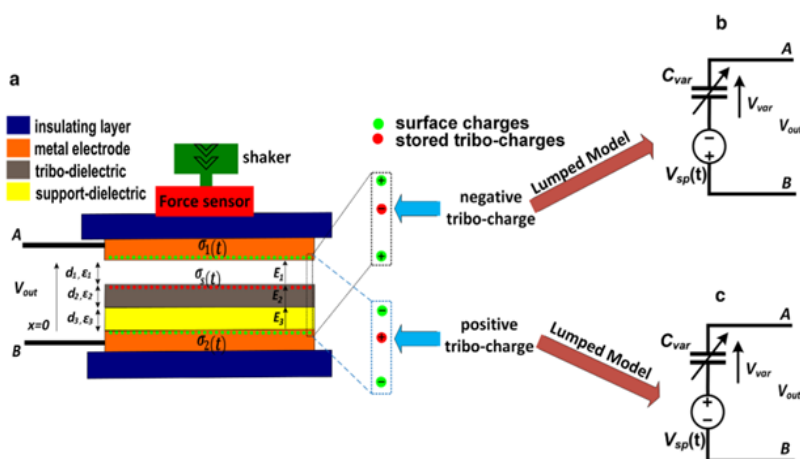
Napon između dvije elektrode:

Gustoća naboja slobodnih elektrona na površini elektrode, u stanju kratkog spoja:

$\sigma_1(L, t)$ - gustoća slobodnih elektrona na površini elektrode
 L- udaljenost između elektroda
 t- vrijeme
 ϵ_1 - dielektrična permitivnost materijala

vu računalnu simulaciju, u svrhu određivanja odgovarajuće korelacije između gustoće površinskog naboja i površinskog napona na ispitivanom uzorku materijala, generiranom tijekom i nakon određenog broja uzastopnih kontakta-odvajanja gornje elektrode.

Predloženi mjerni sustav u čijem se centru nalazi uređaj nalik kondenzatoru, koji putem vibracije vrši (oscilacijsko) gibanje gornje metalne ploče (elektrode) i izaziva kontaktnu elektrifikaciju s dielektričnim materijalom koji se ispituje (sl.5a). Uzorci materijala rezani su na kvadratiće (3 x 3 cm) i očišćeni izopropanolom, nakon čega su postavljeni na dvostranu ljepljivu traku te „ispražnjeni“ od zaostalog ili novo nastalog elektrostatskog naboja uz pomoć deionizirane vode. Pozicija mjernog uređaja, voltmetra (Trek 347) prikazana je na djelomično pojednostavljenom modelu strujnog kruga za mjerenje površinskog naboja na sl.5b, 5c. Cjeloviti strujni krug sastoji se od polovalnog ispravljača, koji sadrži dvije diode s malom razinom propuštanja (D1, D2, type: MMBD1503A) i dodatnim kondenzatorom od 3.33 nF (C). Početna pretpostavka dynamic charge modela je da će površina svakog dielektričnog materijala postati zasićena nakon određenog vremena, zbog uzastopnog kontakta i odvajanja gornje elektrode, što je opisano jednadžbom (8).



Sl.5. Pojednostavljeni prikaz predloženog kondenzatorskog uređaja (a), pojednostavljeni model strujnog kruga mjernog uređaja za negativni površinski naboj (b) i za pozitivni površinski naboj (c). Copyright © 2019, Springer-Verlag GmbH Germany, dio Springer Nature-a. Nepromijenjena.

Autori su odvojili slučaj beskontaktna i kontaktne elektrifikacije, kako za stvaranje pozitivnog, tako i za stvaranje negativnog naboja, te izveli odgovarajuće jednadžbe (11)-(14). Postupak mjerenja proveden je voltmetrom (Trek 347) i sastojao se od jednog mjerenja u beskontaktnom načinu rada i devet uzastopnih mjernih ciklusa u kontaktnom načinu rada, za oba slučaja stvaranja pozitivnog i negativnog naboja.

Maksimalna sila pritiska u kontaktnom modu bila je 2,8 N, a mjereno vrijeme unutar kojeg je postignut napon zasićenja (V_{sat}) za svako od mjerenja bilo je 60 s. Napomena: između mjerenja u kontaktnom modu, ne vrši se prethodno „pražnjenje“ mjerne površine, već je izmjereni napon prethodnog mjerenja, ujedno i početni napon svakog idućeg mjerenja. Dodatno efektivnost dynamic charge modela istražena je putem

Predloženi „dynamic charge model“:

$$\sigma_s(t) = \sigma_s(0) + \Delta\sigma_s(t) = A + B \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (8)$$

$$A + B = \sigma_s(0) = \sigma_s(t)|_{t=0} \quad (9)$$

$$B \left(\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - 1\right) = \Delta\sigma_s(t) = \sigma_s(t) - \sigma_s(0) \quad (10)$$

$\sigma_s(0)$ – početna (stabilna) gustoća naboja na površini dielektričnog materijala
 $\Delta\sigma_s(t)$ – gustoća akumuliranog naboja na površini materijala u promatranom vremenu
 $\sigma_s(t)$ – ukupna gustoća naboja na površini dielektričnog materijala
 τ – kumulativno vrijeme svih akumuliranja i pražnjenja
 A – početna vrijednost naboja na dielektričnom materijalu
 B – količina generiranog naboja

Kontaktni mod:

$$\sigma_s(t) = \frac{V_{sp}(t) \cdot \epsilon_0}{\left(\frac{d_3}{\epsilon_3} + \frac{d_2}{\epsilon_2}\right)} \quad (11)$$

Gustoća negativnog površinskog naboja:

$$\sigma_s(t) = \frac{V_{sat} \cdot \epsilon_0}{\left(\frac{d_3}{\epsilon_3} + \frac{d_2}{\epsilon_2}\right) \left(\frac{C_{max}}{C_{min}} - 1\right)} \quad (13)$$

Bez kontakti mod:

$$\sigma_s(0) = \frac{V_{sp}(0) \cdot \epsilon_0}{\left(\frac{d_3}{\epsilon_3} + \frac{d_2}{\epsilon_2}\right)} \quad (12)$$

Gustoća pozitivnog površinskog naboja:

$$\sigma_s(t) = \frac{V_{sat} \cdot \epsilon_0}{\left(\frac{d_3}{\epsilon_3} + \frac{d_2}{\epsilon_2}\right) \left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)} \quad (14)$$

$\sigma_s(0)$ – početna (stabilna) gustoća naboja na površini
 $\sigma_s(t)$ – dinamička gustoća naboja na površini dielektričnog materijala u promatranom vremenu

$V_{sp}(t)$ – dinamički napon ispitivanog materijala i donje elektrode
 $V_{sp}(0)$ – početni površinski napon
 V_{sat} – napon zasićenja

d_2 – debljina ispitivanog materijala
 d_3 – debljina dvostrane ljepljive trake
 C_{min} – najniža zabilježena vrijednost kapaciteta
 C_{max} – najviša zabilježena vrijednost kapaciteta

ϵ_0 – električna permitivnost slobodnog prostora
 ϵ_1 – električna permitivnost zraka
 ϵ_2 – električna permitivnost ispitnog materijala
 ϵ_3 – električna permitivnost dvostrane ljepljive trake

Bennet-ovog strujnog kruga, osjetljivog na elektrostatski naboj. Tijekom postupka mjerenja odabrano je tri, šest i devet diskretnih referentnih mjernih točaka kako bi se odredilo koji će broj referentnih točaka dati najmanju pogrešku u simulaciji. Odnosno, vidjeti što se događa s procjenom naboja tijekom vremena. Na kraju, predložena metoda je primjenjiva za detekciju početnog naboja na ispitivanom materijalu i potvrdila je da se stvaranje naboja povećava s vremenom.

3. Zaključak

Prikazani mjerni sustavi prikazuje različite načine utvrđivanja generirane količine elektrostatskog naboja na površini ispitivanog materijala uslijed kontaktne (2.1, 2.3 i 2.4) ili bez kontaktne (2.2) elektrifikacije. Pritom, mjerni sustavi ne mogu direktnim putem izmjeriti iznos površinskog naboja, već indirektnim izračunom iz jedne od direktno izmjerenih vrijednosti, kao što su električni kapacitet ili napon. Iz tog razloga, bili su potrebni odgovarajući matematički izrazi, koje su istraživači izveli sukladno pretpostavkama navedenim u svojoj metodi. Na kraju, svi predstavljeni mjerni sustavi za kvantificiranje elektrostatskog naboja daju vrijedne podatke korisne za predviđanje ponašanja uređaja kao što je TEG, ali su ograničeni njihovom robusnom mjernom opremom i strogim atmosferskim uvjetima.



Zahvala

Ovaj rad je djelomično poduprla Hrvatska zaklada za znanost kroz projekt IP-2018-01-6363 "Razvoj i toplinska svojstva inteligentne odjeće (ThermIC)", kao i Sveučilište u Zagrebu kroz istraživačku potporu TP11/21 "Parametri ultrazvučnog spajanja polimernih materijala".

Literatura:

- [1] Rutherford E.: The structure of the atom, Nature, 92 (1913) 2302, 423
- [2] Kruz V.: Električna ili nauka o elektricitetu, In Tehnička fizika, Školska knjiga, Zagreb, 1969, 257-274
- [3] Welker R. W. et al.: Contamination and ESD Control in High-Technology Manufacturing, John Wiley & Sons, Inc., ISBN-13: 978-0-471-41452-0, Hoboken, New Jersey, 2005
- [4] Reppermund J. R.: Generation and Control of Static Electricity in Coatings Operations, American Coatings Association, Inc., Washington DC, 2010
- [5] Lüttgens G., Lüttgens S., and Schubert W.: Principles of Static Electricity, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017, 19–39
- [6] Vigo, T. L.: Textile Processing and Properties, Vol. 11, 1st Edition Preparation, Dyeing, Finishing and Performance, Elsevier Sci., ISBN: 9780080933986, Amsterdam, (1994)
- [7] Hearle, J. W. S.: Physical Properties of Textile, Woodhead Publishing in Textiles, ISBN: 978-1-84569-220-9, Boston, (2008)
- [8] Rogale, S. F. et al.: Intelligent clothing: first and second generation clothing with adaptive thermal insulation properties, Textile Research Journal, 88 (2018) 19, 2214–2233
- [9] Van Langenhove, L.: Advances in Smart Medical Textiles: Treatments and Health Monitoring, The Textile Institute and Woodhead Publishing, ISBN: 978-1-78242-379-9, Amsterdam, (2015)
- [10] Mi, H. et al.: Electroluminescent Fabric Woven by Ultrastretchable Fibers for Arbitrarily Controllable Pattern Display, ACS Applied Materials & Interfaces, 13 (2021) 9, 11260–11267
- [11] Hardianto, H. et al.: Textile yarn thermocouples for use in fabrics, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 14 (2019), 1-7
- [12] Riemer, R.; Shapiro, A.: Biomechanical energy harvesting from human motion: theory, state of the art, design guidelines, and future directions, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 8 (2011) 22, 1-13
- [13] Dionisi, A. et al.: Autonomous Wearable System for Vital Signs Measurement With Energy-Harvesting Module, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 65 (2016) 6, 1423–1434
- [14] Chen, J. et al.: Micro-cable structured textile for simultaneously harvesting solar and mechanical energy, Nature Energy, 1 (2016) 10, 1–8
- [15] Fowle, F. E. et al.: Smithsonian physical tables, Smithsonian Institution, ISBN: 9780874740158, 1934
- [16] Henniker, J.: Triboelectricity in Polymers, Nature, 196 (1962) 4853, 474–474
- [17] Pan, S.; Z. Zhang: Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review, Friction, 7 (2019) 1, 2–17
- [18] Choi, A. Y. et al.: Corrugated Textile based Triboelectric Generator for Wearable Energy Harvesting, Scientific Reports, 7 (2017), 7–12
- [19] Stark, I.: Integrating thermoelectric technology into clothing for generating usable energy to power wireless

- devices, Proceedings of the conference on Wireless Health, Kaiser, William; McCray, Robert (Ed.), 3–4, ISBN: 978-1-4503-1760-3, San Diego California, October 23 - 25, 2012, San Diego California, October 2012, Association for Computing Machinery, 2012
- [20] Lei, R. et al.: Sustainable high-voltage source based on triboelectric nanogenerator with a charge accumulation strategy, *Energy & Environmental Science*, 13 (2020) 7, 2178–2190
- [21] Odhiambo, S. A. et al.: Discharge characteristics of poly(3,4-ethylene dioxythiophene): Poly(styrene-sulfonate) (PEDOT:PSS) textile batteries; comparison of silver coated yarn electrode devices and pure stainless steel filament yarn electrode devices, *Textile Research Journal*, 84 (2014) 4, 347–354
- [22] Dharmasena, R. D. I. G. et al.: Triboelectric nanogenerators: providing a fundamental framework, *Energy & Environmental Science*, 10 (2017) 8, 1801–1811
- [23] Hinchet, R. et al.: Understanding and modeling of triboelectric-electret nanogenerator, *Nano Energy*, 47 (2018), 401–409
- [24] Ghaffarinejad, A.; Yavand Hasani, J.: Modeling of triboelectric charge accumulation dynamics at the metal–insulator interface for variable capacitive structures: application to triboelectric nanogenerators *Applied physics, Materials science and processing* 125 (2019) 4, 1-14
- [25] Liu, L. et al.: Frictional electrification on polymeric flat surfaces, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 8 (2013) 1, 126–136
- [26] Žilinskas, P. J. et al.: Electrostatic properties and characterization of specific polymeric materials for building purposes, *Materials science*, 16 (2010) 1, 57–62
- [27] Zou, H. et al.: Quantifying the triboelectric series, *Nature Communications*, 10 (2019) 1, 1–9
- [28] Yang, B. et al.: A Fully Verified Theoretical Analysis of Contact-Mode Triboelectric Nanogenerators as a Wearable Power Source, *Advanced Energy Materials*, 6 (2016) 16, 1-8
- [29] Lowell, J. & Akande, A. R.: Contact electrification—why is it variable?, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 21 (1988) 1, 125–137
- [30] Mellouki, H. et al.: Experimental modeling of the conformal-contact tribocharging of polymers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25 (2018) 1, 145–153

SUMMARY

Applicable measurement systems for determining the amount of electrostatic charge generated on textile materials

J. Živičnjak, D. Rogale

Static electricity is a phenomenon that describes the instability of an electric charge inside or on the surface of an observed object. Previously, static electricity was closely related to electrical resistivity, i.e., the electrical conductivity of the observed object. More recently, electrical resistance is no longer sufficient as a reference value, especially with the increasing use of multipurpose materials such as textiles that contain active elements that are powered by electricity. E-, smart or intelligent textiles are limited by their energy storage capacity and proximity to the nearest power source. Therefore, portable energy harvesting devices such as triboelectric generators (TEG) are used to generate electrostatic charge and convert it into usable electrical energy. The need for further analysis of the electrical properties of textile materials has led to several research papers observing the voltage and capacitance values induced by contact or non-contact electrification of textile materials. From the numerous investigations, a few reference examples were selected in which the electrification of materials was performed by contact or non-contact and with different measurement setups to determine the electrostatic charge.

Keywords: static electricity, electric charge, textile, voltage, capacity

University of Zagreb Faculty of Textile Technology

Zagreb, Croatia

e-mail: juro.zivicnjak@tf.unizg.hr

Received December 20, 2021

Messsysteme zur Bestimmung der Elektrostatischen Aufladung von Textilmaterialien

Statische Elektrizität ist ein Phänomen, das die Instabilität einer elektrischen Ladung im Inneren oder auf der Oberfläche eines beobachteten Objekts beschreibt. Früher war die statische Elektrizität eng mit dem elektrischen Widerstand, d. h. der elektrischen Leitfähigkeit des beobachteten Objekts, verbunden. In jüngster Zeit reicht der elektrische Widerstand als Referenzwert nicht mehr aus, insbesondere mit der zunehmenden Verwendung von Mehrzweckmaterialien wie Textilien, die aktive Elemente enthalten, die mit Strom betrieben werden. E-, Smart- oder intelligente Textilien sind durch ihre Energiespeicherkapazität und die Nähe zur nächsten Stromquelle begrenzt. Daher werden tragbare Energiegewinnungsgeräte wie triboelektrische Generatoren (TEG) verwendet, um elektrostatische Ladung zu erzeugen und diese in nutzbare elektrische Energie umzuwandeln. Die Notwendigkeit einer weiteren Analyse der elektrischen Eigenschaften von textilen Materialien hat zu mehreren Forschungsarbeiten geführt, in denen die Spannungs- und Kapazitätswerte beobachtet wurden, die durch die kontakt- oder kontaktlose Elektrifizierung von textilen Materialien induziert werden. Aus den zahlreichen Untersuchungen wurden einige Referenzbeispiele ausgewählt, bei denen die Elektrifizierung von Materialien berührend oder berührungslos und mit unterschiedlichen Messaufbauten zur Bestimmung der elektrostatischen Aufladung durchgeführt wurde.