

UŠTEDA ENERGIJE U IoMT SISTEMIMA PRIMJENOM ELEKTRONSKIH TETOVAŽA / ENERGY SAVING IN IoMT SYSTEMS USING ELECTRONIC TATTOOS

Goran Popović¹

¹IUT, Fakultet politehničkih nauka Travnik, Aleja konzula – Meljanac bb, 72270 Travnik,
Bosna i Hercegovina,
e-mail: goran.popovic@iu-travnik.com

Izvorni naučni rad

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251401028>

UDK / UDC 621.38: 616.5

Sažetak

IoMT (Internet of Medical Things) sistemi su jedan od najvažnijih segmenata globalnih IoT mreža, koje su namijenjene praćenju zdravstvenih parametara učesnika u mreži. Učesnici su opremljeni senzorima, postavljenim na tijelo, ispod kože ili na odjeću, koji vrše mjerenja različitih veličina te ih prosleđuju bežičnim putem do lokacije na kojoj se podaci obrađuju i analiziraju. Klasični senzori, montirani na ovakav način su neudobni za pacijenta, njihova montaža nije uvijek jednostavna, napaju se baterijama ograničenog kapaciteta, čija zamjena ponekad može biti problematična, pogotovo ako se radi o implantima gdje je neophodno izvršiti operativni zahvat. Razvoj epidermalne elektronike, koja se donedavno svrstavala u oblast naučne fantastike, a danas već omogućava praktičnu primjenu različitih rješenja, doveo je do elektronskih tetovaža kao alternativni klasičnim senzorima. Radi se o uređajima izuzetno male debljine i težine koji se specijalnim tehnološkim postupcima nanose na kožu pacijenta. U ovom radu prikazaćemo osobine ovih uređaja, njihove prednosti i značajan doprinos energetske efikasnosti IoMT sistema.

Ključne riječi: Elektronske tetovaže. Epidermalna elektronika, IoMT, Ušteda energije, WBAN
JEL klasifikacija: L630

Abstract

IoMT (Internet of Medical Things) systems are one of the most important segments of global IoT networks, which are intended for monitoring health parameters of network participants. Participants are equipped with sensors, placed on the body, under the skin or on clothing, which take measurements of various values and transmit them wirelessly to the location where the data is processed and analyzed. Classic sensors, mounted in this way, are uncomfortable for the patient, their installation is not always easy, they are powered by batteries of limited capacity, the replacement of which can sometimes be problematic, especially if it is an implant where it is necessary to perform an operation. The development of epidermal electronics, which until recently was classified as science fiction, but today already enables the practical application of various solutions, has led to electronic tattoos as an alternative to classic sensors. These are devices of extremely low thickness and weight that are applied to the patient's skin using special technological procedures. In this paper, we will present the features of these devices, their advantages and significant contribution to the energy efficiency of the IoMT system.

Keywords: Electronic tattoos, Energy saving, Epidermal electronics, IoMT, WBAN
JEL classification: L630

UVOD

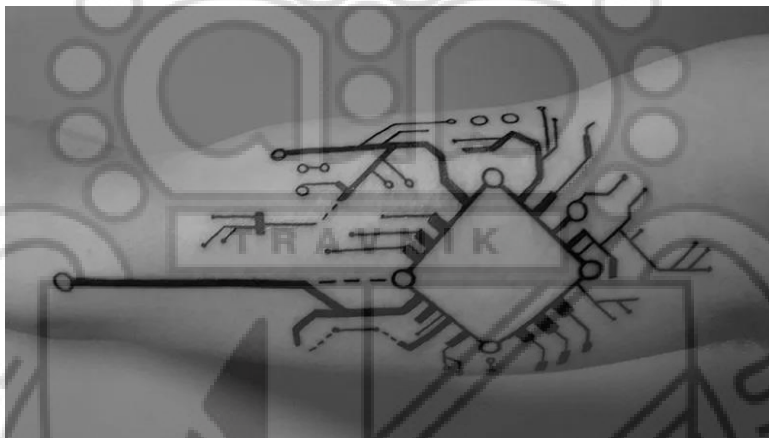
Bežične senzorske mreže WSN (*Wireless Sensor Networks*) spadaju u red tehnologija čiji će uticaj na dalji razvoj informacijskog društva u cjelini biti najveći [8]. Integracija senzorskih uređaja s računarskim sistemima i njihovo međusobno povezivanje putem digitalnih komunikacionih sistema omogućavaju neograničen pristup podacima od interesa u realnom vremenu i njihovu pravovremenu dostavu do odredišta, gdje se vrši njihova analiza i obrada. WBAN (*Wireless Body Area Network*) je posebna vrsta WSN koja se postavlja na ljudsko tijelo. Sastoji se od senzora koji očitavaju signale iz ljudskog tijela od interesa za praćenje vitalnih zdravstvenih parametara posmatrane osobe, kao što su npr. krvni pritisak, puls, tjelesna temperatura, glukoza, pH vrijednost, znojenje, tjelesna težina itd. Mreža se sastoji od relativno jeftinih, vrlo malih i laganih senzora. Senzori se mogu nositi (u odjeći osobe ili odgovarajućim torbicama), na neki način postaviti na površinu ili implantirati unutar tijela. Njihova je uloga da vrše očitavanja fizioloških parametara, koja se obavljaju u realnom vremenu ili periodično, dostave pacijentu, njegovom ljekaru ili drugim osobama koje prate zdravstveno stanje pacijenta. Komunikaciono povezivanje senzora na ljudskom tijelu, posebno onih koji su ugrađeni unutar tijela, putem žica nije razumna opcija. Stoga bežično povezivanje nema alternativu [2]. Klasični senzori ne zadovoljavaju ni minimalne zahtjeve za ergonomičnost, neudobni su za nošenje, jednostavno ih je pomjeriti, starije i dementne osobe ih mogu onesposobiti nepažnjom ili neznanjem. Pored toga, napajanje klasičnih senzora se vrši baterijama ograničenog kapaciteta. Dopunjavanje ili zamjena ovih baterija nije uvijek jednostavan zadatak, pogotovo kada je riječ o implantiranim senzorima gdje je neophodno preduzeti operativni zahvat za obnavljanje napajanja uređaja. Zbog navedenog se teži iznalaženju rješenja koje će istovremeno riješiti dva problema: udobnost, pouzdanost i robustnost WBAN mreže te energetske efikasnost i osiguranje napajanja mreže kroz obnovljive izvore energije. Razvoj epidermalne elektronike posljednjih godina otvorio je sasvim nove mogućnosti za implementaciju senzora na ljudsko tijelo. Stvoreni su uslovi za tehnologije kojim se direktno na kožu nanose elektronski uređaji u obliku privremenih tetovaža [15]. Ovi ultra-tanki, fleksibilni uređaji omogućuju neinvazivno praćenje različitih fizioloških parametara. Zahvaljujući svojoj savitljivosti i sposobnosti da prijanjaju uz kožu bez nelagode, epidermalna elektronika nalazi primjenu u medicini, sportu, rehabilitaciji i čak u interaktivnoj zabavi. Pametne tetovaže kombinuju estetiku s funkcionalnošću, otvarajući vrata novim oblicima personalizirane zdravstvene zaštite i interfejsa čovjek-mreža u realnom vremenu bez potrebe za glomaznom opremom ili invazivnim metodama. Na ovaj način se značajno povećava kvalitet života pacijenata kroz diskretno i udobno praćenje njihovog zdravstvenog stanja. Jedna od ključnih prednosti pametnih tetovaža u odnosu na tradicionalne nosive uređaje jeste energetska efikasnost. Zahvaljujući svojoj jednostavnoj arhitekturi, ultra-tankom dizajnu i korišćenju niskonaponskih komponenti, ovi uređaji mogu raditi uz minimalnu potrošnju energije, što ih čini idealnim za dugotrajno korišćenje bez potrebe za čestim punjenjem ili zamjenom baterija. U ovom radu opisać se različiti načini za napajanje pametnih tetovaža, predstavice se prednosti i nedostaci različitih pristupa i naznačiti dalji pravci i perspektive razvoja.

1. PAMETNE TETOVAŽE

Klasični senzori za očitavanje fizioloških parametara u WBAN mrežama su izrađeni od nepropusnih i krutih materijala, što dovodi do mehaničkih i biohemijskih dispariteta između uređaja i ljudskog tkiva, pri čemu pored neudobnosti može doći i do iritacije kože i oštećenja tkiva a znojenje ispod senzora veoma negativno utiče na kvalitet signala [5]. Elektronske tetovaže, sa druge strane, su fleksibilne, lagane i integrisane u kožu ljudskog tijela. Sadrže senzore koji su načinjeni od veoma tankih i fleksibilnih materijala koji se prilagođavaju obliku kože i pri tome omogućavaju izuzetne performanse bez nelagode za nosioca uređaja ili ometanja u vršenju svakodnevnih aktivnosti.

Epidermalna elektronika se još uvijek nalazi u fazi početnog razvoja pa je neophodno riješiti čitav niz problema kao što su: meke, ljepljive elektrode koje se moraju prilagoditi konturama ljudskog tijela, osjetljivo termalno mikrokruženje koje omogućava prirodno znojenje i smanjenje rizika od upalnih procesa na koži te degradacije kvaliteta signala uslijed znojenja [21]. Pored toga, svako pomijeranje i deformacija kože na mjestu nanošenja tetovaže zahtijeva i adaptiranje tetovaže na nove osobine podloge bez oštećenja njene funkcionalnosti [10].

Izrada elektronskih tetovaža podrazumijeva integraciju primjenljivih materijala i tehnologija za njihovo prilagođenje ciljanom okruženju tj. osobinama kože ljudskog tijela [19]. Razvojem naprednih tehnologija 3D štampe kao i fleksibilne elektronike te primjena novih materijala omogućen je jeftina i jednostavna implementacija elektronskih tetovaža u praksi (Slika 1).



Slika 1. Elektronska tetovaža ⁷

Nanošenje tetovaža bez iritacije kože zahtijeva primjenu odgovarajućih tehnika i materijala kao što su: zlatne nanošipke, drugi grafen ili raznih polimera sa gumenom podlogom. Preko toga se mogu nanositi i različiti sprejevi, kako bi se dodao tanak zaštitni sloj i čitav sistem bolje vezao za kožu. Uređaj može da se pokreće, savija i rasteže zajedno s kožom pacijenta, pri čemu ne gubi svoju osnovnu funkciju.

2. NAPAJANJE PAMETNIH TETOVAŽA

Pametne tetovaže nisu stabilne instalacije, slično popularnim privremenim umjetničkim tetovažama. U tom smislu je posebno interesantan problem napajanja ovih uređaja. Energija se ne troši samo na očitavanje medicinskih parametara kao osnovne funkcije senzora, već i na sakupljanje i skladištenje podataka, njihovu obradu i prikaz. Međutim, na potrošnju raspoložive energije najviše utiče bežična komunikacija senzora sa okruženjem. Primjena BLE (*Bluetooth Low Energy*) tehnologije, npr., za prenos podataka, utiče na ukupnu potrošnju energije senzora u procentu 98% [1]. Rješenju problema napajanja pristupa se na različite načine opisane u nastavku rada.

2.1. BEŽIČNI PRENOS SNAGE

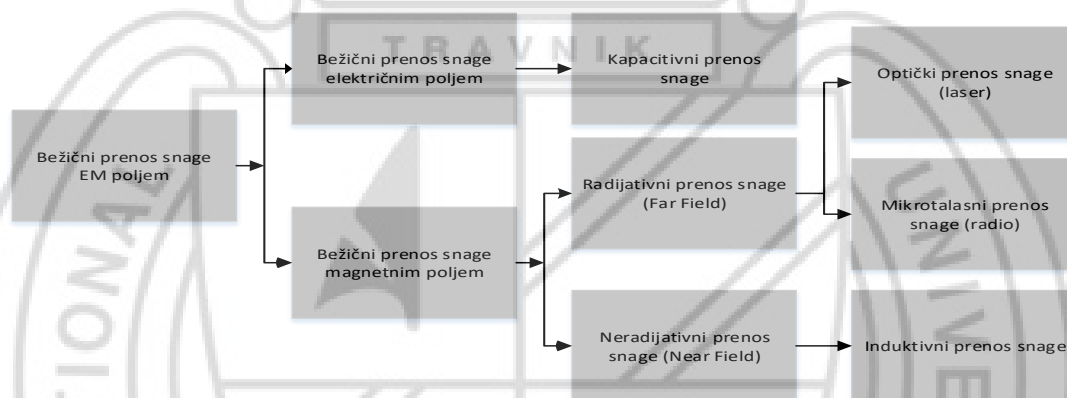
Bežični prenos energije WPT (*Wireless power Transfer*) je prenos električne energije od predajnika do prijemnika bez direktnog fizičkog kontakta tj. bežično. Predajnik energije generiše vremenski promjenljivo elektromagnetno polje koje vrši predaju energije kroz prostor prema prijemniku. Blok šema WPT sistema je prikazana na Slici 2.

⁷ <https://pcpress.rs/tehnovizija-tetovaza-umesto-smartfona/> (Pristup 1.4.2025.)



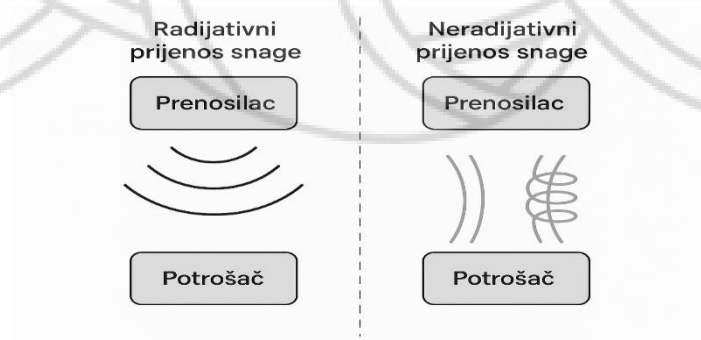
Slika 2. Bežični prenos energije WPT

Koristi se nekoliko različitih metoda za bežični prenos energije do elektronske tetovaže [17]. Na Slici 3. su prikazane tehnike koje su na raspolaganju zavisno od realizacije predajnika, prijemnika te antena ili uređaja za uparivanje sa Slike 2. Na navedenoj blok šemi možemo zapaziti nekoliko potpuno različitih pristupa bežičnoj dostavi snage a najčešće korišćene u praksi ćemo kratko opisati u nastavku.



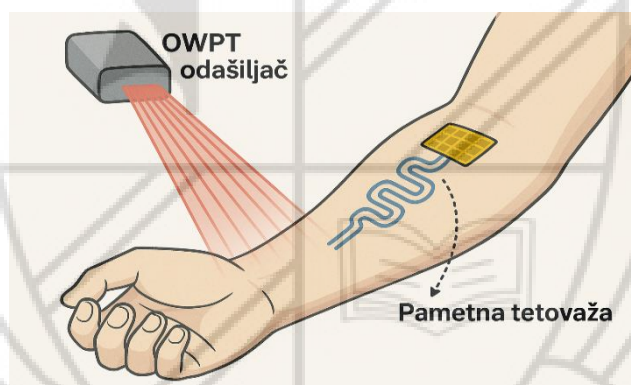
Slika 3. Različite kategorija sistema za bežični prenos snage

Radijativni prenos snage podrazumijeva emitovanje u prostor kojim se dosežu veće udaljenosti. Cijena koja se plaća za veće domete su veći gubici energije ali i veća interferencija sa drugim uređajima na putanji prenosa. Prenos se vrši talasima različitih frekvencijskih opsega EM spektra kao što su: radio talasi, mikrotalasi, optički talasi (laseri) i infracrveni talasi. Sa druge strane **neradijativni prenos snage** (Slika 4) se odnosi na prenos energije bez zračenja na daljinu već kroz blisku interakciju između predajnika i prijemnika. Najčešće korišćena tehnika neradijativnog prenosa je induktivno uparivanje.



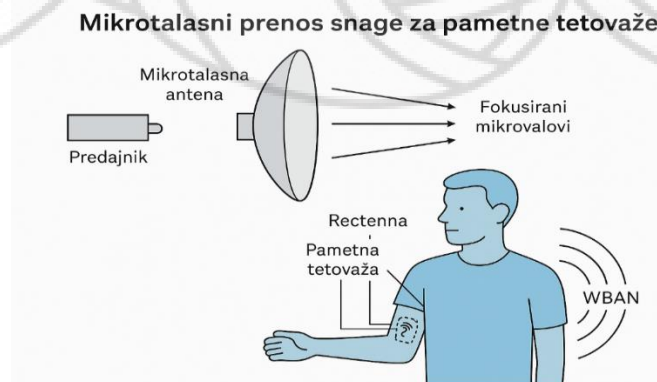
Slika 4. Radijativni i neradijativni prenos energije

Optički prenos snage OWPT (*Optical wireless power transfer*) je tehnika koja koristi neki od izvora svjetlosti (LED ili LD) kao predajnik snage pri čemu se vrši konverzija iz električne u optičku snagu. Na mjestu prijema se koristi solarna ćelija ili PV (*Photovoltaic Receivers*) ćelija za konverziju energije u obrnutom smjeru (Slika 5). Primjena lasera ima čitav niz prednosti u odnosu na ostale tehnologije kao što su: kompaktan signal, velika gustina prenosa energije, velika pokrivenost i nepostojanje interferencije sa ostalim signalima iz EM spektra. Laser može prenositi snagu na velike udaljenosti. Precizna usmjerenost laserskog snopa je veoma značajna za napajanje mikrosistema kao što su pametne tetovaže. Snaga laserskog snopa se smanjuje po eksponencijalnom zakonu dok snaga RF signala opada sa kvadratom udaljenosti [12]. Efikasnosti prenosa energije drugih tehnologija se veće su od OWPT na kratkim udaljenostima, ali na većim udaljenostima OWPT postiže veoma dobre rezultate u odnosu na konkurentne tehnike. Prednost ove tehnologije leži i u njoj bezbjednosti i komforu. OWPT sistemi omogućavaju precizno usmeravanje svetlosnog zraka ka ciljanom uređaju, čime se minimizuje izloženost okolnih tkiva i smanjuje rizik od pregrijavanja. Takođe, zbog odsustva elektromagnetnog zračenja karakterističnog za RF tehnologije, OWPT predstavlja pogodnu alternativu za korišćenje u osjetljivim biomedicinskim okruženjima, uključujući bolnice i kućnu njegu. Integracija OWPT sistema sa pametnim tetovažama zahtijeva pažljiv odabir optoelektronskih komponenti, kao i razvoj efikasnih mehanizama za usmjeravanje i fokusiranje svjetlosnih zraka [7]. Trenutni izazovi uključuju ograničenu stabilnost nekih fotonaponskih materijala, potrebu za minijaturizacijom optičkih prijemnika, kao i optimizaciju energetske menadžmenta na samom uređaju. Ipak, uz kontinuirani napredak u nanotehnologiji i materijalima, OWPT se sve više pozicionira kao održiva i skalabilna opcija za napajanje slijedeće generacije nosivih biosenzora.



Slika 5. Napajanje pametne tetovaže laserski

Mikrotalasni prenos snage MPT (*Microwave wireless power transfer*) podrazumijeva slanje energije sa predajnika (TX) ka prijemniku (RX) putem mikrotalasa, najčešće u ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) frekventnim opsezima (2.45 GHz, 5.8 GHz).



Slika 6. Mikrotalasni prenos snage u WBAN

Predajnik generiše EM talase iz mikrotalasnog opsega čiju energiju antena fokusira i emituje u obliku usmjerenog i fokusiranog energetskeg snopa. Suština je da se energija se ne raspršuje već se fokusira ka tačno određenom prijemniku. Prijemnik ovih talasa je Rectenna (*Rectifying antenna*) uređaj koji kombinuje antenu i ispravljač te prima mikrotalase i pretvara ih u jednosmjernu struju (DC) kojom se napaja elektronika u tetovaži. Razvoj 5G tehnologija omogućio je formiranje energetskeg snopa željenih performansi koje se zahtijevaju za napajanje tetovaža malih dimenzija [4]. Izazovi koje prati implementacija ove tehnologije su:

- Bezbjednost korisnika: Zračenje mora biti u okviru dozvoljenih granica (npr. ICNIRP, FCC) da bi se sprečilo zagrijavanje tkiva.
- Efikasnost: Prenos snage brzo opada sa rastojanjem i gubi se u prisustvu prepreka, kao što su dijelovi tijela ili odeća.
- Precizno usmjeravanje: Potrebno je koristiti tehnologije poput beamforminga da bi se energija fokusirala na malu površinu (tetovažu).
- Minijaturizacija rectenni: Izrada efikasnih, fleksibilnih i ultra-tankih rectenna antena koje se mogu integrisati u tetovažu.

Induktivni prenos snage IPT (*Inductive Power Transfer*) spada u tehnike za neradijativni prenos snage i djeluje na malim rastojanjima. Energija se prenosi putem magnetnog polja koje se stvara između dvije zavojnice. Primarna zavojnica u predajniku je izvor energije a sekundarna fleksibilna zavojnica, koja služi kao predajnik, se nalazi u pametnoj tetovaži (Slika 7). Prijemnik može primati energiju samo na malim udaljenostima maksimalno od nekoliko cm. na ovim udaljenostima efikasnost prenosa energije je veoma velika, tipično 70-90% [9]. Međutim, kako bi se ostvarila zadovoljavajuća efikasnost zavojnice moraju biti u savršenom poravnanju. Čak i mali pomak u uglu ili razdaljini može značajno smanjiti efikasnost prenosa energije ili čak prekinuti napajanje i komunikaciju.



Slika 7. Induktivni prenos snage u WBAN

Induktivni prenos snage za WBAN tetovaže obično radi na niskim do srednjim frekvencijama, u opsegu od kiloherca (kHz) do nekoliko megaherca (MHz), u zavisnosti od aplikacije. Tipično se koriste opsezi:

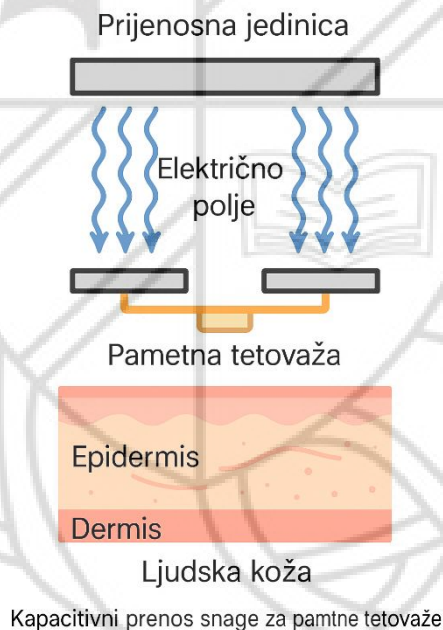
- 100-500 kHz – ukoliko je prioritet sigurnost tkiva tj. mala emisija potencijalno štetnog zračenja a duboka penetracija. Nedostaci su potreba za većim dimenzijama zavojnica i manja efikasnost pri većem opterećenju.
- 6.78 MHz - je standardizovana kroz AirFuel i ima veoma dobru efikasnost. Nedostatak je veće EM zračenje.

- 13.56 MHz – je standardizovani ISM opseg koji se koristi za NFC tehnologiju pa se jednostavno integrišu sa pametnim telefonima. Ovdje zavojnice mogu biti jako tanke i fleksibilne. Nedostaci su potreba za bliskim kontaktom ne više od 2 cm te ograničena količina energije za napajanje obično dovoljne za napajanje samo jednog senzora.

Kapacitivni prenos snage CPT (*Capacitive Power Transfer*) se zasniva na električnom polju koje se formira između dvije elektrode, pri čemu se energija prenosi kroz električni kapacitet. Za razliku od induktivnog prenosa, CPT ne zahtijeva zatvoreni magnetni tok, što ga čini pogodnim za tanke, površinske uređaje [16]. Snaga prenijeta kapacitivnim putem semože predstaviti izrazom:

$$P = \frac{1}{2} CV^2 f \quad (1)$$

Gdje je C električni kapacitet a V napon između elektroda, dok je f frekvencija prenosa signala. Ključni izazovi ovog načina napajanja su strogi zahtjevi za stabilnim kapacitetom te minimizacija gubitaka nastalih uslijed parazitskih kapaciteta i otpora tkiva. Na Slici 8 je prikazan princip rada ovog načina prenosa energije. Elektrode ovog kapacitivnog sistema su: Aktivne elektrode koje se povezuju sa izvorom energije (npr. napajanje iz bežičnog uređaja) te pasivne elektrode koje sprovode energiju prema prijemnicima ili uređajima integrisanim u tetovažu. Materijali za elektrode su obično lagani, fleksibilni i biokompatibilni, poput grafena, srebra ili drugih provodnih materijala koji mogu izdržati kontakt s kožom i omogućiti efikasan prenos energije. Dielektrički materijal omogućava skladištenje energije u električnom polju bez provođenja struje a u ovom slučaju to je ljudska koža.



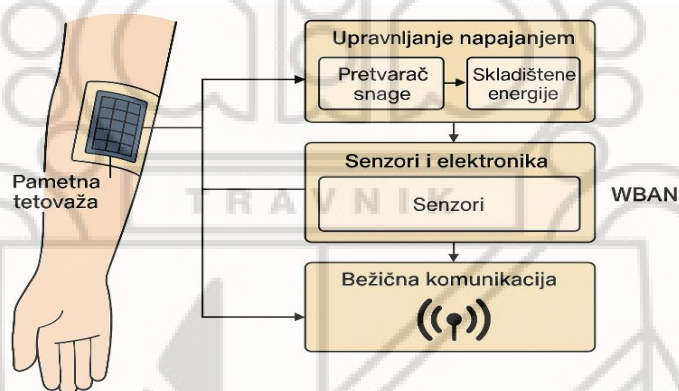
Slika 8. Kapacitivni prenos snage u WBAN

Efikasnost kapacitivnog prenosa je 60-80% i veća je što su elektrode međusobno bliže tako da sistem funkcioniše samo na malim razdaljinama od nekoliko cm. Koža ima nisku dielektričnu konstantu u poređenju sa sintetičkim materijalima i nije dobar dielektrik. Značajan uticaj na performanse ima znojenje tijela. Koža je nejednaka u svojoj strukturi i električnim karakteristikama pa stoga ni prenos energije nije potpuno konzistentan. Takođe, moguća je pojava elektromagnetne interferencije sa drugim uređajima u blizini, kao što su mobilni telefoni, bežični uređaji i različiti medicinski aparati [14].

2.2.SOLARNO NAPAJANJE

Sunčeva energija je najzastupljeniji izvor energije u prirodi i logično je da se koristi svuda gdje je to moguće i isplativo. Napredak u razvoju fleksibilnih i transparentnih solarnih ćelija omogućava njihovu integraciju u kožne tetovaže. Ove ćelije mogu da rade pri slabom osvjetljenju i u zatvorenim prostorima. Efikasnost konverzije, debljina, fleksibilnost i biokompatibilnost su ključni faktori za izbor tehnologije.

U zavisnosti od toga kako su solarne ćelije optimizovane, raspoloživa gustina snage fotonaponske (PV) može varirati od 100 mW/cm^2 na sunčevoj svjetlosti do manje od $500 \mu\text{W/cm}^2$ u zatvorenom prostoru [11]. Kako bi solarne ćelije intergrirane u tetovaže bile funkcionalne i efikasne na koži, moraju biti tanke (debljine ispod $50 \mu\text{m}$), fleksibilne i otporne na znoj, pokrete i UV zračenje.



Slika 9. Solarno napajanje pametne tetovaže u WBAN

Međutim, nedostaci i rizici koje nosi ovaj način napajanja su brojni [3]:

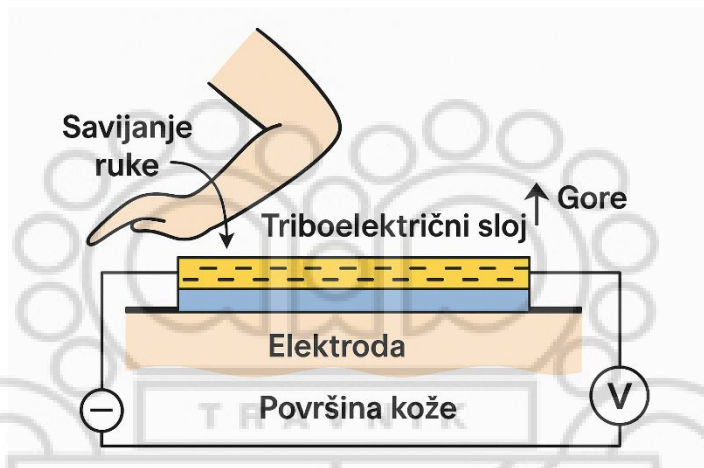
- Funkcionalnost solarnih ćelija zavisi od osvjetljenja, pa efikasnost značajno opada u zatvorenim prostorima, noću, ili kada su pokrivena odjećom.
- Solarne ćelije mogu da se oštete usled znojenja, pokreta kože, trenja sa odjećom ili prilikom istezanja kože.
- Potrebna je pažljiva integracija solarnih ćelija sa tetovažom, senzorskim sistemom i komponentama za upravljanje energijom (npr. pretvarači i skladištenje).
- Organske i perovskitne solarne ćelije imaju kraći životni vijek i brže se degradiraju pod utjecajem UV zračenja, temperature i vlage.
- Neki materijali korišćeni u proizvodnji solarnih ćelija (npr. teški metali u perovskitima) mogu biti toksični ako dođe do kontakta sa kožom.

2.3.ENERGIJA IZ TIJELA – BIOMATERIJALNI IZVORI

Biomaterijalni izvori energije su inovativna rešenja koja koriste biološke ili biohemijske procese u tijelu da generišu električnu energiju za napajanje pametnih tetovaža. Ovaj tip napajanja omogućava tetovažama da funkcionišu bez potrebe za spoljnim napajanjem, što ih čini vrlo praktičnim za dugotrajno korišćenje [6]. Energiju je moguće crpiti iz različitih fizioloških fenomena koji se dešavaju unutar ljudskog tijela.

Jedna od tehnika sa najboljom perspektivom su Bio-gorivne ćelije (*Biofuel Cells*) koje koriste ljudski znoj. Glavna funkcija znoja na koži je formiranje zaštitne barijere koja prekriva kožu i sprečava dehidraciju. Znoj se može iskoristiti za napajanje biobaterija gdje anoda baterije sadrži enzim koji uklanja elektrone iz laktata u znoju, a katoda sadrži molekule koji prihvataju slobodne elektrone. Ovakve baterije koriste obnovljiv izvor energije (ljudski znoj) i veoma brzo se dopunjavaju [13].

Triboelektrični nanogeneratori (TENG) koriste mehaničke pokrete (poput savijanja kože, trenja odeće o telo ili pokreta mišića) za generisanje električne energije na osnovu triboelektričnog efekta i elektrostatike (Slika 10). Mogu se koristiti i tokom mirovanja (ako postoje bar mikropokreti) i veoma su lagani i neinvazivni. Nedostaci su potreba za stalnim pokretima, pulsno generisanje energije i složenost pri pretvaranju neregularnog signala u stabilan napon [20].



Slika 10. Princip rada triboelektričnog nanogeneratora

Termoelektrični generatori (TEG) su uređaji koji direktno pretvaraju temperaturni gradijent u električnu energiju. TEG koristi razliku između temperature kože (oko 32–37 °C) i ambijentalne temperature (obično niža) kako bi generisao električnu energiju potrebnu za napajanje pametne tetovaže [18]. Ovaj princip ne zahtijeva pokrete pacijenta i aktivan je neprekidno. Sistem lošije radi u ljetnim danima kada se temperature gotovo izjednače, materijali koji se primjenjuju su relativno skupi i krhki.

ZAKLJUČAK

U radu su predstavljeni alternativni načini napajanja senzorskih čvorova u WBAN mrežama realizovanih u formi pametnih tetovaža. Klasično napajanje senzora putem baterije ograničenog kapaciteta je u mnogome nepraktično u WBAN mrežama a nema ni dobru energetska efikasnost. Jasno je da razvoj epidermalne elektronike nameće inovativna rješenja koja će doprinijeti daljem razvoju IoMT sistema čije domete možemo samo da naslutimo. Prikazane su neke od tehnika koje u ovom trenutku razvoja najviše obećavaju. Opisani su principi rada, prednosti i nedostaci, svake od njih. Teško je predložiti neko od rješenja u ovoj fazi. Pametne tetovaže su u tehnološkom povoju a dalji napredak će sam da nametne puteve daljeg razvoja.

LITERATURA

- [1] Altini M. et al. (2011.) "October. An ECG patch combining a customized ultra-low-power ECG SoC with Bluetooth low energy for long term ambulatory monitoring," Proc. of the 2nd Conf. on Wireless Health, p. 15
- [2] Buurman B. et al. (2020.), "Low-power wide-area networks: design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges", IEEE Access 8, pp.17179–17220
- [3] Chen H., Hou Y., Yang H. (2015). "Photovoltaic technologies for buildings: A brief review", Energy Procedia, 103, 135–138.
- [4] Costanzo, A., Masotti, D. (2017.) "Energizing 5G: Near-and far-field wireless energy and data transfer as an enabling technology for the 5G IoT". IEEE Microw. Mag. 18, 125–136.
- [5] Dong J. et al. (2024.), „Breathable and stretchable epidermal electronics for health management: recent advances and challenges“ Adv. Mater. 2024, 36, 2409071
- [6] Escalona-Villalpando R.A. et al (2019) "A complete tattoo-based wireless biofuel cell using lactate directly from sweat as fuel", J. Phys.: Conf. Ser. 1407 012028
- [7] Haydaroglu I, Mutlu S, (2015.), "Optical power delivery and data transmission in a wireless and batteryless microsystem using a single light emitting diode", J Microelectromech Syst, 24(1):155-165.
- [8] Heydarishahreza N. et al. (2020.), "Wireless sensor networks fundamentals: a review," 11th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), pp. 1–7
- [9] Jawad A.M. et al. (2017.) "Opportunities and challenges for near-field wireless power transfer: A review." Energies 10.7: 1022.
- [10] Jeong J. W. et al. Capacitive epidermal electronics for electrically safe, long-term electrophysiological measurements. Adv. Healthc. Mater. 3, 642–648 (2014).
- [11] Lechêne B.P. et al. (2016) "Organic solar cells and fully printed super-capacitors optimized for indoor light energy harvesting", Arias, Nano Energy, 26, 631.
- [12] Mohsan S. A. H., Qian H., Amyad H., (2023.) "A comprehensive review of optical wireless power transfer technology", Front Inform Technol Electron Eng 24(6):767-800
- [13] Mangiola S. (2014.), "Temporary Tattoo Sensors Create Sweat-Fueled Biobatteries", <https://www.electronicdesign.com/>, (Pristup 17.3.2025.)
- [14] Naveed S. et al. (2023.) "Flexible planar capacitive devices for hydration and sweat sensing", Flexible and Printed Electronics, 8, 2, (025009)
- [15] Ray, T. R., et al. (2019), "Bio-integrated wearable systems: a comprehensive review", Chemical Reviews, 119(8), 5461-5533
- [16] Sample, A. et al. (2013). "Capacitive power transfer for wearable sensors". IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.
- [17] Shukla, D. A. (2022). Design and construction of a reliable wireless power transfer system for an embedded device: With emphasis on industrial applications., Degree Project in Electrical Engineering Second Cycle, KTH, Stockholm
- [18] Tian R. (2019), "Body Heat Powers Future Electronic Skins", Future Energy, Volume 3, pp. 1399-1403
- [19] Williams N.X., Franklin A.D., (2020.), "Electronic Tattoos: A Promising Approach to Real-time Theragnostics", J. Dermatol. Skin Sci. 2, 5–16.
- [20] Wong T.H. et al, (2022), "Triboelectric nanogenerator tattoos enabled by epidermal electronic technologies", Advanced Functional Materials 32.15
- [21] Yanyan L. et al. (2024.), „Recent Advances Stretchable and Permeable Electrodes for Epidermal Electronics“, Adv. Sensor Res. 2024, 3