

Digitalna transformacija mjeriteljstva

Šašlić, Đorđe

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:990324>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika

DIGITALNA TRANSFORMACIJA MJERITELJSTVA

Diplomski rad

Đorđe Šašlić

Osijek, godina 2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMATIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

Ime i prezime pristupnika:	Đorđe Šašlić
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1474, 07.10.2022.
JMBAG:	0165083518
Mentor:	prof. dr. sc. Kruno Miličević
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Davor Vinko
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Kruno Miličević
Član Povjerenstva 2:	dr. sc. Tin Benšić
Naslov diplomskog rada:	Digitalna transformacija mjeriteljstva
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	Potrebno je opisati ciljeve i zahtjeve digitalne transformacije mjeriteljstva, tehnologije koje se koriste kao i rješenja u primjeni, primjerice digitalni kalibracijski certifikat, tzv. European Metrology Cloud, projekt IDIS, projekt GEMIMEG, načela FAIR i Digital SI, i sl. Realizirati prototip barem jednog aspekta digitalne transformacije mjeriteljstva.
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	04.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Vrlo dobar (4)
Datum obrane diplomskog rada:	19.09.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	19.09.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 19.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:

Dorđe Šašlić

Studij:

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika

Mat. br. Pristupnika, godina upisa:

D-1474, 07.10.2022.

Turnitin podudaranje [%]:

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Digitalna transformacija mjeriteljstva**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Kruno Miličević

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED PODRUČJA TEME	2
3. MJERITELJSTVO	3
3.1. Digitalna transformacija	3
3.2. Međunarodni sustav jedinica	3
3.3. Terminologija	6
3.4. Pametna proizvodnja	6
3.5. Mjeriteljstvo 4.0	8
3.6. Mjeriteljstvo u digitalno doba	9
3.7. Izazovi u digitalnom mjeriteljstvu	11
4. PODACI I ALGORITMI	13
4.1. FAIR	14
4.1.1. Pronalazivost (engl. <i>findable</i>).....	16
4.1.2. Dostupnost (engl. <i>accessible</i>)	16
4.1.3. Interoperabilnost (engl. <i>interoperable</i>).....	16
4.1.4. Ponovna upotreba (engl. <i>reusable</i>).....	16
4.2. Primjeri FAIR pristupa i dodane vrijednosti	19
4.3. Cyber-fizički sustavi (CPS) i Internet stvari (IoT)	21
5. MJERITELJSKI INSTITUTI	23
5.1. National Physical Laboratory (NPL)	23
5.2. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)	24
5.3. Federal Institute of Metrology, METAS	25
6. KVALITETA	27
6.1. European Metrology Cloud	27
6.2. Infrastruktura kvalitete	27
6.3. Digitalna transformacija u infrastrukturi kvalitete	28
6.4. Europska infrastruktura kvalitete	28

6.5. GEMIMEG-II	29
6.6. Digitalni blizanci	30
6.7. Digitalni kalibracijski certifikat	30
6.7.1. DCC koncept	31
6.8. Ko-kalibracija senzora	33
7. ANALIZA TEMPERATURA SENZORA POMOĆU RASPBERRY PI-A.....	35
7.1. Raspberry Pi komponente.....	35
7.2. Pokretanje Raspberry Pi-a.....	36
7.3. Povezivanje temperaturnih senzora i Raspberry Pi-a.....	39
7.4. Rezultati mjerenja.....	41
8. ZAKLJUČAK.....	48
9. LITERATURA	49
10. SAŽETAK.....	51
11. ABSTRACT	51
PRILOG 1 – kod za Indeks.html (prikaz stranice i crtanje grafova).....	52
PRILOG 2 – kod za Python datoteku (očitanje vrijednosti senzora, web server)	58

1. UVOD

Mjeriteljstvo je znanost o mjerenju koja obuhvaća mjerne jedinice i njihove etalone, mjerila i njihovo područje primjene, teoretske i praktične probleme vezane uz mjerenje. Sastavni dio međunarodne trgovine je mjeriteljstvo koje ima važnu ulogu za rast i razvoj industrije svake zemlje na način da potiče konkurentnost i povjerenje. U posljednjim desetljećima se mjeriteljstvo suočava s brojnim izazovima u razvojnim procesima. Razvojem tehnologije i digitalne transformacije dolazi do promjena u mjeriteljstvu uključujući nove procese, metode i pristupe. Za digitalnu transformaciju mjeriteljstva su potrebni jasni i strojno upravljivi prikazi mjernih jedinica. Jedna od glavnih promjena koje donosi digitalna transformacija je digitalna komunikacija podataka i informacija na način da je omogućena strojna obrada podataka pomoću usluga „u oblaku“. Distribuirani mjerni instrumenti i senzorske mreže postaju sve važniji, uključujući metode za ko-kalibraciju i mjeriteljsku procjenu cijele senzorske mreže. Isto tako, umjetna inteligencija, fuzija senzora i virtualni mjerni instrumenti će zamijeniti tradicionalne tehnologije i metode. Jedan od glavnih izazova u mjeriteljstvu je osigurati točna i sljediva mjerenja te je zbog toga potreban razvoj kalibracijskih procedura i standarda. U praktičnom dijelu rada su analizirane temperature senzora koji su spojeni s Raspberry Pi-om. Za preciznije rezultate mjerenja je potrebno provoditi kalibraciju senzora, a to je proces ispravljanja sustavnih pogrešaka u očitanjima senzora tako da se uspoređuju poznata mjerenja prvog uređaja s nepoznatim mjerenjem drugog uređaja kako bi se prilagodili parametri drugog uređaja i osigurala točnost mjerenja. U ovom radu je odabrana ko-kalibracija senzora jer se ona koristi u stvarnim procesnim okruženjima u kojima su podaci dostupni u kontinuiranim tokovima koji pružaju mjerne podatke.

U trećem poglavlju rada se opisuje razvoj mjeriteljstva, utjecaj digitalne transformacije i razvoj digitalnog SI okvira. U četvrtom poglavlju se govori o upravljanju podacima i verifikaciji algoritama te njihovoj ulozi u mjeriteljstvu. U ovom poglavlju se još navode FAIR načela koja se odnose na podatke. Peto poglavlje govori o ulozi i važnosti mjeriteljskih instituta te se opisuju dva najutjecajnija europska mjeriteljska instituta i njihove strategije. U šestom poglavlju se opisuje infrastruktura kvalitete i utjecaj digitalne transformacije u infrastrukturi kvalitete. U ovom poglavlju su još obrađene teme GEMIMEG-II, Digitalni blizanci i DCC. Zadnje, sedmo poglavlje predstavlja praktični dio rada i u njemu su analizirani rezultati mjerenja temperaturnih senzora na kojima je napravljena ko-kalibracija.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

U literaturi „Digital Avatar of Metrology“ se raspravlja o digitalnoj transformaciji u mjeriteljstvu te o razvoju znanosti i današnje tehnologije poput umjetne inteligencije, IoT-a, računalstva u oblaku i ostalih. Osnovni cilj je poboljšanje postojećih procesa za digitalnu transformaciju [1].

U literaturi „Metrology for digital age“ se opisuju digitalne tehnologije, podaci i algoritmi, umjetna inteligencija, strojno čitljive informacije. Raspravlja se o izazovima mjeriteljstva u digitalnom dobu te njegovoj budućnosti [2].

Na stranici „Međunarodni sustav jedinica SI“ su opisane osnovne i izvedene veličine i jedinice [3]. U literaturi New Digital Services from the BIPM autori govore o Metarskoj konvenciji i organizaciji BIPM te o digitalnom SI okviru i njegovim ciljevima [4].

U literaturi „Brief overview of the future of metrology“ se raspravlja o digitalnom mjeriteljstvu uključujući trendove i aktivnosti za digitalizaciju mjeriteljstva. Autori objašnjavaju razliku između pojmova digitizacije, digitalizacije i digitalne transformacije te opisuju strategiju METAS-a [5].

U literaturi „The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship“ se opisuju FAIR načela koja predstavljaju skup podataka koji su pronalazivi, dostupni, interoperabilni i ponovo upotrebljivi. Njihov cilj je poboljšati sposobnosti strojeva uz ponovnu uporabu podataka [6].

U literaturi „The European Metrology Cloud“ autori opisuju razvoj digitalne infrastrukture kvalitete. European Metrology Cloud je dizajniran za podršku nadzora na tržištu i ocjene sukladnosti te za podršku razvoja referentnih arhitektura i novih usluga [7].

U literaturi „Digital Calibration Certificate (DCC) for an End-to-End Digital Quality Infrastructure for Industry 4.0“ se opisuje uloga Digitalnog kalibracijskog certifikata te njegov utjecaj na povećanje produktivnosti u proizvodnji. DCC koncept je potreban za digitalizaciju koja je ključna za poboljšanje kvalitete proizvoda i procesa [8].

Na stranici GEMIMEG-II, „Digital Twin“ se opisuju „digitalni blizanci“ koji predstavljaju precizne numeričke modele stvarnih uređaja i procesa. „Digitalni blizanci“ se stvaraju kombinacijom DCC-a i fizičkih modela [9].

3. MJERITELJSTVO

3.1. Digitalna transformacija

Digitalne tehnologije su značajno napredovale posljednjih godina. One uključuju koncepte velikih podataka, računalstvo u oblaku (engl. *Cloud computing*), blockchain tehnologije, Internet stvari (engl. *Internet of Things*, IoT), ugrađene sustave. Napredak tehnologije potaknuo je razvoj novih industrija i tržišta temeljenih na podacima poput Industrije 4.0, umjetne inteligencije (engl. *Artificial intelligence*, AI), usluge strojnog učenja (engl. *Machine learning*, ML). Povećanje računalnih i skladišnih kapaciteta, povećanje brzine razmjene podataka i velika dostupnost senzora su omogućili povezivanje i korištenje pohranjenih podataka. Ove promjene se odnose i na područja robotike, sintetičke biologije, inteligentne komunikacijske mreže, aditivnu proizvodnju i autonomne sustave [1].

Digitalna transformacija mijenja osnovne elemente, procese i principe u području mjeriteljstva. Mjeriteljstvo se suočava s revolucionarnim promjenama temeljenim na kvantnim tehnologijama i novom Međunarodnom sustavu mjernih jedinica (SI). Digitalna komunikacija informacija i podataka postaje standard. To se ostvaruje pomoću cloud usluga koje omogućuju strojnu obradu podataka. Digitalna infrastruktura koristi podatke o kalibraciji, samodijagnozama i drugim podacima koje pojedinačni mjerni instrumenti šalju. Usluge se temelje na distribuiranim bazama podataka i sučeljima za programiranje aplikacija API (Application Programming Interface) [2].

Potreba za preciznim i pouzdanim mjerenjima se javlja zbog sve većih inovacija, jače konkurencije i raznolikosti poslovanja. Tehnološki napredak će znatno utjecati na preciznost i točnost mjerenja tijekom procesa proizvodnje. Zbog toga su razvijeni nacionalni sustavi mjerenja (NMS) koji se sastoje od mreža laboratorija, kalibracijskih postrojenja, standarda i tijela za certificiranje. NMS osigurava pouzdanu osnovu za mjerenja koja se mogu povezati s SI jedinicama [1].

3.2. Međunarodni sustav jedinica

Međunarodni sustav jedinica (SI) je dogovoreni standard za izražavanje mjerenja na svim razinama točnosti i u svim područjima znanosti, tehnike i ljudskog djelovanja. U međunarodnom sustavu jedinica postoje osnovne i izvedene jedinice. Osnovne jedinice SI-a zajedno sa njihovim odgovarajućim osnovnim veličinama osiguravaju referenciju koja se koristi za definiranje svih mjernih jedinica sustava [3]. U tablici 3.1. su navedene i opisane osnovne SI jedinice [10].

Tablica 3.1. Osnovne SI jedinice [10]

VELIČINA	OSNOVNA JEDINICA (ZNAK)
Duljina	metar (m) – definiran je uzimanjem brojčane vrijednosti brzine svjetlosti u vakuumu c , koja iznosi 299792458 kada je izražena u jedinici $m s^{-1}$, pri čemu je sekunda definirana u odnosu na frekvenciju cezija $\Delta\nu_{Cs}$
Masa	kilogram (kg) – definiran je uzimanjem fiksne brojčane vrijednost Planckove konstante h koja iznosi $6,626070150 \times 10^{-34}$ kada je izražena u jedinici J s što je jednako $kg m^2 s^{-1}$, pri čemu su metar i sekunda definirani u odnosu na c i $\Delta\nu_{Cs}$
vrijeme, trajanje	sekunda (s) – definirana je na temelju fiksne brojčane vrijednosti frekvencije cezija $\Delta\nu_{Cs}$, neometane prijelazne frekvencije između hiperfinskih razina osnovnog stanja atoma cezija-133 koja iznosi 9192631770 kada je izražena u jedinici Hz što je jednako s^{-1}
električna struja	amper (A) – definiran je uzimanjem fiksne brojčane vrijednost elementarnog naboja e koja iznosi $1,602176634 \times 10^{-19}$ kada je izražena jedinicom C, koja je jednaka A s, pri čemu je sekunda definirana u odnosu na frekvenciju cezija $\Delta\nu_{Cs}$
termodinamička temperatura	kelvin (K) – definiran je uzimanjem fiksne brojčane vrijednosti Boltzmannove konstante k koja iznosi $1,380649 \times 10^{-23}$ kada je izražena u jedinici $J K^{-1}$, što je jednako $kg m^2 s^{-2} K^{-1}$, pri čemu su kg, m i s definirani u odnosu na h , c , $\Delta\nu_{Cs}$

količina tvari	mol (mol) – jedan mol sadrži točno $6,02214076 \times 10^{23}$ elementarnih čestica. Taj broj predstavlja fiksnu brojčanu vrijednost Avogadrova broja N_A kada je izražen u jedinici mol^{-1} i naziva se Avogadrova konstanta. Količina tvari n mjeri broj specificiranih elementarnih čestica.
svjetlosna jakost	candela (cd) – definirana je uzimanjem fiksne brojčane vrijednosti svjetlosne učinkovitosti monokromatskog zračenja frekvencije 540×10^{12} Hz, K_{cd} , koja iznosi 683 kada je izražena u jedinici lm W^{-1} što je jednako cd sr W^{-1} ili $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$, pri čemu su kg, m i s definirani u odnosu na h, c, $\Delta \nu_{Cs}$

Izvedene jedinice su umnošci potencija osnovnih jedinica i koriste se za mjerenje izvedenih veličina. Nedimenzijske veličine, poznate kao veličine dimenzije jedan, definiraju se kao omjer dviju veličina iste vrste. Jedinica nedimenzijskih veličina je stoga omjer dvije istovjetne SI jedinice i uvijek je jednaka jedan, ali pri izražavanju vrijednosti nedimenzijskih veličina jedinica 1 se ne piše [3]. Primjeri izvedenih jedinica s posebnim nazivima u SI-u su prikazani u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Izvedene SI jedinice [3]

Izvedena veličina	Naziv izvedene jedinice	Znak	Izražena pomoću drugih jedinica
Frekvencija	herc	Hz	s^{-1}
Snaga	vat	W	$\text{J/s} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$
Električni otpor	om	Ω	$\text{V/A} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$
Induktivnost	henri	H	$\text{Wb/A} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$

3.3. Terminologija

Važno je razumjeti što znači pojam digitalizacije. Posljednjih godina se taj pojam često povezuje sa inovacijama, ali i sa zadacima digitalizacije koji nisu povezani s pravim značenjem toga pojma. Potrebno je razlikovati pojmove digitizacija, digitalizacija i digitalna transformacija [5].

- Digitizacija je predstavljanje objekta, dokumenta, slike, zvuka ili signala koji je uglavnom analogan na način da se generira niz brojeva koji opisuju diskretni skup njegovih točaka ili uzoraka.
- Digitalizacija je uporaba digitalnih tehnologija za promjenu poslovnog modela i pružanje novih prilika za ostvarivanje prihoda. To je proces prelaska na digitalno poslovanje.
- Digitalna transformacija je ukupni i sveobuhvatni učinak digitalizacije.

Digitalizacija se može objasniti na jednostavnom primjeru usporedbe klasične karte i Google Mapsa. Proizvođači klasičnih karti ne mogu pružiti opcije i značajke kao što pružaju Google Maps koje se stalno ažuriraju u stvarnom vremenu. Pretvaranje analognih karti u digitalni oblik predstavlja digitizaciju. Stvaranje alata kao što je Google Maps, koji ima mogućnost prikazivanja informacija u stvarnom vremenu kao npr. informacije o prirodnim nepogodama, predstavlja digitalizaciju karte. Razvoj mobilne aplikacije Google Maps kojom je došlo do promjena u industriji karata te stvaranja novih poslovnih prilika predstavlja digitalnu transformaciju [5].

3.4. Pametna proizvodnja

Proizvodna industrija trenutno prolazi kroz veliku transformaciju. Taj proces je pokrenut sve većom automatizacijom, digitalnom transformacijom, povezivanjem digitalnog i fizičkog okruženja, razvojem aditivne proizvodnje kao industrijske i proizvodne tehnologije, izazovima u proizvodnji, ekonomskim i društvenim evolucijama, spajanjem IT i operativne tehnologije. Cilj pametne proizvodnje je automatizacija što više procesa kako bi se povećala efikasnost proizvodnje [1]. Na slici 3.1. su prikazane glavne tehnološke veze koje podržavaju pametnu proizvodnju.



Sl. 3.1. Pametna proizvodnja [1]

Digitalni modeli osiguravaju unaprijed definirane podatke za mjerne sustave kroz programe mjerenja s optimalnim i sigurnim putanjama, pravilima mjerenja u okviru upravljanja kvalitetom performansi te predviđanjem problema kvalitete. Tvornice imaju pristup brojnim tehnološkim opcijama za poboljšanje svojih procesa zahvaljujući napretku u analizi podataka, umjetnoj inteligenciji i strojnom učenju. Jedan od načina na koje se pametna proizvodnja može izraziti su potpuno integrirani proizvodni sustavi suradnje i suradnička robotika koji u stvarnom vremenu odgovaraju dinamičkim uvjetima i zahtjevima u opskrbenj mreži, pametnoj tvornici i zahtjevima kupaca [1].

Ključni elementi pametne proizvodnje uključuju objedinjene tehnologije i integriranu digitalnu infrastrukturu. Tvrtke zahtijevaju centralizirani pristup podacima sa svih izvora kako bi mogle učinkovito upravljati, analizirati i donositi odluke na temelju svih dostupnih informacija. Na taj način se poboljšava suradnja unutar tvrtke, optimiziraju se radni procesi i brže se reagira na tržišne promjene. Umjetna inteligencija i strojno učenje poboljšavaju istraživanje, analizu i automatizirane procese unutar tvrtke, a „edge computing“ pruža siguran podatkovni međuspremnik između lokalnih stranica i interneta ili oblaka tako što omogućuje obradu podataka bliže izvoru podataka, odnosno na rubu mreže. „Edge computing“ omogućuje pohranu i obradu podataka na lokalnim uređajima ili poslužiteljima prije nego što se podaci pošalju u centralni oblak ili podatkovni centar. Time se povećava brzina reakcije sustava, a ujedno se smanjuje opterećenje centralnih sustava i mreže. Svaki industrijski resurs ili komponenta sustava mora imati IP adresu

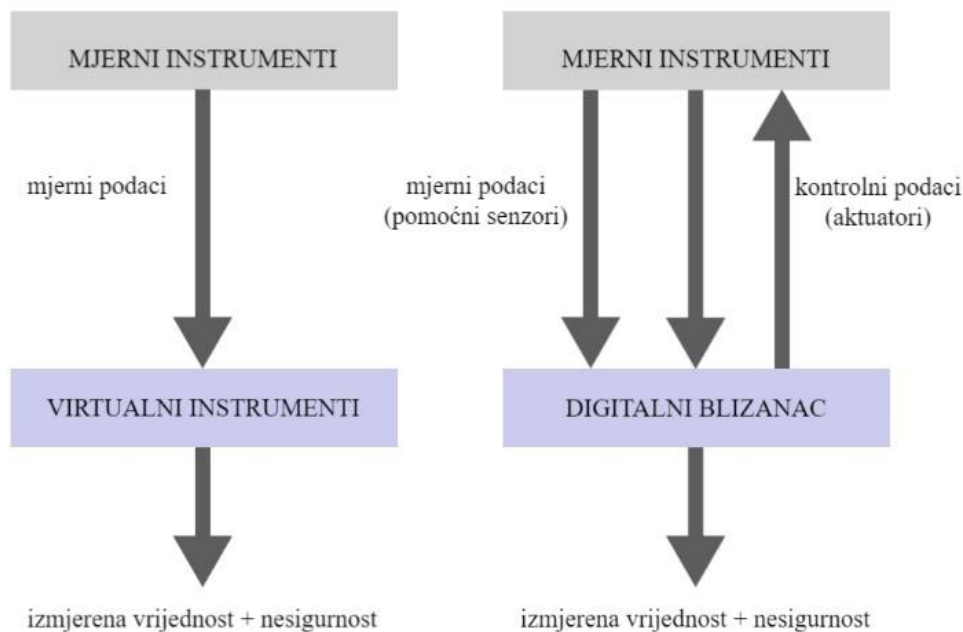
i bežičnu vezu kako bi podržavali pametnu proizvodnju. Pametni senzori su integrirani u svaki uređaj kako bi prenosili podatke do centralnog upravljanja podacima na toj lokaciji ili u oblaku [1].

3.5. Mjeriteljstvo 4.0

Industrija 4.0 se temelji na mjeriteljstvu 4.0 koje sadrži stvarno-vremenske podatke, virtualne prikaze, prilagođena izvješća i daljinsko upravljanje. Umjetna inteligencija u industriji 4.0 je od velike važnosti za razvoj proizvoda jer se primjenjuje u procesu izrade i kontroliranju kvalitete proizvoda. Rješenja temeljena na umjetnoj inteligenciji pridonose proizvodnji na način da stvaraju inovativne, kvalitetne i dobro dizajnirane proizvode, a istovremeno smanjuju zastoje u tvornicama [1].

Isto tako, u mjeriteljstvu 4.0 se koriste algoritmi koji prilagođavaju proizvodne procese te omogućuju konstantnu, efikasnu i ponovljivu proizvodnju uz minimalne pogreške.. Također se koriste beskontaktni optički mjerni uređaji koji mogu snimati 3D podatke tijekom proizvodnje komponenti i direktno ih slati timu za kontrolu kvalitete kako bi oni mogli provjeriti usklađenost s dizajnerskim specifikacijama usporedbom s 3D CAD modelima [1].

Jedna softverska platforma može podržavati procjene završne obrade površine, kontura i topografije. Razvojem mjernih alata koji imaju napredne matematičke modele dolazi do stvaranja „virtualnih instrumenata“ i „digitalnih blizanaca“. To su tehnologije koje omogućuju razvoj virtualnih verzija proizvoda, procesa ili usluga tako što koriste stvarne podatke u vremenu, makete, algoritme i umjetnu inteligenciju. Ove tehnologije su uglavnom jeftinije od fizičkih prototipova i zbog toga omogućuju tvrtkama neograničeni broj varijacija i testiranja [1]. Kvalitativna razlika između virtualnih instrumenata i digitalnih blizanaca je prikazana na slici 3.2. (detaljniji opis „digitalnih blizanaca“ se nalazi u poglavlju 6.6).



Sl. 3.2. Razlika između virtualnih instrumenata i digitalnog blizanca [1]

3.6. Mjeriteljstvo u digitalno doba

Pojam „digitalno mjeriteljstvo“ koristi se za opis potencijalnog napretka i značajnih promjena u trenutnim mjeriteljskim uslugama te za nove usluge koje zahtijevaju digitalni trendovi. Njegova transformacija u potpuno digitalno mjeriteljstvo je potrebna za olakšavanje učinkovitih procesa u industriji, infrastrukturi kvalitete, suvremenom istraživanju i razvoju. Za takvu transformaciju su potrebni jasni i strojno izvedivi digitalni prikazi mjernih jedinica (engl. *machine-actionable digital representations of units*) [1].

Kako bi se osigurala dugoročna stabilnost Međunarodnog sustava jedinica i primjena novih tehnologija, članice Međunarodnog ureda za utege i mjere (fra. *Bureau International des Poids et Mesures*, BIPM) su odlučile promijeniti Međunarodni sustav jedinica (SI) na 26. sastanku Generalne konferencije za težine i mjere (fra. *Conférence générale des poids et mesures*, CGPM) u Francuskoj u gradu Versaillesu. Međunarodni sustav jedinica se primjenjuje u znanstvenim istraživanjima, tehnološkom razvoju, međunarodnoj trgovini i poslovima, a promjene bi se odnosile na definiranje SI jedinica korištenjem konstanti koje opisuju prirodne pojave [1].

Metarska konvencija je potpisana 20. svibnja 1875. u Parizu između 17 država kako bi se osigurala međunarodna unifikacija i usavršavanje metričkog sustava. Ovom konvencijom je osnovana i organizacija BIPM čije se članice bave pitanjima koja se odnose na mjeriteljske znanosti i standarde mjerenja. [5]

Međunarodni odbor za mjere i utege (fra. *Comité international des poids et mesures*, CIPM) osnovao je radnu grupu za digitalne SI jedinice (D-SI) kako bi pružili podršku digitalizaciji globalne infrastrukture kvalitete zato što se vodeće organizacije infrastrukture kvalitete suočavaju sa izazovom pronalaska identiteta u digitalnoj transformaciji. Na slici 3.3. su prikazani ciljevi digitalnog SI okvira [1].



Sl. 3.3. Ciljevi digitalnog SI okvira [1]

Digitalni SI okvir podržava opis mjenog sustava, metode korištene za mjerenje i procese koji su potrebni za dobivanje konačnih rezultata mjerenja. Ovaj okvir bi povećao strojnu čitljivost od osnovnih mogućnosti do cjelokupnog znanja koje strojevi mogu koristiti. Primjenom tehnologija umjetne inteligencije (AI) i strojnog učenja (ML) moguća je automatska procjena porijekla podataka, mjeriteljske povezanosti i primjenjivosti podataka [1].

Digitalna tehnologija je omogućila razvoj naprednih algoritama i softverskih alata koji mogu brzo i precizno procijeniti velike količine podataka uz mogućnost identifikacije i ispravka pogreški mjerenja u stvarnom vremenu. Kako bi se osiguralo dosljedno i povezano mjerenje u različitim sustavima i laboratorijima, moguće je koristiti digitalne potpise i digitalne certifikate za kalibraciju (DCC) [1].

3.7. Izazovi u digitalnom mjeriteljstvu

Metoda pružanja mjeriteljskih usluga, koja se trenutno koristi, ima svoje nedostatke jer zahtijeva puno vremena za administraciju i praćenje uspostavljenih protokola. Nedostatak mehanizma za praćenje u stvarnom vremenu otežava praćenje napretka usluge i provjeru dokumenata. Istraživači i stručnjaci iz industrije proučavaju različite digitalne tehnologije kako bi pružili bolju uslugu korisnicima i pronašli rješenja za automatizaciju. Industrija kvalitete, koja uključuje mjeriteljstvo, ocjenu sukladnosti, norme, akreditaciju, standarde i nadzor tržišta, suočava se s izazovima digitalne transformacije [1]. Glavni izazovi su:

- Kalibracija i sljedivost – jedan od glavnih izazova je osigurati da mjerenja izvedena digitalnim instrumentima budu točna i da se mogu pratiti. To zahtijeva razvoj kalibracijskih procedura i standarda kako bi se osigurala dosljedna mjerenja. Važno je da postoji jasan put sljedivosti za svako pojedinačno mjerenje, a to je teže postići s digitalnim instrumentima.
- Upravljanje podacima – velike količine podataka mogu biti izazovne za obradu i analizu. Važno je imati učinkovite alate za upravljanje i analizu podataka da se osigura točnost i pouzdanost mjerenja. Važni čimbenici u digitalnom mjeriteljstvu su i sigurnost i privatnost podataka.
- Ažuriranja softvera i firmwarea – redovito ažuriranje softvera i firmwarea za digitalne instrumente može biti izazovno za upravljanje. Ažuriranja mogu biti potrebna zbog ispravljanja pogreški ili poboljšanja funkcionalnosti.
- Obuka i stručnost – digitalno mjeriteljstvo zahtjeva posebnu obuku i stručnost. To može biti izazov za organizacije koje nisu u mogućnosti da ulažu u obuku i certifikaciju svojih zaposlenika.
- Troškovi – digitalno mjeriteljstvo može biti skupo, posebice za male organizacije. Troškovi opreme, softvera i obuke mogu predstavljati značajnu prepreku. Potrebna su velika ulaganja kako bi se osigurala točna i standardizirana mjerenja [1].

Vidljiva je tehnološka razlika između proizvođača, ovlaštenih tijela i nadzornih tijela tržišta zbog toga što ne djeluju svi na istoj razini. Nadzorna tijela ne prihvaćaju inovativna rješenja i

pokušavaju ih prilagoditi poznatim konceptima. Ovlaštena tijela nekada zahtijevaju previše sigurnosti, a u nekim slučajevima ne zahtijevaju dovoljan stupanj sigurnosti. Proizvođači se žale što ne postoji dosljednost u ocjenjivanju sukladnosti i provjeri mjernih instrumenata. Također, proizvođačima ne odgovara što nema jedinstvenog standarda kvalitete na europskom tržištu [7].

4. PODACI I ALGORITMI

Podaci su postali vrsta „robe“ u globalnoj ekonomiji te je shodno tome potrebno uspostaviti novo mjeriteljstvo za podatke kako bi se dogovorili standardi za kvalitetu podataka. Oni se moraju pročitati pomoću algoritama. Potrebno je uspostaviti novo „mjeriteljstvo za algoritme“ zato što klasični algoritmi uglavnom nisu dovoljni za veliku količinu podataka. Na taj način bi se koristile metode strojnog učenja kojima bi se izravno koristili izvori podataka i bilo bi prednosti od velikog broja podataka [2].

Pravilno upravljanje podacima vodi do integracije i ponovne uporabe podataka nakon njihovog objavljivanja. Postojeći digitalni sustav za objavljivanje znanstvenih podataka ograničava maksimalno iskorištavanje istraživačkih ulaganja. Osim prikupljanja i upravljanja podataka, važna je i briga o podacima koja uključuje dugoročno očuvanje vrijednih digitalnih resursa s ciljem da se pronađu i ponovno koriste za buduća istraživanja, samostalno ili u kombinaciji s novim podacima. Ishodi dobrog upravljanja podacima su digitalni rezultati visoke kvalitete koji olakšavaju proces otkrivanja i ponovne uporabe. Definicija „dobrog upravljanja podacima“ još nije detaljno opisana i uglavnom se prepušta vlasniku podataka ili repozitoriju da odluči što je dobro upravljanje. Stoga bi bilo korisno opisati ciljeve i zahtjeve dobrog upravljanja podacima te napisati smjernice za one koji žele objaviti ili čuvati znanstvene podatke. Korist od toga bi imali istraživači koji žele međusobno dijeliti i ponovno koristiti podatke te programeri koji izrađuju softvere i alate za analiziranje i obradu podataka [6].

Način na koji se mjerni podaci i jedinice prikazuju u digitalnoj infrastrukturi je jedan od ključnih aspekata interoperabilnosti podataka. Potrebno je uspostaviti prihvaćen i nedvosmislen standard prikaza takvih podataka. Za to postoje organizacije koje omogućuju automatiziranu interpretaciju i uporabu informacija kao što su Open Geospatial Consortium (OGC), Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM), German Institute of Medical Documentation and Information (DIMDI), Unified Code of Measure (UCUM), Quantities, Units, Dimensions, and Types (QUDT) i Digital System of Units (D-SI). „Vodič za izražavanje nesigurnosti u mjerenju“ i „Rječnik u mjeriteljstvu“ su standardi koji pružaju informacije korisnicima. Informacije u strojno čitljivom obliku omogućuju programerima da referenciraju vokabular u digitalnim certifikatima ili softverskim paketima [2].

Osim pravilnog upravljanja podacima i mjernih instrumenata, jednako važnu ulogu imaju i algoritmi i softveri. Umjetna inteligencija, fuzija senzora i virtualni mjerni instrumenti digitalnog

doba su zamjena za brojne instrumente i metode koji su se prije koristili. Njihova uporaba zahtjeva ponovnu provjeru utvrđenih metoda za procjenu nesigurnosti i procjenu algoritama [2].

Verifikacija algoritama ne podrazumijeva samo ispravnu obradu nesigurnosti, nego i kvantitativnu procjenu pouzdanosti, stabilnosti i mogućnost objašnjavanja podataka. Potrebno je osigurati pouzdan okvir za referente podatke i standard za procjenu kvalitete podataka jer algoritmi ovise o velikim količinama podataka. Ovisnost o podacima i složenost metoda koje se koriste za podatke stvaraju potrebu za revizijom načina na koji se tretira nesigurnost u strojnom učenju (ML) ili umjetnoj inteligenciji (AI). Nesigurnost rezultata može biti uzrokovana ograničenjima naučenog modela, kvalitetom podataka i razlikama između konteksta i cilja. Potrebno je kvantificirati nesigurnosti i povezati ih zajedničkim standardom kako bi se uspostavio smisleni razvoj učinkovitosti strojnog učenja, odnosno umjetne inteligencije. Nastoje se definirati standardi koji mogu služiti za usporedbu rezultata sustava strojnog učenja ili umjetne inteligencije s klasičnim statističkim metodama te za evaluaciju njihove učinkovitosti. Algoritmima koji su bez nadzora nedostaje „istina“ kako bi utvrdili kvalitetu predviđanja. Takvi algoritmi mogu naučiti prepoznavati neočekivane obrasce u podacima i stvarati neželjene rezultate. Za povjerenje u takve algoritme su ključne kvantitativne metode za objašnjivost i interpretacija metoda strojnog učenja ili umjetne inteligencije. Isto tako, otpornost algoritama procjenjuje utjecaj promjena ulaznih podataka u odnosu na izlazne podatke obrađene metodom strojnog učenja ili umjetne inteligencije. Uzrok promjena mogu biti skupovi podataka „izvan distribucije“ kojima nedostaju potrebne značajke u testnom okruženju ili manipulacija izvornih podataka i naknadna promjena izlaznih podataka. Poboljšanje takvih postupaka i definicija kriterija za procjenu otpornosti su još u postupku istraživanja [2].

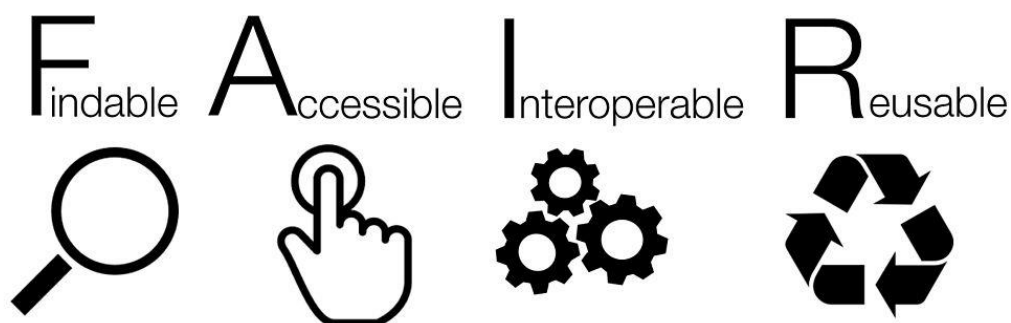
4.1. FAIR

Rastuća proizvodnja i dostupnost digitalnih sadržaja stvaraju potrebu za korištenjem podataka na duži vremenski period. Pristup istraživačkim podacima omogućava lakše dijeljenje znanja i poboljšava transparentnost istraživanja [11]. „Jointly Designing a Data Fairport“ radionica je održana 2014. godine u Leidenu, Nizozemska. Na radionici su sudjelovali akademski i privatni sudionici kojima je cilj bio rješavanje izazova u pronalasku i ponovnoj uporabi podataka. Tijekom rasprave je došlo do prijedloga definiranja minimalnog skupa zajednički dogovorenih načela i praksi kako bi se omogućilo jednostavnije otkrivanje, pristupanje, integracija i ponovna uporaba informacija koje stvara suvremena znanost s velikim brojem podataka. Na kraju radionice je sastavljen nacrt temeljnih načela koji su nazvani FAIR načelima. FAIR je akronim skupa četiri

načela koji naglašavaju važnost da podaci trebaju biti pronalazivi (engl. *findable*), dostupni (engl. *accessible*), interoperabilni (engl. *interoperable*) i ponovno uporabljivi (engl. *reusable*). Nakon toga je osnovana radna skupina FAIR koja je sastavljena od članova zajednice FORCE11. Radna skupina je naknadno doradila i poboljšala načela, posebice u citiranju podataka. Grupa Skunkworks razvija softversku podršku za infrastrukture koje su potpuno usklađene s FAIR načelima i mogu se primijeniti na postojeće repozitorije. Softverski moduli su fokusirani na objave i pretraživanje metapodataka, provjeru kompatibilnosti u uvjetima stroge privatnosti te se bave složenim problemima interoperabilnosti podataka i metapodataka [6]. Prema tome je 2016. godine objavljen rad „The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship“ [11].

FAIR načela podržavaju ponovnu uporabu podataka od strane znanstvenika, ali posebno naglašavaju mogućnost strojnog pronalaženja i korištenja dostupnih podataka. Računalni sustavi imaju sposobnost da pronađu, pristupe, povežu i ponovno koriste podatke uz minimalnu ili nikakvu ljudsku pomoć [11].

Mjerenja se nadograđuju na ova načela osiguravajući povezanost s Međunarodnim sustavnom mjernih jedinica (SI), ponovljivost, reproduktivnost mjerenja te evaluaciju nesigurnosti mjerenja. Tako se poboljšava kvaliteta istraživačkih podataka. Načela FAIR u industriji osiguravaju da se podaci mogu koristiti za primjenu metoda umjetne inteligencije [2]. Na slici 4.1. su simbolički prikazana FAIR načela.



Sl. 4.1. FAIR načela [11]

4.1.1. Pronalazivost (engl. *findable*)

Pronalaženje podataka je prvi korak u postupku ponovnog korištenja podataka. Važno je da ljudi i računala mogu jednostavno pronaći podatke i metapodatke. Strojno čitljivi metapodaci su značajni za automatsko otkrivanje skupova podataka i usluga. Osnovni koraci za ostvarivanje pronalazivosti su [11]:

- jedinstveni trajni identifikatori (PID) su dodani metapodacima
- podacima je dodan detaljan opis metapodataka
- metapodaci sadrže identifikatore podataka
- metapodaci su registrirani ili indeksirani u pretraživom resursu, odnosno sustavu

4.1.2. Dostupnost (engl. *accessible*)

Nakon što korisnici pronađu podatke, moraju znati kako mogu pristupiti podacima. To može uključivati procese autentikacije i autorizacije. Osnovni koraci za ostvarivanje dostupnosti su [11]:

- pristup metapodacima pomoću identifikatora tako da se koriste standardizirani komunikacijski protokoli
- protokoli su besplatni, otvoreni i prihvaćeni
- protokoli omogućavaju procese autentikacije i autorizacije ukoliko su potrebni
- metapodaci su dostupni čak i kada podaci više nisu dostupni

4.1.3. Interoperabilnost (engl. *interoperable*)

Podaci se uglavnom koriste u kombinaciji s drugim skupovima podataka. Važno je uzeti u obzir interakciju podataka s aplikacijama tijekom njihove analize, pohrane i obrade [11].

Interoperabilnost je sposobnost podataka ili alata koji ne surađuju da se integriraju ili zajednički surađuju uz minimalne napore [6]. Osnovni koraci za ostvarivanje interoperabilnosti su [11]:

- metapodaci koriste formalni, dostupni i standardizirani jezik za prikazivanje znanja
- metapodaci koriste rječnike koji su usklađeni s FAIR načelima
- metapodaci uključuju kvalificirane reference prema drugim metapodacima

4.1.4. Ponovna upotreba (engl. *reusable*)

Ponovna upotreba podataka je glavni cilj FAIR načela. Kako bi se to ostvarilo, važno je detaljno opisati podatke i metapodatke tako da se mogu replicirati ili međusobno povezati u različitim okruženjima. Osnovni koraci za ostvarivanje ponovne upotrebe su [11]:

- metapodaci su detaljno opisani sa puno relevantnih atributa
- metapodaci su objavljeni s jasnom licencom o korištenju
- metapodaci su povezani s informacijama o porijeklu podataka i zadovoljavaju standarde zajednice

FAIR načela su ključna za pravilno upravljanje i očuvanje podataka. Načela se temelje na prethodnim radovima partnera Concept Web Alliance koji su se bavili harmonizacijom podataka i njihovom strojnom izvedivosti (engl. *machine-actionability*). Također, temelje se na Zajedničkoj deklaraciji o načelima citiranja podataka (JDDCP) koju su razvile znanstvene organizacije. FAIR načela su usklađena i sa Data Seal of Approval (DSA). DSA se fokusira na odgovornost proizvođača podataka i repozitorija, a FAIR je fokusiran na same podatke [6].

Korištenje FAIR načela ima brojne prednosti za istraživače, istraživačke zajednice i organizacije. Neke od prednosti su [11]:

- ostvarivanje maksimalnog potencijala podataka
- povećanje vidljivosti i citiranosti istraživanja
- poboljšanje reproducibilnosti i vjerodostojnosti istraživanja
- usklađivanje s međunarodnim standardima i propisima
- poticanje novih oblika suradnje s istraživačima i širom zajednicom
- odgovori na nova istraživačka pitanja
- poticanje korištenja novih inovativnih istraživačkih pristupa i alata

Elementi FAIR načela su povezani, ali su ujedno neovisni i odvojivi. Načela definiraju karakteristike koje bi trebali imati suvremeni resursi podataka kako bi olakšali njihovo otkrivanje i ponovnu uporabu. Primjena načela može biti postupna i prilagodljiva što olakšava proizvođačima podataka da ih primijene. Važna je modularnost načela te razlikovanje podataka i metapodataka prilikom obrade osjetljivih ili osobno identificirajućih podataka. Na primjer, objavljivanjem velike količine metapodataka može se pridonijeti „FAIRness-u“ čak i u slučajevima da podaci nisu objavljeni na način koji zadovoljava FAIR standarde. FAIR načela se mogu jednako primijeniti i na ove elemente koji nisu podaci, a moraju se identificirati, opisati, otkriti i ponovno uporabiti na sličan način kao podaci. Ukoliko zajednica podržava rječnike ili druge standarde metapodataka koji ne sadrže attribute za bogatu anotaciju, potrebno je objaviti proširenje postojećeg rječnika ili stvoriti novi resurs rječnika prema FAIR načelima. Budući da je dostupno više rječnika i standarda metapodataka, prilikom odabira standarda se može koristiti registar BioSharing koji detaljno opisuje standarde i primjenjive verzije [6].

Ono što je važno jest da se FAIR načela ne primjenjuju samo na podatke u osnovnom smislu, nego i na algoritme, alate i procese koji su doveli do tih podataka. Ova načela se primjenjuju na sve znanstvene digitalne istraživačke objekte zato što svi dijelovi istraživačkog procesa moraju biti dostupni da bi se osigurala njihova transparentnost, ponovljivost i ponovna uporabljivost. Za određene vrste važnih digitalnih objekata postoje specijalizirani repozitoriji poput Genbank, Svjetska proteinska banka podataka (wwPDB), UniProt u znanostima o životu, Ured za podatke o svemirskoj fizici (SPDF) i SIMBAD u svemirskim znanostima. Ovi resursi održavaju i prikupljaju skupove podataka te ih podešavaju kako bi poboljšali znanstvene rezultate. Međutim, mnogi skupovi podataka ne mogu biti predani navedenim repozitorijima. Neki skupovi podataka koji proizlaze iz tradicionalnih eksperimenata se ne uklapaju u modele podataka kao što su u specijaliziranim repozitorijima. Takvi skupovi podataka su jednake važnosti kao i podaci u specijaliziranim repozitorijima pa se zbog toga javlja potreba za općim repozitorijima. Takvi repozitoriji su na različitim razinama od institucionalnih, npr. pojedinačno sveučilište, do globalno usmjerenih kao što su Dataverse, FigShare, Dryad, Mendeley Data, Zenodo, DataHub, DANS, EUDat. Oni prihvaćaju različite vrste podataka u brojnim formatima i ne usklađuju pohranjene podatke. Na taj način se podatkovni ekosustav udaljava od centralizacije i postaje sve različitiji, a to dodatno otežava problem otkrivanja i ponovne uporabe podataka [6].

Europski oblak za otvorenu znanost (engl. *European Open Science Cloud*, EOSC) je osmišljen kao podrška europskim istraživanjima, a sadrži i mrežu FAIR istraživačkih podataka. EOSC ima platformu koja pruža besplatne i otvorene usluge za pohranu podataka, upravljanje, analizu i njihovu ponovnu uporabu. Pomoću njega znanstvenici mogu iskoristiti sve prednosti podatkovno utemeljene znanosti i na taj način maksimalno iskoristiti svoj istraživački potencijal [11].

U istraživačkim područjima s brojnim podacima, strojevi imaju značajnu ulogu. FAIR načela su posebno fokusirana na aktivnosti koje obavljaju ljudi i na aktivnosti vođene strojevima. Ljudi i strojevi se često suočavaju s različitim preprekama prilikom pronalaska i obrade podataka na internetu. Ljudi imaju prirodan osjećaj za značenje ili namjenu digitalnog objekta zato što mogu prepoznati i interpretirati kontekstualne znakove uključujući strukturu, vizualne znakove ili sadržaj web stranica. Njihov glavni problem je što ne mogu djelovati u opsegu i brzini potrebnim za suvremena znanstvena istraživanja. Zbog toga se ljudi sve više oslanjaju na računalne agente koji obavljaju zadatke otkrivanja i integracije umjesto njih. To zahtijeva od strojeva da mogu samostalno i adekvatno reagirati na različite vrste, formate i protokole pristupa koje pronalaze tijekom istraživanja. Također je važno da strojevi zabilježe porijeklo podataka koje prikupe kako bi ih mogli točno i pravilno citirati [6].

Digitalni objekt je strojno djelotvoran ako sadrži sve detaljne informacije za računalnog agenta, a te informacije agentu omogućuju:

- identificirati vrstu objekta - struktura i namjena
- utvrditi je li koristan u kontekstu trenutnog zadatka ispitivanjem metapodataka ili podataka
- utvrditi je li uporabljiv s obzirom na licencu, pristanak i druge pristupačnosti ili ograničenja uporabe
- poduzeti odgovarajuće mjere na isti način na koji bi čovjek to napravio

Na primjer, stroj može prepoznati vrstu podataka u otkrivenom digitalnom objektu, ali ih ne može raščlaniti jer su u nepoznatom formatu. U drugom slučaju, stroj može biti sposoban obraditi podatke, ali ne može odrediti uvjete licenciranja povezane s pristupom ili korištenjem tih podataka. Teško je postići optimalno stanje u kojem strojevi mogu samostalno i ispravno raditi na digitalnom objektu. Djelomičnim ili potpunim usvajanjem FAIR načela je moguće postići takvo optimalno stanje [6].

Postoji razlika između podataka koji su strojno djelotvorni zbog specifičnih ulaganja u softver koji podržava tu vrstu i podataka koji su strojno djelotvorni samo korištenjem općenitih otvorenih tehnologija. Problem je što se podatkovno okruženje s novim tehnologijama i složenim vrstama podataka brzo razvija, a raste i broj repozitorija opće namjene u kojima su vrste podataka nepredvidive. Stvaranje prilagođenih programa koji obavljaju sintaktičku analizu nekog jezika (parseri) za sve vrste podataka i sve alate za analizu je neodrživo. Stoga je pomoć strojevima u otkrivanju i istraživanju podataka kroz primjenu općenitih tehnologija i standarda za interoperabilnost ključna za kvalitetno upravljanje podacima [6].

4.2. Primjeri FAIR pristupa i dodane vrijednosti

Dataverse je softver otvorenog koda namijenjen za pohranu podataka. Instaliran je u brojnim institucijama kako bi podržao javne i institucionalne repozitorije istraživačkih podataka. Najveći od njih je Harvard Dataverse koji sadrži više od 60000 skupova podataka i dostupan je istraživačima iz svih znanstvenih područja. Dataverse generira formalni citat za svaku pohranu podataka prema standardu koji su definirali Altman i King. Pohranjeni podaci uključuju metapodatke, datoteke s podacima i dodane datoteke poput dokumentacije i koda koje su potrebne za razumijevanje podataka i analizu. Prilikom objave skupa podataka, Dataverse napravi da Digitalni Objekt Identifikator (DOI) ili drugi trajni identifikatori (Handles) budu javni. Identifikatori vode do određene stranice koja omogućava pristup metapodacima, datotekama

podataka, uvjetima korištenja, licencama i informacijama o verzijama, što čini sadržaj lako pretraživim. Metapodaci su uvijek javno dostupni i imaju tri razine:

1. metapodaci za citiranje podataka koji su usklađeni s DataCite shemom ili Dublin Core Terms
2. metapodaci specifični za određeno znanstveno područje koji su usklađeni sa standardima metapodataka u toj domeni kada god je moguće
3. metapodaci na razini datoteka koji mogu biti detaljni za tablične datoteke podataka

Dataverse pruža javno dostupna sučelja za strojni pristup kako bi se mogli pretraživati podaci, metapodaci i preuzimati datoteke podataka uz uporabu tokena za pristup ograničenim datotekama [6].

FAIRDOM integrira SEEK i openBIS platforme kako bi stvorio sustav za upravljanje podacima i modelima koji je u skladu s FAIR načelima za sistemsku biologiju. Svaki istraživački resurs (pojedinačni podaci ili skup modela) ima jedinstveni i trajni HTTP URL. Oni se mogu registrirati pomoću DOI-a ukoliko trebaju nešto objaviti. Resursima se može pristupiti putem interneta u različitim formatima koji odgovaraju potrebama korisnika i njihovih računala kao što su RDF i XML. Istraživački resursi su obogaćeni detaljnim metapodacima koji koriste standarde, formate i ontologije prihvaćene u zajednici. Metapodaci su pohranjeni kao RDF što omogućava interoperabilnost, a resursi se mogu preuzimati za ponovnu uporabu [6].

ISA je okvir za praćenje metapodataka kojeg razvija zajednica, a cilj mu je olakšati prikupljanje, kuriranje, upravljanje i ponovnu upotrebu bioloških znanstvenih podataka prema standardima. Ovaj okvir omogućuje postupno strukturiranje metapodataka prema FAIR načelima za članke u časopisima poput Nature Specific Data te podržava bazu podataka EBI MetaboLights. U središtu sustava se nalazi ISA model koji ima mogućnost proširivanja i prvobitno je bio dostupan kao tablični prikaz, a kasnije je nadograđen u RDF i JSON formatu. Nakon što se ISA model objavi kao povezani podaci, FAIR načela su zadovoljena i može nadopunjavati druge istraživačke objekte [6].

Open PHACTS je platforma koja obuhvaća podatke za otkrivanje lijekova. Korisnicima omogućava pristup putem strojno prilagođenog sučelja koje podržava formate koje mogu čitati ljudi (HTML) i strojevi (RDF, JSON, XML, CSV). Na taj način su zadovoljena FAIR načela. Sučelje omogućava upotrebu različitih URL-ova za pristup informacija o određenom entitetu pomoću usluge mapiranja. Svi izvori podataka su opisani pomoću standardiziranih opisa poput

VoID standarda koji ima detaljne informacije o porijeklu podataka. Većina skupova podataka je opisana korištenjem ontologije koju su dogovorile zajednice [6].

wwPDB je organizirana arhiva podataka koja sadrži informacije o trodimenzionalnim strukturama proteina i nukleinskih kiselina koje su eksperimentalno određene. Svi zapisi su dostupni na FTP poslužitelju i prikazani su u strojno čitljivim formatima (XML). Metapodaci su detaljno opisani u dokumentima koji se pridržavaju standarda IUCr, a sadrže veze s drugim identifikatorima kao što su PubMed i NCBI Tasonomija. Svaki zapis ima jedinstveni DOI koji mogu koristiti ljudi i strojevi. DOI vodi do zipiranog arhiva datoteka koji zahtjevaju poseban softver za daljnje ispitivanje. Drugi način pristupa podataka je korištenje URL-a [6].

UniProt je izvor podataka o sekvencama proteina i njihovim anotacijama. Svi zapisi su identificirani pomoću URL-a koji omogućuje pristup zapisu u različitim formatima (web stranica, tekst, RDF). Metapodaci su čitljivi ljudima i strojevima. UniProt je povezan s više od 150 različitih baza podataka što omogućuje veze s drugim izvorima poput PubMed-a [6].

4.3. Cyber-fizički sustavi (CPS) i Internet stvari (IoT)

Cyber-fizički sustav (engl. *Cyber Physical system*, CPS) predstavlja kombinaciju fizičkog sustava s komponentama softvera i informacijske tehnologije. Takvi sustavi spajaju elemente iz različitih disciplina i smatraju se izvrsnim primjerima složenih sustava.

Na primjer, mjerni instrumenti prikazuju izmjerene vrijednosti preko digitalnih sučelja najčešće putem bežične veze. Uz to, neki senzori koriste komunikaciju temeljenu na događajima umjesto kontinuiranog uzorkovanja radi štednje baterije. Jeftini digitalni senzori, kao što je MEMS, mogu se jednostavno integrirati u cyber-fizičke sustave u velikom broju. Preciznost i pouzdanost takvih senzora je upitna, a kalibracija ili temeljita mjeriteljska karakterizacija senzora često nije ekonomski opravdana. Kalibracijski laboratoriji nastoje postići što bolju sinkronizaciju mjerenja, ali je to u IoT (engl. *Internet of Things*) okruženju teško postići [2].

CPS-ovi su uglavnom opremljeni sa sensorima koji dostavljaju mjerne podatke za ostale sustave. Na primjer, sustav u proizvodnoj liniji može biti opremljen sensorima za mjerenje veličina kao što su potrošnja energije, zvuk, vibracija i tlak. Sustav za strojno učenje i sustav umjetne inteligencije mogu koristiti te podatke za detekciju anomalija, procjenu preostalog vijeka trajanja ili pružanje informacija o održavanju. Senzori u CPS-ovima formiraju vrstu mreže u kojoj se izmjereni podaci prenose u neku jedinicu za obradu. To može biti lokalno u fizičkom sustavu „na rubu“ ili na

vanjskom poslužitelju u „oblaku“. Zbog toga se mjerni sustav CPS-a može smatrati vrstom mreže Internet stvari (IoT) [2].

Mjeriteljska karakterizacija IoT mreža se suočava sa izazovima nedvosmislene i pouzdane komunikacije te evaluacije izmjerenih podataka. IoT uređaji uglavnom omogućuju povezivanje putem standardnih mrežnih sučelja. Porijeklo podataka koji se prenose u IoT i CPS-u nalazi se u samim sensorima. Zbog toga je važno da informacije o vrsti senzora, količini, jedinici mjerenja, kvaliteti i nesigurnosti budu dostupne na strojno čitljiv način. Za podatke se koristi OPC-UA protokol koji sadrži koncepte i infrastrukturu za komunikaciju između klijenata i poslužitelja, a ujedno predstavlja standard u industrijskom sektoru. U OPC-UA protokolu je dopušteno nekoliko mehanizama i tehnologija za stvarnu komunikaciju i kodiranje izmjerenih podataka. Uslijed toga se javlja potreba za razvojem standarda za kodiranje mjernih jedinica, nesigurnosti i kvalitete podataka. U informacijskoj teoriji postoji nekoliko pristupa za kodiranje informacija na strojno čitljiv način: kontrolirani vokabular, ontologija i taksonomija. Od ovih pristupa se ističe ontologija kao najnapredniji pristup jer kodira odnose i daje objašnjenja pojmova. Također se može koristiti kombinacija ontologija za automatsku analizu izmjerenih podataka u senzorskoj mreži [2].

5. MJERITELJSKI INSTITUTI

Nacionalni mjeriteljski instituti (engl. *National Metrology Institut*, NMI) svake zemlje jamče točnost, dosljednost, povjerljivost i usklađivanje mjerenja. Oni trebaju biti fokusirani na proizvodnju DCC-ova koji su ekvivalentni stvarnim i virtualnim mjerenjima kako bi se ostvarili ciljevi digitalnog SI okvira [1]. Budućnost mjeriteljstva se može planirati tako da se fokusira na znanost o podacima, nove mjeriteljske usluge i inovativne tehnologije. National Physical Laboratory (NPL) i Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) su utjecajni nacionalni mjeriteljski instituti u Europi [5].

5.1. National Physical Laboratory (NPL)

National Physical Laboratory je fokusiran na analizu podataka i pristup koji osnažuje procjenu kvalitete podataka. Njihov zadatak je prenijeti podatke o mjerenju u pouzdanu digitalnu infrastrukturu koja će osigurati povjerenje. Istraživanje i razvoj su im fokusirani na dva glavna područja [5]:

- a) Razvoj tehnika za poboljšanje modeliranja i analize podataka te omogućavanje donošenja pretpostavki i odluka s povjerenjem. To uključuje:
 - tehnike optimizacije i uzorkovanja iz statističkih distribucija kako bi se omogućilo zaključivanje u neizvjesnim situacijama
 - razvoj novih metoda analize podataka, statističko učenje, strojno učenje, identifikacija i klasifikacija značajki
 - kvantifikacija nesigurnosti za analizu podataka kao što je primjena u strojnom učenju i klasifikaciji
 - verifikacija i validacija softvera što uključuje definiciju računalnih ciljeva, generiranje referentnih podataka, samoprovjeru softvera
- b) Razvijanje standarda i platformi za kvalitetu podataka i njihovo porijeklo kako bi se podaci mogli primjenjivati u različitim situacijama. To uključuje poboljšanje ponovljivosti u znanstvenim podacima.

NPL-ova strategija digitalizacije je usmjerena na modernizaciju trenutnih mjeriteljskih usluga i stvaranje novih usluga kojima su ključni podaci i procjena njihove kvalitete. Strategija zahtijeva uspostavljanje „digitalnog povjerenja“ za procjenu kvalitete podataka na nacionalnoj i međunarodnoj razini [5].

5.2. Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

PTB-ov pristup digitalizaciji je definirati digitalnu transformaciju mjeriteljskih usluga i stvaranje novog mjeriteljstva. To uključuje mjeriteljstvo velikih podataka i komunikacijskih sustava te mjeriteljstvo za simulacije i virtualne sustave. Njihovo istraživanje i razvoj su u početku bili usmjereni na digitalizaciju i pojednostavljenje infrastrukture kvalitete. To se izvodilo putem projekata kao što je Metrology Cloud koji generira nove usluge, a ujedno i potiče inovacije iz privatnog sektora. Prioritet je prilagodba trenutnih mjeriteljskih usluga i stvaranje digitalnog radnog tijeka za mjeriteljske usluge. Ova strategija digitalizacije potiče suradnju za razvoj digitalnih kalibracijskih certifikata, ali je prvenstveno fokusirana na infrastrukturu kvalitete. Rezultat toga može biti suzdržavanje mjeriteljske zajednice od sudjelovanja u centraliziranom pristupu koji je fokusiran na potrebe njemačkog tržišta. Na slici 5.1. je prikazana PTB-ova strategija digitalizacije [5].



Sl. 5.1. PTB-ova strategija digitalizacije [5]

Unutar PTB-a, spomenuta interoperabilnost se ostvaruje pomoću sustava E-Files u kojem su sve informacije pohranjene i centralno upravljane. Korisnici mogu putem weba poslati narudžbu za kalibraciju PTB-u. Mjeriteljski podaci koji su potrebni za obradu narudžbe se mogu pohraniti kao strojno čitljivi dokumenti. Narudžba se provjerava unutar sustava E-Files prije nego što se izvrši

obrada. Nakon toga slijedi proces kalibracije koji zahtijeva da se svi podaci pošalju u laboratorij za kalibraciju. Laboratorij mora imati mogućnost digitalnog čitanja i obrade. Mjerni podaci generirani u laboratoriju se prenose u bazu podataka i dodaju se glavnom zapisu podataka. Nakon što su svi podaci dostupni, slijedi izrada digitalnog kalibracijskog certifikata (DCC). Certifikat je kriptografski zaštićen i dostupan korisnicima putem portala E-Service te se narudžba završava [5].

5.3. Federal Institute of Metrology, METAS

METAS-ov pristup je posljednjih godina usmjeren na stvaranje, razvoj i primjenu novih alata i usluga kako bi postao vodeći sudionik u stvaranju digitalnog mjeriteljstva. U pilot projektima se testiraju inovativni pristupi u laboratorijima kako bi se razvili novi alati i mjeriteljske usluge. To se izvodi pomoću analize podataka, modeliranja i simulacije. Takav dinamički pristup omogućuje da METAS-ova strategija digitalizacije bude u interakciji između tri glavna područja [5]:

- 1) Inovativni mjerni sustavi – uglavnom decentralizirani i umreženi mjerni sustavi s jednim ili više senzora
- 2) Digitalne mjeriteljske usluge – usklađivanje korisnikovih potreba i laboratorija za nove proizvode ili postupke koji uključuju inovativne alate
- 3) Dinamični interdisciplinarni okvir za istraživanje i razvoj – kratkoročno isplanirani i provedeni izvještaji o izvedivosti za nove potencijalne istraživačke teme te konceptualni dokazi za nove potencijalne razvojne prilike

METAS-ov pristup digitalizaciji obuhvaća:

- a) Teme istraživanja i razvoja za „Digitalizaciju mjeriteljstva“:
 - Karakteristike integriteta, dostupnosti i povjerljivosti mjernih podataka iz umreženih sustava
 - Digitalizacija kalibracijskih podataka, izvještaja, certifikata (npr. DCC)
 - Upravljanje istraživačkim podacima (engl. *Research Data Management*, RDM)
- b) Teme istraživanja i razvoja „Mjeriteljstva za digitalizaciju“:
 - Analiza velikih količina podataka
 - Simulacija i virtualni mjerni uređaji – certifikacija i verifikacija mjernih sustava koji uključuju digitalne blizance
 - Pouzdanost algoritama umjetne inteligencije i rezultata mjerenja strojnog učenja
 - Kalibracija i pružanje certifikacijskih usluga za industriju 4.0. [5]

Inovativnim mjernim sustavima je osnovni cilj pratiti inovativne tehnologije mjerenja. Glavna podjela je na decentralizirane mjerne instrumente i mjerne sustave koji obuhvaćaju module umjetne inteligencije. Decentralizirani mjerni instrumenti mogu uključivati jedan senzor i decentralizirane module ili više senzora povezanih u mrežu. Mjerni sustavi koji uključuju module umjetne inteligencije se mogu razvijati tijekom vremena. Oni mogu biti ovisni o digitalnim blizancima ili mogu biti dio mjernog sustava kao npr. moduli za preprocesiranje, postprocesiranje ili prikupljanje podataka [5].

Digitalne usluge u mjeriteljstvu se mogu podijeliti na tri glavna dijela: usluga, proces i postupak. Usluga i proces ovise o instituciji zato što laboratoriji uglavnom koriste opće alate i platforme za kreiranje, planiranje i fakturiranje usluga. Kod postupka, laboratoriji imaju slobodu izbora i tu mogu najviše napredovati u istraživanju i razvoju. Cilj digitalne usluge mjeriteljstva je integracija rješenja za stvaranje i upravljanje uslugama koje imaju digitalne laboratorijske postupke. Laboratoriji trebaju omogućiti bolju povezanost počevši od digitalnog oblika stvorenog prema potrebama korisnika sve do digitalnog dokumenta koji daje rezultat usluge (DCC) [5].

Dinamički interdisciplinarni oblik istraživanja i razvoja se može predstaviti kao ontologija koja je usmjerena na razine: podaci (rezultati mjerenja), informacije, znanje, stručnost (mjeriteljska područja) i sadržaj (izvještaji o izvodljivosti).

Kako bi se obradila velika količina digitalizacije i istraživanja u različitim područjima mjeriteljstva, predloženi su pojednostavljeni postupci:

1. postupak – pročišćavanje podataka u informacije tako da se prate industrijski trendovi i usmjeravanje prema strategijama METAS-a
2. postupak – klasifikacija informacija prema postojećim kompetencijama METAS-a i mogućim novim kompetencijama u području znanja
3. postupak – formuliranje kompetencije kako bi se mogla uspostaviti stručna inženjerska znanja i istraživačke teme
4. postupak – primjena definiranih znanja kako bi se dobio popis potrebnih resursa za postizanje novih kompetencija ili stručnosti [5]

6. KVALITETA

6.1. European Metrology Cloud

Digitalna infrastruktura kvalitete „European Metrology Cloud“ je osnovana kako bi podržavala procese ocjene sukladnosti i nadzora tržišta te razvoj arhitektura i novih tehnoloških usluga. Europska komisija je izdala „Strategiju digitalnog jedinstvenog tržišta za Europu“ kako bi mogla ostvariti značajnu ekonomsku korist. Cilj te strategije je uspostava učinkovite infrastrukture koja podržava računalstvo u oblaku i velike podatke kao osnovne tehnologije za pametne usluge. Računalstvo u oblaku ima ključnu ulogu u rješavanju problema vezanih uz vlasništvo, prenosivost podataka i promjenu pružatelja usluga u oblaku. „European Cloud Initiative – Building a competitive data and knowledge economy in Europe“ ima cilj ojačati poziciju Europe u inovacijama podataka, poboljšati konkurentnost i stvaranje digitalnog jedinstvenog tržišta u Europi. Utjecaj inicijativa je vidljiv u zakonskom mjeriteljstvu gdje proizvođači i pravne vlasti surađuju kako bi postigli međusobne ciljeve [7].

6.2. Infrastruktura kvalitete

Infrastruktura kvalitete u svakoj zemlji je ključna za pružanje usluga javnosti i za zaštitu potrošača. Kvaliteta se značajno povećava jer su informacije o kalibraciji preciznije i mogu se automatizirano koristiti. U odnosu na ručni prijenos podataka, značajno je smanjeno vrijeme potrebno za prijenos podataka i uklanjaju se pogreške prilikom prijena. Proizvodi se mogu proizvoditi na održiv način tako da se uštedi na sirovinama, vremenu i energiji, a samim time se i smanjuje emisija CO₂. Na taj način se pridonosi zaštiti okoliša i postizanju globalnih ciljeva u svim državama [8].

Nacionalna infrastruktura kvalitete pokušava prenijeti i uspostaviti oznaku kvalitete u digitalni svijet. To uključuje razvoj pouzdanih i velikih kalibriranih mjernih sustava kako bi se osigurala kvaliteta podataka i povjerenje u njih. Infrastruktura kvalitete pojedine države se temelji na 5 glavnih elemenata: normizacija, akreditacija, mjeriteljstvo, ocjena sukladnosti i kvaliteta. Značajnu ulogu u osiguranju kvalitete i povjerenja u mjerenje ima mjeriteljstvo. Nacionalni mjerni instituti šalju SI jedinice nacionalnom institutu za normizaciju. Zatim taj institut osigurava da poduzeća zadovoljavaju norme i standarde, a u isto vrijeme utvrđuje norme za nacionalno akreditacijsko tijelo. Akreditacijsko tijelo ima zadatak akreditirati mjerne i ispitne laboratorije, inspekcijaska tijela i tijela za certifikaciju te nadzire akreditaciju. Nacionalni mjeriteljski instituti moraju osigurati akreditiranim kalibracijskim laboratorijima sljedive sustave. Na taj način se

osigurava povezanost mjeriteljskih standarda kalibracijskih laboratorija s nacionalnim mjeriteljskim standardima [8].

6.3. Digitalna transformacija u infrastrukturi kvalitete

U infrastrukturi kvalitete (engl. *Quality Infrastructure, QI*) se procesi i radni tokovi temelje na dokumentima poput certifikata ili standarda te na podacima. Mjerni uređaji pod zakonskom regulativnom, kao što je npr. vaga u supermarketu, moraju imati odgovarajući ocjenu sukladnosti i odobrenje tijela za provjeru. Stoga su pokrenuti projekti digitalne transformacije u infrastrukturi kvalitete. Jedan od primjera su tijela za standardizaciju koji rade na razvoju pametnih standarda koji su strojno čitljivi. To će u budućnosti omogućiti strojevima da čitaju standardizirane informacije bez potrebe za poznavanjem točnog broja standarda te bez ljudske pomoći [2].

Isto tako, laboratoriji za kalibraciju, verifikaciju i testiranje su počeli razvijati digitalne strojno čitljive certifikate. Oni omogućuju integraciju informacija i podataka direktno u digitalne infrastrukture. Na taj način se javljaju nove mogućnosti za usluge kalibracije u količini i vrsti informacija koje mogu pružiti. Digitalna transformacija procesa u infrastrukturi kvalitete zahtijeva sigurne platforme pa se predlaže korištenje blokchain tehnologije, npr. Metrology Cloud [2].

6.4. Europska infrastruktura kvalitete

Europska infrastruktura kvalitete ima zadatak poboljšati koordinaciju u Europi te razviti infrastrukturu za kvalitetu podataka i referentne arhitekture za nove tehnologije. Ovim prijedlogom se obuhvaćaju potrebe svih sudionika u mjeriteljstvu što uključuje industriju, ovlaštena tijela i nadzorna tijela tržišta. Kako bi se to ostvarilo, predlaže se [7]:

- udruživanje infrastrukture i baze podataka
- referentne arhitekture
- pojednostavljene i nove mjeriteljske usluge
- europski centar izvrsnosti

Potrebno je razviti digitalnu infrastrukturu kvalitete za europsko zakonsko mjeriteljstvo kako bi se smanjila administrativna opterećenja za poslovne subjekte te ubrzao proces ocjene sukladnosti i nadzora tržišta. Infrastruktura bi trebala povezivati postojeću IT infrastrukturu i baze podataka od industrije, ovlaštenih tijela i nadzornih tijela. Kako bi oni bili povezani u Zakonsku mjeriteljsku mrežu, potrebno je uspostaviti pouzdanu „jezgru“ platforme svakom članu [7].

Industrija i ovlaštena tijela zahtijevaju referentne arhitekture za nove složene tehnologije kao što su kibernetičko-fizički sustavi, Internet stvari (IoT), računalstvo u oblaku ili obrada velikih podataka. Ove arhitekture će biti ključni elementi za europsku digitalnu infrastrukturu kvalitete. Ona ispunjava osnovne zahtjeve europskog zakonodavstva o pravnom mjeriteljstvu te omogućava sigurnost i jednostavnu verifikaciju novih tehnologija [7].

Nove mjeriteljske usluge se mogu razviti na temelju ovih tehnologija i podataka. One mogu obuhvaćati daljinsku verifikaciju i dijagnostiku, održavanje, praćenje stanja, nadzor tržišta putem interneta i usklađenost prema prijedlozima Europske komisije. Koncept „digitalni blizanac“ se može koristiti za uspostavljanje takvih usluga. Administrativni „omotač“ koji sadrži informacije o pojedinačnom mjernom instrumentu se može smjestiti unutar digitalne infrastrukture kvalitete te mu mogu pristupiti svi ovlašteni sudionici. Pametnim spajanjem će se stvoriti velika količina podataka na jednom mjestu što omogućuje jednostavniju primjenu usluga [7].

Europski centar izvrsnosti za mjeriteljsku informacijsku tehnologiju se sastoji od stručnjaka koji će se baviti tehnološkim i pravnim pitanjima vezanim za nove tehnologije te će koordinirati mjeriteljske usluge u Europi (npr. podugovaranjem). Svaki sudionik koji je uključen u zakonsko mjeriteljstvo moći će dobiti savjete i podršku oko informacijskih tehnologija. Europski centar izvrsnosti analizira složene probleme na tržištu te na taj način osigurava jedinstvenu razinu kvalitete u cijeloj Europi. Glavni ciljevi centra su jačanje europske suradnje te održavanje i unapređenje razvijene mjeriteljske infrastrukture. Digitalna infrastruktura će prenijeti spoznaje europskim i međunarodnim organizacijama za razvoj standarda u zakonskom mjeriteljstvu - the European Cooperation in Legal Metrology (WELMEC) i International Organization of Legal Metrology (OIML). Koncept je osmišljen kako bi se moglo obavještavati standardizacijske odbore o napretku. Odbori WELMEC WG 7 i OIML TC5/SC2 mogu aktivno sudjelovati i preporučiti daljnje korake ili istraživanja kako bi rezultati bili korisni za sve sudionike. Europska industrija može koristiti rezultate istraživanja prilikom dizajniranja novih mjernih instrumenata i sustava [7].

6.5. GEMIMEG-II

U Njemačkoj je 2020. godine osnovan projektni konzorcij GEMIMEG-II kojeg financira Savezno ministarstvo za ekonomska pitanja i klimatske akcije (BMWK). Konzorcij se sastoji od 12 partnera i drugih institucija koje imaju savjetodavnu ulogu. Oni doprinose istraživanjima u području DCC-a i uspostavljaju infrastrukturu digitalne kalibracije. Glavni cilj projekta GEMIMEG-II je povezati zahtjeve infrastrukture kvalitete s praktičnim potrebama industrije kroz zajednički pristup koji je primjenjiv u praksi [8].

Projekt je fokusiran na mjeriteljstvo, što uključuje kalibraciju, referenciranje, mjerenje i pružanje pouzdanih informacija o kvalitete mjernih instrumenata, senzorske mreže, digitalnog blizanca i metode analize podataka. Glavni cilj GEMIMEG-II je osigurati informacije koju se potrebne za stvaranje pouzdanih i povezanih mjernih sustava na zakonit način. Rezultati istraživanja se primjenjuju u četiri tzv. „RealBeds“. To su demonstratori koji su usmjereni na različite primjene, a služe kao prototipi. RealBeds obuhvaćaju povezane kalibracijske objekte, aplikacije Industrije 4.0, farmaceutske ili procesnu industriju i autonomnu vožnju [8].

U istraživanjima su važna dva aspekta:

- koliko su pouzdane i vjerodostojne digitalne informacije o mjernim instrumentima i mjernim podacima
- kako se može postići sigurna i robusna koordinacija mjernih sustava

Istraživanja uključuju razvoj digitalnog mjeriteljskog sustava koji omogućuje potpunu digitalizaciju, sljedivost i pravnu sigurnost mjernih i kalibracijskih lanaca za složene senzorske mreže [8].

6.6. Digitalni blizanci

Digitalni blizanci (engl. *Digital Twin*, DT) su precizni numerički prikazi stvarnih uređaja i korištenih procesa koje je razvio GEMIMEG. Digitalni blizanci stvaraju se kombinacijom DCC-a i fizičkih modela, a na njih se primjenjuju numeričke metode. Isto tako, digitalni blizanci razmatraju informacije o sustavu kao što su jedinstveni identifikatori pojedinih komponenti, podaci o trenutnom stanju sustava (mjerene vrijednosti okolišnih uvjeta) te predviđanje o intervalima održavanja. Primjerice, proizvodnja pojedinačnog dijela određene točnosti se može simulirati na različitim proizvodnim linijama, a zatim se odabere proizvodna linija koja stvara najveću dodanu vrijednost [9].

Digitalni blizanci jednostavnih senzora poput temperaturnih senzora predstavljaju osnovne tipove, a digitalni blizanci složenijih mjernih uređaja i sustava se mogu sastaviti od tih osnovnih tipova. Ključno je da svi mogu međusobno komunicirati unutar digitalne platforme, bez obzira na proizvođača. Temelj univerzalnog sučelja digitalnog blizanca je postavljen DCC-om [9].

6.7. Digitalni kalibracijski certifikat

Unatoč globalnoj digitalizaciji, kalibracijski certifikati se još uvijek većinom izdaju u papirnatom obliku ili kao zatvoreni PDF dokument. To stvara brojne probleme i sprječava potpunu

digitalizaciju lanca vrijednosti u svim područjima zato što analogni certifikati imaju često različite dizajne i u slučajevima iste kalibracije. Korištenje analognih kalibracijskih podataka u daljnjim procesima je dugotrajno i sklono pogreškama jer je potrebno ponovno pretvaranje podataka u digitalne formate za određenu proizvodnju. Zbog toga takvi dokumenti ne pridonose poboljšanju proizvodnog procesa. Digitalni kalibracijski certifikat (engl. *Digital Calibration Certificate*, DCC) je razvijen kako bi se riješio taj problem. Cilj je bio razviti međunarodno prihvaćeni DCC format koji bi služio kao sučelje za razmjenu podataka u području mjeriteljstva, posebice u komunikaciji između strojeva. Takav format omogućuje razvoj ostalih formata razmjene u budućnosti, poput digitalnog certifikata ispitivanja za digitalnog blizanca ili Digitalnog zahtjeva za kalibraciju (engl. *Digital Calibration Request*, DCR). DCC se koristi za elektroničko pohranjivanje i autentičnu, kriptiranu, potpisanu distribuciju te dosljedno tumačenje rezultata kalibracije. Primjenom DCC sheme, Digitalni kalibracijski certifikat postaje strojno čitljiv i može se interpretirati. Certifikat se stalno nadograđuje kako bi bio svjetski prihvaćen. Ciljane skupine su sva tijela, vlasti i tvrtke koje trebaju dokaz mjeriteljske sljedivosti svojih mjerenja i koriste te rezultate u suvremenim proizvodnim procesima u okviru IIoT-a ili Industrije 4.0. Među njima su mjeriteljski instituti, ovlaštene instituti, nacionalni kalibracijski centri, kalibracijski laboratoriji i razne industrijske tvrtke koje zahtijevaju sljedive rezultate za svoje sustave upravljanja kvalitetom, [8].

6.7.1. DCC koncept

DCC je u digitalnom obliku definiran pomoću XSD sheme. Za informacije dobivene tijekom kalibracije, shema sadrži definirana polja za obavezne specifikacije i otvorena polja za tekst u kojima kalibracijski laboratorij može navesti dodatne informacije [8].

Digitalni zahtjev za kalibraciju (engl. *Digital Calibration Request*, DCR) je standardizirani digitalni dokument koji omogućuje traženje i specificiranje potrebne kalibracije. Digitalni odgovor na kalibraciju (engl. *Digital Calibration Answer*, DCA) je dokument u koji kalibracijski laboratorij može unijeti dodatne informacije o kalibraciji. Takve informacije se ne bi trebale pojaviti u službenom dokumentu o kalibraciji zbog formalnih razloga, npr. prema standardu ISO IEC 17025. Glavni cilj je osigurati da se svi dokumenti temelje na zajedničkoj strukturiranoj shemi dokumenata DX. Ta shema mora uzeti u obzir standarde, norme, nomenklature i tehničke propise. Na taj način je osigurano da se kalibracija digitalno dokumentira na ispravan način u skladu sa standardima i normama [8].

Opća struktura DDC-a je podijeljena na četiri područja:

- **Administrativni podaci** – regulirano područje

Administrativni podaci sadrže ključne informacije o DCC-u. Polja podataka su unaprijed određena. Informacije se uglavnom nalaze na prvoj stranici analogne kalibracijske potvrde. Pomoću njih se jasno identificiraju kalibracijski laboratoriji, predmeti i korisnici kalibracije. Svi podaci su formatirani prema međunarodnim standardima, a slova se mogu koristiti u obliku Unicode-a. Brojevi su prikazani u obliku arapskih brojeva, a glavni jezik je engleski. Identifikatori su jasno definirani [12].

- **Rezultati mjerenja** – djelomično regulirano područje

Prikazivanje rezultata mjerenja je jedan od najzahtjevnijih zadataka u okviru DCC-a zbog različitih načina na koje se rezultati mogu prikazati. Potrebno je omogućiti jednostavnu strukturu za korisnike koji nemaju vlastiti format razmjene podataka. Zbog toga se ovo područje ne može općenito regulirati. Jedino je strogo regulirano da rezultati mjerenja moraju biti potpuno prikazani isključivo na temelju SI jedinica. Rezultati mogu biti prikazani kao skalar, vektor, matrica ili tenzor. Kompletan rezultat mjerenja treba sadržavati: identifikator, vrijednost mjerenja, proširenu mjernu nesigurnost, faktor pokrivenosti, jedinicu, vrijeme [12].

Identifikatori se sastoje od Unicode slova, a brojevi i formati vremena su definirani prema postojećim standardima. Prikazivanje faktora proširenja i jedinice je definirano standardima BIPM-a. Jedinice koje nisu dio SI sustava se također mogu prikazati. Moguće je koristiti pojedinačne strukture podataka pod uvjetom da su rezultati potpuni i uključuju SI jedinice. Kod pojedinačnih struktura podataka često nedostaju opisni elementi i informacije o nesigurnosti mjerenja pa su stoga potrebne prilagodbe. Potrebno je osigurati alate za vizualizaciju sadržaja. Univerzalna struktura podataka je linearna i sastoji se od tekstualnih blokova i rezultata mjerenja [12].

- **Komentari** – neregulirano područje

Odjeljak za komentare pruža dodatne informacije o procesu mjerenja. Korištenje ovog odjeljka je opcionalno. U njemu se mogu nalaziti različiti podaci poput grafika mjernih krivulja, video i audio informacije te pojedinačne serije mjerenja u različitim formatima [12].

- **Dokument** – dodatno područje

U ovom dijelu je moguće pohraniti opcionalnu verziju kalibracijskog certifikata u PDF-A formatu koji je u skladu sa prethodnom papirnatom verzijom. Na taj način korisnici DCC-

a mogu vidjeti poznati oblik svog kalibracijskog certifikata tijekom prelaska na digitalni sustav. PDF-A se može kodirati u Base64 i pohraniti u XML formatu zajedno s odgovarajućim informacijama [12].

6.8. Ko-kalibracija senzora

Kalibracija je proces ispravljanja sustavnih pogrešaka u očitanjima senzora tako da se uspoređuju poznata mjerenja prvog uređaja s nepoznatim mjerenjem drugog uređaja kako bi se prilagodili parametri drugog uređaja i osigurala točnost mjerenja. Ovaj proces također uključuje prilagođavanja neobrađenih očitavanja senzora kako bi se dobile ispravljene vrijednosti na način da se preslikavaju u standardizirane jedinice. Tradicionalna kalibracija jednog senzora zahtijeva specifičan podražaj s poznatim rezultatom i na taj način izravno povezuje izlaz senzora i očekivane vrijednosti. Takva kalibracija je često ograničena specifičnim rasponima i radnim uvjetima prema specifikacijama proizvođača. Može se provoditi u tvornici tijekom proizvodnje ili ručno na terenu. Osim kalibracije na razini komponenti, senzori se moraju kalibrirati i na razini uređaja kada se koriste kao dio mjernog sustava. Ponovna kalibracija je potrebna kako bi se osigurala ispravnost mjernog uređaja zato što senzori i ostala mjerna oprema s vremenom stare i podložni su raznim faktorima. Kada se proces obavlja na terenu u bežičnim mrežama senzora, bez kontroliranog okoliša, naziva se samokalibracija u nekontroliranom okruženju [13].

Kalibracija u mrežama senzora se suočava s brojnim izazovima zato što se mreža sastoji od velikog broja uređaja koji najčešće nemaju sučelje za kalibraciju. Zbog toga je kalibracija na licu mjesta dugotrajna i teška za izvođenje. Senzorski čvorovi su izloženi okolišnoj buci i mogućim kvarovima hardvera. Uvjeti pod kojima se provodi tvornička kalibracija se razlikuju od terenskih uvjeta što dodatno otežava kalibraciju.

Yamamoto [14] zaključuje da se temperaturni senzori kalibrirani na jednom mjestu ponašaju drukčije kada se pojave na drugom mjestu zbog razlike u okolišnim uvjetima između dva mjesta.

Izbor kalibracijskog modela utječe na točnost kalibracije. Senzori se opisuju funkcijom odgovora koja povezuje mjerene parametre (skup X) s izlaznim parametrom (Y) koji je izražen kao

$$Y = f(\beta, X) \quad (6-1)$$

gdje je β koeficijent kalibracije. Kalibracijska krivulja se dobije tako da se funkcija odgovora prilagodi eksperimentalnim podacima koji sadrže izmjereni signal u odnosu na poznati stvarni

signal. Ovisno o vrsti fenomena koji se mjeri, funkcija može biti linearna, logaritamska, eksponencijalna ili neki drugi matematički model [13].

Temperaturni senzori u bežičnim senzorskim mrežama slijede linearnu funkciju odziva u kojoj je stvarna vrijednost y prikazana kao linearna funkcija izmjerene vrijednosti x

$$y \sim f(\beta, x) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (6-2)$$

gdje je β_0 kalibracijski koeficijent pomaka i β_1 kalibracijski koeficijent pojačanja. Stoga je prema literaturi [13] odabran kalibracijski model linearne regresije za ko-kalibraciju temperaturnih senzora.

Ko-kalibracija se koristi u stvarnim procesnim okruženjima gdje su podaci dostupni u kontinuiranim tokovima koji pružaju mjerne podatke. Vremenska usklađenost mjernih podataka se ne može garantirati. Podaci mogu odstupati zbog kvarova senzora ili gubitaka uzrokovanih komunikacijskim pogreškama [15].

Algoritmi za kalibraciju na licu mjesta služe za kalibraciju mjernih instrumenata na terenu, po mogućnosti bez fizičkog posredovanja. Rezultati kalibracije se mogu pratiti pomoću referentnih vrijednosti. Uvođenje dodatne mjeriteljske opreme u senzorsku mrežu nije uvijek dostupno. Kalibracija na licu mjesta se oslanja samo na dostupne i praćene informacije mjerenja u senzorskoj mreži. To podrazumijeva situacije u kojima nije dostupan službeni postupak referentnog mjerenja, nego se umjesto toga formira virtualni referentni podatak iz homogene i suradničke senzorske mreže. U homogenim ko-kalibracijama se koriste samo referentni senzori koji su prostorno bliski (ko-lokacija) i mjere istu veličinu [16].

U 7. poglavlju će biti opisana primjena ko-kalibracije na praktičnom primjeru.

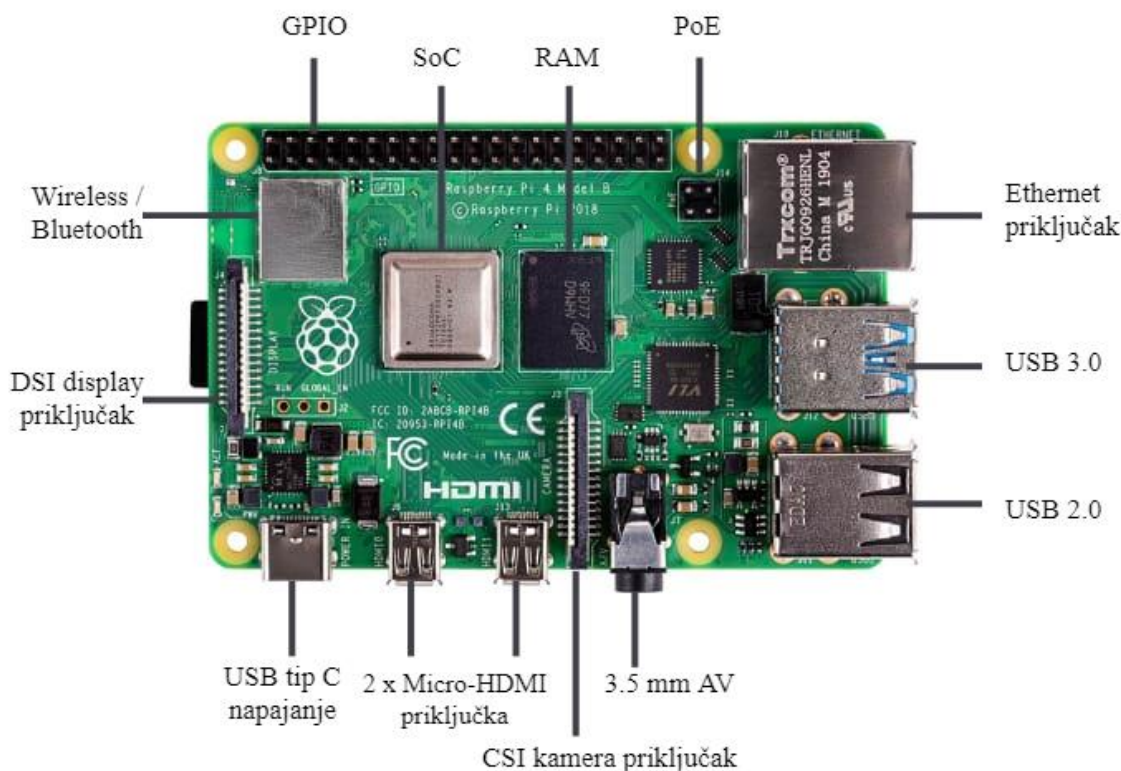
7. ANALIZA TEMPERATURA SENZORA POMOĆU RASPBERRY PI-A

Za prikupljanje podataka s temperaturnih senzora se koristi Raspberry Pi 4 Model B. Raspberry Pi je uređaj koji predstavlja računalo u malom po vrlo povoljnoj cijeni. Može se koristiti za pregledavanje interneta, učenje programiranja i stvaranje jednostavnijih elektroničkih sklopova. Raspberry Pi je računalo smješteno na jednoj tiskanoj ploči i može obavljati sve zahtjeve kao i veće računalo, ali mu je potrebno više vremena zbog svojih ograničenih karakteristika. Svi modeli Raspberry Pi-a su kompatibilni što znači da softver napisan za jedan model može raditi na bilo kojem drugom modelu [17].

U odnosu na klasično računalo kojemu se dijelovi nalaze unutar kućišta, Raspberry Pi ima sve vidljive komponente i dijelove. Na taj način omogućuje lakše učenje i spajanje različitih dijelova računala [17].

7.1. Raspberry Pi komponente

Na slici 7.1. je prikazan Raspberry Pi 4 Model B.



Sl. 7.1. Raspberry Pi 4 Model B komponente [17]

System-on-chip (SoC) predstavlja silicijski čip koji je ispod metalnog poklopca i na njemu se nalazi većina sustava Raspberry Pi-a. Sastoji se od središnje procesorske jedinice (CPU) koja predstavlja „mozak“ računala i grafičke procesorske jedinice (GPU) koja se bavi vizualnim stvarima.

RAM je radna memorija Raspberry Pi-a koja privremeno pohranjuje podatke dok se radi na uređaju. Nakon spremanja rada, podaci se trajno pohranjuju na microSD karticu. RAM je promjenjiva memorija i gubi svoj sadržaj kada se uređaj isključi, a nepromjenjiva microSD kartica čuva podatke.

Na gornjem lijevom dijelu ploče se nalazi metalni poklopac koji prekriva radio komponentu. Ona omogućuje bežičnu komunikaciju s uređajima tako što djeluje kao WiFi radio za povezivanje s računalnim mrežama i Bluetooth radio za povezivanje s mišem i pametnim uređajima.

Na uređaju se nalaze 4 USB priključka koji omogućuju povezivanje tipkovnice, miša, digitalne kamere ili USB memorije.

Ethernet priključak, odnosno mrežni priključak služi za povezivanje Raspberry Pi-a s računalnom mrežom pomoću kabela koji na krajevima ima RJ45 konektor.

Audio-vizualni (AV) priključak može služiti kao priključak za slušalice, ali osim audio signala može prenositi i video signal te se povezati s TV-om, projektorom ili drugim zaslonima koji podržavaju video signal pomoću posebnog kabela.

Na gornjem dijelu ploče se nalazi 40 metalnih pinova koji su podijeljeni u dva reda po 20 pinova. GPIO (general-purpose input/output) se koristi za komunikaciju s dodatnim hardverom poput LED dioda, tipki, senzora temperature.

Power over Ethernet (PoE) HAT (engl. *Hardware Attached on Top*) ploča ima 4 pina i omogućava Raspberry Pi-u da se napaja preko mrežnog priključka umjesto preko USB tip C priključka [17].

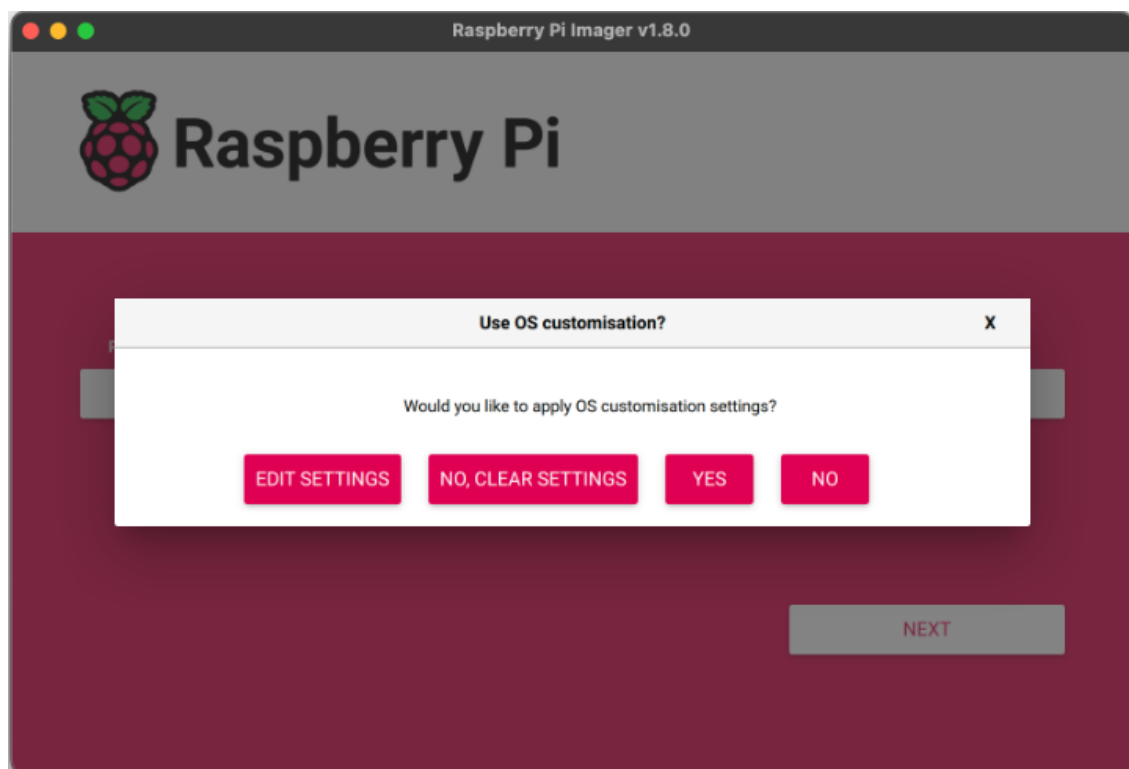
7.2. Pokretanje Raspberry Pi-a

Za pokretanje Raspberry Pi-a potrebno je napajanje i medij za pokretanje, na primjer microSD kartica koja ima dovoljno prostora za pohranu. Raspberry Pi se može postaviti kao interaktivno računalo s radnom površinom ili kao „headless“ računalo kojemu se može pristupiti samo putem

mreže. Za postavljanje „headless“ računala potrebno je unaprijed konfigurirati naziv hosta, korisnički račun, mrežnu vezu i SSH kada se instalira operativni sustav. Ukoliko se izravno koristi Raspberry Pi, potreban je zaslon, kabel za napajanje uređaja, tipkovnica i miš. Raspberry Pi modeli dolaze s Wi-Fi i Bluetooth vezom. Model B označava da ima mogućnost Ethernet priključka, a Model A označava da nema Ethernet priključka [18].

Operativni sustav se može pokrenuti s uređaja za pohranu kao što su SD kartica, USB, pohrana putem HAT-a i mrežna pohrana. U ovom slučaju je odabrana microSD kartica kao uređaj za pokretanje. Instalacija operativnog sustava je izvršena pomoću Raspberry Pi Imagera. To je alat koji pomaže pri preuzimanju i zapisivanju slika na macOS-u, Windowsu i Linuxu. Podržava slike u .img formatu i .zip formate spremnika.

Za instalaciju Imagera potrebno je preuzeti najnoviju verziju s raspberrypi.com/software i pokrenuti instalacijski program. Nakon instalacije, potrebno je otvoriti aplikaciju i odabrati model uređaja, operativni sustav i pohranu. Prije nego što se odabere pohrana, potrebno je pomoću čitača SD kartice priključiti microSD karticu na računalo [18]. Nakon toga će se pojaviti skočni prozor koji traži promjene prilagodbe OS-a koji je prikazan na slici 7.2.

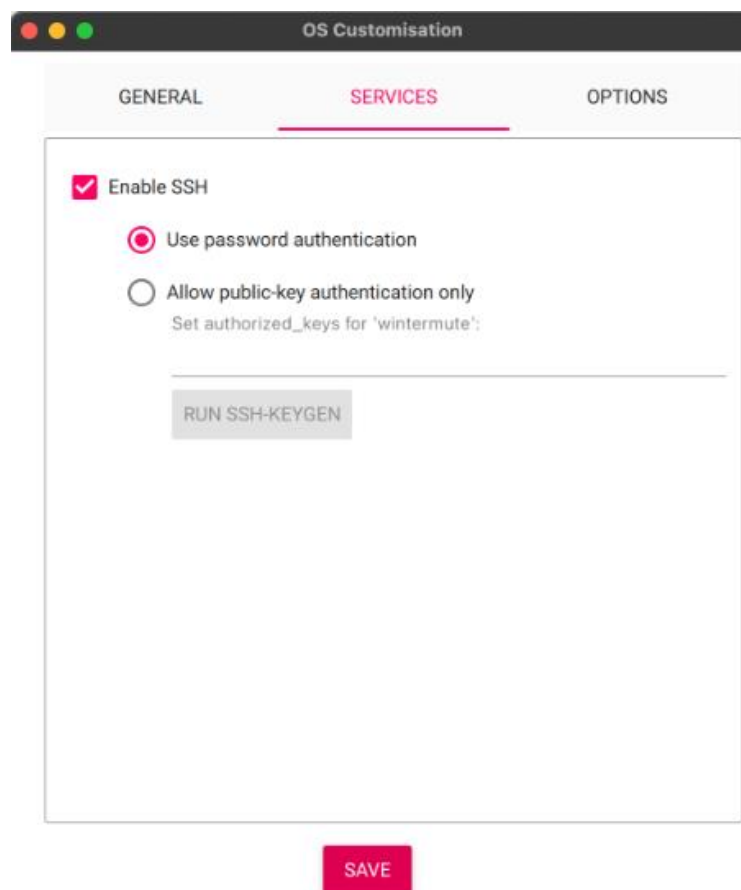


Sl. 7.2. Prilagodbe OS-a [18]

Odabrana je prilagodba postavki OS-a. Moguće je unaprijed konfigurirati:

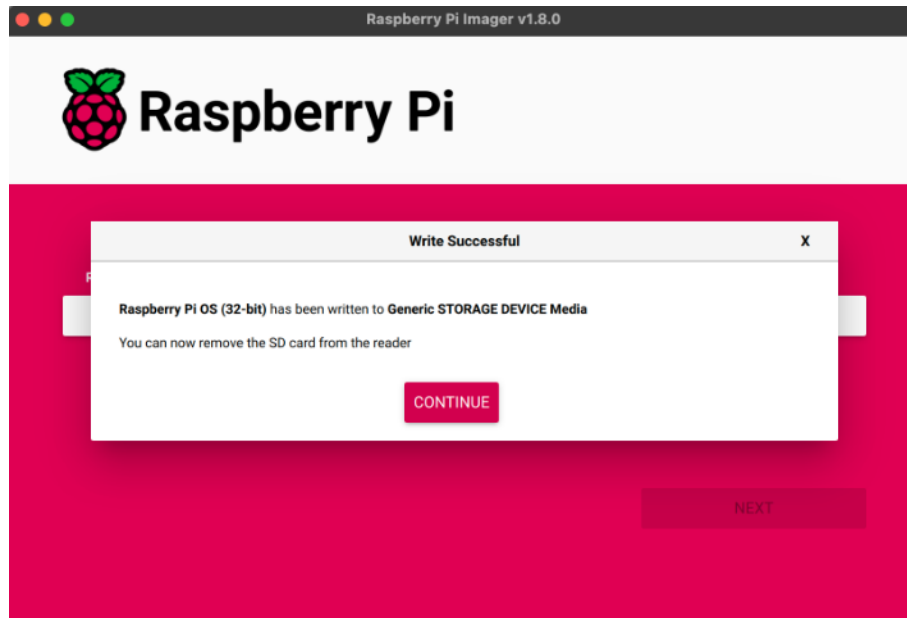
- Korisničko ime
- Lozinku
- Wi-Fi
- Naziv hosta uređaja
- Vremensku zonu
- Tipkovnicu
- Daljinsko povezivanje

Kartica „Usluge“ sadrži postavke koje omogućuju povezivanje Raspberry Pi-a na daljinu. Potrebno je odabrati „Omogući SSH“ za daljinsko povezivanje kako je prikazano na slici 7.3. [18].



Sl. 7.3. OS prilagodba – usluge [18]

Odabrana je „provjera autentičnosti lozinke“ za SSH pomoću korisničkog imena i lozinke. Nakon spremanja postavki slijedi zapisivanje podataka na uređaj za pohranu. Kada se pojavi skočni prozor „Uspješno pisanje“ kao na slici 7.4., Raspberry Pi je spreman za pokretanje s uređaja za pohranu.



Sl. 7.4. Skočni prozor - uspješno pisanje [18]

MicroSD kartica se nakon toga može izvaditi iz računala te priključiti na Raspberry Pi. Potrebno je uređaj spojiti na napajanje. Nakon svih koraka, Raspberry Pi je uspješno postavljen i spreman za rad. On sadrži mnoge predinstalirane aplikacije koje se mogu odmah početi koristiti [18].

7.3. Povezivanje temperaturnih senzora i Raspberry Pi-a

Za mjerenje temperature je odabran digitalni temperaturni senzor DS18B20 koji može mjeriti temperature u rasponu od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ pomoću Raspberry Pi-a. Teoretski se može spojiti do 128 senzora na jedan GPIO zato što će svaki dobiti jedinstveni serijski broj. S obzirom da se napajanje koristi iz Raspberry Pi-a, preporučeno je maksimalno 50 senzora [19].

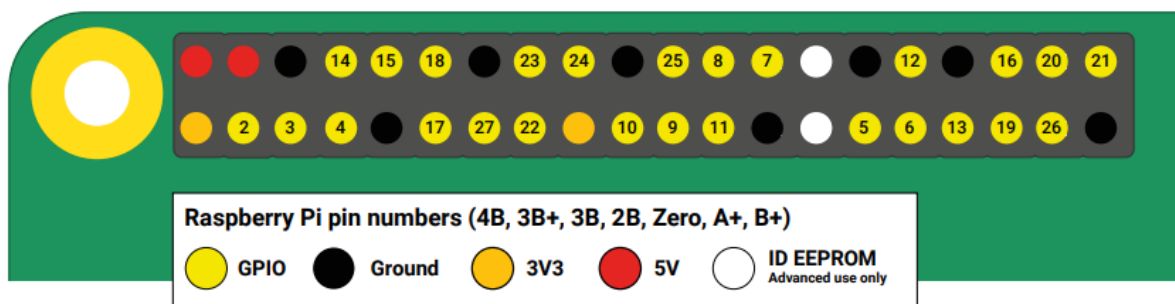
Potrebna oprema za projekt je:

- Raspberry Pi
- 5 vodootpornih temperaturnih senzora DS18B20
- eksperimentalna pločica
- set kabela muško-ženski

- set kabela za eksperimentalnu ploču
- otpornik 4,7 kΩ

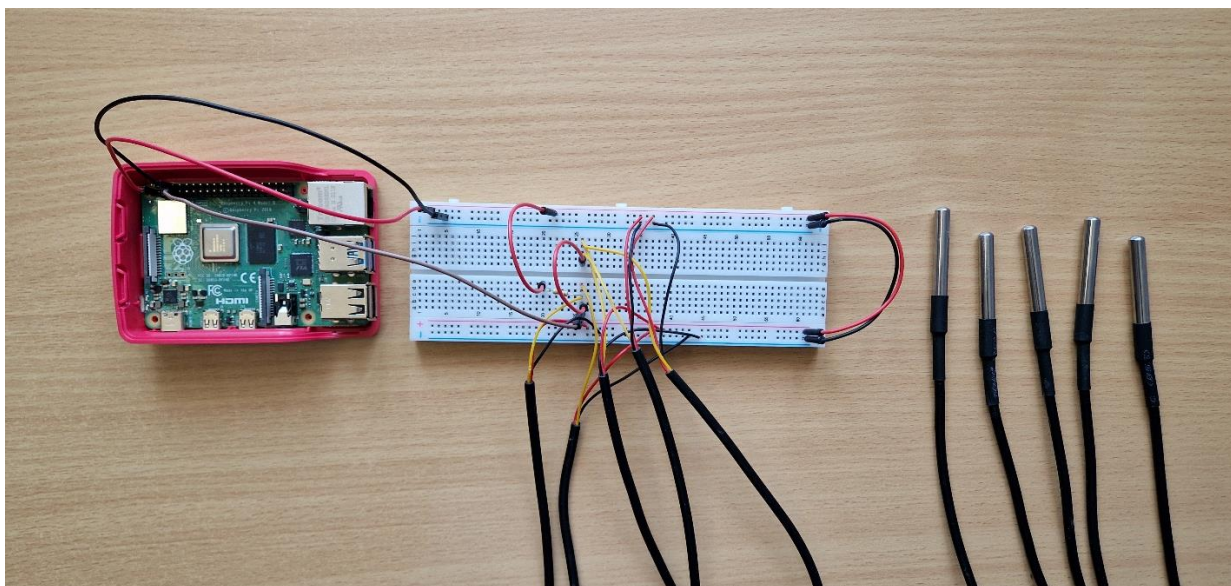
Temperaturni senzor DS18B20 se sastoji od tri žice – crna za uzemljenje, crvena za napajanje na 3,3 V i žuta za podatke. Za jednostavnije povezivanje senzora s Raspberry Pi-em se koristi eksperimentalna pločica. Ona se sastoji od rupa koje su međusobno udaljene 2,54 mm i ispod njih se nalaze metalne trake koje djeluje kao spojene žice. Trake vode u redovima preko ploče, a većina ploča ima razmak u sredini koji ih dijeli na dvije polovice. Trake označene crvenim i plavim prugama su napojni vodovi i služe da olakšaju ožičenje. Za povezivanje na pločici se koriste muško-muški kabeli, a za povezivanje pločice i Raspberry Pi-a se koriste muško-ženski kabeli [19].

DS18B20 temperaturni senzor koristi komunikacijski protokol s jednom žicom. Svaki senzor ima jedinstvenu adresu i zahtjeva samo jedan pin mikrokontrolera za prijenos podataka. Raspberry Pi podržava jednu žicu na bilo kojem GPIO pinu, ali je odabran GPIO4. Otpornik 4,7 kΩ je potrebno postaviti između podataka i napajanja, odnosno između pinova GPIO4 i 3V3 napajanja. Nakon ožičenja senzora, potrebno je povezati kabele s uzemljenjem, napajanjem (3,3 V) i GPIO4 na Raspberry Pi-u [19]. Na slici 7.5. je prikazan raspored GPIO pinova.



Sl. 7.5. Raspored pinova na Raspberry Pi-u [17]

Na slici 7.6. je prikazano povezivanje senzora i Raspberry Pi-a pomoću eksperimentalne ploče i kabela.



Sl. 7.6. Povezivanje senzora i Raspberry Pi-a

Potrebno je omogućiti 1-wire sučelje za očitavanje podataka sa senzora. Za to je potrebno pomoću Desktop sučelja odabrati *Preferences > Raspberry Pi Configuration > Interfaces >* te kliknuti *Enabled* za 1-wire sučelje. Može se koristiti i *raspi-config* pomoću terminala. Nakon toga se Raspberry Pi treba ponovno pokrenuti pomoću *sudo reboot* [19].

Za identifikaciju serijskog broja senzora je potrebno dodati 1-wire i termometarske drajvere:

```
sudo modprobe w1-gpio
```

```
sudo modprobe w1-therm
```

Za očitavanje temperatura u Pythonu se koristi skripta iz literature [19] koja je prilagođena i izmijenjena za više senzora.

7.4. Rezultati mjerenja

Kreirane su dvije datoteke:

- Index.html – za prikaz stranice i crtanje grafova
- Python datoteka – za očitavanje vrijednosti senzora i pokretanje web servera kojim se prikazuje stranica

Kod za Indeks.html se nalazi u prilogu 1. U Indeks.html se koriste 3 tehnologije: HTML, JavaScript i CSS. HTML je jezik za označavanje koji se koristi za prikaz i raspored informacija. CSS je jezik za stiliziranje koji se koristi za uređivanje sadržaja (promjena boja, fonta, crtanje grafova i ostalo). JavaScript je programski jezik koji se koristi za učitavanje skripti tako da se koriste gotove tehnologije poput *chart.js* za crtanje grafova i *chartjs-adapter-date-fns* za automatsko korištenje datuma.

Kada se stranica učita, prvo se poziva *Document.addEventListener*. To su prislušivači (engl. *event listeners*) koji čekaju događaj učitavanja stranice te se nakon toga učitavaju temperature sa servera pomoću funkcije *fetchTemperatures*. Temperature se spremaju i stavljaju u niz zbog ko-kalibracije. Na stranicu se ispisuje glavna temperatura te ostale temperature senzora.

Funkcija za izračunavanje linearne regresije koristi formulu

$$y = a x + b \quad (7-1)$$

gdje y predstavlja u ovom slučaju referentnu temperaturu, a x očitavanje senzora, a je koeficijent pojačanja, a b je koeficijent pomaka. Koeficijenti linearne regresije se izračunavaju pomoću metode najmanjih kvadrata koja minimizira zbroj kvadrata razlika između promatranih i predviđenih vrijednosti. Koeficijent a se računa prema formuli:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (7-2)$$

Koeficijent b se računa prema formuli:

$$b = \frac{\sum y_i - a \sum x_i}{n} \quad (7-3)$$

Ukoliko je $n < 2$ učitane su manje od dvije temperature i nije moguće izvršiti ko-kalibraciju. Funkcija za crtanje grafova prikuplja x, y i y kalibrirane vrijednosti.

Kod za Python datoteku se nalazi u prilogu 2. *Import os* omogućuje prolazak kroz datoteke, *import glob* se koristi za globalne varijable, *import time* i *datetime* su potrebni za dohvaćanje trenutnog vremena s računala, Flask je potreban za web server kako bi se mogla prikazati web stranica i ruta s učitanim temperaturama.

Funkcija za čitanje temperatura radi na način da se temperature spremaju u datoteke i svaki senzor predstavlja zaseban uređaj koji zapisuje svoje vrijednosti u datoteke. Vrijednosti se konstantno

osvježavaju. Potrebno je dohvatiti sve foldere koji se nalaze u `/sys/bus/w1/devices/` i počinju s 28-xxxxxx jer taj broj predstavlja broj temperaturnog senzora. Pokretanje servera pomoću `host='0.0.0.0.'` se koristi da bi se omogućio bežični pristup drugim uređajima. Za pokretanje je potrebno upisati python ime-datoteke.py te navigirati u web pregledniku na IP adresu 192.168.1.8:5000.

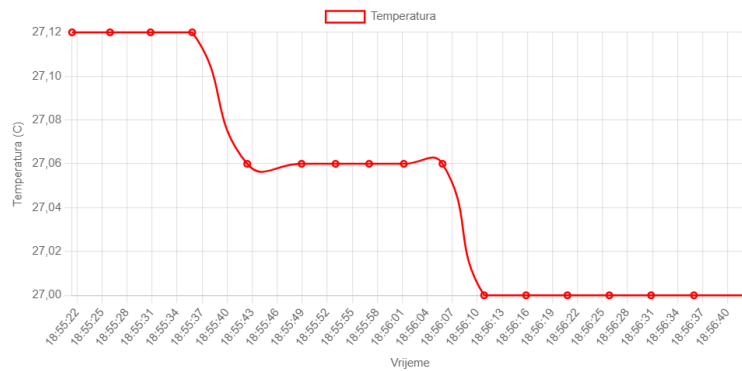
Na slikama je prikazana web stranica sa ispisanim temperaturama. Na stranici se nalaze vrijednosti temperature referentnog senzora i ostalih senzora u tri različita uvjeta: pri sobnoj temperaturi, nakon zagrijavanja senzora te nakon hlađenja senzora.

A) Temperature senzora pri sobnoj temperaturi

Glavna temperatura

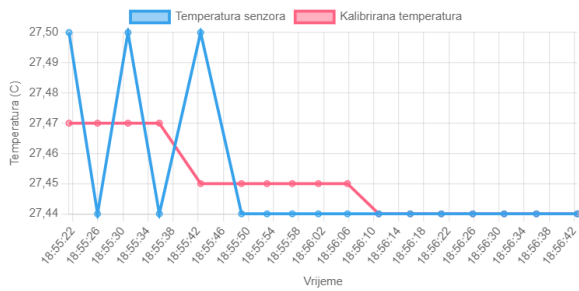
27 °C
18:56:38

Referentna temperatura

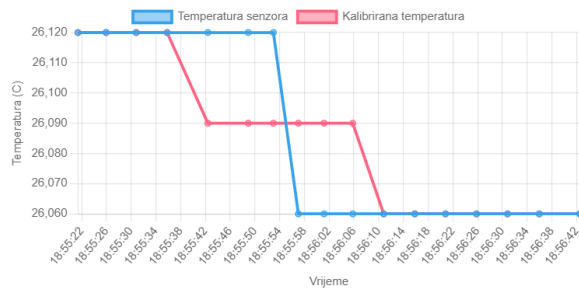


Temperaturne razlike

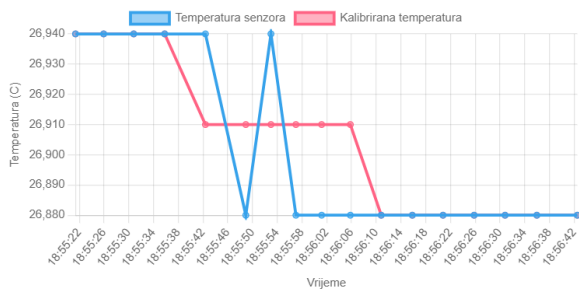
Temperatura 1: 27.44 °C
Razlika 1: 0.44 °C
Kalibrirana 1: 27.44 °C
Koefficient 1: a=0.24, b=20.92
18:56:38



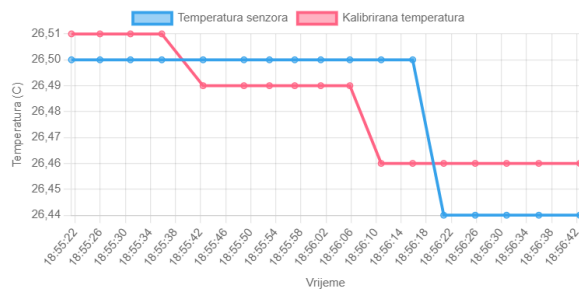
Temperatura 2: 26.06 °C
Razlika 2: -0.94 °C
Kalibrirana 2: 26.06 °C
Koefficient 2: a=0.50, b=12.56
18:56:38



Temperatura 3: 26.88 °C
Razlika 3: -0.12 °C
Kalibrirana 3: 26.88 °C
Koefficient 3: a=0.48, b=13.83
18:56:39



Temperatura 4: 26.44 °C
Razlika 4: -0.56 °C
Kalibrirana 4: 26.46 °C
Koefficient 4: a=0.39, b=15.84
18:56:41



Sl. 7.7. Temperature senzora pri sobnoj temperaturi

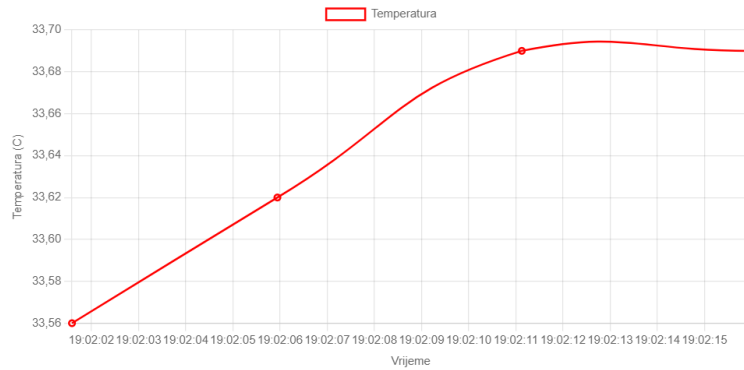
B) Temperature senzora nakon zagrijavanja

Glavna temperatura

33.69 °C

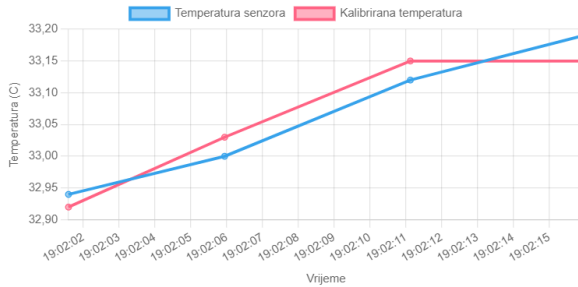
19:02:13

Referentna temperatura

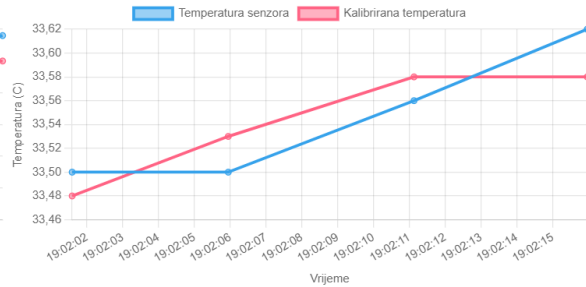


Temperaturne razlike

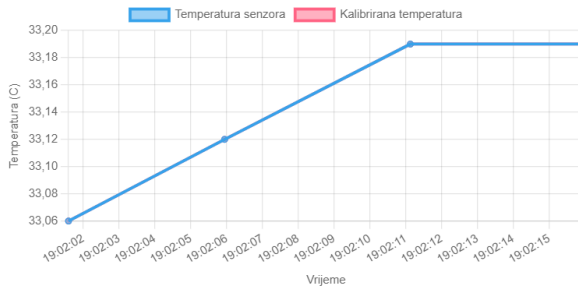
Temperatura 1: 33.19 °C
 Razlika 1: -0.50 °C
 Kalibrirana 1: 33.15 °C
 Koeficijent 1: a=1.72, b=-24.81
 19.02.13



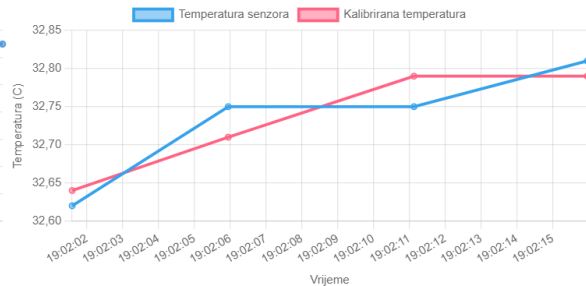
Temperatura 2: 33.62 °C
 Razlika 2: -0.07 °C
 Kalibrirana 2: 33.58 °C
 Koeficijent 2: a=0.76, b=7.89
 19.02.14



Temperatura 3: 33.19 °C
 Razlika 3: -0.50 °C
 Kalibrirana 3: 33.19 °C
 Koeficijent 3: a=1.00, b=-0.50
 19.02.14



Temperatura 4: 32.81 °C
 Razlika 4: -0.88 °C
 Kalibrirana 4: 32.79 °C
 Koeficijent 4: a=1.14, b=-5.47
 19.02.15



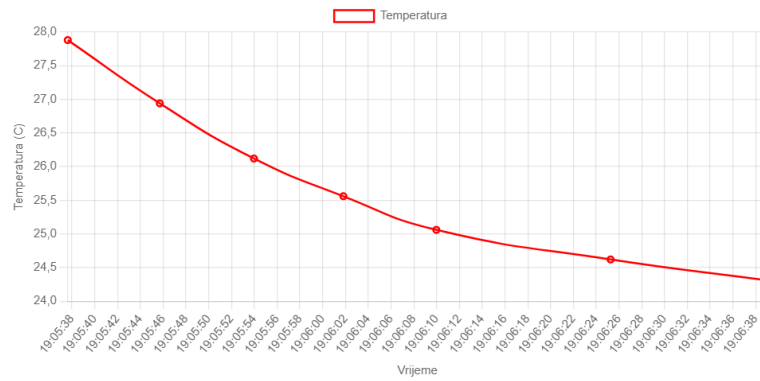
Sl. 7.8. Temperature senzora nakon zagrijavanja

C) Temperature senzora nakon hlađenja

Glavna temperatura

24.31 °C
19:06:20

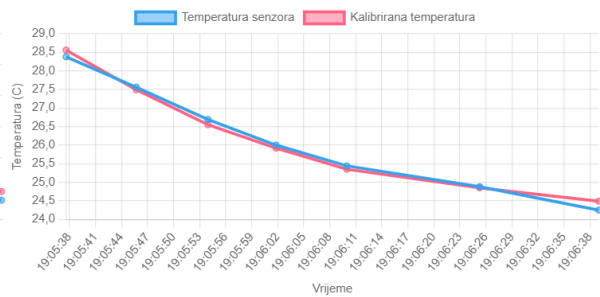
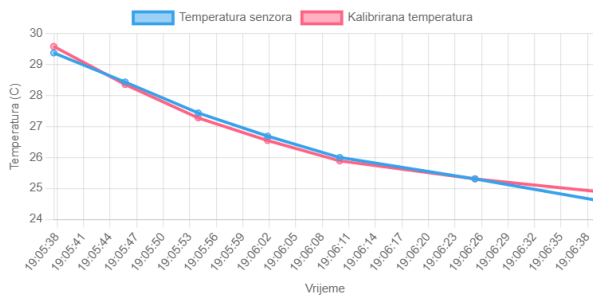
Referentna temperatura



Temperaturne razlike

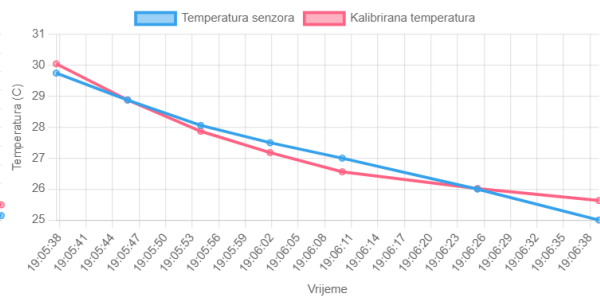
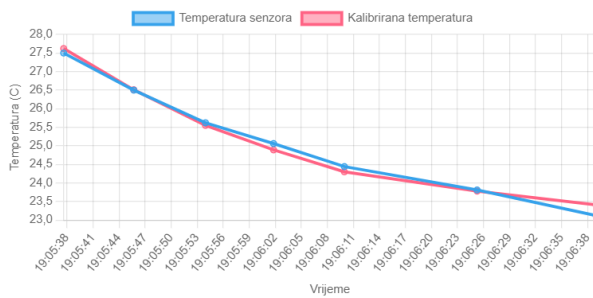
Temperatura 1: 24.62 °C
Razlika 1: 0.31 °C
Kalibrirana 1: 24.90 °C
Koeffcijent 1: a=1.31, b=-7.05
19.06.20

Temperatura 2: 24.25 °C
Razlika 2: -0.06 °C
Kalibrirana 2: 24.49 °C
Koeffcijent 2: a=1.14, b=-3.16
19.06.25



Temperatura 3: 23.12 °C
Razlika 3: -1.19 °C
Kalibrirana 3: 23.41 °C
Koeffcijent 3: a=1.18, b=-5.26
19.06.29

Temperatura 4: 25 °C
Razlika 4: 0.69 °C
Kalibrirana 4: 25.63 °C
Koeffcijent 4: a=1.24, b=-4.42
19.06.33



Sl. 7.9. Temperature senzora nakon hlađenja

Za sva tri slučaja su prikazane glavna temperatura, temperaturne razlike te njihovi grafovi u stvarnom vremenu. Temperature se prikupljaju svakih 5 sekundi. Za referentni senzor je prikazan graf s jednom krivuljom jer prikazuje samo referentnu temperaturu, a ostali senzori sadrže grafove s dvije krivulje od kojih plava predstavlja temperaturu senzora, a crvena ko-kalibriranu temperaturu. Na y osi se nalazi temperatura prikazana u °C, a na x osi se nalazi globalno vrijeme. Za svaki senzor je ispisana temperatura, razlika u odnosu na referentnu temperaturu, kalibrirana vrijednost te temperature i koeficijenti linearne funkcije prema kojoj se vrši ko-kalibracija.

U slučaju A glavna temperatura opada sa 27.12 °C na 27 °C i tu zadržava svoju vrijednost nakon što je postignuta sobna temperatura. Graf temperature 1 prikazuje značajnije oscilacije očitavanja senzora prije nego što temperatura padne i postane stabilna, a kalibrirana temperatura je stabilna i blizu temperature senzora. Graf temperature 2 ima manje oscilacije u temperaturi senzora i kalibrirana temperatura je prati uz manje oscilacije. Na grafu 3 su također prisutne manje oscilacije. Na grafu 4 kalibrirana temperatura ne postiže istu vrijednost kao temperatura senzora, ali nije značajna razlika.

U slučaju B glavna temperatura se stabilizira nakon zagrijavanja i postiže vrijednost 33,69 °C. Na grafu 1 kalibrirana temperatura prati temperaturu senzora uz manju razliku, a koeficijenti ukazuju na značajniju ko-kalibraciju. Na grafu 2 su male razlike između temperature senzora i kalibrirane. Na grafu 3 su se potpuno izjednačile krivulje temperature senzora i kalibrirane temperature što znači da je ko-kalibracija vrlo precizna. Na grafu 4 su prisutne oscilacije, ali se na kraju također male razlike između temperature senzora i kalibrirane temperature.

U slučaju C nakon hlađenja glavna temperatura postiže vrijednost 24,31 °C. Na grafovima 1 i 2 kalibrirana temperatura vrlo dobro prati temperaturu senzora što ukazuje na visoku preciznost. Kod senzora 3 je nešto značajnija razlika u temperaturi što ukazuje na veću grešku senzora prije kalibracije. Na grafu 4 kalibrirana temperatura prati temperaturu senzora, ali postoji manja razlika.

Ko-kalibracija senzora smanjuje razlike između očitanih i stvarnih vrijednosti temperatura. Svaki senzor ima različit stupanj preciznosti te je stoga potrebna ko-kalibracija kako bi se postigla veća preciznost i pouzdanost mjerenja. Ko-kalibracija smanjuje pogreške i osigurava točnost mjerenja i na taj način je moguće precizno pratiti temperature senzora.

8. ZAKLJUČAK

Digitalna transformacija donosi brojne izazove i mogućnosti u mjeriteljstvu i infrastrukturi kvalitete pri čemu je primjena novih tehnologija ključna za osiguranje preciznosti, dosljednosti i točnosti mjerenja. Usljed globalizacije tržišta i povećanih zahtjeva potrošača razvijaju se nacionalni mjeriteljski instituti kako bi uskladili mjerenja i podržali pametnu proizvodnju koja je ključna u jačanju konkurentnosti industrije. Cilj pametne proizvodnje je povećanje efikasnosti kroz automatizaciju većeg broja procesa. Primjenom modernih algoritama i softverskih alata, digitalna infrastruktura kvalitete omogućuje brzu obradu velike količine podataka u skladu s FAIR načelima koji osiguravaju da podaci budu pronalazivi, dostupni, interoperabilni i ponovo upotrebljivi. Na taj način su olakšani procesi ocjene sukladnosti i nadzora tržišta. Digitalnom transformacijom su tradicionalni papirnati kalibracijski certifikati zamijenjeni digitalnima koji osiguravaju dosljednost mjerenja u različitim sustavima. U praktičnom dijelu su analizirani rezultati mjerenja temperature senzora za različite slučajeve i na taj način je prikazano kako digitalna transformacija može unaprijediti mjeriteljstvo. Izbor kalibracijskog modela utječe na točnost kalibracije pa je stoga odabran kalibracijski model linearne regresije za ko-kalibraciju temperaturnih senzora koji slijede linearnu funkciju odziva. Rezultati pokazuju da je ko-kalibracija senzora korisna za smanjenje razlika između očitanih i stvarnih vrijednosti temperature. Ko-kalibracijom senzora su smanjene pogreške mjerenja i poboljšana preciznosti i pouzdanost mjerenja te je na taj način omogućeno precizno praćenje temperature senzora. Rezultati istraživanja pokazuju da ko-kalibracija također omogućava bolji prijenos informacija u sustavu. Zaključuje se da digitalna transformacija može unaprijediti mjeriteljstvo kroz preciznu kalibraciju i efikasnu obradu podataka te na taj način poboljšati konkurentnost industrije.

9. LITERATURA

- [1] S. Rab, M. Wan., R. K. Sharma, L. Kumar, A. Zafer, K. Saeed, S. Yadav, Digital Avatar of Metrology, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12647-023-00641-1>, pristup 20.05.2024.
- [2] Sascha Eichstädt, Anke Keidel, Julia Tesch, Metrology for digital age, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917421001951?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=899de2463d4b2490, pristup 25.05.2024.
- [3] Državni zavod za mjeriteljstvo, Međunarodni sustav jedinica SI, https://dzm.gov.hr/UserDocsImages/Zakonsko%20mjeriteljstvo/Publikacije/Mjerne_jedinice.pdf, pristup 28.05.2024.
- [4] Digital Reference Point, New Digital Services from the BIPM – Nuevos servicios digitales ofrecidos por le BIPM, https://sim-metrologia.org/wp-content/uploads/2023/12/New-Digital-Services_-BIPM.pdf, pristup 28.05.2024.
- [5] Federico Grasso Toro, Hugo Lehmann, Brief overview of the future of metrology, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665917421002695?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=899deb397ff72490, pristup 05.06.2024.
- [6] Mark D. Wilkinson et al., The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship, <https://www.nature.com/articles/sdata201618>, pristup 06.06.2024.
- [7] Florian Thiel, Marko Esche, Federico Grasso Toro, Alexander Oppermann, Jan Wetzlich, Daniel Peters, The European Metrology Cloud, https://cfmetrologie.edpsciences.org/articles/metrology/pdf/2017/01/metrology_metr2017_09001.pdf, pristup 12.06.2024.
- [8] Siegfried Hackel, Shanna Schönhals, Lutz Doering, Thomas Engel, Reinhard Baumfalk, The Digital Calibration Certificate (DCC) for an End-to-End Digital Quality Infrastructure for Industry 4.0, <https://www.mdpi.com/2413-4155/5/1/11>, pristup 15.06.2024.
- [9] PTB, GEMIMEG-II, Digital Twin, <https://www.gemimeg.ptb.de/en/project/technologies/digital-twin/>, pristup 16.06.2024.
- [10] NIST, Definition of SI Base Units, <https://www.nist.gov/si-redefinition/definitions-si-base-units>, pristup 28.05.2024.

- [11] Nacionalne inicijative za otvorenu znanost u Europi, FAIR, https://training.ni4os.eu/pluginfile.php/3637/mod_resource/content/0/HR-NI4OS%20-%20FAIR.pdf, pristup 10.06.2024.
- [12] Siegfried Hackel, Frank Härtig, Julia Hornig, Thomas Wiedenhöfer, The Digital Calibration Certificate, https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=The%20digital%20calibration%20certificate&publication_year=2017&author=S.%20Hackel&author=F.%20H%C3%A4rtig&author=J.%20Hornig&author=T.%20Wiedenh%C3%B6fer, pristup 20.06.2024.
- [13] Jose M. Barcelo-Ordinas, Messaoud Doubou, Jorge Garcia-Vidal, Nadjib Badache, Self-calibration methods for uncontrolled environments in sensor networks: A reference survey, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1570870518306115>, pristup 27.06.2024.
- [14] Kyosuke Yamamoto et al., Machine Learning-Based Calibration of Low-Cost Air Temperature Sensors Using Environmental Data, <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/6/1290>, pristup 27.06.2024.
- [15] Shaoming He, Hyo-Sang Shin, Shuoyuan Xu, Antonios Tsourdos, Distributed estimation over a low-cost sensor network: A Review of state-of-the-art, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253518307747>, pristup 28.06.2024.
- [16] Florentin Delaine, In Situ Calibration of Low-Cost Instrumentation for the Measurement of Ambient Quantities: Evaluation Methodology of the Algorithms and Diagnosis of Drifts, <https://theses.hal.science/tel-03086234>, pristup 29.06.2024.
- [17] Gareth Halfacree, Raspberry Pi Beginner's Guide, 4th Edition, Raspberry Pi PRESS, Cambridge, 2020.
- [18] Raspberry Pi Getting started, <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/getting-started.html>, pristup 25.06.2024.
- [19] Raspberry Pi Guide, Temperature monitoring with the Raspberry Pi, <https://raspberrypi-guide.github.io/electronics/temperature-monitoring>, pristup 26.06.2024.

10. SAŽETAK

U diplomskom radu se opisuje digitalna transformacija mjeriteljstva koja uključuje napredne tehnologije za mjerenje, analizu i obradu podataka. Opisane su tehnologije strojnog učenja, umjetne inteligencije, IoT te analiza i procjena kvalitete velikih podataka u različitim područjima mjeriteljstva. Navedeni su glavni mjeriteljski instituti u Europi i njihova strategija digitalizacije. Objasnjava se infrastruktura kvalitete i kalibracija. Na primjeru prikupljanja podataka s temperaturnih senzora pomoću Raspberry Pi-a je prikazana metoda ko-kalibracije senzora.

Ključne riječi: digitalna transformacija, mjeriteljstvo, kalibracija

11. ABSTRACT

The thesis describes the digital transformation of metrology, which includes advanced technologies for measurement, analysis, and data processing. It covers technologies such as machine learning, artificial intelligence, IoT, and the analysis and evaluation of big data quality in various metrology fields. The main metrology institutes in Europe and their digitalization strategies are presented. The quality infrastructure and calibration are explained. Using the example of data collection from temperature sensors with Raspberry Pi, the method of sensor co-calibration is demonstrated.

Keywords: digital transformation, metrology, calibration

PRILOG 1 – kod za Indeks.html (prikaz stranice i crtanje grafova)

Kod

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-
scale=1.0">
  <title>Ko-kalibracija temperature</title>
  <style>
    /* Osnovni stilovi za tijelo stranice */
    body {
      font-family: Arial, sans-serif;
      background-color: #f0f8ff;
      color: #333;
      display: flex;
      justify-content: center;
      align-items: center;
      flex-direction: column;
      margin: 0;
    }
    /* Stilovi za glavni kontejner */
    .container {
      text-align: center;
      background-color: #fff;
      padding: 20px;
      border-radius: 10px;
      box-shadow: 0 0 10px rgba(0, 0, 0, 0.1);
      margin-bottom: 20px;
      width: 90vw;
      display: flex;
      flex-direction: column;
      align-content: center;
      justify-content: center;
      align-items: center;
    }
    /* Stilovi za prikaz temperature */
    .temperature {
      font-size: 2em;
      margin: 20px 0;
    }
    /* Stilovi za razlike u temperaturama */
    .difference {
      font-size: 1.5em;
      margin: 10px 0;
      width: 600px;
      font-size: 1rem;
    }
    /* Stilovi za vremenske oznake */
    .timestamp {
      font-size: 0.8em;
      color: #777;
    }
  </style>
</head>
```

```

        /* Stilovi za grafike */
        .chart {
            width: 600px;
            height: 400px;
            margin: 20px 0;
        }

        /* Kontejner za prikazivanje razlika u temperaturama u 2x2
mreži */
        #differences {
            display: flex;
            align-content: center;
            justify-content: center;
            flex-wrap: wrap;
            flex-direction: row;
        }

        .reference {
            width: 50vw;
        }
    </style>
</head>
<body>
    <div class="container">
        <!-- Prikaz glavne temperature -->
        <div class="reference">
            <h1>Glavna temperatura</h1>
            <div class="temperature">
                <span id="main-temperature"></span> &deg;C
                <div id="main-timestamp" class="timestamp"></div>
            </div>
            <h2>Referentna temperatura</h2>
            <canvas id="chart-main" class="chart"></canvas>
        </div>
        <h2>Temperaturne razlike</h2>
        <!-- Kontejner za razlike u temperaturama -->
        <div id="differences">
            <div id="difference-1" class="difference">
                Temperatura 1: <span class="temp-value" id="temp-
1"></span> &deg;C <br>
                Razlika 1: <span class="diff-value" id="diff-
1"></span> &deg;C <br>
                Kalibrirana 1: <span class="calibrated-value"
id="calibrated-1"></span> &deg;C <br>
                Koeficijent 1: <span class="coef-value" id="coef-
1"></span> <br>
                <div id="timestamp-1" class="timestamp"></div>
                <canvas id="chart-1" class="chart"></canvas>
            </div>
            <div id="difference-2" class="difference">
                Temperatura 2: <span class="temp-value" id="temp-
2"></span> &deg;C <br>
                Razlika 2: <span class="diff-value" id="diff-
2"></span> &deg;C <br>
                Kalibrirana 2: <span class="calibrated-value"
id="calibrated-2"></span> &deg;C <br>
                Koeficijent 2: <span class="coef-value" id="coef-
2"></span> <br>
                <div id="timestamp-2" class="timestamp"></div>
                <canvas id="chart-2" class="chart"></canvas>
            </div>
        </div>
    </div>

```

```

        <div id="difference-3" class="difference">
            Temperatura 3: <span class="temp-value" id="temp-
3"></span> &deg;C <br>
            Razlika 3: <span class="diff-value" id="diff-
3"></span> &deg;C <br>
            Kalibrirana 3: <span class="calibrated-value"
id="calibrated-3"></span> &deg;C <br>
            Koeficijent 3: <span class="coef-value" id="coef-
3"></span> <br>
            <div id="timestamp-3" class="timestamp"></div>
            <canvas id="chart-3" class="chart"></canvas>
        </div>
        <div id="difference-4" class="difference">
            Temperatura 4: <span class="temp-value" id="temp-
4"></span> &deg;C <br>
            Razlika 4: <span class="diff-value" id="diff-
4"></span> &deg;C <br>
            Kalibrirana 4: <span class="calibrated-value"
id="calibrated-4"></span> &deg;C <br>
            Koeficijent 4: <span class="coef-value" id="coef-
4"></span> <br>
            <div id="timestamp-4" class="timestamp"></div>
            <canvas id="chart-4" class="chart"></canvas>
        </div>
    </div>
    </div>
    <!-- Uključivanje Chart.js i adaptera za datum -->
    <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js"></script>
    <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chartjs-adapter-date-
fns"></script>
    <script>
// Kada se sadržaj stranice učita
    document.addEventListener("DOMContentLoaded", function() {
        // Inicijalizacija varijabli za temperature, vremenske
oznake i grafikone
        let temperatures = [[], [], [], [], []];
        let timestamps = [];
        let charts = [null, null, null, null, null];

        // Funkcija za dohvaćanje temperatura sa servera
        function fetchTemperatures() {
            fetch('/temperatures')
                .then(response => response.json())
                .then(data => {
                    if (data.length >= 10) {
                        // Dohvaćanje glavne temperature i
vremenskih oznaka
                        const mainTemperature = data[0];
                        const currentTimestamps = [data[1],
data[3], data[5], data[7], data[9]].map(t => t.split(': ')[1]);
                        timestamps.push(new Date());

                        // Spremanje temperatura u odgovarajuće
nizove
                        temperatures[0].push(mainTemperature);
                        temperatures[1].push(data[2]);
                        temperatures[2].push(data[4]);
                        temperatures[3].push(data[6]);
                        temperatures[4].push(data[8]);

                        // Ažuriranje prikaza glavne temperature

```

```

        document.getElementById('main-
temperature').textContent = mainTemperature;
document.getElementById('main-timestamp').textContent =
currentTimestamps[0];
drawReferenceChart(timestamps, temperatures[0]);

// Ažuriranje prikaza za razlike u
temperaturama
for (let i = 1; i < 5; i++) {
    document.getElementById(`temp-
${i}`).textContent = data[i * 2];
    document.getElementById(`diff-
${i}`).textContent = (data[i * 2] - mainTemperature).toFixed(2);
    document.getElementById(`timestamp-
${i}`).textContent = currentTimestamps[i - 1];

    // Ako imamo dovoljno podataka,
    izračunaj i prikaži kalibrirane temperature
    if (temperatures[0].length > 1) {
        const { a, b, calibrated } =
calculateLinearRegression(temperatures[0], temperatures[i]);
        document.getElementById(`coef-
${i}`).textContent = `a=${a.toFixed(2)}, b=${b.toFixed(2)}`;

document.getElementById(`calibrated-${i}`).textContent =
calibrated[calibrated.length - 1].toFixed(2);
        drawChart(i, timestamps,
temperatures[i], calibrated);
    }
}
})
.catch(error => console.error('Error fetching
temperatures:', error));
}

// Funkcija za izračunavanje linearne regresije
function calculateLinearRegression(x, y) {
    const n = x.length;
    if (n < 2) {
        return { a: NaN, b: NaN, calibrated: [] };
    }

    const sum_x = x.reduce((a, b) => a + b, 0);
    const sum_y = y.reduce((a, b) => a + b, 0);
    const sum_xy = x.reduce((sum, xi, i) => sum + xi *
y[i], 0);
    const sum_x2 = x.reduce((sum, xi) => sum + xi * xi,
0);

    const denominator = (n * sum_x2 - sum_x * sum_x);
    if (denominator === 0) {
        return { a: NaN, b: NaN, calibrated: [] };
    }

    const a = (n * sum_xy - sum_x * sum_y) / denominator;
    const b = (sum_y - a * sum_x) / n;

    const calibrated = x.map(xi => a * xi + b);
    return { a, b, calibrated };
}

```

```

    }

    // Funkcija za crtanje grafikona
    function drawChart(index, x, y, yCalibrated) {
        const canvasId = `chart-${index}`;
        const ctx =
document.getElementById(canvasId).getContext('2d');
        x = x.map(function(d) { return d.getTime() } );
        y = y.map(function(d) { return d.toFixed(2) } );
        yCalibrated = yCalibrated.map(function(d) { return
d.toFixed(2) } );

        if (charts[index]) {
            charts[index].destroy();
        }

        charts[index] = new Chart(ctx, {
            type: 'line',
            data: {
                labels: x,
                datasets: [{
                    label: "Temperatura senzora",
                    data: y,
                    borderColor: 'blue',
                    fill: false,
                },
                {
                    label: "Kalibrirana temperatura",
                    data: yCalibrated,
                    borderColor: 'red',
                    fill: false,
                }
            ]
        },
        options: {
            scales: {
                x: {
                    type: 'time',
                    time: {
                        unit: 'second',
                        displayFormats: {
                            second: 'HH:mm:ss'
                        }
                    },
                },
                title: {
                    display: true,
                    text: 'Vrijeme'
                }
            },
            y: {
                title: {
                    display: true,
                    text: 'Temperatura (C)'
                }
            }
        }
    });
}

// Funkcija za crtanje referentnog grafikona
function drawReferenceChart(x, y) {

```

```

        const ctx = document.getElementById('chart-
main').getContext('2d');
        x = x.map(function(d) { return d.getTime() });
        y = y.map(function(d) { return d.toFixed(2) });

        if (charts[5]) {
            charts[5].destroy();
        }

        let data = [];
        for (let i = 0; i < x.length; i++) {
            data.push({"x": x[i], "y": y[i]});
        }

        charts[5] = new Chart(ctx, {
            type: 'line',
            data: {
                datasets: [{
                    label: 'Temperatura',
                    data: data,
                    backgroundColor: 'transparent',
                    borderColor: 'red',
                    borderWidth: 2,
                    tension: 0.5
                }]
            },
            options: {
                scales: {
                    x: {
                        type: 'time',
                        time: {
                            unit: 'second',
                            displayFormats: {
                                second: 'HH:mm:ss'
                            }
                        },
                    },
                    title: {
                        display: true,
                        text: 'Vrijeme'
                    }
                },
                y: {
                    title: {
                        display: true,
                        text: 'Temperatura (C)'
                    }
                }
            }
        });
    });
}

// Pozivanje funkcije za dohvaćanje temperatura svakih
5000 ms
fetchTemperatures();
setInterval(fetchTemperatures, 5000);
});
</script>
</body>
</html>

```

PRILOG 2 – kod za Python datoteku (očitanje vrijednosti senzora, web server)

Kod

```
#!/usr/bin/env python

import os
import glob
import time
import datetime
from flask import Flask, render_template, jsonify

# Inicijalizacija Flask aplikacije za webserver
app = Flask(__name__)

# Funkcija za čitanje temperature
def read_temp(decimals=1):
    # Pronalaženje svih uređaja koji počinju s "28" u
    # /sys/bus/w1/devices/
    devices = glob.glob("/sys/bus/w1/devices/" + "28*")
    temperatures = []
    for folder in devices:
        # Put do datoteke s podacima o uređaju
        device = folder + "/w1_slave"
        with open(device, "r") as f:
            lines = f.readlines()
        # Provjera valjanosti prvog retka
        while lines[0].strip()[-3:] != "YES":
            lines = read_temp_raw()
        # Pronalaženje temperature u drugom retku
        equals_pos = lines[1].find("t=")
        if equals_pos != -1:
            temp_string = lines[1][equals_pos + 2:]
            temp = round(float(temp_string) / 1000.0, decimals)
            # Dodavanje temperature i vremena mjerenja u listu
            temperatures.append(temp)
            temperatures.append(time.strftime("Vrijeme mjerenja:
%H:%M:%S"))
    return temperatures

# Ruta za dohvaćanje temperatura
@app.route('/temperatures')
def index():
    temperatures = read_temp(2)
    return jsonify(temperatures)

# Ruta za prikaz početne stranice
@app.route('/')
def home():
    return render_template('index.html')

# Pokretanje Flask aplikacije
if __name__ == '__main__':
    app.run(debug=True, host='0.0.0.0')
```