

# Mreže sa bežičnim napajanjem u ivičnom računarstvu

NEDA I. BABIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

ORCID: 0009-0007-3710-6983

BRANKA D. MIKAVICA, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0003-3206-5098

MIRJANA D. STOJANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0003-1073-5804

ALEKSANDRA M. KOSTIĆ-LJUBISAVLJEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

ORCID: 0000-0002-7101-3023

Pregledni rad

UDC: 621.39:004.384

DOI: 10.5937/tehnika2502185B

*Integracija bežičnog prenosa energije, WPT (Wireless Power Transfer) i računarstva u ivičnom delu mobilne mreže, MEC (Mobile Edge Computing) omogućila je razvoj MEC mreže sa bežičnim napajanjem, WPMEC (Wireless Powered Mobile Edge Computing), koja se smatra ključnom za održivost sistema industrijskog Interneta stvari, IIoT (Industrial Internet of Things). Primarni cilj WPMEC je unapređenje računarskih kapaciteta mobilnih uređaja i kompenzacija ograničenja njihovih baterija. WPMEC sistem čine energetske predajnici, mobilni uređaji i edge serveri koji formiraju zatvorenu petlju. Usled dinamičnosti u mreži, ograničenog trajanja baterije i polu-dupleksnog načina rada mobilnih uređaja, istovremeno rešavanje problema premeštanja računarskih zadataka na MEC server i alokacije resursa u MEC mrežama sa bežičnim napajanjem je veoma složeno. U ovom radu, dat je pregled osnovnih karakteristika MEC mreža sa bežičnim napajanjem. Analizirani su najznačajniji parametri za izgradnju arhitekture WPMEC. Prikazani su neki modeli za alokaciju resursa i identifikovani su ključni izazovi u njihovoj primeni.*

**Ključne reči:** mobilno ivično računarstvo, MEC mreže sa bežičnim napajanjem, Industrijski Internet stvari, bežični prenos energije, arhitektura, prikupljanje energije

## 1. UVOD

Industrijski Internet stvari, IIoT (Industrial Internet of Things) obuhvata širok spektar industrijskih uređaja povezanih putem komunikacionih tehnologija koje omogućavaju naprednu analizu podataka, doprinoseći postizanju izuzetnog nivoa efikasnosti, produktivnosti i unapređenju performansi. Kako bi se odgovorilo na izazove u pogledu ograničenih računarskih kapaciteta i energije bežičnih uređaja, stvaraju se novi poslovni modeli sa fokusom na računarstvo u ivičnom delu mobilne mreže, MEC (Mobile Edge Computing)

i tehnologije bežičnog prenosa energije, WPT (Wireless Power Transfer).

MEC omogućava obradu podataka bliže krajnjim korisnicima, smanjujući kašnjenje i rasterećujući centralizovane cloud sisteme. WPT, s druge strane, omogućava kontinuirano napajanje mobilnih uređaja putem radio signala. Kombinacijom ove dve tehnologije nastaje WPMEC (Wireless Powered Mobile Edge Computing), koji integriše energetske, komunikacione i računarske resurse radi optimizacije performansi mreže.

WPMEC mreže donose brojne prednosti u optimizaciji energetske efikasnosti i iskorišćavanju računarskih resursa, ali istovremeno postavljaju niz izazova koje je neophodno rešiti, kako bi se stekli uslovi za njihovu širu primenu. Ključni izazovi uključuju efikasnu alokaciju resursa u dinamičnim mrežnim uslo-

---

Adresa autora: Neda Babić, Univerzitet u Beogradu,  
Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305

e-mail: nedababic2000@gmail.com

Rad primljen: 28.03.2025.

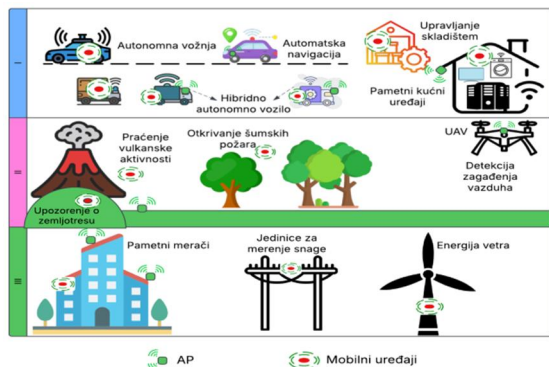
Rad prihvaćen: 05.04.2025.

vima, smanjenje kašnjenja u obradi zadataka, optimizaciju prenosa energije i podataka, kao i rešavanje problema privatnosti i bezbednosti. Takođe, nepredvidljivost radio-kanala i energetska ograničenja uređaja otežavaju ostvarivanje stabilnih performansi u realnim uslovima. Ovi izazovi zahtevaju razvoj naprednih algoritama i optimizacionih tehnika kako bi se obezbedila pouzdana i efikasna implementacija WPMEC mreža.

Ovaj rad je organizovan na sledeći način: nakon uvoda, u prvom poglavlju predstavljen je osnovni model MEC mreže sa bežičnim napajanjem (WPMEC) i tri kategorije u kojima se WPMEC koristi. Drugo poglavlje obuhvata arhitekturu, kao i ključne parametre koji se koriste u kontekstu WPMEC. Treće poglavlje se bavi modelima za premeštanje obrade zadataka i alokaciju resursa, kako bi se rešili ključni problemi u WPMEC mrežama. Četvrto poglavlje obuhvata tehnološke izazove u oblasti WPMEC. Konačno, u petom poglavlju data su zaključna razmatranja.

## 2. ARHITEKTURA MEC MREŽA SA BEŽIČNIM NAPAJANJEM

WPMEC predstavlja inovativno rešenje koje integriše WPT i MEC tehnologije, omogućavajući mobilnim uređajima da obavljaju složenije računarske zadatke uz istovremeno rešavanje problema nedostatka energije. Tradicionalna WPMEC arhitektura najčešće se sastoji od edge servera, mobilnih uređaja i izvora energije (uključujući solarne panele, vetar i pristupne tačke sa RF predajnicima energije). Ti izvori energije služe za punjenje mobilnih uređaja i produženje njihovog vremena rada, dok edge serveri pružaju računarske resurse kako bi se poboljšale njihove performanse. Kao što je prikazano na slici 1, različiti scenariji u kojima se koristi WPMEC uglavnom obuhvataju tri kategorije.

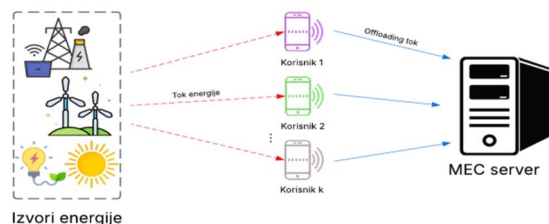


Slika 1 – Primene WPMEC

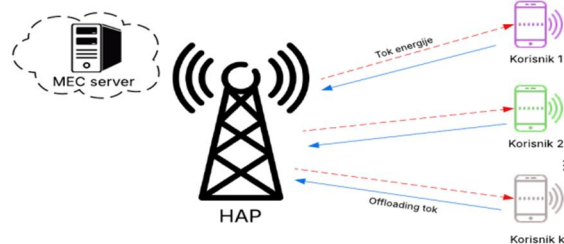
Prva kategorija sadrži IoT (Internet of Things) aplikacije, poput autonomne vožnje, automatske navigacije, pametnih kućnih uređaja i upravljanja skladištem. Druga kategorija obuhvata aplikacije u bežičnim senzorskim mrežama, poput detekcije šumskih

požara, detekcije toksičnih gasova, upozorenja na zemljotrese i praćenja vulkanske aktivnosti. Poslednja kategorija obuhvata aplikacije u pametnim mrežama, na primer pametne merače i praćenje proizvodnje. U ovim scenarijima, energetske predajnice, mobilni uređaji i edge serveri formiraju WPMEC mrežu, čime se ostvaruje zatvorena petlja emitovanja energije, prijema energije, kao i premeštanja i obrade zadataka.

Postoje dve osnovne realizacije arhitekture za WPMEC mreže sa više korisnika, a njihova osnovna razlika je da li se RF predajnik nalazi na istom mestu kao i MEC server [1]. Distribuirana arhitektura, prikazana na slici 2, sastoji se od izvora energije, k mobilnih uređaja i MEC servera. Centralizovana arhitektura prikazana na slici 3 sastoji se od HAP (Hybrid Access Point) i k mobilnih uređaja. Budući da su RF predajnik i MEC server integrisani na HAP, izvor energije HAP je pristupna tačka AP (Access Point). U opštem slučaju se polazi od pretpostavke da su svi mobilni uređaji, RF predajnici i MEC serveri opremljeni jednom antenom, pri čemu se bežični downlink koristi za WPT, a uplink se koristi za premeštanje obrade zadataka (offloading). Uvek se pretpostavlja da je podkanal između MEC servera i mobilnih uređaja kanal za blokiranje fedinga, tj. da je pojačanje kanala konstantno u jednom vremenskom bloku.



Slika 2 – Distribuirana arhitektura



Slika 3 – Centralizovana arhitektura

### 2.1. Modeli premeštanja računarskih zadataka na MEC server

U opštem slučaju, postoje dva modela koja se koriste za premeštanje obrade zadataka: binarni i delimični. Binarno premeštanje obrade zadataka omogućava da se računarski zadatak obrađuje ili lokalno, ili da se premešta na MEC server za obradu, uzimajući u obzir faktore kao što su ograničenja kašnjenja i broj zahteva za premeštanje. Različiti delovi jednog zadatka mogu imati različite zahteve u pogledu kašnjenja i obrade podataka, pa premeštanje celog zadatka na

MEC server povećava kašnjenje i troši resurse. Zbog toga je u [2] predložen model delimičnog premeštanja, koji deli zadatak na dva dela na osnovu faktora kao što su kašnjenje i količina obrade podataka, pri čemu se jedan deo koristi za lokalnu obradu podataka, a drugi za obradu na serveru. U praksi se, delimično premeštanje pokazalo korisnim za situacije koje zahtevaju kompleksnu analizu proizvodnje sa više paralelnih segmenata, dok je binarno premeštanje pogodno za manje zahtevne zadatke, kao što je praćenje okoline.

U WPMEC mreži sa više korisnika, mnogi korisnici premeštaju zadatke istovremeno. Da bi se podržalo više-korisničko premeštanje obrade zahteva, neki istraživači koriste tehnologiju multipleksiranja u vremenskom domenu, TDMA (Time Division Multiple Access), koja deli fazu premeštanja u više vremenskih slotova i izvršava premeštanje za različite korisnike u različitim vremenskim slotovima [3]. TDMA mehanizam omogućava zajedničku optimizaciju premeštanja i prikupljanja energije, što omogućava fleksibilne šeme alokacije vremena.

## 2.2. Ključni parametri

U WPMEC mrežama, operatori su odgovorni za postavljanje pristupnih tačaka sa RF predajnicima i postavljanje uređaja za bežično punjenje na mobilne uređaje, dok korisnici plaćaju operatorima za servis neprekidnog punjenja. Jedna od glavnih prednosti WPMEC u odnosu na MEC je što rešava problem malog kapaciteta baterije uređaja i visokih zahteva u pogledu performansi. Da bi se procenile performanse sistema WPMEC, neophodno je analizirati relevantne parametre iz perspektive i operatora i korisnika [4].

Parametri od značaja za operatore:

- Potrošnja energije: Ovaj parametar se odnosi na energiju koju troše AP, korisnici ili ceo sistem u jednom vremenskom slotu.
- Energetska efikasnost: Definisana je kao bit po džulu, odnosno broj računarskih bitova koji se mogu izvesti po jedinici džula u sistemu.
- Stopa uspešne obrade podataka: Definisana je kao odnos između podataka obrađenih od strane sistema i ukupno generisanih podataka.

Parametri od značaja za korisnike:

- Kašnjenje: Predstavlja prosečno vreme potrebno za uspešnu obradu podataka u sistemu tokom životnog ciklusa zadatka.
- Računarski bitovi: Parametar koji se iskazuje kao ukupan broj obrađenih bitova za sve korisnike u sistemu.
- Širina propusnog opsega: Predstavlja broj informacionih bitova koji se uspešno prenose po jedinici vremena. Različiti bežični kanali, odabir *edge* servera, način premeštanja obrade zadataka i

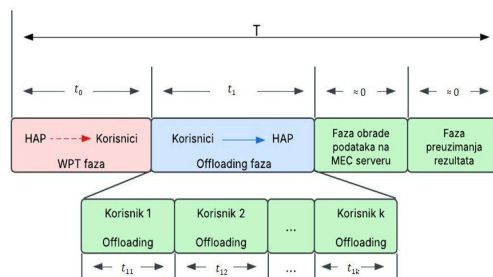
raspodela resursa sistema utiču na to koliko podataka sistem može preneti.

## 3. MODELI ZA ALOKACIJU RESURSA U MEC MREŽAMA SA BEŽIČNIM NAPAJANJEM

WPMEC zahteva usklađenost između obrade podataka, uspostavljanja komunikacija i prikupljanja energije. Cilj brojnih istraživanja je razvoj strategija za premeštanje i zajedničko upravljanje raspodelom energije, vremena i računarskih resursa. U cilju rešavanja ovih izazova, predloženo je nekoliko pristupa kako bi se razvile efikasne šeme za raspodelu resursa i strategije za premeštanje. Ovi pristupi uključuju strategije za alokaciju vremena, EB (Energy Beamforming) pristupe, IRS (Intelligent Reflecting Surface) pristupe, i SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) pristupe [1].

### 3.1. Strategije alokacije vremena

Ograničenja usled polu-dupleksnog rada hardvera onemogućavaju istovremeno izvršavanje procesa prikupljanja energije i procesa premeštanja. Dakle, neophodno je da se ti zadaci izvršavaju naizmenično. U literaturi se mogu naći brojne studije koje imaju za cilj pronalaženje načina za efikasnu alokaciju vremena tako da se optimizuju procesi prikupljanja energije i premeštanja [1]. Tipična vremenska podela sistema, uzimajući u obzir polu-dupleksna ograničenja hardvera, prikazana je na slici 4.



Slika 4- Vremenska podela sistema

Vremenski blok dužine  $T$  može se dalje podeliti na četiri faze: WPT faza  $t_0$ , faza premeštanja  $t_1$ , faza obrade podataka na MAC serveru i faza preuzimanja rezultata.

U literaturi koja se bavi WPMEC sistemima, često je razmatrano pitanje primene strategija alokacije vremena u cilju rešavanja problema polu-dupleksnog ograničenja hardvera. Na primer, neka od predloženih rešenja uključuju alokaciju vremena i donošenje odluka o premeštanju kroz optimizaciju energetske efikasnosti [5]. Uzimajući u obzir polu-dupleksni hardver mobilnog uređaja, pretpostavlja se da je HAP opremljen sa dve antene koje omogućavaju fizičko razdvajanje WPT i prijema zadataka za obradu. To znači da dok mobilni uređaji funkcionišu u polu-dupleksnom režimu, HAP radi u ful-dupleksnom režimu.

Suprotno pristupu koji koristi ful-dupleksni rad HAP, neki predloženi modeli vrše optimizaciju izbora strategije za premeštanje i alokacije vremena kada su i HAP i mobilni uređaji u polu-dupleksnim režimima rada [6]. Najpre se vrši alokacija vremena primenom metode binarnog pretraživanja, a zatim se metodom opadajućih koordinata optimizuje izbor strategije za premeštanje. Uz to, problem združene alokacije vremena i premeštanja zadataka uzima u obzir i vreme obrade na MEC serveru i vreme preuzimanja rezultata zadataka. U WPMEC sistemima, politike alokacije vremena često se koriste za alokaciju resursa i donošenje odluka za premeštanje [7]. Cilj tih politika je da omoguće razdvajanje u vremenskom domenu između WPT procesa i procesa premeštanja, kako bi se prevazišao problem polu-dupleksnog rada uređaja.

### 3.2. SWIPT pristupi

Polu-dupleksna ograničenja hardvera u WPMEC sistemu razdvajaju WPT procese i premeštanje. Tehnologija SWIPT se uvodi kako bi se poboljšala efikasnost iskorišćenja spektra, omogućavajući istovremeni bežični prenos energije i podataka. Za razliku od WPMEC sistema koji koriste tradicionalne komunikacione protokole nakon prikupljanja podataka, u [8], predložen je alternativni pristup baziran na SWIPT tehnologiji koja omogućava istovremeni prenos energije i podataka. Mobilni uređaji u ovom pristupu opremljeni su EH (Energy Harvesting) i ID (Information Decoding) modulima koji im omogućavaju da prikupe energiju iz SWIPT signala poslatog od strane HAP i dekodiraju informacije. U [9], razvijen je sistem za alokaciju resursa korisnicima, gde se vremenski okvir deli na više blokova, a svaki blok opslužuje samo jedan mobilni uređaj.

Pored pristupa koji koristi linearne EH modele, postoje i istraživanja koja se fokusiraju na proučavanje WPMEC sistema koristeći nelinearne EH modele i SWIPT metode. Tako, u [10], predlaže se koncept korišćenja više nelinearnih EH ispravljača u mobilnim uređajima kako bi se izbeglo zasićenje prilikom prikupljanja energije. Kada mobilni uređaj primi SWIPT signal, deo snage signala koristi se za ID, dok se preostali deo raspodeljuje na više EH ispravljača radi prikupljanja energije. Rešavanje optimizacionog problema, pri čemu je kašnjenje zadatka ključni parametar, postiže se primenom Lagranžove dualne metode. Osim nelinearnih EH modela i SWIPT metoda, u nekim studijama je razmatran problem nasumičnog dolaska zadataka [11]. Zbog promenljivosti uslova u kanalu i dinamičnog dolaska zadataka, proces odlučivanja Markova, MDP (Markov Decision Process) koristi se za formulisanje optimizacionog problema za minimizaciju potrošnje energije sistema. Da bi se efikasno rešio ovaj problem, razvijen je i inteligentni

algoritam za premeštanje zasnovan na DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient), koji može da se nosi sa diskretnim i kontinuiranim stanjima.

Dizajn optimizacionih problema koji koriste SWIPT metodu uglavnom se zasniva na odlučivanju o premeštanju, ne uzimajući u obzir raspodelu ograničenog vremena za mobilne uređaje. Zbog toga je prilikom optimizacije raspodele snage važno rešiti problem između vremena potrebnog za WPT i vremena potrebnog za premeštanje [1].

### 3.3. IRS pristupi

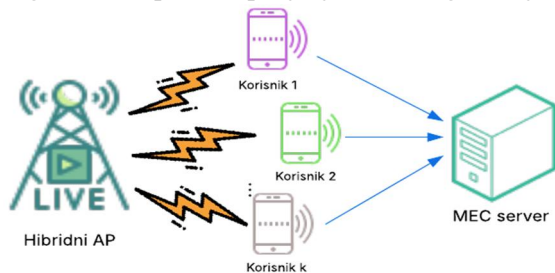
IRS je površina sačinjena od visokoreflektujućih elektromagnetnih materijala i smatra se novom tehnologijom koja je sposobna da rekonfiguriše WP-MEC okruženje kako bi se poboljšala efikasnost prenosa energije i podataka. IRS se može napraviti korišćenjem jednostavnih panela koji sadrže kontrolno kolo i više pasivnih reflektujućih elemenata koji su relativno jeftini. Dobitak IRS predstavlja kombinaciju dobitka virtualnog signala i dobitka signala koji se reflektuje od same IRS površine, a to se postiže podešavanjem amplitude i faze signala na svakom reflektujućem elementu [1]. IRS može pametno uspostaviti dodatnu komunikacionu vezu u realnom vremenu pomoću svog kontrolera. Kontroler IRS može prilagoditi koeficijent refleksije svakog elementa u realnom vremenu na osnovu povratnih informacija od HAP, čime se poboljšava efikasnost refleksije.

U [12], predložen je model zasnovan na IRS kako bi se izvršila istovremena optimizacija alokacije energije, vremena i računarskih resursa. IRS se koristi kao sredstvo za refleksiju signala, sastavljen od  $N$  reflektujućih elemenata, postavljenih blizu uređaja. Deo RF signala i zadaci koji se premeštaju se reflektuju od strane IRS, što omogućava efikasan prenos podataka do ciljane strane. Početni optimizacioni problem je podeljen na dva potproblema: 1) WPT i 2) alokaciju vremena i računarskih resursa. Ovi potproblemi se rešavaju korišćenjem SCA (Successive Convex Approximation) i metode unutrašnje tačke. Za razliku od [12], u [13] predložena je strategija zajedničke alokacije vremena, energije i računarskih resursa u cilju minimizacije potrošnje energije IRS i maksimizacije broja obrađenih računarskih bitova. Početni optimizacioni problem je nekonveksan nelinearan problem koji nije lako rešiti zbog međusobne zavisnosti optimizacionih promenljivih. Kako bi se olakšalo rešavanje, ovaj problem je podeljen na četiri potproblema korišćenjem BCD (Binary Coded Decimal) metode, odnosno: 1) alokaciju snage i vremena za premeštanje, 2) izbor frekvencije centralnih procesorskih jedinica, CPU (Central Processing Unit) mobilnih uređaja, 3) EB dizajn za downlink i 4) formiranje snopova za uplink.

Važno je uočiti da, u situacijama gde postoji mnogo IRS komponenti, potrošnja energije IRS postaje značajna, budući da je broj IRS proporcionalan efikasnosti prenosa. Takođe, zbog potrošnje energije IRS i fiksnih lokacija postavljanja postoji pojava „mrtvih tačaka“, odnosno mesta gde je refleksija signala od IRS-a oslabljena.

### 3.4. EB pristupi

Za razliku od prenosa podataka, proces prenosa energije u WPMEC sistemima ima veoma malu osetljivost na smetnje. Zbog sve veće potrebe za signalima visoke snage, neke studije predlažu primenu tehnika sa više antena, kao što je tehnika usmerenog snopa (EB), kako bi se poboljšala efikasnost prenosa energije [14]. Pošto EB ima strogu usmerenost, ometanje koje bi nastalo korišćenjem omnidirekcionih antena koje zrače u svim pravcima praktično ne postoji kod EB tehnologije. Na slici 5 prikazan je WPMEC sistem koji koristi EB pristup u WPT fazi gde AP može slati više energetskih snopova za punjenje mobilnog uređaja.



Slika 5 – EB pristup

Da bi se smanjila degradacija prenosa energije u WPT fazi, u [13], napravljen je okvir za WPMEC sistem zasnovan na EB pristupu. Umesto korišćenja strategije alokacije vremena, pretpostavljeno je da se WPT i premeštanje obavljaju istovremeno u ortogonalnim opsezima. EB, frekvencija CPU i broj prenesenih bitova se zajedno optimizuju kako bi se minimizirala potrošnja energije AP. Za razliku od statičkog okruženja koje je bilo razmatrano u [13], istraživanja su proširena na WPMEC sistem uz pomoć EB pristupa i sa dinamičkim dolascima zahteva za obradu zadataka [15]. Tako, pretpostavljeno je da znanje o CSI/TSI (Time-State Information) nije unapred poznato, pa se WPT i premeštanje obavljaju istovremeno na međusobno ortogonalnim frekvencijskim opsezima. Najpre se radi na dobijanju rešenja u realnom vremenu kada su informacije o stanju kanala (CSI/TSI) potpuno poznate, a zatim se istražuje šema alokacije resursa u realnom vremenu zasnovana na kliznom prozoru sa poznatim prošlim CSI/TSI.

U opštem slučaju, u WPMEC sistemu koji koristi EB metodu, mikrotalasni signal koji se koristi za prenos energije ima veći nivo od uobičajenog RF signala, što može predstavljati rizik po zdravlje ljudi zbog intenziteta zračenja. Da bi se smanjio taj rizik,

obećavajuće rešenje može biti implementacija distribuiranog sistema antena [1]. Ovaj sistem koristi više antena postavljenih na različitim lokacijama. Svaka antena emituje signal manjeg nivoa koji se širi u svim pravcima. Međutim, kombinovanjem signala emitovanih od strane više antena, može se postići usmeravanje signala u određenom pravcu. Ovo omogućava efikasniji prenos podataka bez izlaganja korisnika prevelikom mikrotalasnom zračenju.

## 4. IZAZOVI U PRIMENI MEC MREŽA SA BEŽIČNIM NAPAJANJEM

U različitim WPMEC okruženjima, postoje brojna važna pitanja koja zahtevaju dodatna istraživanja. Do sada su sumirana istraživanja koja se bave strategijama za alokaciju resursa i premeštanje u WPMEC sistemima. Ipak, još uvek postoje nerešeni problemi i izazovi koje je potrebno detaljnije analizirati.

### 4.1. Polu-dupleksna ograničenja hardvera

Kod WPMEC sistema koji koriste WPT tehnologiju za napajanje mobilnih uređaja, prikupljanje RF energije i podaci o premeštanju razdvajaju se u vremenskom domenu zbog polu-dupleksnog ograničenja hardvera [16]. Zato je potrebna pravilna raspodela resursa i vremensko planiranje za prikupljanje RF energije i premeštanje. Međutim, nailazi se na izazove pri pravilnom raspoređivanju vremena i resursa, jer WPT određuje premeštanje što dalje utiče na narednu fazu WPT. Dakle, pronalaženje rešenja za raspodelu resursa i premeštanje obrade zadataka u WPMEC sistemima postaje veoma složeno.

### 4.2. Dvostruki blizu-daleko efekti

Dvostruki blizu-daleko efekat često se javlja u okruženjima sa više korisnika, gde su i energetski predajnici i MEC serveri postavljeni na HAP. Ovo se posebno odnosi na situacije gde su neki korisnici udaljeni od HAP, dok su drugi bliže. Konkretno, korisnici koji su udaljeni od HAP prikupljaju manje energije u poređenju sa onima koji su blizu u istom vremenskom intervalu, i suočavaju se sa dužim vremenom potrebnim za premeštanje. To rezultuje neravnomernim prikupljanjem energije i premeštanjem među korisnicima, pri čemu performanse korisnika udaljenih od HAP ne mogu biti pouzdano obezbeđene [17]. Parametri sistema su uvek prilagođeni tako da koriste mobilne uređaje koji su bliži HAP, što često utiče na performanse uređaja koji su udaljeni. Ipak, bitno je omogućiti jednak odnos svih mobilnih uređaja u WPMEC sistemu.

### 4.3. Slabljenje signala

Slabljenje signala prilikom prenosa se dešava kada RF signal postaje slabiji kako se udaljava od svog izvora, a loši uslovi prenosa u komunikacionom kanalu

moгу dovesti do gubitka podataka. Kada se WPT tehnologija primenjuje u realnim okruženjima, slabljenje signala se mora uzeti u obzir. Da bi se rešio ovaj problem, predlaže se primena tehnika sa više antena poput tehnike usmerenog snopa (EB) i MIMO (Multi-Input Multi-Output) kako bi se unapredila energetska efikasnost i prenos podataka od tačke do tačke [1].

#### 4.4. Slučajnost nailazaka zahteva za obradu zadataka

Polazna pretpostavka u brojnim istraživanjima je da svaki zadatak stiže na svaki mobilni uređaj sa uniformnom raspodelom na početku vremenskog intervala i može biti rešen u tom vremenskom intervalu [18].

Optimizacija performansi zadatka sa strogo ograničenim kašnjenjem u kratkom vremenskom okviru olakšava proces premeštanja, ali može izazvati probleme u realnim aplikacijama. Kada se koriste aplikacije koje mogu tolerisati kašnjenje (na primer, rezervne kopije podataka), važno je uzeti u obzir model slučajnog dolaska zahteva za obradu zadataka kako bi se performanse sistema održale stabilnim.

## 5. ZAKLJUČAK

Značaj povezanih uređaja i njihovog uticaja na svakodnevni život je sve veći, dok nove tehnologije kao što su industrijski Internet stvari, pametne kuće, pametni gradovi, pametne fabrike i pametno merenje postaju sve prisutnije i već su deo stvarnosti. U ovom radu predstavljen je detaljan pregled WPMEC sistema kao perspektivnog rešenja za obezbeđivanje održivosti i dovoljnih računarskih kapaciteta. Pružen je sveobuhvatan pregled istraživanja o WPMEC, koji predstavlja integraciju MEC i WPT tehnologija. Predstavljani su osnovni modeli, postojeći problemi kao i najnovija istraživanja u vezi sa alokacijom resursa i premeštanjem obrade zadataka u WPMEC sistemima. Potencijal WPMEC mreža je ogroman, jer omogućavaju poboljšanje performansi mobilnih uređaja kroz efikasnije korišćenje resursa i bežičnog prenosa energije. Ova tehnologija može transformisati način na koji se upravlja podacima i energijom u IoT okruženju, otvarajući put ka pametnijim i održivim industrijskim rešenjima.

Ipak, ova tehnologija suočava se sa mnogim tehnološkim izazovima kao što su polu-dupleksna ograničenja hardvera, dvostruki blizu-daleko efekti, slabljenje signala prilikom prenosa i slučajnost nailazaka zahteva za obradu podataka. Rešenja ovih izazova zahtevaju napredne algoritme, efikasne strategije planiranja resursa i inovativne metode. Stoga, buduća istraživanja treba da se usmere ka razvijanju ovih tehnologija kako bi se postigla veća efikasnost i pouzdanost WPMEC mreža.

## LITERATURA

- [1] X. Wang *et al*, Wireless Powered Mobile Edge Computing Networks: A Survey, *ACM Comput. Surv.*, vol. 55, no. 13s, p. 263:1-263:37, doi: 10.1145/3579992, Jul. 2023.
- [2] Z. Ning, J. Huang, X. Wang, J. J. P. C. Rodrigues, and L. Guo, Mobile Edge Computing-Enabled Internet of Vehicles: Toward Energy-Efficient Scheduling, *IEEE Network*, vol. 33, no. 5, pp. 198–205, doi: 10.1109/MNET.2019.1800309, Sep. 2019.
- [3] B. Li, F. Si, W. Zhao, and H. Zhang, Wireless Powered Mobile Edge Computing With NOMA and User Cooperation, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 2, pp. 1957–1961, doi: 10.1109/TVT.2021.3051651, Feb. 2021.
- [4] T. Zhu, J. Li, Z. Cai, Y. Li, and H. Gao, Computation Scheduling for Wireless Powered Mobile Edge Computing Networks, in *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 596–605. doi: 10.1109/INFOCOM-41043.2020.9155418, Jul. 2020.
- [5] D. (TAI-T. Young, The Industrial Internet Reference Architecture.
- [6] Y. Sun, E. Uysal-Biyikoglu, R. Yates, C. E. Koksal, and N. B. Shroff, Update or wait: How to keep your data fresh,” in *IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1–9. doi: 10.1109/INFOCOM.2016.7524524, Apr. 2016.
- [7] J. Liu, K. Xiong, D. W. K. Ng, P. Fan, Z. Zhong, and K. B. Letaief, Max-Min Energy Balance in Wireless-Powered Hierarchical Fog-Cloud Computing Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 11, pp. 7064–7080, doi: 10.1109/TWC.2020.3007805, Nov. 2020.
- [8] H. Zheng, K. Xiong, P. Fan, Z. Zhong, and K. B. Letaief, Fog-Assisted Multiuser SWIPT Networks: Local Computing or Offloading, *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 5246–5264, doi: 10.1109/JIOT.2019.2899458, Jun. 2019.
- [9] J. Fu, J. Hua, J. Wen, K. Zhou, J. Li, and B. Sheng, Optimization of Achievable Rate in the Multiuser Satellite IoT System With SWIPT and MEC, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 3, pp. 2072–2080, doi: 10.1109/TII.2020.2985157, Mar. 2021.
- [10] J. Park, S. Solanki, S. Baek, and I. Lee, “Latency Minimization for Wireless Powered Mobile Edge Computing Networks With Nonlinear Rectifiers,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 8, pp. 8320–8324, doi: 10.1109/TVT.2021.3093630, Aug. 2021.
- [11] C. Wan, S. Guo, J. He, G. Liu, and P. Zhou, “iCOS: A Deep Reinforcement Learning Scheme for Wireless-Charged MEC Networks,” *IEEE Trans-*

- actions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 7, pp. 7739–7750, doi: 10.1109/TVT.2022.3166973, Jul. 2022.
- [12] T. Bai, C. Pan, H. Ren, Y. Deng, M. ElKashlan, and A. Nallanathan, Resource Allocation for Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Powered Mobile Edge Computing in OFDM Systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 8, pp. 5389–5407, doi: 10.1109/TWC.2021.3067709, Aug. 2021.
- [13] S. Mao *et al*, Computation Rate Maximization for Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Powered Mobile Edge Computing Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 10, pp. 10820–10831, doi: 10.1109/TVT.2021.-3105270, Oct. 2021,.
- [14] F. Wang, J. Xu, and S. Cui, Optimal Energy Allocation and Task Offloading Policy for Wireless Powered Mobile Edge Computing Systems, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 4, pp. 2443–2459, doi: 10.1109/TWC.2020.2964765, Apr. 2020.
- [15] F. Wang, H. Xing, and J. Xu, Real-Time Resource Allocation for Wireless Powered Multiuser Mobile Edge Computing With Energy and Task Causality, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 11, pp. 7140–7155, doi: 10.1109-TCOMM.2020.-3011990, Nov. 2020.
- [16] S. Mao, J. Wu, L. Liu, D. Lan, and A. Taherkordi, Energy-Efficient Cooperative Communication and Computation for Wireless Powered Mobile-Edge Computing, *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 287–298, Mar. 2022, doi: 10.1109-/JSYST.2020.3020474.
- [17] P. S. Bouzinis, P. D. Diamantoulakis, L. Fan, and G. K. Karagiannidis, Pareto-Optimal Resource Allocation in Decentralized Wireless Powered Networks, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 2, pp. 1007–1020, doi: 10.1109/TCOMM.-2020.3029574, Feb. 2021.
- [18] S. Mao, S. Leng, S. Maharjan, and Y. Zhang, Energy Efficiency and Delay Tradeoff for Wireless Powered Mobile-Edge Computing Systems With Multi-Access Schemes, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 1855–1867, doi: 10.1109/TWC.2019.2959300, Mar. 2020.

## SUMMARY

### WIRELESS POWERED MOBILE EDGE COMPUTING NETWORKS

*The integration of Wireless Power Transfer (WPT) and Mobile Edge Computing (MEC) has enabled the development of Wireless Powered Mobile Edge Computing (WPMEC) networks, which are considered crucial for the sustainability of Industrial Internet of Things (IIoT) systems. The primary objective of WPMEC is to enhance the computational capabilities of mobile devices while compensating for their battery limitations. A WPMEC system consists of energy transmitters, mobile devices, and edge servers, forming a closed-loop structure. Due to network dynamics, limited battery life, and the half-duplex operation of mobile devices, the simultaneous resolution of computation offloading and resource allocation challenges in WPMEC networks is highly complex. This paper provides an overview of the fundamental characteristics of WPMEC networks. The key parameters for WPMEC architecture design are analyzed, several resource allocation models are presented, and critical challenges in their implementation are identified.*

**Key Words:** mobile edge computing, Wireless Powered Mobile Edge Computing, Industrial Internet of Things, Architecture, Energy harvesting