

NANOGENERATOARE TRIBOELECTRICE - REALIZĂRI RECENTE

Aurelian CRĂCIUNESCU

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
aurelian.craciunescu@upb.ro

Rezumat. Nanogeneratoarele triboelectrice reprezintă o direcție promițătoare de realizare a unor surse regenerabile de energie electrică de foarte mică putere, destinate alimentării dispozitivelor electronice portabile și a senzorilor utilizați în rețelele de internet al lucrurilor. Atractivitatea lor este datorată, în primul rând, capacității de a converti eficient energiile cinetice specifice unei mari varietăți de surse vibraționale ambientale, cu frecvențe joase, cum ar fi mișcarea umană, mișcarea valurilor, a vântului, a undelor acustice ș.a., dar și a altor factori cum ar fi greutatea redusă și costul relativ mic. În această lucrare se face o prezentare sumară a nanogeneratoarelor triboelectrice, a mecanismului lor de funcționare și a configurațiilor lor structurale. Cu caracter ilustrativ, sunt prezentate câteva exemple de utilizate a nanogeneratoarelor triboelectrice în diverse domenii de interes actual.

1. INTRODUCERE

În prezent, tehnologia senzorilor ocupă un rol deosebit de important în utilizările de fiecare zi ale diferitelor dispozitive electronice mobile, de monitorizare a mediului, de monitorizare a stării de sănătate în cursul deplasărilor ș. a. Folosirea bateriilor electrice pentru alimentarea cu energie a senzorilor necesită înlocuirea periodică a acestora, operație care poate fi uneori dificilă din cauza locurilor de dispunere a senzorilor. De asemenea, un alt dezavantaj îl poate reprezenta imposibilitatea de reutilizare a bateriilor folosite, fapt care are repercursiuni nedorite asupra sănătății mediului ambiant. Tendința actuală este aceea a dezvoltării unor senzori cu autoalimentare pe baza captării energiei din mediul ambiant. Dintre convertoare dezvoltate în prezent pentru captarea energiilor ambientale, cum sunt convertoarele fotovoltaice, convertoarele piezoelectrice, convertoarele electromagnetice sau convertoarele triboelectrice, acestea din urmă se remarcă prin mai multe avantaje cum ar fi costul relativ redus, greutatea foarte mică, eficiența ridicată și, mai ales, capacitatea de captare a energiilor cinetice de frecvență joasă prezente aproape peste tot. În ultimii ani, după realizarea în anul 2012 a primului nanogenerator triboelectric în SUA, dezvoltarea nanogeneratoarelor triboelectrice a cunoscut o evoluție exponențială. În această lucrare se va face o prezentare a structurilor principale ale nanogeneratoarelor triboelectrice și a modurilor lor de funcționare și se vor prezenta și câteva realizări recente de nanogeneratoare pur triboelectrice sau în construcții hibride realizate prin asociere cu generatoare electromagnetice pentru captarea eficientă a unor vibrații mecanice într-o gamă mai largă.

2. STRUCTURI ȘI MODURI DE FUNCȚIONARE

2.1 Structura și modurile de funcționare ale primului nanogenerator triboelectric

În Fig. 1 se prezintă schematic structura și modurile de funcționare ale primului nanogenerator triboelectric, propus și realizat în anul 2012 [1]. Acest nanogenerator era alcătuit din două foi dreptunghiulare, cu laturi de 4,5 cm x 1,2 cm, una din Kapton, cu grosimea de 125 μm și alta din PET, cu grosimea de 220 μm. Aceste materiale, capabile să se electrizeze prin frecare, erau acoperite fiecare cu câte o foaie conductoare, cu rol de electrod care asigura conectarea cu sarcina. În urma frecării prin presare a celor două materiale, în regiunea

interfacială a lor, indicată prin linii întrerupte, se crează un strat de potențial triboelectric, numit și strat dipolar de interfață. Ca urmare a apariției acestui strat, prin inducție electrostatică, pe cei doi electrozi, vor apărea sarcini electrice de semne contrarii, sarcini care vor determina o diferență de potențial între cei doi electrozi. Această diferență de potențial va determina producerea unui puls de curent electric prin sarcină, puls urmat de egalizarea potențialelor celor doi electrozi. Apoi, dacă se înlătură presiunea dintre cele două materiale triboelectrice, ca urmare a distanțării lor, prin inducție electrostatică se va restabili diferența de potențial dintre cei doi electrozi. Această restabilire va avea loc în urma producerii unui puls de curent de semn contrar pulsului produs prin presarea materialelor triboelectrice. Așadar, prin alternarea punerii în contact cu separarea contactului dintre cele două materiale triboelectrice, se produce un curent electric alternativ. Tensiunea electrică produsă de nanogeneratorul realizat în 2012 a fost de 3,3 V, cu o densitatea de putere de $10,4 \text{ mW/cm}^3$ [1].

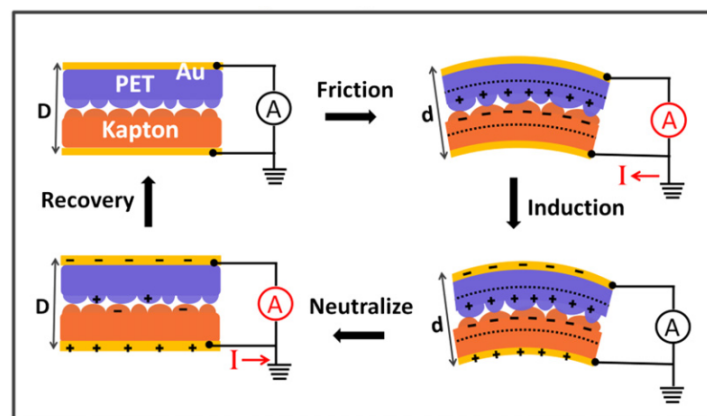


Fig. 1. Structura și modurile de funcționare ale primului nanogenerator triboelectric [1]

2.2 Cele patru structuri ale nanogeneratoarelor triboelectrice

În Fig. 2 se prezintă cele patru structuri de realizare a nanogeneratoarelor triboelectrice.

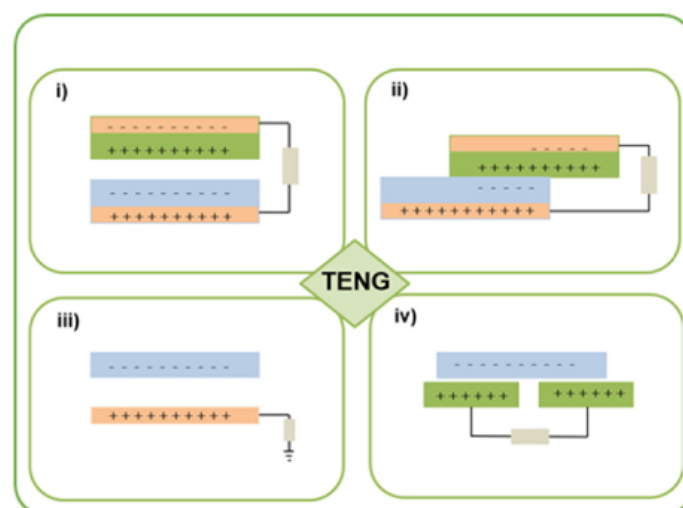


Fig. 2. Cele patru structuri de realizare a nanogeneratoarelor triboelectrice: (I) structura cu separarea verticală a contactelor, (II) structura cu alunecarea laterală a contactelor, (III) structura cu un singur electrod, (IV) structura autonomă sau independentă [2].

Structura cu separarea verticală a contactelor se realizează în două variante, definite de materialele triboelectrice folosite: dielectric cu dielectric și dielectric cu conductor electric. Uzual, se folosește structura dielectric cu dielectric, structură a cărei funcționare a fost descrisă în secțiunea anterioară, 2.1. Această structură are avantajul că permite realizarea unor tensiuni electrice cu valori mari dacă se folosesc suprafețe de contact mari. Ea are însă și un dezavantaj important cauzat de utilizarea repetată a contactului, utilizare care duce la degradarea materialelor și, deci, la limitarea duratei de utilizare.

Structura cu alunecarea laterală a contactelor este realizată, ca și structura cu separarea verticală a contactelor, tot cu două materiale triboelectrice diferite și doi electrozi de contact. La această structură, însă, aria suprafeței de contact variază în urma unor alunecări de translație sau de rotație, modalități care oferă posibilitatea realizării unor nanogeneratoare cu configurații adaptate diverselor utilizări.

Structura cu un singur electrod este o structură cu material dielectric mobil. Ea realizează 50 % din transferul de sarcină electrică realizat de structurile cu doi electrozi.

Structura autonomă sau independentă se bazează pe frecarea naturală dintre materialul triboelectric și aerul din mediul înconjurător. Sunt două variante ale acestei structuri: structura autonomă cu contact și structura autonomă cu alunecare. În aceste structuri, materialul dielectric, înconjurat de aer, este plasat între doi electrozi metalici. Datorită unor forțe externe, electrozii metalici intră în contact cu materialul dielectric și îl încarcă cu sarcini electrice negative. Electrozii metalici împreună cu materialul dielectric formează o configurație de condensator electric cu geometrie variabilă. Când capacitatea acestei configurații de condensator electric variază, ca urmare a unor forțe vibraționale externe, se produce generarea unei puteri electrice. Datorită frecărilor reduse ale materialului dielectric cu aerul, durata de funcționare a unor asemenea structuri este mult mai mare decât a structurilor cu frecare între corpuri solide, dar realizarea lor este dificilă și eficiența este mai scăzută [2].

2.3 Alegerea materialelor triboelectrice pe baza afinității lor la electroni

Alegerea materialelor triboelectrice este unul din cele mai importante aspecte ale proiectării unui nanogenerator triboelectric. Aceste materiale sunt clasificate după capacitatea de transfer a electronilor de la un material la altul, în vederea producerii sarcinilor triboelectrice. Materialele care au afinitate mare la electroni și, deci, atrag electronii, sunt numite materiale acceptoare de electroni, iar cele care cedează electroni, sunt numite materiale donoare de electroni. Exemple de materiale acceptoare de electroni sunt: PTFE (Polytetrafluoroethylene or Teflon), PDMS (Polydimethylsiloxane), FEP (Fluorinate ethylene propylene), Kapton, cauciucul, grafenele, celuloza ș.a. Exemple de materiale donoare de electroni sunt: aluminiul, cuprul, pielea, nylonul, aurul, argintul, mătasea, grafenele, celuloza ș.a. De remarcat că grafenele și celuloza pot fi atât acceptoare cât și donoare, după cum sunt asociate cu alte materiale la realizarea nanogeneratoarelor triboelectrice.

În Fig. 3 se prezintă serii de materiale triboelectrice ordonate după afinitatea lor la electroni.

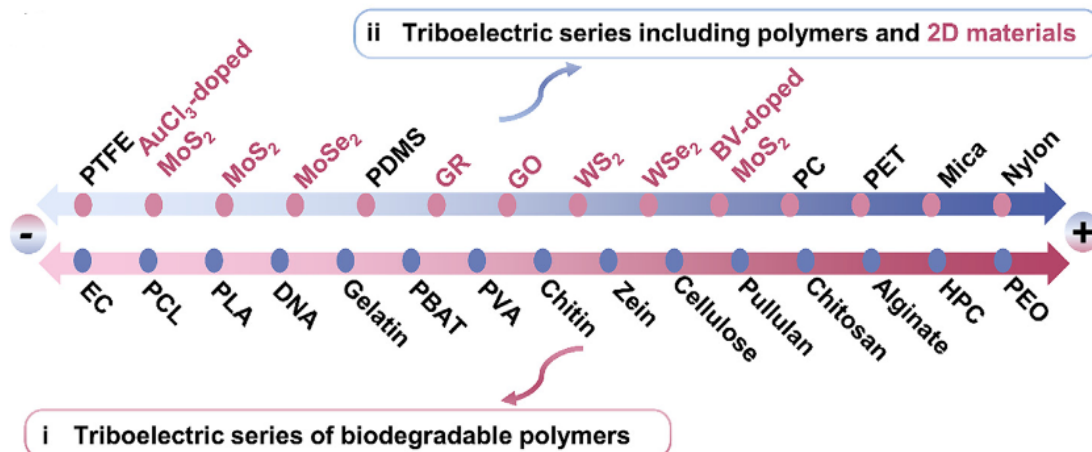


Fig. 3. Serii de materiale triboelectrice ordonate după afinitatea lor la electroni [3]

3. EXEMPLE DE UTILIZARE A NANOGENERATOARELOR TRIBOELECTRICE

3.1 Anemometru de uz meteorologic, cu nanogenerator triboelectric [4]

În Fig. 4 se prezintă structura unui anemometru pentru vânturi cu viteză mică, dispus pe drone de uz meteorologic. Acest anemometru conține un nanogenerator triboelectric antrenat de o microturbină eoliană cu trei pale. Nanogeneraatorul triboelectric produce energie electrică pe baza frecării de rotație dintre un rotor realizat din material dielectric (FEP) și un stator realizat din Kapton. Datorită electronegativității mai mari a membranei rotorice, față de cea a membranei statorice, sarcinile negative se acumulează pe suprafața membranei rotorice iar sarcinile pozitive se acumulează pe suprafața membranei statorice, în cursul contactului cu frecare dintre cele două membrane. Pe măsură ce membrana rotorică se rotește, în sensul acelor de ceasornic, de la starea (i), aliniată cu electrodul A, la starea (ii), inducția electrostatică determină curgerea sarcinilor electrice pozitive de la electrodul A la electrodul B prin circuitul exterior, echilibrând astfel câmpul electric localizat al sarcinilor electrice fixe aflate pe dielectric. Pe măsură ce membrana rotorică își continuă mișcarea de rotație și ajunge în poziția (iii) aliniată cu următorul electrod B, toate sarcinile pozitive migrează către electrodul B. Apoi, membrana rotorică se deplasează în continuare de la electrodul B la electrodul A, prosulsând sarcinile pozitive de la electrodul B înapoi la electrodul A, generând astfel, în circuitul exterior, un curent cu sens invers. Revenind la starea inițială (i), pe măsură ce membrana rotorică se aliniază cu următorul electrod A, se începe un nou ciclu și procesul de transfer de sarcină electrică se va repeta ciclic, pe măsură ce membrana se rotește, generându-se astfel un curent alternativ. Nanogeneratorul descris furnizează o tensiune electrică alternativă cu amplitudinea de 4 V, și cu frecvențe cuprinse între 16,6 Hz și 215,8 Hz, pentru viteze ale vântului cuprinse între 1,6 m/s și 10,7 m/s [4].

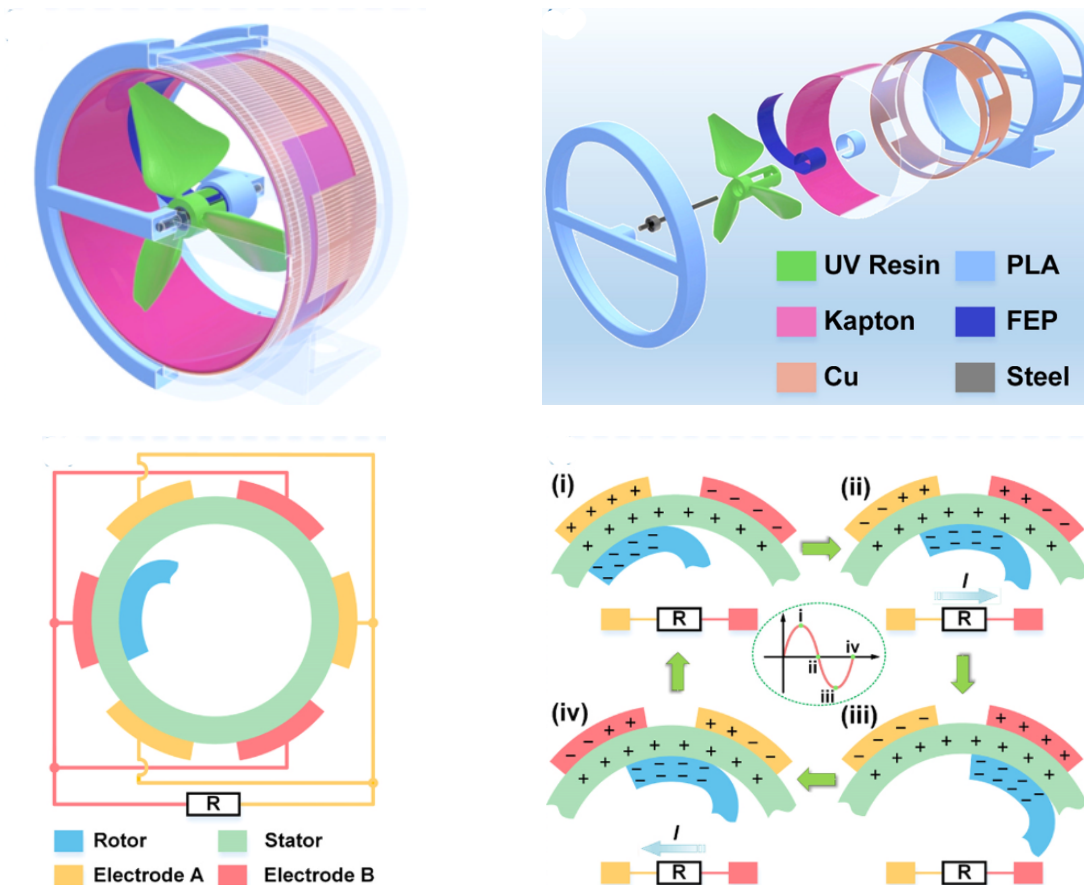


Fig. 4. Anemometru de uz meteorologic cu nanogenerator triboelectric [4]

3.2 Nanoconvertor triboelectric de energie eoliană [5]

În Fig. 5 se prezintă un nanoconvertor triboelectric cu bilă din material dielectric, antrenată de un vortex eolian indus într-o structură de tip fluier. Acest nanoconvertor triboelectric de energie eoliană poate furniza o tensiune electrică alternativă cu amplitudinea de cca. 11,2 V și un curent electric cu amplitudinea de cca. 1,86 μA .

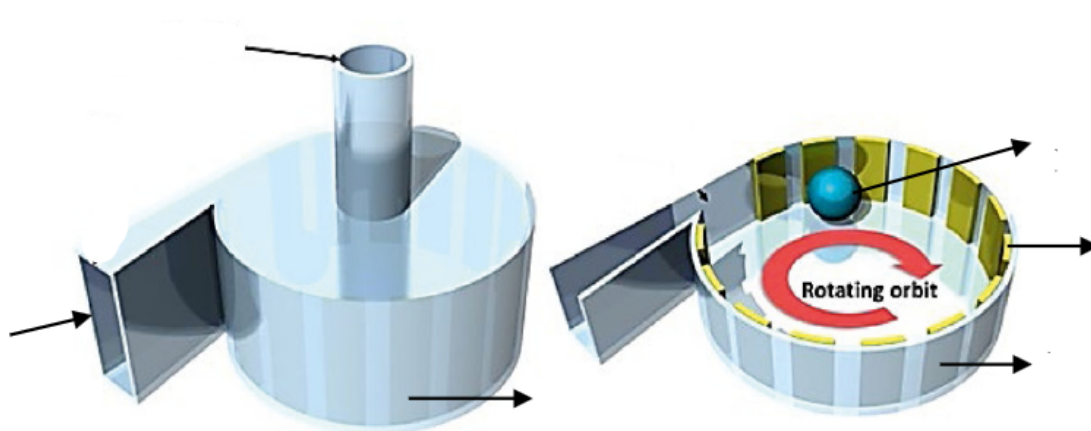


Fig. 5. Nanogenerator triboelectric antrenat de un vortex eolian indus [5]

3.3 Nanoconvertor triboelectric de energie acustică folosit ca senzor autoalimentat [6]

În Fig. 6.a se prezintă structura unui nanoconvertor triboelectric de energie acustică și o schemă de utilizare a lui pentru alimentarea unui grup de 72 de LED-uri.

În Fig. 6.b se prezintă o schemă de utilizare a nanoconvertorului triboelectric de energie acustică în sisteme cu inteligență artificială, ca senzor autoalimentat, împreună cu un chip de procesare și recunoaștere a vocii în scopul transmiterii de comenzi, cum ar fi comenzile de închidere sau de deschidere a unui circuit electric.

Convertorul acustic din Fig. 6 poate furniza o putere electrică de 4,33 mW, la un sunet cu frecvența de 100 Hz și intensitatea de 100 dB,.

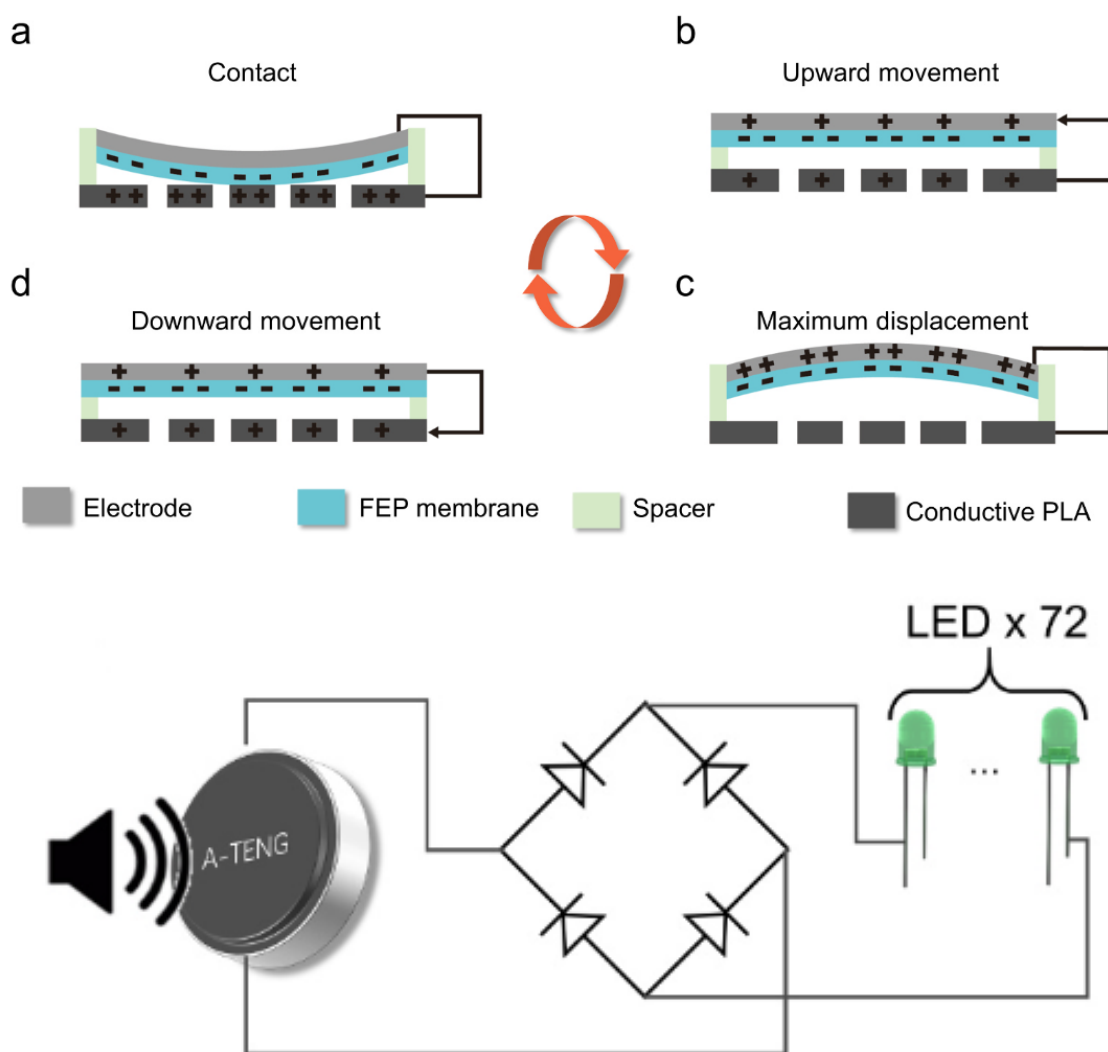


Fig. 6.a. Nanoconvertor triboelectric de energie acustică folosit ca senzor autoalimentat utilizat pentru alimentarea unui grup de LED-uri [6]

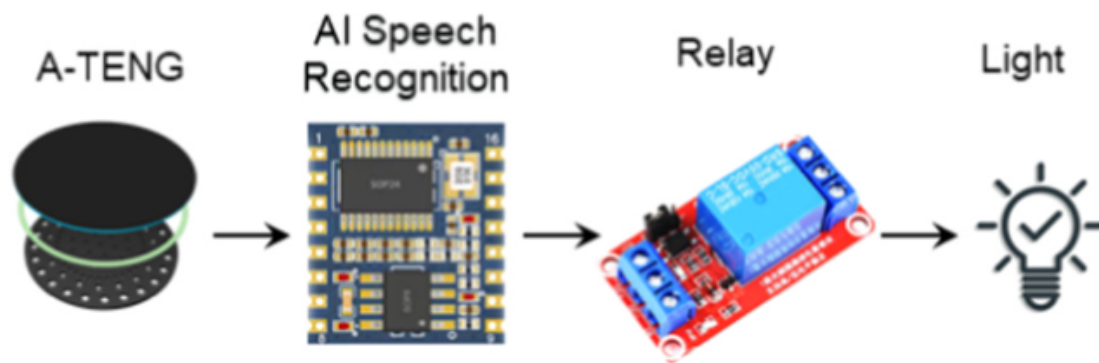


Fig. 6.b. Nanoconvertor triboelectric de energie acustică folosit într-un sistem cu inteligență artificială pentru recunoașterea vocii și transmiterea de comenzi vocale [6].

3.4 Nanogenerator hibrid triboelectric-electromagnetic, cu pendul și rotoare conice, pentru captarea energiei valurilor [7]

Componentele esențiale ale convertorului hibrid de energie a valurilor marine sunt prezentate schematic în Fig. 7.a, în care se disting trei părți: captatorul de energie mecanică, generatorul electromagnetic și generatorul triboelectric. Captatorul de energie mecanică consistă într-un pendul principal și câteva penduluri adiționale. Schimbând numărul pendulurilor adiționale ale captatorului, energia valurilor cu frecvență foarte joasă, determinată de o gamă largă de condiții, poate fi transferată eficient polilor conici rotitori componenți ai generatorului electromagnetic și, totodată, ai generatorului triboelectric. Componentele celor două generatoare transformă în același timp mișcarea polilor conici rotitori în energie electrică în conformitate cu efectul inducției electromagnetice, efectul triboelectric și efectul inducției electrostatice.

În Fig. 7.b se prezintă structura generatorului triboelectric, și respectiv, mecanismul lui de funcționare. Generatorul triboelectric are trei componente: rotorii conici din nylon, statorul cu film FEP (fluorinated ethylene propylene) și electrozii dispuși radial. În cursul mișcării rotorilor conici, cantități egale de sarcini electrice se produc pe suprafața statorului cu film FEP și, respectiv, pe ansamblul suprafețelor rotoarelor conice din nylon. În starea inițială, sarcinile negative induse, datorită inducției electrostatice, se transferă de la E1 la E2, cu E1 și E2 încărcate negativ și, respectiv, pozitiv. Sarcinile negative de pe E1 curg spre E2 prin circuitul extern pentru a menține echilibrul electrostatic. Diferența maximă de potențial, conform simulării făcute în Comsol, poate ajunge la 1200 V.

Componenta generatorului electromagnetic, prezentată în Fig. 7, este alcătuită din rotorii conici din nylon, magneții încorporați în baza rotorilor conici și bobinele distribuite într-un inel în jurul periferiei unității. Pe măsură ce magneții se rotesc o dată cu rotorii conici, fluxul din interiorul bobinelor variază, ceea ce induce tensiuni electromotoare în bobine. Experimentele s-au făcut la vibrații ale generatorului hibrid cu frecvența de 1 Hz. Tensiunile maxime produse de cele două generatoare componente au fost de 4,3 V pentru generatorul electromagnetic și de 78 V pentru generatorul triboelectric. Cu energia produsă la vibrații cu frecvența de 1 Hz s-a putut alimenta un gup de 360 de led-uri cu lumină roșie conectate în paralel [7].

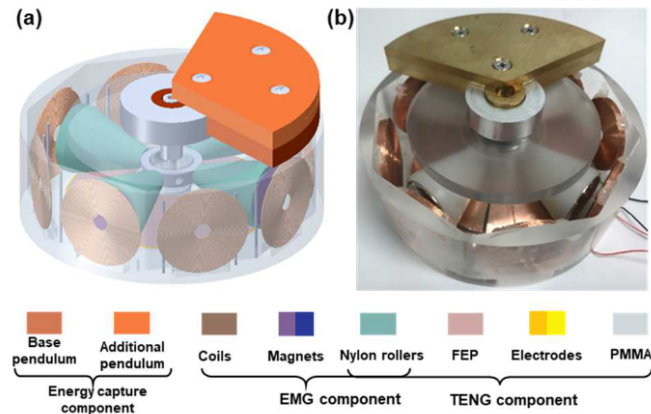


Fig. 7.a.

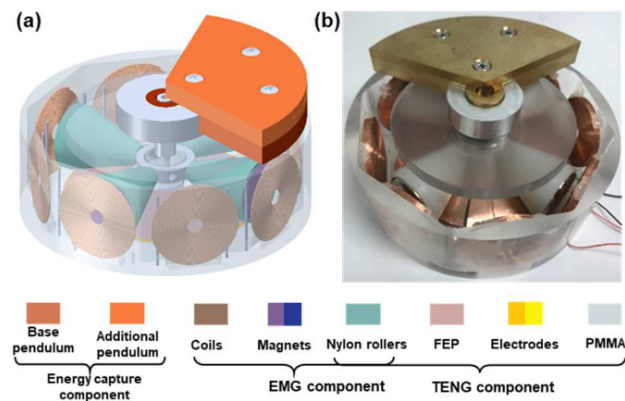


Fig. 7.b.

3.5 Nanogenerator hibrid triboelectric-electromagnetic, cu lichid și magneți permanenți sferici, pentru captarea energiei valurilor marine [8]

În Fig. 8 este prezentat un nanogenerator hibrid triboelectric-electromagnetic, cu lichid și magneți permanenți sferici, pentru captarea energiei valurilor marine. Nanogeneratorul este realizat din tuburi PTFE, doi electrozi de cupru, două bobine de cupru, apă deionizată și magneți sferici. Apa deionizată are o funcțiune dublă, ea acționând atât ca mediu de lucru pentru nanogeneratorul triboelectric, cât și ca lubrefiant pentru mișcările magneților sferici. Bobinele din cupru dispuse la capetele tubului sunt sediul tensiunilor electromotoare induse de magneții permanenți sferici când aceștia se deplasează în tub, ca urmare a mișcărilor de oscilație ale aestuia.

Nanogeneratorul hibrid din Fig. 8 combină avantajele celor două nanogeneratoare componente, care au performanțe diferite la frecvențe de oscilație diferite. Astfel, nanogeneratorul triboelectric furnizează o tensiune de 75 V și un curent de 8,8 μA la frecvența de oscilație de 0,5 Hz, iar nanogeneratorul electromagnetic furnizează o tensiune de 0,3 V și o putere de 2,35 mW, la o frecvență de oscilație de 1,2 Hz. Nanogeneratorul triboelectric poate asigura alimentarea unui senzor de temperatură a apei oceanului cum și alimentarea unor LED-uri chiar și la frecvența joasă de 0,5 Hz.

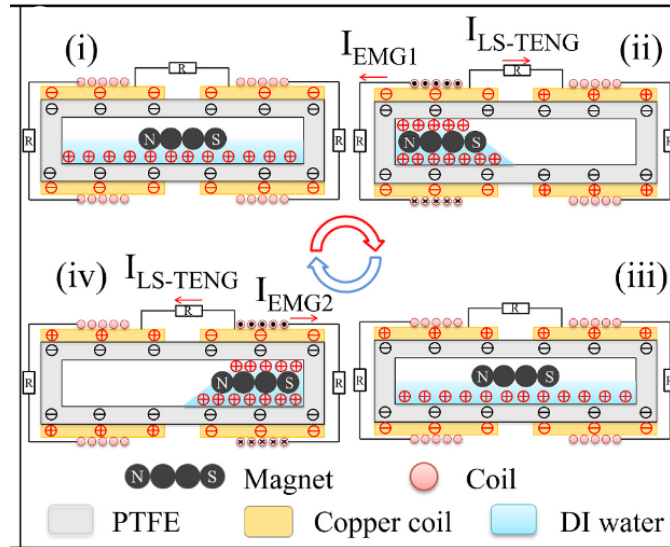


Fig. 8. Nanogenerator hibrid triboelectric-electromagnetic, cu lichid și magneți permanenți sferici, pentru captarea energiei valurilor marine [8]

4. CONCLUZII

Dezvoltarea rapidă a dispozitivelor electronice personale a condus la o creștere exponențială a cererii de surse de energie durabile și portabile. Dezvoltarea sistemelor autoalimentate elimină utilizarea surselor de alimentare externe, uneori dificil de înlocuit și creatoare de deșeuri nereciclabile. Nanogeneratoarele triboelectrice care convertesc energia mecanică a vibrațiilor ambientale în energie electrică reprezintă o soluție eficientă de furnizarea a unei energii curate, în locurile de prezență a senzorilor și a echipamentelor electronice portabile.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XX, ediția 2024.”

BIBLIOGRAFIE

1. Feng-Ru Fan, Zhong-Qun Tian, Zhong Lin Wang, *Flexible triboelectric generator*, *Nano Energy*, **1**, 328–334, 2012.
2. Muhammad Sohaib Iqbal, Honglang Lu, Somnath Khaladkar, Xiaowei Wu, Shubham Roy, Zia Ullah, Yuqian Yan, Yinghe Zhang, Bing Guo, *Recent advances in triboelectric nanogenerators: Mechanism, rational designing and applications*, *Materials Today Energy*, **46**, 2024.
3. Shengshun Duan, Huiyun Zhang, Lei Liu, Yu Lin, Fangzhi Zhao, Pinzhen Chen, Shuze Cao, Kai Zhou, Changjiang Gao, Zhengfeng Liu, Qiongfeng Shi, Chengkuo Lee, Jun Wu, *A comprehensive review on triboelectric sensors and AI-integrated systems*, *Materials Today*, **80**, 2024.
4. Yixin Liu, Yongming Yao, Kuankuan Wang, Xiang Guan, Tianyu Li, Tinghai Cheng, Zhiwu Han, *A bioinspired triboelectric wireless anemometer with low cut-in wind speed for meteorological UAVs*, *Nano Energy*, **128**, 2024.
5. H. Yong, J. Chung, D. Choi, D. Jung, M. Cho, S. Lee, *Highly reliable wind-rolling triboelectric nanogenerator operating in a wide wind speed range*, *Sci. Rep.* **6**, 2016.
6. Ming Yuan, Chunhui Li, Hongmian Liu, Qinghao, Yannan Xie, *A 3D-printed acoustic triboelectric nanogenerator for quarter-wavelength acoustic energy harvesting and self-powered edge sensing*, *Nano Energy*, **85**, 2021.
7. Yunfei Li, Tianyi Tang, Yan Fang, Manjuan Huang, Cheng Hou, Huicong Liu, Lining Sun, *Design and experiment of a hybrid wave energy harvester based on tapered rollers*, The 21st International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS), 2022
8. Huahui Long, Shishi Li, Mingsheng Jia, Dandan Huang, Peng Zhang, Xianzhang Wang, Xiaoning Li, Jianlong Wu, Dongdong Hou, Qianxi Zhang, *A tubular liquid-solid triboelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for enhancing wave energy harvesting*, *Energy*, **304**, 2024.