

PRIVATNE MOBILNE MREŽE I PRIMENE**PRIVATE MOBILE NETWORKS AND APPLICATIONS**Milica Milošević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je analiziran koncept privatnih mobilnih mreža koji sve više dobija na značaju sa novom generacijom mobilnih mreža i komunikacionih standarda namenjenih industrijskoj automatizaciji i projektovanju mrežnih servisa prilagođenih posebnim zahtevima korisnika. Predstavljeni su standardi namenjeni bežičnim komunikacijama i izazovi u projektovanju ovakvih sistema. Na kraju su diskutovani različiti scenariji primene i postojeća rešenja.

Ključne reči: Mobilne mreže, komunikacioni sistemi, mrežni servisi

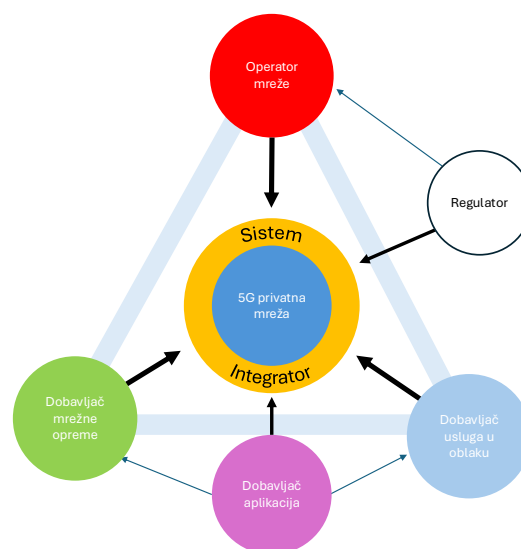
Abstract – The paper analyzes the concept of private mobile networks, which is gaining more and more importance with the new generation of mobile networks and communication standards intended for industrial automation and the design of network services adapted to the specific requirements of users. The standards intended for wireless communications and the reasons for designing such systems are presented. At the end, different application scenarios and existing solutions are discussed.

Keywords: Mobile networks, communication systems, network services

1. UVOD

Privatna mobilna mreža je namenska mrežna infrastruktura konstruisana za određenog korisnika ili grupu korisnika [1]. Ove mreže su dizajnirane da ponude pouzdanu i bezbednu bežičnu komunikaciju, istovremeno obezbeđujući potpunu kontrolu nad mrežnim podacima. Tokom godina, oni su postali sve prisutniji u različitim sektorima, uključujući proizvodnju, logistiku, komunalne usluge i javnu bezbednost, s obzirom na njihovu sposobnost da podrže poslovne i kritične aplikacije. Pojava dugoročne evolucije (engl. long term evolution, LTE) [2] i 5G tehnologija [3] podstakla je značajnu promenu paradigme u privatnim bežičnim mrežama. LTE integracija je donela poboljšane mogućnosti kao što su superioran kvalitet usluge (engl. quality of service, QoS), poboljšana skalabilnost i povećane brzine podataka. To je omogućilo privatnim mrežama da ispune širi spektar aplikacija koje zahtevaju veliki broj podataka, što je označilo značajnu prekretnicu u njihovoj evoluciji. Mreže pete generacije, 5G, predstavljaju najnoviji napredak u

evoluciji mobilnih komunikacionih sistema, sa mogućnostima da dodatno poboljšaju implementaciju i zastupljenost privatnih bežičnih mreža. Obećavajući malo vreme kašnjenja, velike brzine i mogućnosti presecanja mreže, dolazak 5G se smatra ključnim momentom u ovoj evoluciji. Trenutno se privatne 5G mreže [3] primenjuju u različitim sektorima. Proizvodni pogoni koji žele da iskoriste automatizovane sisteme, industrijski internet stvari (IIoT) [4] i bolnice koje imaju za cilj poboljšano daljinsko praćenje pacijenata samo su neki primeri ovog usvajanja. Ekosistem 5G mreže je složen i dinamičan. Uključuje više zainteresovanih strana koje pružaju različite proizvode i usluge. Slika 1 ilustruje glavne aktere koji utiču na rastuće tržište privatnih 5G mreža.



Slika 1. Akteri koji utiču na tržište privatnih 5G mreža

Mrežni operatori u ovom kontekstu uključuju:

- operatore mobilne mreže (engl. mobile network operator, MNO) koji vode sopstvenu mobilnu mrežu,
- operatore mobilne virtualne mreže (engl. mobile virtual network operator, MVNO), koji pružaju usluge mobilne komunikacije oslanjajući se na mrežu MNO,
- operatore servisa mobilne virtualne mreže (engl. mobile virtual network enabler, MVNE), koji omogućavaju pružanje usluga ili platformi sa dodatnom vrednošću na vrhu MVNO ili MNO mreže.

Za industrijske aplikacije, mogućnost dizajniranja mobilnih mreža kako bi se ispunili zahtevi pokrivenosti, performansi i bezbednosti kritičnih aplikacija (kao što su mobilni roboti, automatizovana vođena vozila i displeji na

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada pod mentorstvom dr Branka Brkljača, vanr. prof.

glavi sa naprednim mobilnim aplikacijama za radnike) je od suštinskog značaja za nove talas sajber-fizičkih sistema poznatih kao koncept industrije 4.0 [5].

2. BEŽIČNE PRIVATNE MREŽE

Trenutno su Wi-Fi bežične mreže najšire rasprostranjene privatne bežične mreže koje su našle primenu u poslovne svrhe i pri tome podržavaju i industrijske, multifunkcionalne i korporativne aplikacije. Koriste predefinisane nelicencirane frekvencijske opsege koji su opisani sledećim standardima: IEEE 802.11 Wireless LAN (WLAN poznat kao Wi-Fi), IEEE 802.15.1 koji je osnova za Bluetooth bežičnu komunikaciju, i IEEE 802.15.4 koji pokriva bežičnu kontrolu procesa koji koriste industrijski standard ISA 100.11a, WirelessHART, ZigBee protokol. Wi-Fi je dizajniran po principu da postoji jezgro sistema i više pristupnih tačaka (engl. access point, AP). Jezgro sistema je bežični LAN (engl. local area network) kontroler koji upravlja elementima sistema kao što su mobilnost, bezbednost, QoS i alokacija radio resursa, putem definisanih operativnih pravila. Pristupne tačke služe za povezivanje bežičnih uređaja na WLAN mrežu i podržavaju funkcije nižeg nivoa kao što su: engl. beacon handling, engl. client handshakes i engl. media access layer control encryption. Na ovakve sisteme i kvalitet implementiranih servisa značajan uticaj mogu imati smetnje i slabljenja, što za posledicu ima da njihov učinak može da varira u zavisnosti od udaljenosti između uređaja i pristupne tačke. Navedeno je i jedan od osnovnih nedostataka privatnih bežičnih mreža zasnovanih na WLAN tehnologijama kao što je Wi-Fi.

Napredna i robusna rešenja bežičnih privatnih bežičnih mreža pojavila su se sa implementacijom 4G/LTE i 5G komunikacionih tehnologija [6]. Istorija privatnih mobilnih mreža je duža i počinje sa korišćenjem tehnologija koje su trebale da obezbede radio pokrivenost na različitim geografskim lokacijama. Takvi sistemi su se prvobitno oslanjali na zemaljske mobilne radio stanice (engl. land mobile radio systems, LMRS) i 2G tehnologije, dok su primene uglavnom obuhvatale automatizaciju sistema namenjenih funkcionisanju komunalnih usluga u gradovima, bezbednosnom i transportnom sektoru. Osnovni nedostatak ovih mreža bila je nedovoljna mogućnost skaliranja i adaptacije, što ih je činilo neprikladnim za implementaciju novih servisa i rastuće potrebe u različitim domenima primene.

Standard za bežičnu širokopojasnu komunikaciju četvrte generacije, 4G prvenstveno je korišćen za usluge mobilne telefonije, ali je takođe usvojen kao tehnološka osnova za privatne bežične mreže, posebno u oblastima gde povezivanje putem Wi-Fi nije bilo moguće, dovoljno pouzdano ili isplativo. Kao primeri ovakvih rešenja posebno se ističu tzv. privatne LTE kampus mreže koje garantuju specifične karakteristike koje su neophodne za moderne poslovne procese i inovativne aplikacije koje prate najnovije trendove u industriji. Osnovni razlozi za implementaciju privatne kampus mreže jesu:

- Zatvorenost – mreži kampusa ne može da se pristupi iz javne mreže
- Pokrivenost – kompanije mogu garantovati pokrivenost na proizvoljnoj geografskoj lokaciji ili u objektima, postavljanjem i održavanjem sopstvene 4G infrastrukture

- Kapacitet – kompanije mogu da u potpunosti i isključivo koriste raspoložive kapacitete. Oni mogu da konfigurisu propusni opseg uzlaznih i silaznih linkova namenjenih funkcionisanju različitih servisa, u skladu sa svojim specifičnim zahtevima za kapacitetom (na primer da podrže prenos višestrukih video tokova visoke rezolucije ili daljinskih merenja u realnom vremenu namenjenih analizama, upravljanja ili bezbednosnim aplikacijama.

- Sigurnost i kontrola – kompanije mogu same da definišu koji će korisnici koristiti mrežu, kako će resursi biti raspodeljeni po korisnicima ili aplikacijama kao i upravljanje njihovim prioritetom. Ako je potrebno, parametri u privatnoj LTE mreži takođe mogu da se prilagode kako bi se optimizovala pouzdanost i kašnjenje u izazovnim fizičkim okruženjima. Na taj način postižu se bolji uslovi za implementaciju različitih internih strategija za podizanje pouzdanosti i bezbednosti procesa koji se oslanjaju na implementiranu mrežnu infrastrukturu.

- Skalabilnost – privatne kampus mreže mogu da se prilagode različitim potrebama na generički i unifikovan način, odnosno podrže dodavanje novih korisnika, servisa i širenje (u meri u kojoj to dozvoljava inicijalno projektovani kapacitet jezgra mreže). Na taj način se izbegavaju dodatna ulaganja prilikom prilagođavanja infrastrukture različitim potrebama i promenama u industrijskim postrojenjima različite veličine.

- Pouzdanost – visoka pouzdanost sa niskom potrošnjom energije.

- IoT – privatne LTE mreže su dizajnirane za IoT komunikaciju i kritičnu kontrolnu signalizaciju.

Peta generacija mobilne tehnologije, 5G, dizajnirana je da poveća brzinu, smanji kašnjenje i poboljša fleksibilnost bežičnih usluga. Očekuje se da će primena 5G u implementaciji privatnih bežičnih mreža doprineti većoj zastupljenosti takvih sistema, pre svega kroz sposobnost 5G da podrži ogroman broj uređaja, što je čini idealnom za IoT aplikacije. Takođe, 5G donosi i mogućnost „sečenja mreže“ (engl. network slicing) [8], omogućavajući preduzećima i njihovim tehničkim službama da kreiraju više virtuelnih mreža unutar iste 5G mreže. Time se omogućava razdvajanje različitih korisnika i aplikacija, kao i optimizacija upotrebe raspoloživih resursa, a sve sa ciljem kako bi se ispunili specifični zahtevi različitih poslovnih i proizvodnih procesa.

Evolucija privatnih bežičnih mreža daleko je od kraja. Sa sve većom potražnjom za povezanim uređajima i IoT aplikacijama, očekuje se da će privatne bežične mreže postati još više integrisane u različite procese. Kako tehnologije kao što su rubno računarstvo (engl. edge computing), AI i IoT nastavljaju da se razvijaju, potencijalni slučajevi upotrebe privatnih bežičnih mreža se šire. Razvoj pametnih fabrika, inteligentnih transportnih sistema i pametnih gradova ukazuju na povećanu potrebu za pouzdanom, bezbednom i brzom vezom. Štaviše, regulatorne promene takođe utiču na evoluciju privatnih bežičnih mreža. Vlade širom sveta dodeljuju spektar za privatne mreže, ubrzavajući njihovu primenu i poboljšavajući njihov učinak.

3. PRIMENE PRIVATNIH 5G MREŽA

Privatna mreža pete generacije je namenska mobilna mreža sa poboljšanim komunikacionim karakteristikama, objedinjenom vezom, uslugama i prilagođenom bezbednošću unutar određene oblasti. Uzimajući u obzir prednosti i javnih i nejavnih 5G mreža, privatne 5G mreže našle su svoju primenu u industriji, poslovanju, komunalnim preduzećima i javnom sektoru [1]. Da bi podržali razvoj privatnih mobilnih mreža, 3GPP organizacija za standardizaciju mobilnih tehnologija je razvila koncept nejavnih mreža u 5G koji se sastoji od:

- Kontrole mreže (primene konfiguracije i kontrole koja nije moguća preko javnih mreža).

- Postizanja dovoljno malog kašnjenja za izvođenje vremenski kritičnih operacija.

- Garantovane pokrivenost u zatvorenom prostoru i unutar industrijskih kompleksa [4, 5] (u svim prostorijama, ako spoljno povezivanje nije potrebno, ili u čitavom fabričkom krugu, ako je u pitanju lokacija sa više objekata).

- Veće performanse (kako bi se industrijskim korisnicima pružile mogućnosti implementacije naprednijih servisa, ali i bolje kontrolisanje konfiguracije i kvaliteta usluga).

- Primena bezbednosti zasnovane na ulogama, pristupu, pozicijama i drugim kriterijumima specifičnim za potrebe pojedinih podsistema ili celog entiteta.

Tipične industrijske procesne i proizvodne aplikacije uključuju automatizaciju i kontrolu procesa, komunikaciju između kontrolera, agregaciju podataka senzora i lokalnu obradu za brzo preduzimanje odgovarajućih radnji, upravljanje imovinom, mobilne robote i upravljanje automatizovanim transpoterima (engl. automated guided vehicle, AGV).

Osnovni scenariji primene uključuju proizvodne pogone, rudnike, rečne i pomorske luke, aerodrome, komunalna preduzeća, železničku infrastrukturu [7], medijske kuće, zdravstvene službe [3]. Primene u proizvodnji se pre svega odnose na različite aspekte procesa, među kojima se ističu sledeći. Povećanje fleksibilnosti proizvodnih linija kroz lakšu i bržu rekonfiguraciju elemenata koja je moguća zahvaljujući činjenici da se povezivanje oslanja na bežičnu komunikaciju umesto žičane veze. Takođe, bolja pouzdanost i karakteristike 5G omogućavaju da se takvo umrežavanje odvija i u složenim uslovima okruženja i na distribuiranim prostornim lokacijama, što ne bi bilo moguće korišćenjem klasičnih bežičnih mreža u nelicenciranom opsegu. Ovakav način pouzdanog povezivanja omogućava i automatizovanu komunikaciju između mašina (engl. machine to machine, M2M komunikaciju), koja zahvaljujući malim kašnjenjima u 5G podržava integraciju senzora i mašina koji mogu biti proizvoljno pozicionirani unutar proizvodnog pogona. Primena AGV je takođe olakšana zahvaljujući velikom propusnom opsegu privatnih 5G mreža, koje omogućavaju prenos video tokova visoke rezolucije i upravljanje na osnovu njih u realnom vremenu. Povezivanje radnika je takođe jedan od važnih aspekata primene ovakvih sistema. Navedeno uključuje i mogućnosti primene pomoćnih sredstava kao što su proširena realnost i integraciju pametnih displeja i digitalnih asistenata koji olakšavaju izvođenje pojedinačnih operacija i bezbednost radnika.

Integracija svih podsistema korišćenjem privatnih 5G mreža otvara mogućnost za postizanje bolje logistike sa kraja na kraj proizvodnog lanca [9], posebno korišćenjem namenskih IIoT uređaja. Kao što je već ranije naglašeno, mogućnost namenske alokacije mrežnih resursa i efikasne adaptacije različitim korisnicima i aplikacijama kroz napredne koncepte virtualizacije mrežne infrastrukture [8] je takođe jedna od ključnih prednosti privatnih 5G mreža. Primene 5G privatnih mreža su moguće i u poljoprivredi [10], gde ovakvi sistemi mogu da predstavljaju pouzdanu alternativu satelitskom navođenju i drugim tipovima upravljanja autonomnim traktorima i priključnim mašinama.

4. SIGURNOST SERVISA I MREŽE

Sigurnost implementiranih servisa u okviru privatnih mobilnih mreža ima ključnu ulogu u odlučivanju korisnika za njihovu primenu i integraciju u postojeće procese. S obzirom da su u pitanju bežične tehnologije prisutni su različiti izazovi koji se mogu sažeti u sledeće zahteve prilikom projektovanja komunikacionog sistema:

- sigurnost komunikacije, obuhvata različite aspekte pristupnih tehnologija koji se tiču postizanja poverljivosti, autentifikacije, integriteta komunikacije i izbegavanja napada koji podrazumevaju presretanje komunikacije. Navedeno obuhvata i sigurnost komunikacije na aplikativnom nivou, koja je takođe obuhvaćena različitim 3GPP preporukama.

- bezbednost sa kraja na kraj, uključuje implementaciju različitih protokola na aplikativnom nivou kao što su SSH, TLS, SRTP, kada se podrazumeva da se mrežnoj infrastrukturi ne može u potpunosti verovati. Imajući u vidu potrebu za povezivanjem različitih uređaja, moguće je da u nekim slučajevima povezivanja na obodu mreže nije uvek moguće postići potpunu bezbednost sa kraja na kraj, što zahteva da se takvim elementima unutar privatne mreže veruje i njihova sigurnost obezbedi na drugi način.

- autorizacija unutar mreže i podsistema, podrazumeva praktičnu kontrolu pristupa koja će biti lako prilagodljiva i omogućiti distribuciju odgovarajućih prava na sve elemente unutar mreže. Odgovarajući kredencijali se mogu distribuirati kroz sisteme za autorizaciju ili fizičkim putem.

- otpornost na napade i zagušenja unutar mreže, treba da omogućiti neometano funkcionisanje sistema i u slučajevima kada bi broj zahteva i opterećenje resursa prevazišlo projektovane kapacitete mreže. Navedeno uključuje i projektovanje dovoljnih kapaciteta i redundantnih veza koje uz definisanje prioriteta i detekciju napada mogu razrešiti ovakve situacije.

- bezbedna saradnja i pristup spoljašnjim elementima trećih strana, podrazumeva komunikaciju koja je zaštićena i čiji integritet može biti proveren. Takav pristup bi trebao da bude ograničen, kako u pogledu vremenskog trajanja komunikacije, tako i u pogledu dodeljenih mrežnih resursa.

- sigurnosna podešavanja i politike, obuhvataju različite procedure kojima se garantuje predviđeno ponašanje sistema i u svakom trenutku omogućava praćenje stanja elemenata u privatnoj mobilnoj mreži. Implementacija navedenih zahteva omogućava i lakšu detekciju nepredviđenih situacija i potencijalnih propusta u

konfiguraciji i korišćenju mrežne infrastrukture, a time i potencijalnih upada u sistem.

U kontekstu prethodno opisanih zahteva, posebno se ističu napadi na privatne mobilne mreže koji mogu podrazumevati neku od tehnika karakterističnih za bežične komunikacije. Navedeno uključuje elektronsko ometanje (engl. jamming) komunikacije; presretanje ili praćenje postojeće komunikacije sa ciljem lažnog predstavljanja ili pasivne analize (engl. sniffing), krađu identiteta korisnika ili elemenata mreže (engl. spoofing) sa ciljem pridobijanja prava pristupa resursima mreže ili uvida u komunikaciju, pasivno praćenje komunikacije sa ciljem identifikacije informacionih sekvenci ili paketa koji dovode do određene akcije što omogućava izazivanje iste ponovnim slanjem paketa ili poruke, bez potrebe za dekodovanjem ili dešifrovanjem iste (engl. replay attack).

5. ZAKLJUČAK

U radu su razmatrane komunikacione tehnologije i standardi na kojima se zasniva projektovanje privatnih mobilnih mreža. Takođe su diskutovane i različite primene, sa osvrtom na karakteristike privatnih 5G mreža i bezbednosne zahteve koji se postavljaju prilikom projektovanja takve vrste bežičnih sistema.

Opšti zaključak je da neće postojati jedno tehničko rešenje za sve primene. Kada se danas bavimo ranim tržištem privatnih mobilnih mreža, fokus treba da bude na rešavanju potreba u konkretnom slučaju. Na taj način razmatrani scenario primene značajno utiče na izgled odgovarajućeg tehničkog rešenja. Takođe, 5G nije samo još jedna generacija mobilnih tehnologija, koja ima za cilj povećanje brzine mreže i protoka podataka. Privatne 5G mreže nedvosmisleno predstavljaju budućnost industrijskih bežičnih mreža u narednoj deceniji [6].

Navedeni pravac razvoja će se izvesno nastaviti i sa budućim 6G tehnologijama. Sa evolucijom industrije 4.0, preduzeća i javni sektor imaju snažan interes za postavljanje privatnih 5G mreža kako bi razvili sopstvene aplikacije za postizanje bolje efikasnosti i produktivnosti. Koncept privatnih mobilnih mreža je takođe uspešno demonstrirao implementaciju naprednih mrežnih funkcija kao što su engl. network slicing i engl. edge računarstvo, čime su stvoreni uslovi za efikasne primene u različitim domenima.

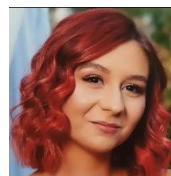
6. LITERATURA

- [1] Eswaran, S., Honnavalli, P. (2023). Private 5G networks: A survey on enabling technologies, deployment models, use cases and research directions. *Telecommunication Systems*, 82(1), 3-26.
- [2] Ferrus, R., & Sallent, O. (2014). Extending the LTE/LTE-A business case: Mission-and business-critical mobile broadband communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(3), 47-55.
- [3] Wen, M., Li, Q., Kim, K. J., López-Pérez, D., Dobre, O. A., Poor, H. V., Popovski, P., Tsiftsis, T. A. (2021). Private 5G networks: Concepts, architectures, and

research landscape. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 16(1), 7-25.

- [4] Brown, G., Principal, A. (2019). Private 5G mobile networks for industrial IoT. *Heavy Reading, White Paper, Qualcomm Inc*
- [5] Bajracharya, R., Shrestha, R., Jung, H. (2020). Future is unlicensed: Private 5G unlicensed network for connecting industries of future. *Sensors*, 20(10), 2774.
- [6] Aijaz, A. (2020). Private 5G: The future of industrial wireless. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 14(4), 136-145.
- [7] Mateus P. (2024). Implementation of 5G private networks in railway communications, master rad, Instituto Superior Técnico, Univerzitet u Lisabonu.
- [8] Bojović, Ž. (2024). *Application of Network Function Virtualization in Modern Computer Environments*. Now Publishers, Boston-Delft, ISBN: 978-1-63828-358-4.
- [9] Vitturi, S., Zunino, C., Sauter, T. (2019). Industrial communication systems and their future challenges: Next-generation Ethernet, IIoT, and 5G. *Proceedings of the IEEE*, 107(6), 944-961.
- [10] Heikkilä, M., Suomalainen, J., Saukko, O., Kippola, T., Lähetkangas, K., Koskela, P., ... & Posti, H. (2021). Unmanned agricultural tractors in private mobile networks. *Network*, 2(1), 1-20.

Kratka biografija:



Milica Milošević – rođena je u Novom Sadu 1996. god. Osnovne studije elektrotehnike i računarstva na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, studijski modul Informaciono-komunikacione tehnologije i obrada signala, završila je 2021. godine. Na istom fakultetu, u okviru master akademskih studija na studijskom programu Energetika, elektronika i telekomunikacije, modul Informaciono-komunikacione tehnologije, 2024. godine uspešno je odbranila master rad.

Email: mima.milosevic96@gmail.com.