

Premostitev tehnoloških razlik: Implementacija 5G tehnologije za doseg povezljivosti med obstoječimi in novimi napravami v proizvodnih sistemih

Miha PIPAN, Niko HERAKOVIČ
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

POVZETEK

Implementacija 5G tehnologije omogoča povezljivost med obstoječimi in novimi napravami v proizvodnih sistemih, ter prispeva k premagovanju tehnoloških razlik. V industrijskih okoljih 5G prinaša večjo fleksibilnost in agilnost sistemov, omogoča oddaljeno spremljanje delovanja naprav, optimizacijo logističnih procesov ter uvajanje pametnega vzdrževanja. Poleg tega podpira učinkovitejšo uporabo brezžičnih tehnologij, ki so ključne za sodobne proizvodne potrebe. Integracija starejših naprav in sistemov, ki pogosto niso prilagojeni za delovanje v sodobnih omrežjih, zahteva prilagoditve, kot so uporaba NAT in statičnih IP naslovov. Te prilagoditve omogočajo stabilno in zanesljivo komunikacijo prek 5G omrežja, kar odpira nove možnosti za njihovo vključitev v sodobne proizvodne procese. 5G tehnologija s svojo stabilnostjo in hitrostjo omogoča učinkovito povezovanje tudi teh sistemov, kar spodbuja večjo interoperabilnost in optimizacijo procesov.

1. UVOD

Da bi širše razumeli potencial komunikacijske tehnologije 5G, smo v laboratoriju LASIM izvedli teste z namenom ugotavljanja, ali je možno preko te tehnologije povezati starejšo in novejšo opremo. Uporabili smo različno industrijsko opremo, kot so industrijski roboti, kolaborativni roboti, pametna skladišča, pametne ročne montažne postaje in drugo opremo, kjer vsaka uporablja svoje komunikacijske protokole. Najprej smo izvedli analizo posameznih naprav glede fizične povezljivosti in katere komunikacijske protokole uporablja za komunikacijo. V naslednjem koraku smo definirali 5 korakov povezovanja teh naprav preko omrežja 5G in ga izvedli. To nam je dalo širši vpogled v potencial 5G tehnologije za industrijske aplikacije.

2. POTENCIAL 5G TEHNOLOGIJE V INDUSTRIJI

Procesi serijske proizvodnje so temeljnega pomena za učinkovito izdelavo različnih podsistemov in končnih izdelkov ter ponujajo velik potencial za nadaljnjo optimizacijo z uporabo tehnologije 5G. Sodobni proizvodni sistemi in procesi se morajo nenehno prilagajati in optimizirati, da bi dosegli največjo produktivnost. Napredek tehnologije 5G obljublja hiter in

zanesljiv prenos podatkov, kar lahko bistveno poveča operativno učinkovitost [1]. Izboljšanje agilnosti sistemov ostaja ključnega pomena za doseganje teh ciljev. Čeprav tehnologija 5G ponuja velik potencial zaradi svoje hitrosti, stabilnosti in nizke zakasnitve, njena trenutna uporaba na proizvodnih področjih še vedno ni dokončno razvita. Kljub temu stalni napredek različnih tehnologij na področju proizvodnih sistemov utira pot hitrejšim odzivom na dinamične zahteve trga in omogoča boljšo prilagodljivost proizvodnih procesov [2].

Pametno in predikativno vzdrževanje, kot je spremljanje zmogljivosti in stanja strojev v realnem času, bodo pomembno pridobile z razvojem tehnologije 5G. Čeprav celoten potencial 5G-podprtega pametnega vzdrževanja še ni popolnoma izkoriščen, bodo nadaljnji napredki na tem področju pomagali preprečiti nepričakovane okvare ter zmanjšati izpade opreme. Ker so obstoječa 4G in celo 5G omrežja še vedno prilagojena mobilnim uporabnikom, ki potrebujejo višje hitrosti prenosa kot nalaganja, bo potrebno uvajanje tehnologij za razrez oz. »slicing« 5G omrežij, da se zagotovi enakovredna hitrost prenosa in nalaganja ter hitri odzivni časi [3].

Za zunanje in notranje logistične procese predstavlja integracija tehnologij, kot so avtomatsko vodena vozila (AGV) in avtonomni mobilni roboti (AMR), priložnost za izkoriščanje obstoječe povezovalne infrastrukture ter pripravo na prihodnje izboljšave s tehnologijo 5G. Z razširitvijo in zrelostjo tehnologije 5G lahko pričakujemo izboljšanje učinkovitosti tovarnega prometa. Numerični testi, izvedeni za nadzor AGV-jev ali AMR-jev v realnem času z uporabo zasebnih 5G omrežij, so pokazali, da so potrebne nadaljnje študije o stroškovni učinkovitosti uvedbe tehnologije 5G. Poleg tega je potrebno primerjati to tehnologijo z Wi-Fi, da se omogoči celovita ocena [4].

Skladiščne operacije, zlasti tiste, ki temeljijo na sledenju izdelkom v realnem času, bodo z razvojem tehnologije 5G pridobile pomembne koristi. Čeprav se široka uvedba rešitev za nadzor zalog, ki temeljijo na 5G, še vedno razvija, obstoječi razvoj nakazuje velik potencial za izboljšave. Pregled literature opisuje različne perspektivne aplikacije tehnologije 5G v notranji in zunanji logistiki, ki ponujajo številne priložnosti za izboljšanje materialnih in informacijskih tokov ter povečanje učinkovitosti, inteligentnosti in trajnosti logističnih ter dobavnih verig. Kljub temu industrijska uporaba tehnologije 5G v logističnem sektorju ostaja omejena [5].

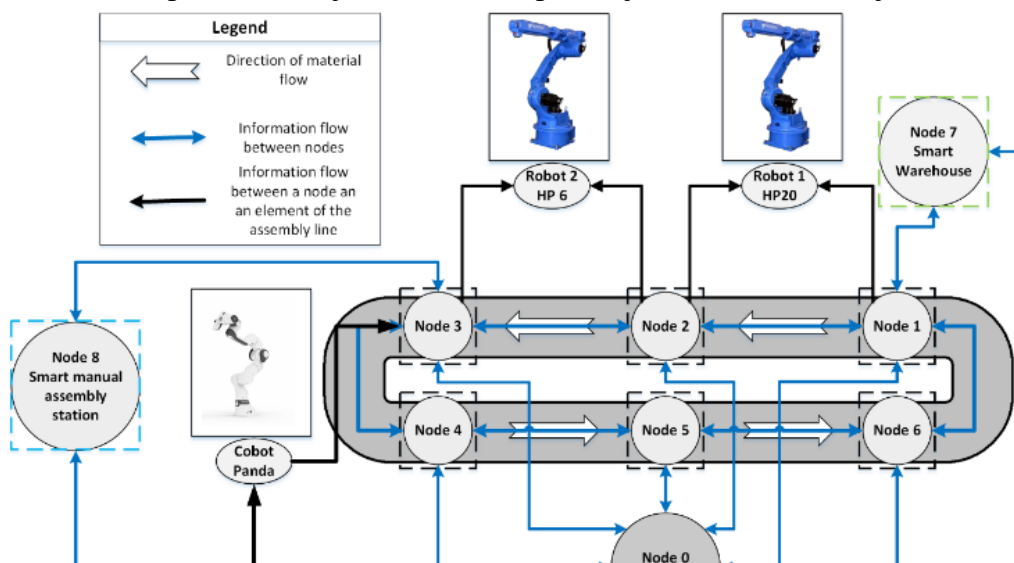
Vodenje delavcev v realnem času in sledenje mobilnim delovnim procesom, je trenutno

omejeno zaradi težav z industrijskim Wi-Fijem ter LTE omrežjem. Vendar stalni napredki v rešitvah povezljivosti preko 5G tehnologije obetajo povečanje učinkovitosti in natančnosti proizvodnih procesov [6].

Stabilnost in hitrost povezljivosti, ki ju zagotavlja tehnologija 5G, postajata vse pomembnejši za poslovne operacije. Čeprav izzivi pri doseganju celovite pokritosti in zanesljivosti ostajajo, se pričakuje, da bodo stalna prizadevanja za razširitev in izboljšanje infrastrukture 5G prispevala k povečanju konkurenčnosti in agilnosti na trgu. Trenutno se večina raziskovalnih prizadevanj nahaja v začetnih fazah, zato so za doseganje naprednih ciljev potrebne nadaljnje raziskave in predvsem razvoj 5G omrežne baze orpeme. Možne prihodnje raziskovalne usmeritve vključujejo: (1) razvoj operativnih mehanizmov digitalnega dvojčka v proizvodnji, (2) metode za upravljanje in analizo masovnih podatkov ter (3) integrirano uporabo robnega in oblachnega računalništva v proizvodnji, podprto s tehnologijo 5G [7].

3. UPORABLJENA OPREMA

Z namenom, da bi bolje razumeli 5G tehnologijo in predstavili praktične primere njene uporabe, smo v Demo center PAMETNA TOVARNA (DCPT) vgradili 5G omrežje s pomočjo našega partnerja Telekom Slovenije d.d.



Slika 1: Pod sistemi, ki se preizkušajo prek omrežja 5G v DCPT

DCPT vključuje več proizvodnih sistemov, v katerih so nameščeni lokalni krmilniki oziroma vozlišča za nadzor proizvodnje (vozlišče 1–8, robot 1, robot 2 in kolaborativni robot). Ta vozlišča so povezana z digitalnim dvojčkom prek omrežja LAN, kar omogoča nemoteno komunikacijo med lokalnim in globalnim digitalnim dvojčkom (vozlišče 0). Po vzpostavitvi lokalnega omrežja 5G se je posameznim podsistemom (vozliščem) omogoči komunikacija prek omrežij LAN, Wi-Fi ali 5G (slika 1). Vsako proizvodno vozlišče deluje kot IIoT naprava, opremljena z lokalnimi digitalnimi agenti za komunikacijo, zbiranje podatkov, sprejemanje odločitev ter nadzor nad proizvodnimi viri.

Za namen testiranja združljivosti različnih proizvodnih podsistemov DCPT z vidika industrijskih in raziskovalnih potreb smo izbrali podsisteme, ki uporabljajo različne komunikacijske protokole in trenutno komunicirajo prek omrežja LAN. Omrežje 5G nam služi kot testna platforma, kjer smo preverili ključne lastnosti, kot so hitrost nalaganja in prenosa podatkov, zakasnitev, stabilnost signala ter druge parametre, ki vplivajo na učinkovitost delovanja [8]. Omrežje deluje v nesamostojnem načinu (NSA), kar pomeni, da uporablja omrežje 4G za povezovanje naprav, medtem ko omrežje 5G zagotavlja prenos podatkov. V demo centru je nameščena naslednja oprema bazne postaje (nastavljena na kanal N78, tj. v frekvenčnem pasu 3,5 GHz):

- radijski sistem ERICSSON RAN 6507,
- Omrežna celica ERICSSON 5G,
- Omrežna celica ERICSSON 4G.

Za izvedbo poskusov združljivosti industrijskih in raziskovalnih sistemov z omrežjem 5G smo najprej analizirali komunikacijske protokole in vrata, ki jih uporablja vsaka posamezna naprava. Pregled izbranih naprav, njihovih komunikacijskih protokolov ter povezav je prikazan v preglednici 1.

Preglednica 1: Izbrani sistemi in njihov način komunikacije

Ime	Povezljivost	Komunikacijski protokoli
Industrijski robot HP20 [9]	LAN	http (80), AUI (3501), SNMP (161 and 162), ssh (22)
Industrijski robot HP6 [9]	LAN	http (80), AUI (3501), SNMP (161 and 162), ssh (22)
Kolaborativni robot Panda [10]	LAN	Modbus (502), https (8080)
Pametno skladišče	LAN / USB	OPC UA (4840), MQTT (1883)
Pametno ročno montažno mesto	LAN / USB	OPC UA (4840), https (8080)
Digitalni dvojček	LAN / USB	OPC UA (4840), Modbus (502), https (8080), ssh (20)
Modula za kakovost	LAN / USB	OPC UA (4840), https (8080)

Način kako doseči povezljivost posameznih podsistemov preko 5G omrežja se je določilo glede na to, preko katerega vmesnika ima naprava omogočeno komunikacijo (LAN ali USB povezavo). Za povezovanje smo uporabili dva različna tipa 5G modemov, pri čemer so bili vsi modemi konfigurirani tako, da so imeli vsi statične IP naslove v 5G omrežju, ki so med seboj dosegljivi. Uporabljena sta bila naslednja dva modela 5G modemov:

- Teltonika Networks TRB500: povezuje se neposredno prek LAN vrat industrijskih podsistemov.
- QUECTEL RMU500-EK: omogoča povezavo prek USB vmesnika.

V primerih, ko je izbrani proizvodni podsistem omogočal le LAN povezavo, smo uporabili modem TRB500. Modem TRB500 smo tako uporabili za industrijska robota HP6 in HP20 ter kolaborativnega robota Panda. Oba modema podpirata nesamostojni način delovanja (5G NSA), ki je trenutno implementiran v DCPT.

V primerih ko je podsistem podpiral USB povezavo, smo uporabili modem RMU500-EK,

saj ta ne zahteva dodatnih nastavitev, kot so »port forwarding« ali odpravljanje komunikacijskih napak.

4. POVEZOVANJE IN TESTIRANJE

Za vzpostavitev povezave posameznih vozlišč oz. naprav z omrežjem 5G smo opredelili pet ključnih korakov. Rezultati izvedbe teh korakov so predstavljeni v preglednici 2. Z njimi smo uspešno zagotovili stabilno povezljivost, ki je omogočila delovanje vseh sistemov preko omrežja 5G. Ti koraki so:

1. **KORAK:** Priključitev 5G modema na napravo.
2. **KORAK:** Nastavitev naprave za zagotovitev, da je vzpostavljena komunikacija med modemom 5G in napravo, ter da sta IP naprave in IP modema 5G združljiva. V primeru modema TRB500 to pomeni, da mora biti nastavljen na »pass-through«, »bridged-mode« ali NAT nastavitev. V primeru RMU500-EK se javren IP samodejno nastavi napravi po namestitvi vseh gonilnikov.

3. **KORAK:** Preverjanje razpoložljivosti industrijske naprave v omrežju 5G y izvedbo ping-anja na novo dodane naprave.
4. **KORAK:** Povezovanje na napravo z njej kompatibilnim protokolom in preverjanje časovno stabilnosti povezave.
5. **KORAK:** Uporaba naprave s krmiljenjem preko omrežja 5G.. To pomeni, da smo uporabili robote za izvajanje operacij pick & place, pametna ročna montažna postaja je vodila delavca pri njegovih montažnih nalogah, pametno skladišče je sporočalo stanje zalog indruge naprave pa so bile uporabljene za preverjanje vseh njihovih funkcij, ki jih nadzorujejo notranji algoritmi in globalni digitalni dvojček.

Kot že omenjeno pri uporabi modema QUECTEL RMU500-EK za povezavo naprav z omrežjem 5G dodatne prilagoditve niso bile potrebne. Zadostovala je preprosta namestitev gonilnikov in vzpostavitev povezave, kar je poenostavilo proces implementacije.

Sodelujoči robot je bil povezan prek prehoda TRB500 5G z uporabo nastavitev "bridged-mode",

Preglednica 2: Izbrani sistemi in njihov način komunikacije

Ime	5G modem	Povezovanje (1. KORAK)	Nastavitev (2. KORAK)	Preskus pinga (3. KORAK)	Kmmunik. (4. KORAK)	Delovanje (5. KORAK)
Industrijski robot HP20	TRB500	Uspešen	Uspešen*	Uspešen**	Omejeno	Uspešen
Industrijski robot HP6	TRB500	Uspešen	Uspešen*	Uspešen**	Omejeno	Uspešen
Kolaborativni robot Panda	TRB500	Uspešen	Uspešen*	Uspešen**	Uspešen	Uspešen
Pametno skladišče	RMU500-EK	Uspešen	Uspešen	Uspešen	Uspešen	Uspešen
Pametna ročna montažna postaja	RMU500-EK	Uspešen	Uspešen	Uspešen	Uspešen	Uspešen
Računalnik z digitalnim dvojčkom	RMU500-EK	Uspešen	Uspešen	Uspešen	Uspešen	Uspešen
Postaja za nadzor kakovosti	RMU500-EK	Uspešen	Uspešen	Uspešen	Uspešen	Uspešen

* Preizkusili smo različne načine, da bi našli pravega za industrijske robote, povezane s TRB500 (NAT s posredovanjem vrat, premostitvi, prehod).

** Ping testiranje industrijskih robotov in sodelovalnih robotov, povezanih s TRB500, je vprašljivo, saj je odziv ping lahko iz modema in ne iz samega robota.

ki krmilnik robota nastavi na isti naslov IP kot prehod in nato posreduje podatke samo na zahtevana vrata.

Povezava dveh industrijskih robotov Yaskawa (HP6 in HP20 s krmilnikom NX100) v omrežje 5G je predstavljala največji izziv. Glavni razlog za to je starost njihovih krmilnikov, ki so stari 20 let in niso združljivi z modemom TRB500 v načinu "bridged-mode" ali "pass-through". Edini izvedljiv način za vzpostavitev povezave je bil neposredna nastavitve naslovov IP robotov (192.168.1.101) ter privzetih naslovov prehoda (192.168.1.1) in omrežne maske IPv4 (255.255.255.0) neposredno v modulu, s čimer smo obšli javni naslov IP modema (169.254.4.1).

Ta postopek je izjemno pomemben, saj se številna podjetja soočajo s podobno situacijo pri posodobitvi svojih starejših robotov in krmilnikov na tehnologijo 5G. Poleg tega je bilo potrebno na prehodu TRB500 uporabiti nastavitve NAT in omogočiti "posredovanje vrat" za vsa vrata, ki jih uporabljata programska oprema za krmiljenje robotov in krmilnik NX100.

Po izvedbi teh nastavitvev je bila vzpostavljena stabilna komunikacija. Vendar pa želimo opozoriti, da je pri uporabi modema TRB500 v omrežju 5G rezultat "ping" testa razpoložljivosti naprave lahko zavajajoč. Odgovor na ping lahko prihaja iz samega prehoda TRB500 in ne iz dejanskega krmilnika robota ali PLC-ja, razen če je prehod nastavljen v načinu »bridged-mode« ali »pass-through«. Zato je bilo v našem primeru »port-forwarding« ključnega pomena za zagotavljanje pravilne povezljivosti.

5. RAZPRAVA

Integracija tehnologije 5G v DCPT predstavlja pomemben korak k našemu razumevanju načina povezovanja različnih naprav v 5G omrežje. Naši poskusi z industrijskimi roboti, kolaborativnimi roboti, pametnimi skladišči in ročnimi montažnimi postajami (ki si različno stari in uporabljajo različno komunikacijske protokole) so pokazali, da omrežja 5G omogočajo izjemne hitrosti prenosa

podatkov, ki pogosto dosegajo ali celo presegajo zmogljivosti gigabitnega Ethernet-a. Te hitrosti podpirajo zahtevne aplikacije, kot so analitika podatkov v realnem času in implementacije digitalnih dvojčkov. Kljub temu pa so hitrosti pošiljanja podatkov bolj primerljive z Wi-Fi, kar izpostavlja trenutno omejitev asimetričnega prenosa podatkov, ki je ključnega pomena za nekatere industrijske procese.

Pri vključevanju starejših industrijskih podsistemov v omrežja 5G (ki morajo imeti vsaj LAN ali USB priklon) so se pojavili določeni izzivi. Na primer, roboti Yaskawa so zahtevali prilagojene omrežne konfiguracije, kar poudarja potrebo po natančnem načrtovanju pri nadgradnji starejših sistemov. Poleg tega so različni 5G modemi razkrili praktične izzive pri vzpostavljanju povezljivosti, saj so nekateri zahtevali bolj kompleksne konfiguracije kot drugi.

Skupno gledano tehnologija 5G prinaša obetavne možnosti za izboljšanje operativne učinkovitosti. Kljub temu ostajajo izzivi, kot so omejitve pri hitrosti nalaganja in združljivost z obstoječimi sistemi, ki jih bo treba rešiti za njeno širšo implementacijo v industriji.

6. ZAKLJUČEK

Izvedeni testi povezljivosti v DCPT prikazujejo potencial in možne pasti pri implementaciji tehnologije 5G v industrijskem okolju. Vendar pa omejitve hitrosti pošiljanja podatkov (ki so največkrat manjše za faktor 10 napram prejemanju podatkov) in zapletenost integracije podsistema predstavljajo izzive.

Kljub trenutnim izzivom tehnologija 5G prinaša pomembne prednosti, kot so velika večja varnost, uporaba lastnih frekvenc in s tem manjša možnost motenj, višje hitrosti prenosa podatkov in manjša zakasnitev, ki lahko bistveno izboljšajo spremljanje procesov v realnem času, nadzor strojev ter operativno učinkovitost. Te prednosti omogočajo ne le podporo sodobnim proizvodnim sistemom, ampak tudi učinkovito vključitev starejše opreme v nova omrežja. Naša analiza

poudarja potrebo po prilagoditvi obstoječih naprav za združljivost z omrežji 5G, kar zahteva preiščeno načrtovanje in v nekaterih primerih specifične omrežne nastavitve.

Rezultati raziskav nakazujejo tudi, da lahko kombinacija naprednih funkcij 5G s prilagoditvami namenjenih starejših sistemov omogoči nemoteno integracijo, s čimer postane nadgradnja obstoječe infrastrukture realno izvedljiva. To še posebej velja za sisteme, ki temeljijo na starejših komunikacijskih protokolih, kjer so potrebne dodatne konfiguracije za zagotavljanje stabilne povezave in optimalnega delovanja.

5G tehnologija torej ne predstavlja zgolj tehnologije prihodnosti, temveč priložnost za premostitev vrzeli med obstoječo in novo opremo. Ob nenehnem razvoju omrežne infrastrukture in nadgradnji naprav ima tehnologija 5G potencial, da združi staro in novo opremo v učinkovito, povezano ter prilagodljivo proizvodno okolje, ki bo kos sodobnim industrijskim izzivom.

Zahvala za sofinanciranje

Delo je bilo finančno podprto v okviru Javne agencije za raziskovalno in inovacijsko dejavnost RS - ARIS, Raziskovalni program P2-0248 – Inovativni proizvodni sistemi in procesi, raziskovalni projekt J2-4470 – Raziskave zanesljivosti in učinkovitosti robnega računalništva v pametni tovarni z uporabo 5G tehnologije. Delo je financirala Evropska unija, projekt 101087348 – Krepitev zmogljivosti za odličnost slovenskih in hrvaških inovacijskih ekosistemov za podporo digitalnemu in zelenemu prehodu pomorskih regij ter projekt 101058693 – Trajnostni prehod v agilno in zeleno podjetje.

Literatura

- [1] Lagorioa A. et al., 5G in Logistics 4.0: potential applications and challenges, *Procedia Computer Science* 217, 2023.
- [2] Chettri L., Bera R.: A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems,

- IEEE Internet of Things Journal JANuary 2020, pg.: 16 – 32.
- [3] Tsourdinis T., Chatzistefanidis I., Makris N. et. al.: Service-aware real-time slicing for virtualized beyond 5G networks, *Computer Networks* no. 247, 2024.
- [4] Boshoffa M., Schusterb D., Christa L.: Evaluation of 5G Edge and Cloud Computing for Data Processing in Visual Referencing of Mobile Robot Manipulators, *Procedia CIRP* 120 (2023) 774–779.
- [5] Lagorioa A., Ciminia C., Pintoa R., Cavalieria S.: 5G in Logistics 4.0: potential applications and challenges, *Procedia Computer Science* 217 (2023) 650–659
- [6] Huang M., Liu A., Xiong N.N., Vasilakos A. V.: Towards intelligent and trustworthy task assignments for 5G-enabled industrial communication systems, *Digital Communications and Networks*, 2023.
- [7] Chenga, J., Chena W., Taoa, F., Linb C.: Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing, *Journal of Industrial Information Integration*, Volume 10, June 2018, Pages 10-19.
- [8] Gustavo P. Cainelli, Lisa Underberg, Performance testing of a 5G campus network in real-world propagation conditions from the application's point of view, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 56, Issue 2, 2023.
- [9] NX100 Maintenance Manual, (https://info.ammc.com/hubfs/Partner/Documents/Yaskawa_Motoman_Robots/NX100_Maintenance_Manual_2520150133-1CD.pdf).
- [10] Franka Emika robot's instruction handbook, (<https://www.generationrobots.com/media/franka-emika-robot-handbook.pdf>).
- [11] Lacknera, T., Hermannia, J., Dietricha, F., Kuhna C. et. al.: Measurement and comparison of data rate and time delay of end-devices in licensed sub-6 GHz 5G standalone non-public networks, *Procedia CIRP* 107 (2022) 1132–1137.