

Implementacija tehnologije „digitalnog blizanca“ za analizu proizvoda tijekom faze korištenja

Celjak, Robert

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:204143>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Robert Celjak

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Implementacija tehnologije „digitalnog blizanca“ za analizu proizvoda tijekom faze korištenja

Mentori:

Doc. dr. sc. Stanko Škec, mag. ing. mech.

Student:

Robert Celjak

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, doc. dr. sc. Stanku Škecu na pruženoj prilici, ukazanoj pomoći i pruženom vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se Nikoli Horvatu, mag. ing. mech. na savjetima, ukazanoj pomoći i podršci tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci tijekom izrade ovog rada i dosadašnjeg dijela studija.

Robert Celjak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Robert Celjak** Mat. br.: 0035216951

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Implementacija tehnologije „digitalnog blizanca“ za analizu proizvoda tijekom faze korištenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The implementation of digital twin technology for the product usage analysis**

Opis zadatka:

U kontekstu Industrije 4.0, tehnologija „digitalnog blizanca“ sve se češće uvodi i primjenjuje u razvojnim procesima. „Digitalni bliznac“ predstavlja digitalnu/virtualnu repliku fizičkog proizvoda koja se koristi za opisivanje, praćenje i analizu ponašanja proizvoda. Korištenjem podataka prikupljenih pomoću senzora te njihovom kombinacijom s podacima generiranim u digitalnoj okolini (npr. CAD modeli, simulacije itd.), dobiva se cjelovit, precizan i pravovremen uvid u rad i korištenje uređaja.

Cilj ovog završnog rada je upoznati se s osnovama tehnologije „digitalnog blizanca“ te ju implementirati na primjeru kućanskog uređaja.

U radu je potrebno:

- Proučiti i objasniti koncept „digitalnog blizanca“.
- Proučiti i usporediti postojeće primjene tehnologije „digitalnog blizanca“ u okviru razvoja proizvoda.
- Definirati proces prikupljanja i analize podataka te odabrati odgovarajuće senzore.
- Objasniti i provesti korake implementacije navedene tehnologije na konkretnom primjeru kućanskog uređaja te prikazati njene prednosti i nedostatke.
- Provesti preliminarnu analizu prikupljenih podataka.


Opseg analize i interpretacije rezultata dogovorit će se tijekom izrade rada.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Stanko Škec

Datum predaje rada:

1. rok: 18. veljače 2021.

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.

3. rok: 23. rujna 2021.

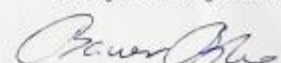
Predvideni datumi obrane:

1. rok: 22.2. – 26.2.2021.

2. rok (izvanredni): 9.7.2021.

3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. DIGITALNI BLIZANAC.....	3
2.1. Definicija.....	3
2.2. Koncept.....	6
2.3. Dodane vrijednosti	8
2.4. Izazovi.....	9
3. PRIMJENA DIGITALNIH BLIZANACA	11
3.1. Pametni hladnjak.....	12
3.2. Uređaj za praćenje potrošnje električne energije kućanskih aparata	13
4. IMPLEMENTACIJA TEHNOLOGIJE DIGITALNOG BLIZANCA NA PRIMJERU KUĆANSKOG UREĐAJA SOKOVNIKA	16
4.1. Arhitektura	18
4.2. Komponente arhitekture.....	21
4.2.1. Senzori	22
4.2.2. NodeMCU (<i>Node Microcontroller Unit</i>).....	24
4.2.3. MySQL baza podataka.....	25
4.2.4. PhpMyAdmin.....	25
4.2.5. Google Cloud platforma	26
4.2.6. Chartbrew.....	27
4.3. Proces izrade digitalnog blizanca.....	28
5. ANALIZA PODATAKA.....	33
6. DISKUSIJA	42

6.1. Izazovi.....	42
6.2. Dodane vrijednosti	43
6.3. Buduća istraživanja	44
7. ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA.....	46
PRILOZI.....	49

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Shematski prikaz modela digitalnog blizanca.....	3
Slika 2.2. Digitalni model – tok podataka.....	4
Slika 2.3. Digitalna sjena – tok podataka	5
Slika 2.4. Digitalni blizanac – tok podataka.....	6
Slika 3.1. Put digitalne transformacije	11
Slika 3.2. Arhitektura pametnog hladnjaka [15]	12
Slika 3.3. Arhitektura uređaja za praćenje potrošnje energije kućanskih aparata.....	14
Slika 3.4. Sučelje „Blynk“ mobilne aplikacije [16].....	15
Slika 4.1. Kućanski uređaj sokovnik.....	16
Slika 4.2. Funkcijska dekompozicija sokovnika	17
Slika 4.3. Apstraktan prikaz arhitekture digitalnog blizanca	19
Slika 4.4. Shematski prikaz arhitekture digitalnog proizvoda sokovnika	20
Slika 4.5. Funkcijska dekompozicija digitalnog blizanca sokovnika.....	21
Slika 4.6. ACS712 senzor	22
Slika 4.7. HC-SR04 senzor	23
Slika 4.8. NodeMCU ESP8266 Wi-Fi modul (lijevo) i kablovi za spajanje sa sensorima.....	24
Slika 4.9. phpMyAdmin sučelje.....	26
Slika 4.10. Chartbrew sučelje.....	27
Slika 4.11. Ožičenje	28
Slika 4.12. Integracija senzora u strujni krug.....	29
Slika 4.13. Prikaz mjerenje udaljenosti senzora.....	29
Slika 4.14. Tablica unutar MySQL baze podataka.....	30

Slika 4.15. Vizualizacija podataka	32
Slika 5.1. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za mango	37
Slika 5.2. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za krušku	38
Slika 5.3. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za jabuku	39
Slika 5.4. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za grejp.....	40
Slika 5.5. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za jabuke s peteljkom.....	41

POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Vrijednosti korištenog voća	34
--	----

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
P	W	Snaga elektromotora
M	Nm	Okretni moment elektromotora
ω	rad/s	Kutna brzina vrtila
P_z	W	Prividna snaga izmjenične struje
U	V	Efektivna vrijednost napona gradske mreže
I	A	Efektivna vrijednost jakosti električne struje
V	cm ³	Volumen tekućine
r	cm	Radijus posude
h	cm	Udaljenost od dna posude do senzora
x	cm	Udaljenost od površine tekućine do senzora

SAŽETAK

Kontinuirano praćenje rada proizvoda u stvarnom vremenu, uz mogućnost upravljanja njime bez fizičke interakcije, također u stvarnom vremenu, ima značajan utjecaj na sve faze i sudionike u razvoju proizvoda. Navedene značajke su ujedno i glavne karakteristike paradigme digitalnog blizanca u kojoj se, na temelju funkcija i obilježja fizičkog proizvoda, modelira digitalni pandan s kojim je fizički proizvod povezan automatiziranim tokovima podataka. U ovom radu adaptiran je postojeći proizvod sokovnik s ciljem realizacije implementacije digitalnog blizanca. Time je omogućeno praćenje podataka o potrošnji električne energije proizvoda tijekom rada te o volumenu dobivenog soka. Uspješno praćenje podataka omogućili su senzori i mikrokontroler koji je Wi-Fi konekcijom podatke slao do poslužitelja gdje su nadalje pohranjeni u bazu podataka te prikazani u stvarnom vremenu korištenjem softvera za vizualizaciju. Prototip je testiran na eksperimentu s uporabom različitih vrsta voća gdje se iz dobivenih rezultata zaključuje kako gustoća određenog voća utječe na potrošnju električne energije te kakva je korelacija između potrošnje električne energije i dobivenog soka čime se definira učinkovitost proizvoda. Iz toga se može zaključiti kako digitalni bliznac može pomoći u optimizaciji potrošnje električne energije, smanjenju troškova kako korištenja, tako i razvoja proizvoda, smanjenju ekološkog otiska, razvoju nove generacije proizvoda te produljenju životnog vijeka proizvoda korištenjem prediktivnog održavanja. Daljnji rad uključuje proširenje digitalnog blizanca na ostale tokove energije, materijala i signala, detaljniju analizu podataka te integraciju komplementarnih tehnologija.

Ključne riječi: Digitalni bliznac, senzori, Internet Stvari, Industrija 4.0, analiza podataka

SUMMARY

Continuous real-time monitoring of product performance combined with real-time control of the said product without physical interactions has a significant impact on all stages and participants in product development. These features are also the main characteristics of the digital twin paradigm in which a digital counterpart is modeled based on the functions and characteristics of the physical product with said products being connected by automated data flows. This study aims to modify the juicer to complete the successful implementation of a digital twin. This enables data monitoring of product electricity consumption during operation, as well as of the volume of juice obtained. Successful data monitoring was enabled by sensors and a microcontroller which sent data via a Wi-Fi connection to a server where it was further stored in a database and displayed in real-time using visualization software. The prototype was tested in an experiment using different types of fruit, where the results show how the density of a particular fruit affects electricity consumption, while also defining the correlation between electricity consumption and juice obtained, which defines product efficiency. It can further be concluded that the digital twin can help optimize electricity consumption, reduce costs of both product usage and product development, reduce the environmental footprint, develop a new generation of products and extend product lifecycle using predictive maintenance. Further studies include the extension of the digital twin to other flows of energy, materials, and signal, as well as more detailed data analysis and the integration of complementary technologies.

Key words: Digital twin, sensors, Internet of Things, Industry 4.0, data analysis

1. UVOD

Svakodnevni razvoj novih tehnologija utječe na sva područja ljudske djelatnosti, a osobito na industriju. Uslijed toga dolazi do promjene fokusa industrije, naime u središtu fokusa više nije proizvod, već usluga [1]. Umjesto prodaje proizvoda kupcima, sve veći broj tvrtki kao cilj definira uspostavljanje i razvoj dugoročnih partnerstva s kupcima. Pritom proizvod i dalje ima neophodnu ulogu, ali ostvarivanje prihoda se više ne ostvaruje samo kroz prodaju, već kroz cijeli radni vijek proizvoda. Naime, pojavom Interneta stvari (eng. *Internet of Things*) mijenja se i sam koncept industrijske usluge – usluga bi se pružala kupcima tijekom cijelog radnog vijeka fizičkog proizvoda kroz usluge održavanja, personalizacije i nadogradnje [2]. U većini industrija, posebno u tehnološkim, pružanje usluge održavanja kupljenih proizvoda i proizvodne opreme nije ništa novo. Međutim, tehnološki napredak u područjima kao što su tehnologija senzora i aktuatora, mrežno povezivanje u stvarnom vremenu, analiza velikih skupova podataka (eng. *Big Data*), strojno učenje (eng. *Machine Learning*), računalni oblaci (eng. *Cloud Computing*) te umjetna inteligencija (eng. *Artificial Intelligence*) omogućuje prethodno nepredviđene mogućnosti u pružanju industrijskih usluga – detekciju abnormalnog ponašanja, prediktivnog održavanja otkrivanjem mogućih grešaka i kvarova te implementacije strategija optimizacije životnog vijeka proizvoda [2]. Kako raste potreba za implementacijom navedenih usluga, rastu i zahtjevi koji omogućuju uspješnu implementaciju, odnosno zahtjevi za kvalitetnim matematičkim modelima procesa te kapacitetima numeričkih simulacija. Kada bi se buduće ponašanje kompleksnog sustava s višestrukim ulaznim i izlaznim karakteristikama poput elektromotora predviđalo samo rješavanjem matematičkog modela na temelju povijesnih podataka proizvoda, postigli bi se približno dobri rezultati. Korištenjem simulacija, digitalnih imitacija operacija ili procesa koji se odvijaju kroz određeno vrijeme u stvarnom svijetu, postižu se znatno točniji rezultati te posljedično kvalitetnije predviđanje budućeg ponašanja proizvoda čime se omogućuje pravovremeno sprječavanje mogućih kvarova i grešaka. Rješavanjem suvremenih matematičkih modela procesa korištenjem numeričkih metoda, uz određene preduvjete kao što su povijest stanja proizvoda, prethodno dobiveni rezultati procesa te drugi atributi specifični za model procesa, aproksimiraju se putanje stanja procesa, tijekom radnog

vijeka proizvoda, kroz određeni vremenski period. Navedene putanje stanja procesa na spomenutom primjeru elektromotora prate i aproksimiraju podatke o brzini, okretnom momentu te izlaznoj snazi. Simulacije su mediji korišteni za prikazivanje navedenih aproksimacija, odnosno ponašanja modela procesa u vremenu. Tijekom pripreme simulacija, uobičajena praksa je podijeliti složeni inženjerski sustav na više manjih modela koji se razvijaju odvojeno, od strane različitih ljudi s različitim metodologijama. Ovaj pristup rezultira skupom modela koji se mogu smatrati točnim unutar svojih domena, no navedene modele je potrebno uspješno integrirati na razini proizvoda kako bi se provodila potpuna simulacija. Pojavom Interneta stvari (eng. *Internet of Things*), identificirana je potreba za interoperabilnošću, odnosno mogućnošću integracije manjih modela u složeniji model na razini proizvoda. Tako je u sklopu ovog rada provedena integracija određenih softverskih i hardverskih komponenti s kućanskim uređajem sokovnikom. Uspješnom integracijom navedenih modela stvara se baza za praćenje, kontrolu i upravljanje proizvodom u stvarnom vremenu, odnosno temelj tehnologije digitalnog blizanca (eng. *Digital Twin*) [3]. Upravo je uspješna implementacija tehnologije digitalnog blizanca cilj ovog rada. Implementacija omogućuje praćenje podataka sokovnika tijekom njegova korištenja te kasniju analizu tih podataka s ciljem optimizacije rada uređaja i njegove potrošnje električne energije.

2. DIGITALNI BLIZANAC

Unutar ovog poglavlja definirat će se pojam digitalnog blizanca, objasniti koncept, predstaviti moguće izazove te navesti dodane vrijednosti koje donosi tehnologija digitalnog blizanca.

2.1. Definicija

Digitalni blizanac se može definirati kao neprestano razvijajući digitalni profil prošlog i trenutnog ponašanja fizičkog proizvoda, sustava ili procesa koji optimizira poslovne rezultate [4]. Temelji se na velikim, kumulativnim količinama podataka prikupljenih u stvarnom vremenu koji pružaju uvid u performanse proizvoda, sustava ili procesa [4]. Sastoji se od tri dijela – fizičkog proizvoda u prirodnom okruženju, digitalnog proizvoda u virtualnom okruženju te podataka i informacija koje povezuju fizički i digitalni proizvod zajedno [5] [Slika 2.1.].

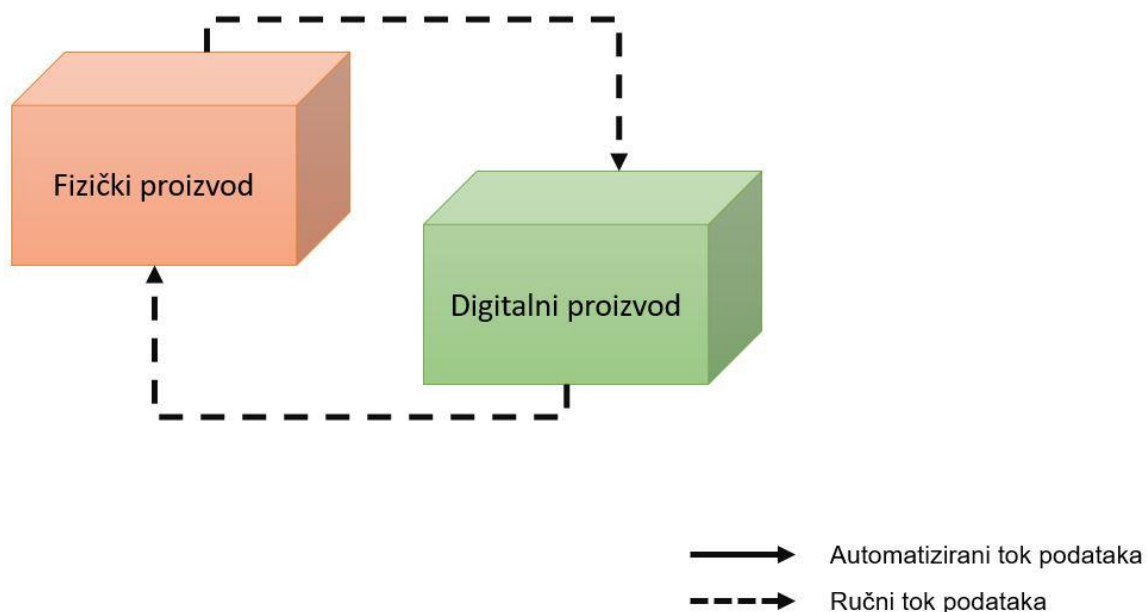


Slika 2.1. Shematski prikaz modela digitalnog blizanca

Umjesto proizvoda, fizička komponenta digitalnog blizanca može biti i kompletan proces (npr. proizvodni proces) ili dio proizvoda (npr. motor automobila). Slijedeći životni ciklus fizičkog proizvoda, digitalni blizanac prati, kontrolira i optimizira njegove procese i funkcije. Digitalni blizanac omogućuje simulaciju i testiranje novih konfiguracija te posljedično i kontinuirano predviđanje budućeg stanja proizvoda (npr. defekte, kvarove, oštećenja) s ciljem primjene preventivnih operacija održavanja. Korištenjem senzora koji su u današnje vrijeme lako dostupni, učitavanja podataka u stvarnom vremenu te kapacitetima pohrane velikih skupova

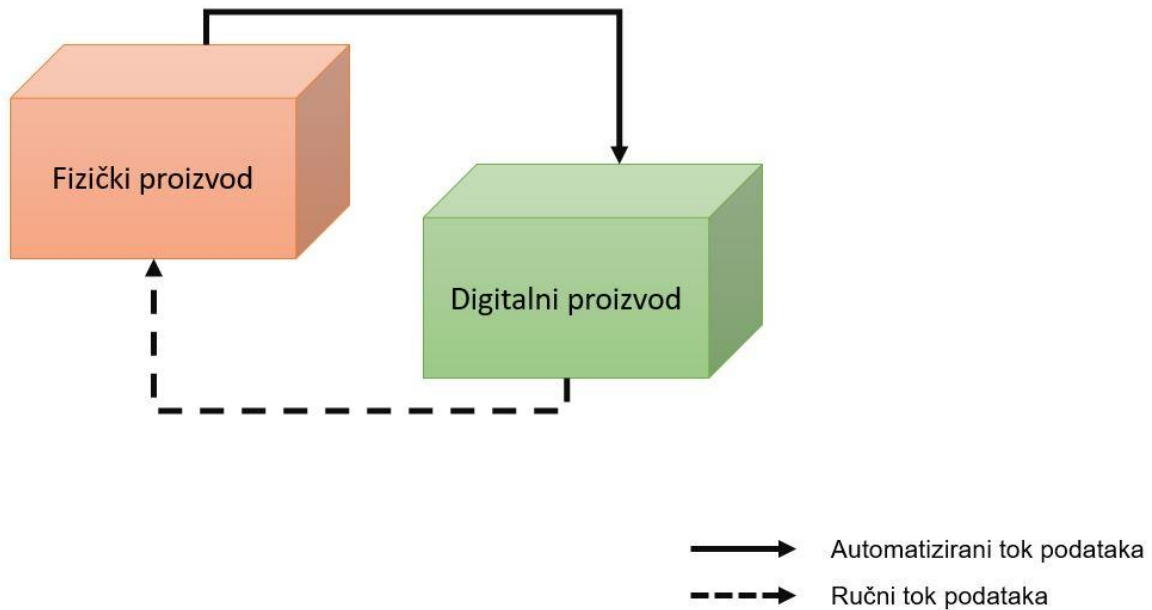
podataka (eng. Big Data), podaci vezani uz određeni proces ili proizvod su kontinuirano ažurirani. Glavni cilj digitalnog blizanca je učiti iz prošlosti, razumjeti sadašnjost te predvidjeti budućnost za postizanje boljih poslovnih rezultata [6].

Definirane su tri razine digitalnog blizanca – osnovna razina u obliku digitalnog modela (eng. *Digital Model*), napredna u obliku digitalne sjene (eng. *Digital Shadow*) te konačna razina u obliku kompletnog funkcionalnog digitalnog blizanca (eng. *Digital Twin*). Kritzinger i sur. [7] interpretiraju navedene pojmove na sljedeći način. Digitalni model, prikazan na slici 2.2., je digitalna reprezentacija postojećeg fizičkog proizvoda koja ne koristi nijedan oblik automatizirane izmjene podataka između fizičkog i digitalnog proizvoda. Bilo kakve promjene u radu fizičkog proizvoda nemaju direktan učinak na digitalni proizvod, a niti se fizički proizvod može kontrolirati pomoću digitalnog proizvoda. Dakle, između fizičkog i digitalnog proizvoda nema automatiziranih tokova podataka, već se sve promjene na fizičkom proizvodu „ručno“ registriraju na digitalnom proizvodu te obratno.



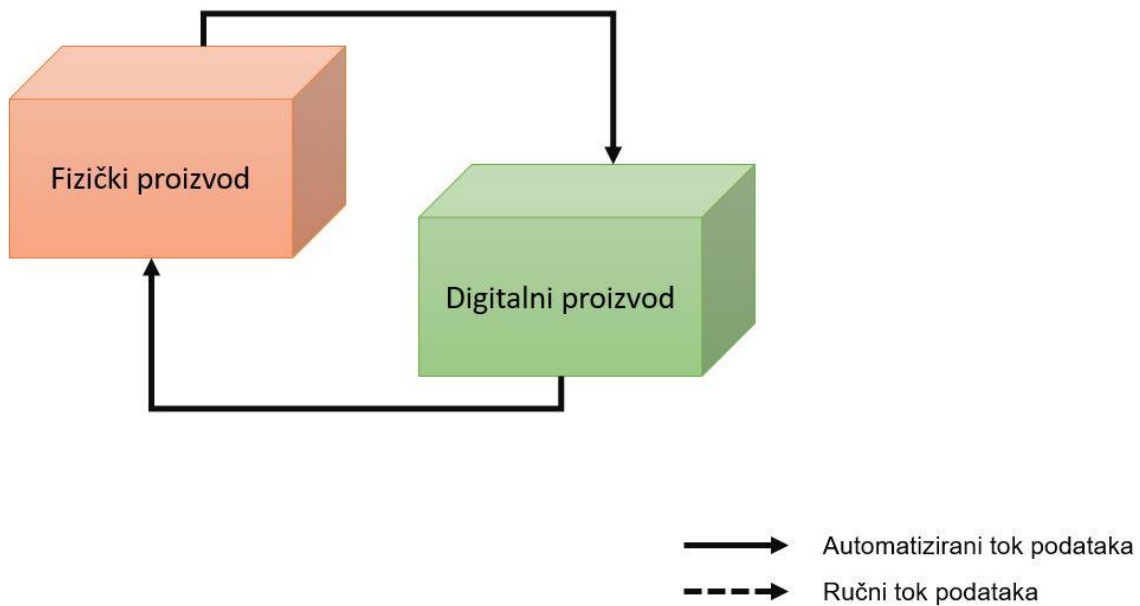
Slika 2.2. Digitalni model – tok podataka

Nastavljajući se na definiciju digitalnog modela, ako postoji automatizirani tok podataka s fizičkog proizvoda na digitalni proizvod, taj koncept se naziva digitalna sjena [slika 2.3.]. Tok podataka s digitalnog na fizički proizvod se i u ovom slučaju i dalje odvija „ručno“.



Slika 2.3. Digitalna sjena – tok podataka

Konačno, ako je osiguran automatizirani tok podataka u oba smjera, odnosno s fizičkog proizvoda na digitalni proizvod, uz također omogućeno i upravljanje fizičkog proizvoda preko digitalnog proizvoda, tada se taj koncept naziva digitalni blizanac [slika 2.4.].



Slika 2.4. Digitalni blizanac – tok podataka

2.2. Koncept

Unutar ovog poglavlja definirane su komponente, aktivnosti i karakteristike koje opisuju koncept digitalnog blizanca [8]. Prva osnovna komponenta je model – temelj svakog digitalnog blizanca. Model definira strukturu prikupljenih podataka s fizičkog objekta, odnosno određuje na koji će se način podaci pohraniti. Model može biti „*Computer Aided Design*“ (CAD) model, model simulacije, proizvodna specifikacija (eng. *Bill of materials*) te kompletan, potpuno funkcionalan model fizičkog proizvoda. Kako bi se realizirao potonji, moguće je modelirati manje, jednostavnije digitalne blizance koji se kasnije integriraju u složenu cjelinu. Primjer takve cjeline je automobil, a manji digitalni blizanci prate i pohranjuju podatke s npr. sustava koji sprječava blokiranje kotača prilikom kočenja, sustava koji uključuje pogon na sva četiri kotača, sustava za održavanje stalne brzine, sustava za pomoć pri parkiranju, itd. Povratna veza može se osigurati omogućivanjem paljenja motora ili uključivanjem grijanja unutar automobila

putem mobitela ili drugog uređaja. Sljedeća osnovna komponenta su podaci - formalizirani prikazi činjenica, pojmova i instrukcija, pogodni za komuniciranje, interpretaciju i obradu uz pomoć ljudi ili strojeva [9]. Razlikuju se dvije vrste podataka - podaci koji dolaze direktno od fizičkog objekta te podaci koji su kontekstualno vezani uz fizički proizvod. Podaci koji dolaze direktno od fizičkog objekta podrazumijevaju sljedeće vrste podataka: statusne podatke (npr. je li ventil otvoren ili zatvoren), podatke sa senzora (npr. iznos tlaka, temperature ili vlage) te podatke upozorenja (npr. razina fluida je premašila graničnu vrijednost). U kontekstualne podatke ulaze izvješća o radu, dnevnici održavanja, lanac opskrbe te ostali podaci povezani uz fizički proizvod. Važna karakteristika digitalnog blizanca je jedinstvenost – jedan digitalni blizanc može predstavljati samo jedan fizički objekt. Svaki digitalni blizanc je vezan sa svojim fizičkim pandanom preko jedinstvenog identifikacijskog ključa [10]. Iz tog razloga važno je, prije povezivanja digitalnog blizanca s fizičkim proizvodom, jasno definirati ciljeve korištenja digitalnog blizanca te modelirati digitalnog blizanca koji se tada usklađuje sa svojim jedinstvenim fizičkim pandanom i podacima koje će prikupljati i obrađivati. Ključna aktivnost je nadgledanje. Digitalni blizanc ima mogućnost nadgledati, pratiti i registrirati određene aspekte fizičkog proizvoda. Time je olakšan pristup podacima vezanim uz fizički proizvod – podaci su, preko digitalnog blizanca, dostupni svima kojima su potrebni, uz uvjet da imaju pravo na pristup spomenutim podacima. Još jedna ključna aktivnost je kontrola, ona digitalnom blizancu omogućuje upravljanje nad i interakciju s fizičkim pandanom. Aktivnosti poput analize i simulacije služe za predviđanje rada i stanja fizičkog proizvoda u budućnosti. One omogućuju primjenu prediktivnog održavanja proizvoda te osiguravaju optimalne performanse tijekom rada proizvoda. Digitalni blizanc je tada kontinuirano sinkroniziran s fizičkim proizvodom - prati i odražava njegove promjene zahvaljujući ažuriranjima sa senzora u stvarnom vremenu. Opremljen umjetnom inteligencijom, digitalni blizanc je sposoban otkriti skrivene obrasce i nepoznate korelacije u radu proizvoda. Bilježenje, kontroliranje i praćenje uvjeta i promjena fizičkog proizvoda omogućuje primjenu prediktivnih tehnika umjetne inteligencije kojima se predviđaju kvarovi i testiraju ishodi mogućih rješenja u obliku simulacija čime se maksimizira vrijeme rada proizvoda te reducira broj skupih kvarova.

2.3. Dodane vrijednosti

Digitalni bliznac sa sobom nosi niz dodanih vrijednosti [11]. Digitalni blizanci su precizni i konzistentni u prikupljanju, pohrani i upravljanju podacima, uz to i reduciraju broj neučinkovitosti i problema te štede vrijeme i novac [12]. Zamišljeno je da digitalni bliznac funkcionira autonomno, uz uključivanje ljudi iznimno u nužnim situacijama kao što su održavanje sustava ili proizvoda, ispravljanje kvarova i sl. Opasni poslovi bi se time dodijelili robotima, uz ljudsku kontrolu nad njima sa sigurne udaljenosti. Napredne analize podataka prikupljenih od mnogih senzora, ugrađenih na fizički proizvod te povezanih s digitalnim okruženjem, u stvarnom vremenu rezultiraju boljom procjenom rizika, ranim detektiranjem grešaka, smanjenjem broja neočekivanih scenarija i pripremom strategija rješavanja istih. Navedene aktivnosti omogućuju bolje i pravovremeno održavanje proizvoda. Analiza podataka prikupljenih s proizvoda bez ugrožavanja i oštećenja fizičkog proizvoda omogućena je korištenjem tehnologije digitalnog blizanca. Vrlo je kompleksan zadatak steći kompletan uvid u složeni proizvod u stvarnom vremenu. Digitalni bliznac olakšava navedeni zadatak jer omogućuje nadgledanje i upravljanje proizvodom u stvarnom vremenu s bilo kojeg mjesta na svijetu uz omogućen pristup Internetu. Pritom je kompletna dokumentacija dostupna svima koji imaju omogućen pristup digitalnom blizancu čime se osigurava transparentnost, a također je moguća i opcija automatiziranog slanja izvješća. S lako dostupnim informacijama i visokim stupnjem automatiziranosti procesa, članovi tima mogu kvalitetnije iskoristiti vrijeme pospešujući međusobnu suradnju i sinergiju čime se povećava i cjelokupna produktivnost tima. Dostupnost kvantitativnih podataka, uz naprednu analizu istih u stvarnom vremenu, također omogućuje brže donošenje odluka, smanjuje vrijeme nedostupnosti i povećava stupanj efikasnosti promatranog procesa ili proizvoda.

U kontekstu korištenja tehnologija Interneta stvari (eng. Internet of Things) u procesu digitalizacije, koncept digitalnog blizanca je jedna od najnaprednijih inovacija koja se može implementirati i koristiti za praćenje, analizu i optimizaciju procesa ili proizvoda. Implementacija digitalnog blizanca u sektore proizvodnje, prijevoza ili zrakoplovstva izuzetno je korisna jer pojednostavljuje proces i testiranja složenih proizvoda poput strojeva, pumpi,

automobila te letjelica, smanjuje operativni rizik te optimizira performanse fizičkih proizvoda [8]. U kontekstu održavanja proizvoda ili sustava, dolazi do zamjene tradicionalnog pristupa održavanju, u kojem su se dijelovi mijenjali tek nakon kvara ili pada performansi ispod tražene razine, sa suvremenim prediktivnim pristupom koji omogućuje zamjenu dijelova neposredno prije kraja radnog vijeka. Na taj način digitalni blizanac, korištenjem analize podataka, nadziranjem proizvoda/sustava te simulacijama mogućih slučajeva, korisnicima omogućuje da konstantno budu korak ispred problema. Time se osigurava manji broj zastoja (eng. *downtime*) te veća produktivnost [13].

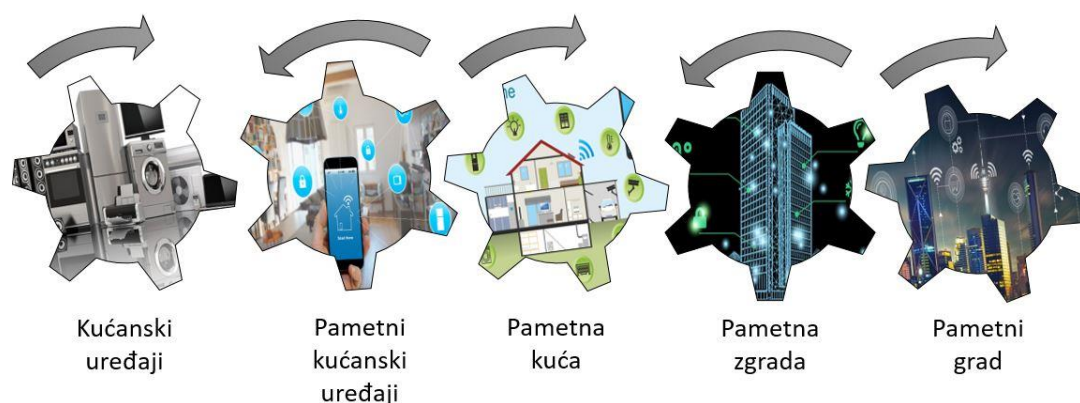
2.4. Izazovi

Tehnologiju digitalnog blizanca prate određeni izazovi koje je potrebno adresirati u daljnjim istraživanjima kako bi tehnologija maksimalno iskoristila svoj potencijal te omogućila čim jednostavniji pristup i sigurnu uporabu svojim korisnicima. Zbog upotrebe komplementarnih tehnologija poput računalnih oblaka (eng. *Cloud computing*) i Interneta stvari (eng. *Internet of Things*) pomoću kojih je digitalni blizanac umrežen, imperativ je osigurati robusno okruženje u kojem digitalni blizanac neće biti podložan napadima hakera i virusima. Hakerski napad ili virus mogu ugroziti privatne, povjerljive i vrijedne podatke, a time i sve uključene sudionike digitalnog i fizičkog okruženja. Osobito je važna sigurnost unutar proizvodne industrije i zdravstva. Uz nedovoljnu sigurnost, u proizvodnji može doći do krađe koncepata od strane konkurentnih tvrtki ili do rušenja kompletnog sustava, a u zdravstvu do krađe osobnih podataka pacijenata. Osim sigurnosti, važan je i ekonomski aspekt digitalnog blizanca. Implementacija digitalnog blizanca u već postojeći sustav unutar tvrtke zahtijeva ponovnu konfiguraciju softverske platforme, ispitivanje međusobne povezanosti strojeva te njihovu mogućnost povezivanja na računalne oblake. U slučaju neadekvatnih komponenti za implementaciju digitalnog blizanca, potrebna je promjena istih koja iziskuje veliku financijsku obavezu od strane tvrtke što odgovara samo većim tvrtkama s dovoljno kapitala. Zahvaljujući brojnim istraživanjima provedenim u području tehnologije digitalnog blizanca, razvijeni su mnogi eksperimentalni digitalni blizanci u području proizvodnje. Neki od njih su javno podijeljeni preko otvorenih repozitorija što manjim tvrtkama financijski olakšava implementaciju

tehnologije digitalnog blizanca. Na taj način manje tvrtke i dalje ostaju konkurentne na tržištu, unatoč tome što si većina njih ne može priuštiti velik broj inženjera koji bi razvijali jedinstvene digitalne blizance ekskluzivno za potrebe poduzeća. Izazove predstavljaju i tehnička ograničenja - za učinkovito korištenje digitalnog blizanca potrebna je brza i stabilna internetska konekcija. Navedeni zahtjev je i u suvremeno doba teško ispunjiv u mnogim područjima diljem svijeta. Nadalje, velike količine podataka otežavaju razvoj učinkovitih, lako pristupačnih i praktičnih sučelja za vizualizaciju istih. Nažalost, upravo se razvoj sučelja prilagođenih korisnicima često zanemaruje od strane inženjera u korist razvoja i performansi samog digitalnog blizanca. Stvaranje sučelja prilagođenog korisnicima je važno kako bi se omogućila jednostavna interakcija između korisnika i podataka.

3. PRIMJENA DIGITALNIH BLIZANACA

Kako bi ostale konkurentne na tržištu te ispunile želje kupaca za personaliziranim proizvodima, sve više tvrtki napušta masovnu proizvodnju te se okreće mogućnostima koje pruža industrija 4.0, konkretno Internet stvari i tehnologija digitalnog blizanca. Osim već prethodno spomenutih dodanih vrijednosti poput reduciranja troškova, povećanja efikasnosti i kvalitete te prediktivnih usluga održavanja, ono što odvaja digitalnog blizanca od drugih tehnologija je razmjena podataka u stvarnom vremenu. Upravo mogućnost povezivanja između fizičkog uređaja i njegovog digitalnog pandana te slanje i razmjena podataka čini taj uređaj pametnim [14]. Više takvih uređaja zajedno čini pametnu kuću (eng. *Smart Home*) ili pametnu zgradu (eng. *Smart Building*), dok više takvih kuća i zgrada čine pametan grad (eng. *Smart City*) [slika 3.1.].

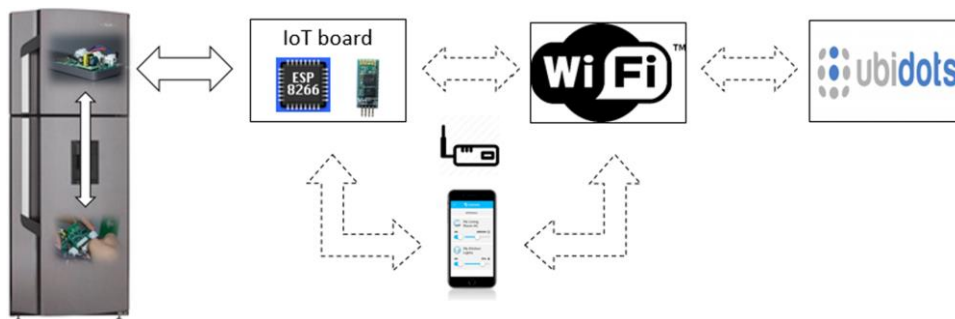


Slika 3.1. Put digitalne transformacije

U okvirima ovog rada, detaljnije će se proučiti pametni kućanski uređaji. Na primjeru pametnog hladnjaka pružit će se uvid u način na koji konvencionalan kućanski uređaj postaje pametan, tehnologije koje to omogućavaju te mogućnosti koje se otvaraju korištenjem pametnih uređaja. Analiza ovog primjera pružila je smjernice te značajno pridonijela izradi vlastitog digitalnog blizanca na primjeru kućanskog uređaja sokovnika. S druge strane, primjer uređaja za praćenje potrošnje električne energije kućanskih aparata, osim što također daje uvid u mogućnosti koje pružaju pametni uređaji, prikazuje arhitekturu tehnologije digitalnog blizanca koja je poslužila kao inspiracija za vlastitu arhitekturu.

3.1. Pametni hladnjak

Ciljevi korištenja Interneta stvari (eng. *Internet of Things*) i tehnologije digitalnog blizanca na primjeru pametnog hladnjaka su optimizacija uporabe električne energije, praćenje korištenja uređaja, mogućnost personalizacije proizvoda od strane korisnika, mogućnost naprednog održavanja proizvoda te cijenom pristupačan sustav ažuriranja proizvoda [15]. U kontekstu analiziranog rada [15], autorima je cilj korištenjem navedenih tehnologija od postojećih kućanskih uređaja napraviti pametne uređaje, konkretno na primjeru hladnjaka. U svom radu napominju kako se korištena arhitektura može primijeniti i na ostale kućanske uređaje. Prilikom provođenja istraživanja, autori su naišli na izazove poput nedostatka korisnicima pristupačnog kontrolnog sustava, integracije hardvera u uređaj bez promjene njegove konstrukcije, povezivanje uređaja na Internet te stvaranje sustava za praćenje rada hladnjaka u stvarnom vremenu i slanje notifikacija na mobilni uređaj. Važno je i osigurati prostor za pohranu podataka. Navedeni podaci će poslužiti u svrhu optimizacije upotrebe energije, poboljšanja performansi kompresora hladnjaka te prediktivnog održavanja.



Slika 3.2. Arhitektura pametnog hladnjaka [15]

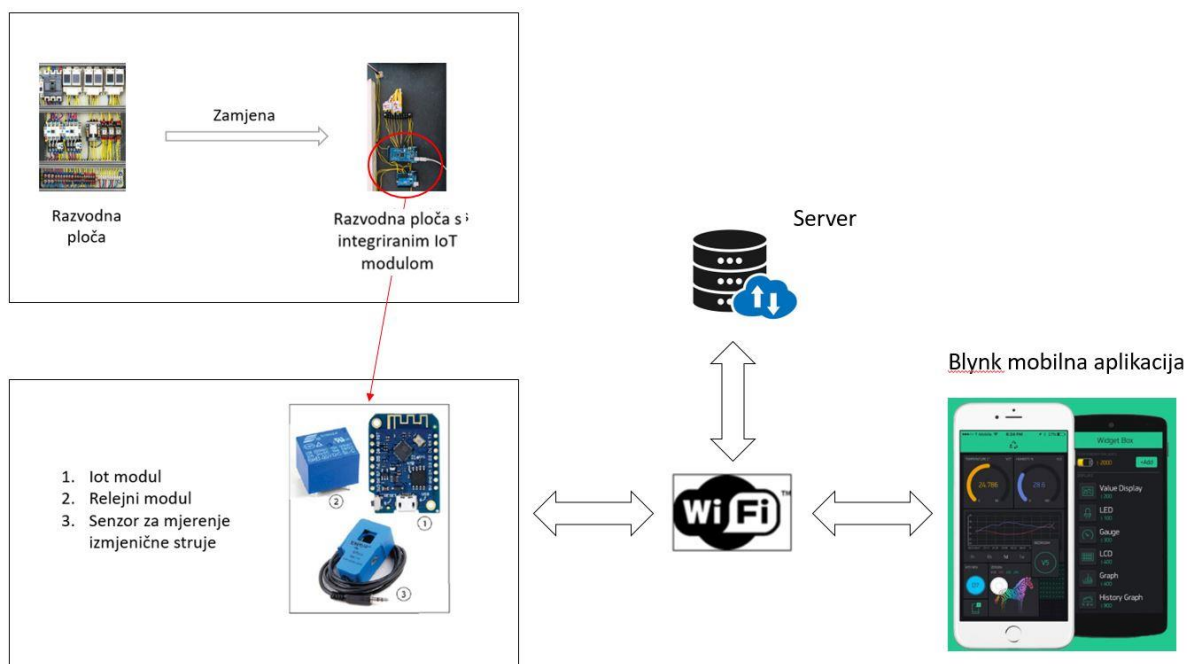
Za potrebe ovog istraživanja izrađena je tiskana pločica na kojoj su integrirani mikrokontroler te Wi-Fi modul koji omogućuje spajanje na Internet i povezivanje s mobilnim uređajem. Pločica se može jednostavno ugraditi u vrata hladnjaka čime se eliminira potreba za konstrukcijskim promjenama uređaja. Mikrokontroler prima podatke s kontrolne ploče hladnjaka preko univerzalnog asinkronog prijemnika-odašiljača. Nadalje, kontrolna ploča prima podatke sa senzora te ih u stvarnom vremenu šalje na „IoT“ platformu „Ubidots“ koja omogućuje pohranu,

analizu i vizualizaciju podataka. Navedena platforma povezana je s mobilnim uređajem korisnika te omogućuje vizualizaciju podataka na istom. Shematski prikaz opisane arhitekture prikazan je na slici 3.2. Varijable koje se mogu pratiti su razina hlađenja (u vrijednostima od jedan do pet), temperatura kompresora, stanje aktuatora (kompresor uključen ili isključen, vrata hladnjaka otvorena ili zatvorena), temperaturu hladnjaka te vrijeme rada kompresora. Korisniku je omogućeno i primanje notifikacija poput „temperatura je dostigla traženu vrijednost“ ili „vrata hladnjaka su otvorena“.

3.2. Uređaj za praćenje potrošnje električne energije kućanskih aparata

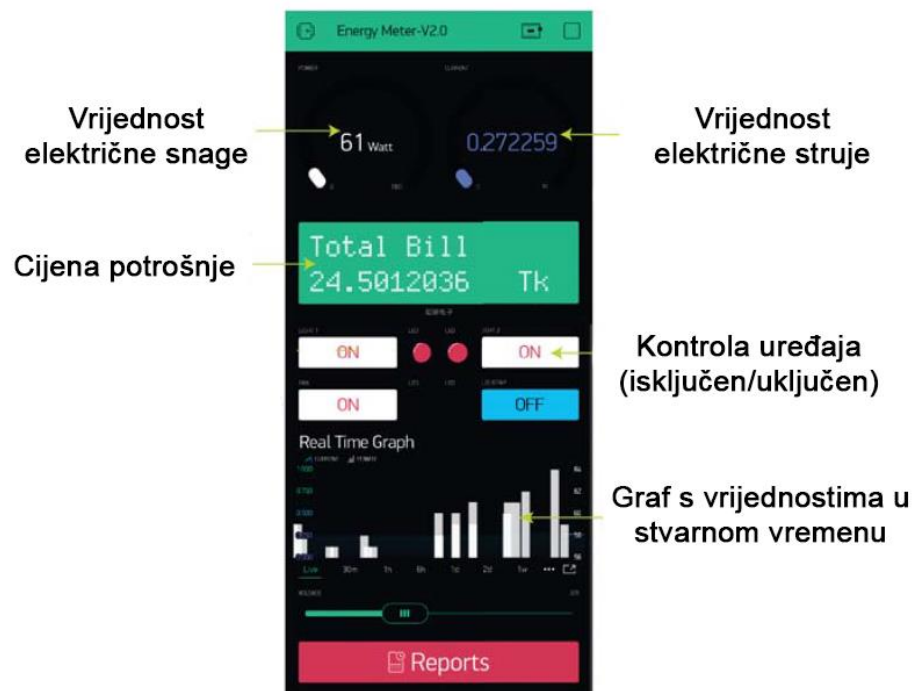
Spoznaja koliko električne energije troši određeni kućanski uređaj ključni je dio praćenja i kontrole potrošnje električne energije nekog kućanstva. Potrošači nemaju uvid u potrošnju energije vlastitog kućanstva sve dok ne stigne mjesečni račun. Nadalje, na istom računu nije definirana konkretna potrošnja električne energije svakog kućanskog uređaja zasebno. Autori analiziranog rada navode kako u vrijeme pisanja rada, 2019. godine, postoji nekoliko uređaja na tržištu koji mjere potrošnju električne energije, no svaki uređaj posjeduje neki od sljedećih nedostataka: visoka cijena, nemogućnost praćenja podataka u stvarnom vremenu, nemogućnost prepoznavanja kućanskog uređaja pojedinačno, nemogućnost izračuna cijene potrošene energije te nemogućnost kontrole kućanskog uređaja [16]. Stoga autori predlažu rješenje bazirano na Internetu stvari u obliku uređaja koji je sposoban mjeriti potrošnju energije više pojedinačnih kućanskih uređaja te izračunati približnu cijenu potrošene električne energije na mjesečnoj bazi. Navedene podatke korisnik će moći pratiti koristeći mobilnu aplikaciju koja će pružati i mogućnost kontrole povezanih kućanskih uređaja. Glavna prepreka u procesu konstruiranja uređaja za praćenje potrošnje električne energije je precizno očitavanje vrijednosti jakosti promjenjive struje, a povezano uz to i računanje iznosa cijene računa na temelju očitanih vrijednosti. Značajan izazov predstavlja i povezivanje uređaja sa serverom te razmjena podataka između uređaja, servera i mobilne aplikacije. Shema na slici 3.3. prikazuje bitne hardverske komponente sustava – senzor za mjerenje izmjenične struje, relejni modul za kontrolu kućanskih električnih uređaja te Wi-Fi modul koji procesira analogne signale dobivene sa senzora te omogućuje povezivanje na Internet i pohranu očitanih podataka.

Navedeni moduli montiraju se na tiskanu pločicu (eng. *Printed Circuit Board*) koja je specifično konstruirana kako bi se nesmetano integrirala u već postojeću razvodnu ploču, dok je senzor s tiskanom pločicom spojen kabelom.



Slika 3.3. Arhitektura uređaja za praćenje potrošnje energije kućanskih aparata

Softverski dio arhitekture obuhvaća bežični prijenos podataka s Wi-Fi modula na server gdje se podaci o potrošnji električne energije i aproksimirana vrijednost cijene pohranjuju u bazu podataka te ponovno preko servera povezuju s mobilnom „IoT“ aplikacijom „Blynk“. Sučelje mobilne aplikacije, prikazano na slici 3.4., korisniku omogućuje prikaz vrijednosti navedenih podataka, kontrolu nad kućanskim uređajima (uređaj uključen/isključen) te graf koji prikazuje podatke u stvarnom vremenu.



Slika 3.4. Sučelje „Blynk“ mobilne aplikacije [16]

4. IMPLEMENTACIJA TEHNOLOGIJE DIGITALNOG BLIZANCA NA PRIMJERU KUĆANSKOG UREĐAJA SOKOVNIKA

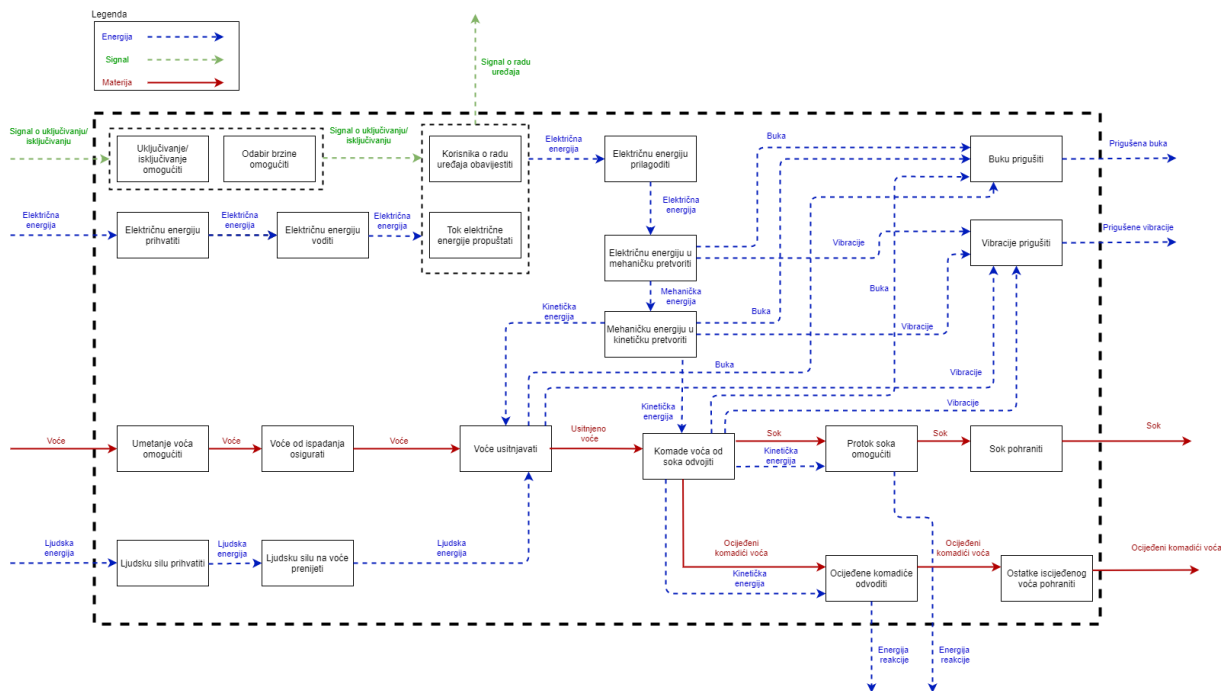
Sokovnik je kućanski uređaj čija je glavna funkcija izdvojiti sok iz različitih vrsta voća, povrća i bilja. U ovom radu je korišten centrifugalni tip sokovnika. Centrifugalni sokovnik sastoji se od dijelova prikazanih na slici 4.1.



Slika 4.1. Kućanski uređaj sokovnik

Proces cijedenja započinje ubacivanjem voća kroz cijev na vrhu sokovnika. Za potiskivanje voća koristi se klip. Pripremljene su dvije posude koje pohranjuju sok, odnosno ostatke voća ili povrća. Potonja je fiksirana uz kućište sokovnika preko poklopca. Na taj se način eliminira izlijetanje komadića voća izvan sokovnika. Unutar kućišta nalazi se elektromotor na koji je preko vratila spojena centrifugalna posuda unutar koje se nalazi pločica s oštricama. Oštrice služe za usitnjavanje komadića voća. Tijekom rada sokovnika, elektromotor uzrokuje vrtnju vratila, a time i vrtnju posude i oštrica. Centrifugalna sila unutar posude tjera komadiće voća

od središta vrtnje prema rubu posude. Na rubu posude nalazi se mnogo sitnih provrta koji omogućuju prolazak soka, ali ne i komadića voća. Uslijed djelovanja centrifugalne sile na posudu čiji su rubovi pod nagibom, ocijeđeni komadići voća postepeno se gibaju prema vrhu posude sve dok ne izlete iz nje u posudu za ostatke.



Slika 4.2. Funkcijska dekompozicija sokovnika

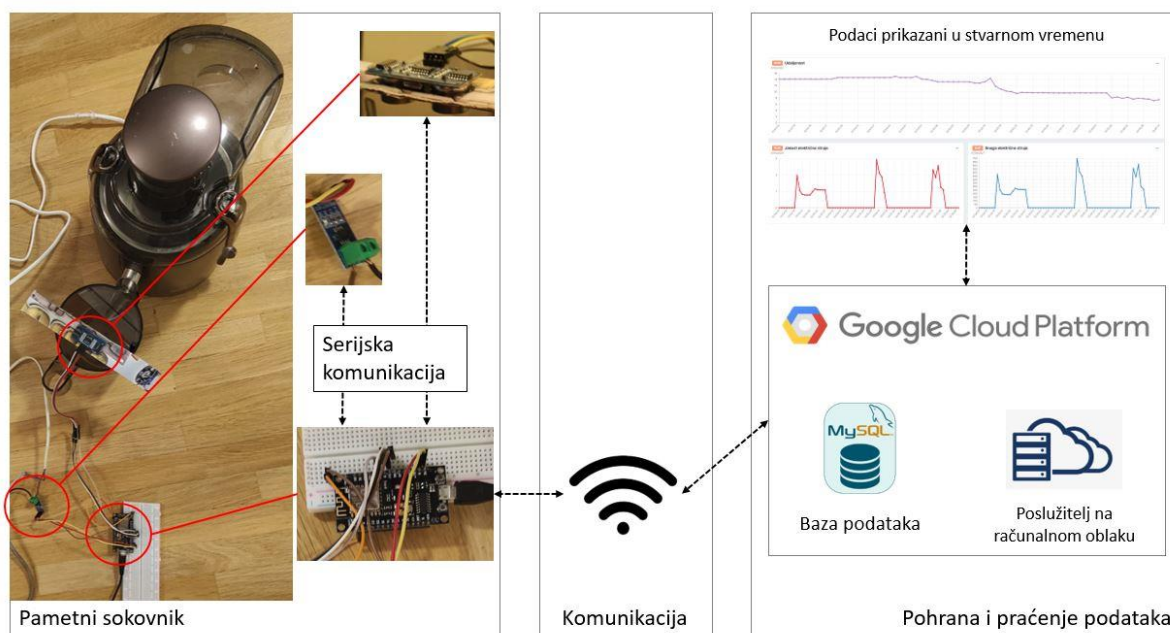
Na slici 4.2. prikazan je funkcijska dekompozicija sokovnika. Funkcijska dekompozicija predstavlja smislenu i kompatibilnu kombinaciju podfunkcija koje čine ukupnu funkciju. Veze između funkcija su pažljivo definirane u smislu konverzije energije, materije i signala. Iz funkcijske dekompozicije očituju se četiri ulazna parametra. Prvi je električna energija čijim se dovodenjem omogućuje pokretanje uređaja. Daljnji tok prikazuje pretvorbu električne energije u ostale oblike energije potrebne za obavljanje rada uređaja. Drugi je parametar signal koji omogućuje uključivanje ili isključivanje uređaja. Treći je ulazni parametar voće koje predstavlja glavni tok ove funkcijske dekompozicije. Ovim tokom prikazan je proces dobivanja krajnjeg proizvoda – soka, od početnog proizvoda – voća. Za ostvarivanje tog cilja korištene su već spomenuta električna energija pretvorena u mehaničku i kinetičku te ljudska energija. Uz

sok kao izlazni parametar definirani su i ocijedeđeni komadići voća koji su odvojeni u procesu stvaranja soka. Kao izlazni parametri definirani su i prigušena buka i vibracije kao identificirana potreba smanjenja buke i vibracija u svrhu pružanja čim ugodnije usluge korisnicima.

S ciljem realizacije paradigme digitalnog blizanca, na kućanski uređaj sokovnik postavljeni su senzori pomoću kojih se mjeri potrošnja električne energije uređaja te proizvedena količina tekućine. Navedeni senzori odabrani su kako bi se pratila potrošnja energije sokovnika tijekom faze korištenja te kako bi se pratio odnos između potrošene energije te dobivenog soka, odnosno učinkovitost sokovnika. Svrha digitalnog blizanca sokovnika je praćenje navedenih parametara, vizualizacija istih u obliku grafova i tablica pomoću softvera za vizualizaciju te konačno analiza podataka. Ovakav način primjene digitalnog blizanca definira se kao težnja za povećanjem efikasnosti postojećeg proizvoda te postavljanjem temelja za kompletnu transformaciju običnog kućanskog uređaja u pametan uređaj. U okviru ovog rada omogućena je povezanost uređaja na Internet, kao i dobivanje podataka od strane uređaja, no interakcija s uređajem ostaje izvan okvira ovog rada. Arhitektura tehnologije digitalnog blizanca na kućanskom uređaju sokovniku predstavljena u ovom radu može se primijeniti na većinu konvencionalnih kućanskih uređaja.

4.1. Arhitektura

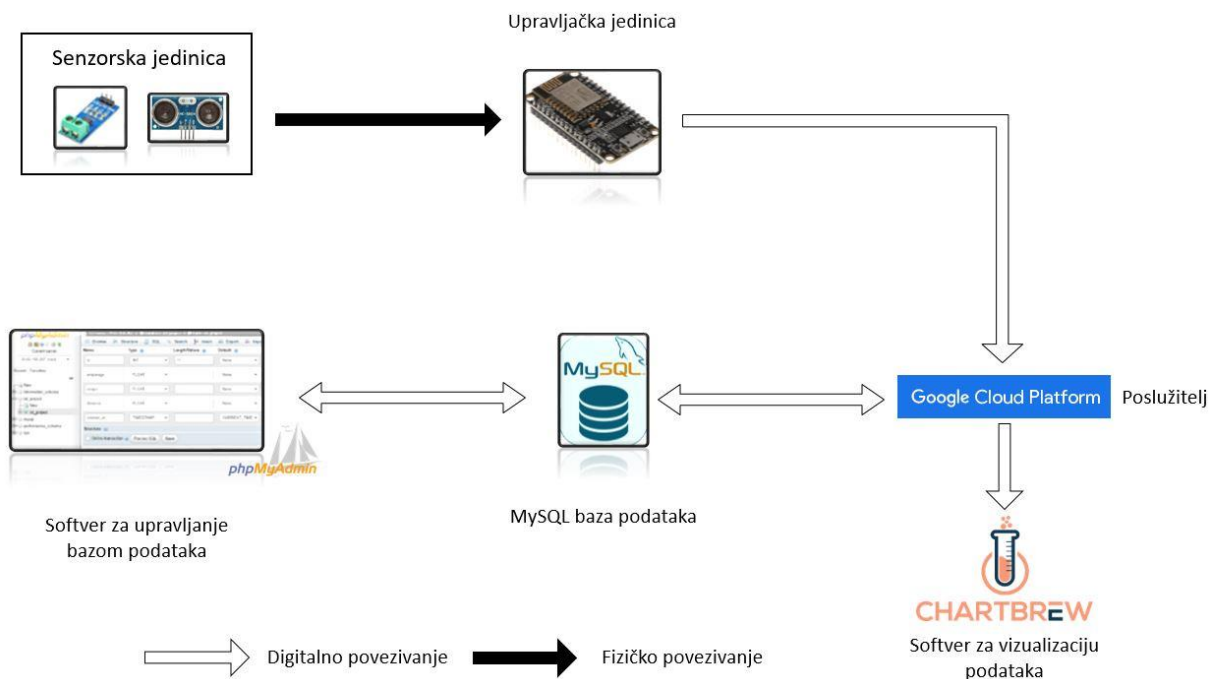
Ovo poglavlje prikazuje osmišljenu arhitekturu za implementaciju tehnologije digitalnog blizanca na primjeru kućanskog uređaja sokovnika. Na slici 4.3. apstraktno je prikazana cjelokupna arhitektura potrebna za uspješnu implementaciju tehnologije digitalnog blizanca. Preduvjet uspješne implementacije je nadogradnja sokovnika. Nadogradnja se postiže ugradnjom senzora na sokovnik te povezivanja istih s mikrokontrolerom. Nadalje, komunikaciju između fizičkog i digitalnog proizvoda omogućuje Wi-Fi konekcija. Komunikacija se odvija između mikrokontrolera i platforme koje se nalazi u računalnom oblaku. Platforma pruža usluge poslužitelja čime omogućuje stvaranje baze podataka te pohranu prikupljenih podataka u istu. Osim usluga poslužitelja, platforma omogućuje i povezivanje vanjskih softvera što se koristi za povezivanje sa softverom za vizualizaciju koji omogućuje prikaz podataka u obliku grafova u stvarnom vremenu.



Slika 4.3. Apstraktan prikaz arhitekture digitalnog blizanca

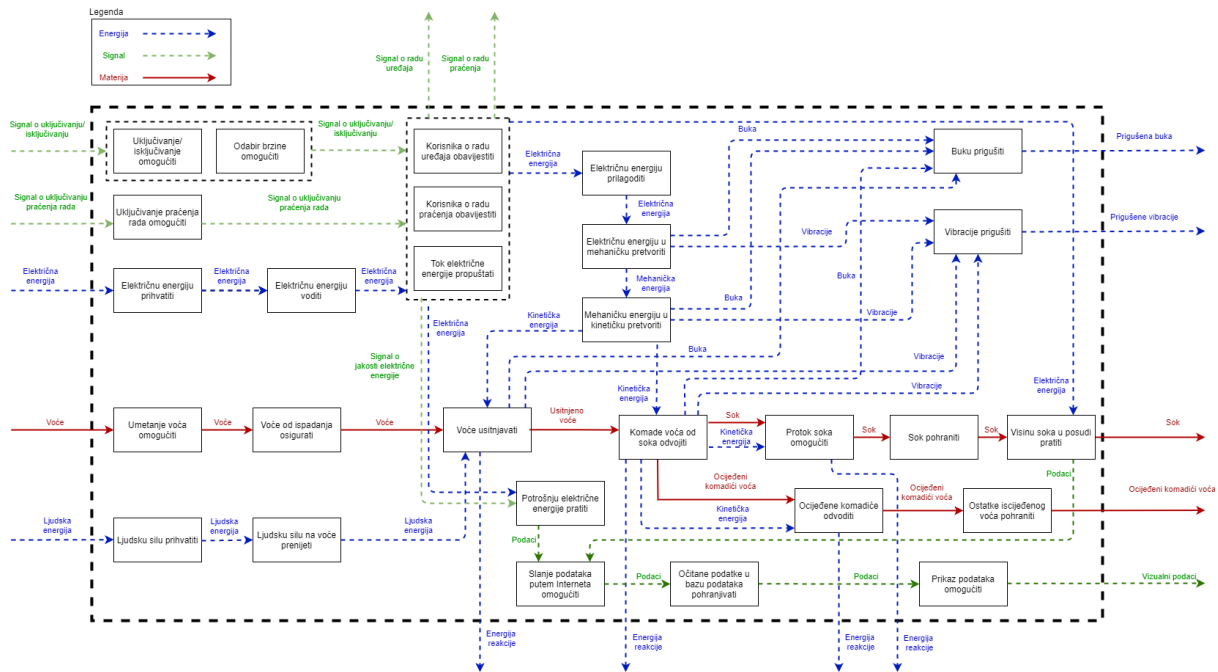
Slika 4.4. pobliže prikazuje arhitekturu digitalnog dijela tehnologije digitalnog blizanca, odnosno digitalni proizvod. Uloga digitalnog proizvoda je praćenje, pohrana i prikaz podataka očitanih tijekom rada sokovnika. Digitalni proizvod sastoji se od sljedećih komponenti:

1. Senzorska jedinica
2. Upravljačka jedinica
3. Baza podataka
4. Softver za upravljanje bazom podataka
5. Poslužitelj
6. Softver za vizualizaciju



Slika 4.4. Shematski prikaz arhitekture digitalnog proizvoda sokovnika

Senzorska jedinica obuhvaća senzor za mjerenje jakosti električne struje te ultrazvučni senzor za mjerenje udaljenosti. Uloga senzorske jedinice unutar opisane arhitekture je praćenje vrijednosti tijekom rada proizvoda. Senzori šalju očitane vrijednosti, u obliku signala, do upravljačke jedinice s kojom su žično povezani. Upravljačka jedinica omogućuje programiranje senzora i povezivanje na Internet. Povezana je s poslužiteljem na kojem se nalazi i baza podataka. Unutar softvera za upravljanje bazom podataka korisnik stvara tablicu u koju se zapisuju podaci očitani sa senzora. Osim stvaranja tablice, navedeni softver omogućuje i uređivanje tablice te brožani prikaz pohranjenih podataka. Poslužitelj osigurava memorijski prostor za pohranu podataka unutar baze podataka te povezanost na Internet. Uz navedeno, omogućuje i povezivanje ostalih softvera s bazom podataka. U ovom primjeru povezan je softver za vizualizaciju podataka koji omogućuje prikaz podataka u obliku grafova u stvarnom vremenu.



Slika 4.5. Funkcijska dekompozicija digitalnog blizanca sokovnika

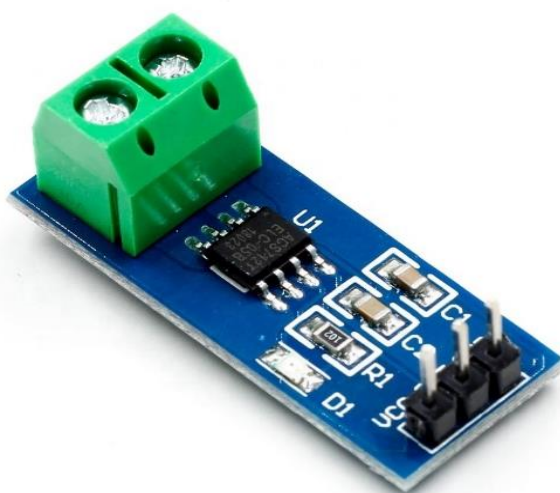
Na slici 4.5. prikazana je funkcijska dekompozicija digitalnog blizanca sokovnika. Ova funkcijska dekompozicija slična je onoj prikazanoj na slici 4.2. uz razliku što su ovdje dodane komponente koje omogućuju stvaranje digitalnog blizanca. Uz već navedene ulazne parametre definira se i signal za početak praćenja vrijednosti senzora povezanih sa sokovnikom. Prate se vrijednosti potrošene električne energije te visine soka u posudi. Nadalje prikazano je kako se očitane vrijednosti šalju, u obliku podataka, u bazu podataka gdje se pohranjuju. Slijedi daljnji tok podataka prema funkciji prikazivanja navedenih podataka. Konačno, kao izlazni parametar definiraju se vizualni podaci koji unutar softvera za vizualizaciju, korisniku prikazuju očitane vrijednosti potrošene električne energije te razine soka u posudi.

4.2. Komponente arhitekture

Unutar ovog poglavlja detaljno će se objasniti svaka komponenta arhitekture digitalnog proizvoda te prikazati njihova uloga u implementaciji tehnologije digitalnog blizanca na sokovnik.

4.2.1. Senzori

Senzor je uređaj koji detektira promjene u svom okruženju te ih pretvara u mjerljivi analogni napon ili u digitalni signal [17]. U suvremenim sustavima za prikupljanje i analizu podataka, važnost implementacije senzora je neosporiva jer njihovo korištenje uvelike ubrzava i olakšava procese u navedenim sustavima. U izradi ovog rada korišteni su senzori za mjerenje jakosti i snage struje ACS712 [Slika 4.6.] te senzor za mjerenje udaljenosti HC-SR04 [Slika 4.7.].



Slika 4.6. ACS712 senzor

ACS 712 je potpuno integrirani senzor koji radi na principu Hall-ovog efekta, odnosno koristi integrirani vodič niskog otpora za mjerenje i izračunavanje količine primijenjene struje. Princip rada senzora je sljedeći – struja teče kroz integrirani strujni krug s Hall-ovim senzorom koji detektira magnetsko polje dolazne struje. Jednom detektiran, senzor stvara napon proporcionalan magnetskom polju koji se zatim koristi za mjerenje jakosti struje. Stvoreni napon se u analognom obliku šalje sa senzora preko „Output“ pina. Senzor sadrži još dva pina uz navedeni – „VCC“ pin za napajanje ulaznog napona od 5 V te „Ground“ pin povezan s uzemljenjem. Raspon primjene senzora je širok jer je sposoban mjeriti istosmjernu i izmjeničnu struju [18]. Uloga ACS 712 senzora u ovom radu je očitavanje vrijednosti jakosti električne struje čime se kasnije mjeri potrošnja električne energije sokovnika.

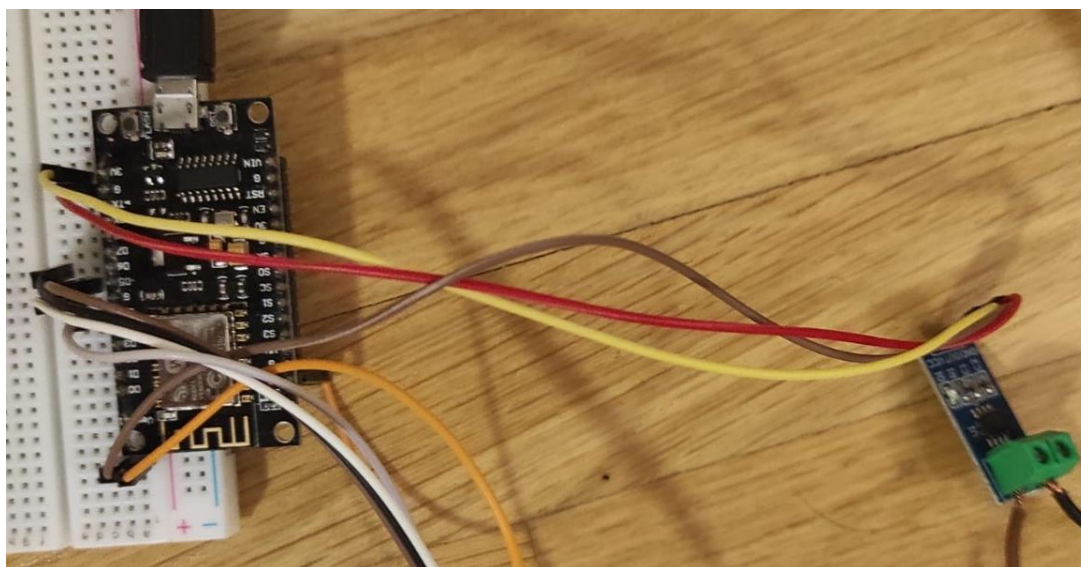


Slika 4.7. HC-SR04 senzor

HC-SR04 je ultrazvučni senzor čija je primarna uporaba određivanje udaljenosti ciljanog objekta. Glavni dijelovi senzora su odašiljač koji pretvara električni signal u ultrazvučne valove te prijemnik čija je uloga pretvaranje povratnih ultrazvučnih signala u električni signal. Senzor se sastoji i od četiri pina – „VCC“ pin za napajanje ulaznog napona od 5 V, „Ground“ pin povezan s uzemljenjem, „Trig“ pin koji ima vitalnu ulogu u inicijalizaciji mjerenja jer šalje ultrazvučne valove te „Echo“ pin koji stvara impuls kada primi reflektirani signal. Senzor radi na sljedeći način – na „Trig“ pin se primjenjuje impuls od najmanje 10 μ s. Kao odgovor na to senzor prenosi zvučni prasak od osam impulsa frekvencije 40 kHz. Impulsni uzorak odaslan s uređaja je jedinstven, što omogućava prijemniku da razlikuje preneseni uzorak od ambijentalne ultrazvučne buke. Ultrazvučni impulsi putuju zrakom od odašiljača do objekta. U međuvremenu, Echo pin prelazi u „HIGH“ stanje kako bi formirao početak povratnog signala. U slučaju da se ti impulsi ne odraze natrag, signal sa „Echo“ pina će isteći nakon 38 ms, a pin se vraća u „LOW“ stanje. Ako se impulsi uspješno reflektiraju, „Echo“ pin prelazi u „LOW“ stanje čim primi signal te se stvara impuls čija vrijednost varira između 150 μ s i 25 ms. Konačna udaljenost je umnožak vrijednosti impulsa te brzine zvuka [19]. Uloga HC-SR04 senzora u ovom radu je očitavanje vrijednosti udaljenosti između senzora i površine iscijeđenog soka čime se kasnije mjeri volumen soka potreban za uvid u učinkovitost sokovnika.

4.2.2. NodeMCU (*Node Microcontroller Unit*)

Razvojne pločice poput Arduina čest su izbor prilikom izrade prototipa novih „Internet of things“ uređaja. U suštini, to su mini računala koja se mogu povezati s računalom gdje se mogu programirati, od strane korisnika, unutar Arduino IDE softvera. Nakon što su programirane, razvojne pločice mogu se spojiti na i kontrolirati senzore. Kako bi se omogućilo slanje podataka sa senzora u bazu podataka na računalu, nužno je razvojnim pločicama omogućiti spajanje na Internet. Jedan od načina za to je korištenje bežičnih mreža. Većina Arduina nema ugrađen Wi-Fi modul, no NodeMCU ima. NodeMCU (*Node Microcontroller Unit*), prikazan na slici 4.8., je softversko i hardversko razvojno okruženje izgrađeno na ESP8266 čipu [20].



Slika 4.8. NodeMCU ESP8266 Wi-Fi modul (lijevo) i kablovi za spajanje sa sensorima ESP8266 sadrži ključne komponente suvremenog računala – CPU, RAM i umreženost (Wi-Fi) [20]. Pločica sadrži integriran USB utor, gumb za resetiranje hardvera, antenu za Wi-Fi, LED svjetla te GPIO (*General Purpose Input Output*) pinove koji olakšavaju spajanje senzora kablovima. Mikrokontroler je korišten u ovom radu u svrhu povezivanja senzora s računalom gdje se oni mogu programirati kako bi pravilno očitavali željene vrijednosti. Nadalje, mikrokontroler omogućuje povezivanje senzora na Internet u svrhu pohrane očitanih vrijednosti u bazu podataka.

4.2.3. MySQL baza podataka

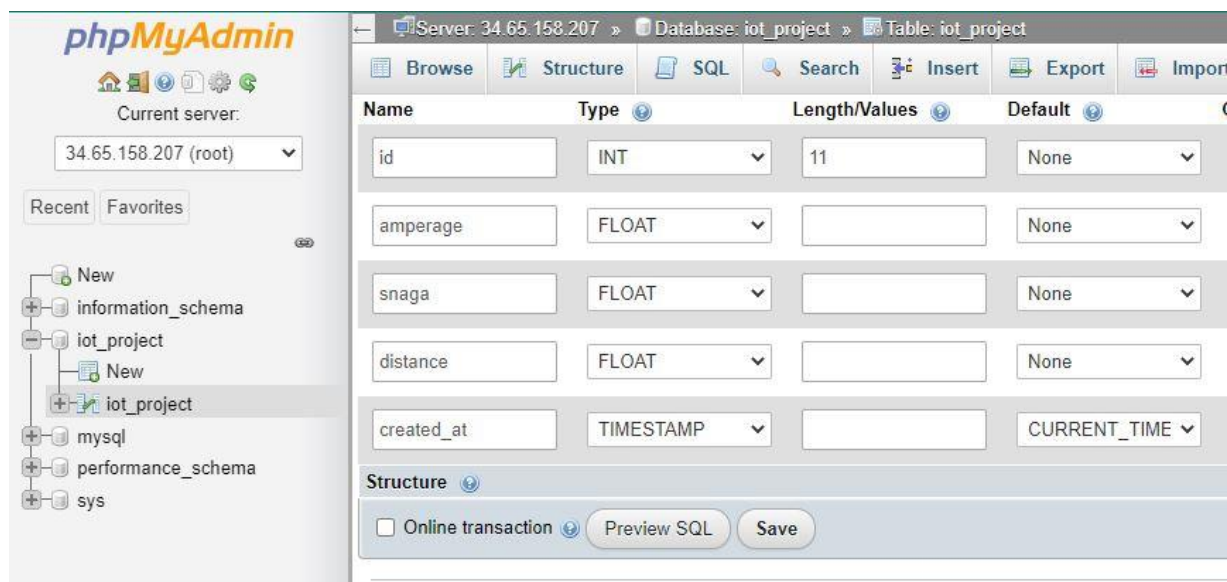
MySQL je standardna relacijska baza podataka, odnosno baza podataka u koju su podaci pohranjeni strukturirano, u tablice. Karakterizira ju sposobnost prepoznavanja odnosa između pohranjenih podataka. Osim što se koristi za unos i pohranu velike količine podataka, javno je dostupna te se njome može koristiti veliki broj korisnika. Najčešća upotreba MySQL-a je u svrhu kreiranja web baze podataka, što je i razlog uporabe MySQL baze podataka u ovom radu. Prednosti MySQL-a su u tome što je kompatibilan s najkorištenijim operativnim sustavima, besplatan je te optimalno iskorištava memoriju, a karakterizira ga i niska potrošnja računalnih resursa poput RAM-a i procesora. Princip rada je sljedeći – nakon kreirane MySQL baze podataka u kojoj su jasno definirane tablice, stupci te odnosi između podataka, korisnici mogu pristupiti podacima šaljući određene SQL upite. Nakon poslanog ispravnog upita, server će prikazati tražen set podataka na grafičkom sučelju korisnika. MySQL baza podataka je u ovom radu korištena u svrhu pohrane očitanih vrijednosti sa senzora u tablice unutar baze podataka. Osim pohrane, MySQL baza podataka pruža i mogućnost jednostavnog pristupa podacima korištenjem SQL upita poput:

```
SELECT `snaga`, TIME(`vrijeme`) FROM `završni_projekt`.
```

4.2.4. PhpMyAdmin

PhpMyAdmin je softverski alat koji se koristi u svrhu upravljanja MySQL bazom podataka. Praktično korisničko grafičko sučelje korisnicima omogućuje jednostavno korištenje alatom. Unutar PhpMyAdmin okruženja moguće je stvarati, uređivati i brisati tablice koje se nalaze u MySQL bazama podataka. Tablice se kreiraju tako da se obavezno definira broj stupaca te za svaki stupac unese naziv stupca i tip podataka koji će se unositi u stupac (Slika 4.9.). Definiranje ostalih parametara je izborno. Nakon kreiranja tablice, stupce je moguće brisati, dodavati i uređivati. Podatke pohranjene u tablici unutar baze podataka moguće je i spremiti izvanmrežno u obliku pdf, word, excel, xml, csv ili sql dokumenta. PhpMyAdmin se unutar ovog rada koristi za izradu i uređivanje tablica unutar baze podataka. Unutar navedenih tablica se zapisuju podaci

očitanu sa senzora. Navedeni alat također omogućuje i broječni prikaz očitanih vrijednosti u tablicama.



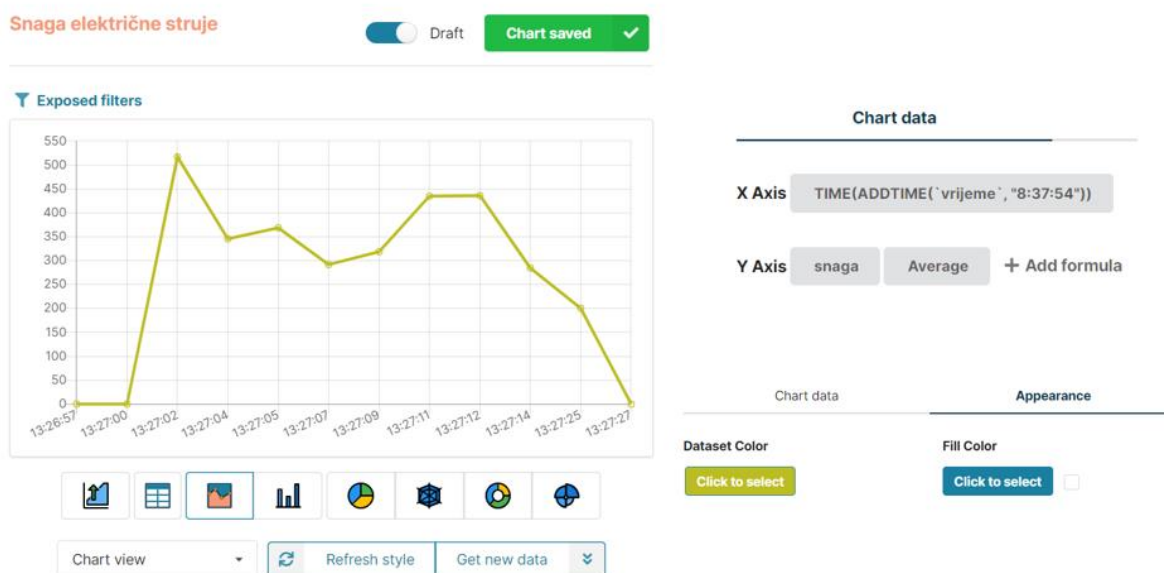
Slika 4.9. phpMyAdmin sučelje

4.2.5. Google Cloud platforma

Google računalni oblak je paket usluga za „cloud computing“ omogućen od strane Google-a. Google Cloud platforma pruža različite usluge poput pohrane i upravljanja podacima, umrežavanja, sigurnosti podataka, itd. Korisnicima je omogućen pristup podacima s većine pametnih uređaja iz svih dijelova svijeta, isto kao i privatna mreža koja omogućuje više kontrole i skalabilnosti. Sami podaci su dodatno šifrirani čime je korisnicima zajamčena sigurnost podataka. Google Cloud platforma također ima integriranu značajku pohranjivanja sigurnosnih kopija u određenim intervalima čime se sprječava gubitak podataka. Google Cloud platforma je unutar ovog rada korištena u funkciji poslužitelja zbog mogućnosti povezivanja s mikrokontrolerom, stvaranja baze podataka, memorijskih kapaciteta pohrane podataka unutar baze podataka te mogućnosti povezivanja vanjskih softvera s bazom podataka.

4.2.6. Chartbrew

Chartbrew je „open-source“ web aplikacija koja korisnicima omogućuje povezivanje baza podataka ili sučelja za programiranje aplikacija te vizualizaciju prikupljenih podataka iz navedenih izvora u obliku grafova. Nakon uspješnog povezivanja baze podataka sa Chartbrew-om te slanjem zahtjeva za pristup podacima, moguće je kreirati grafove. Chartbrew nudi širok izbor grafova – linijski, stupčasti, tortni i prstenasti grafovi samo su neki od mogućih izbora [slika 4.10.].



Slika 4.10. Chartbrew sučelje

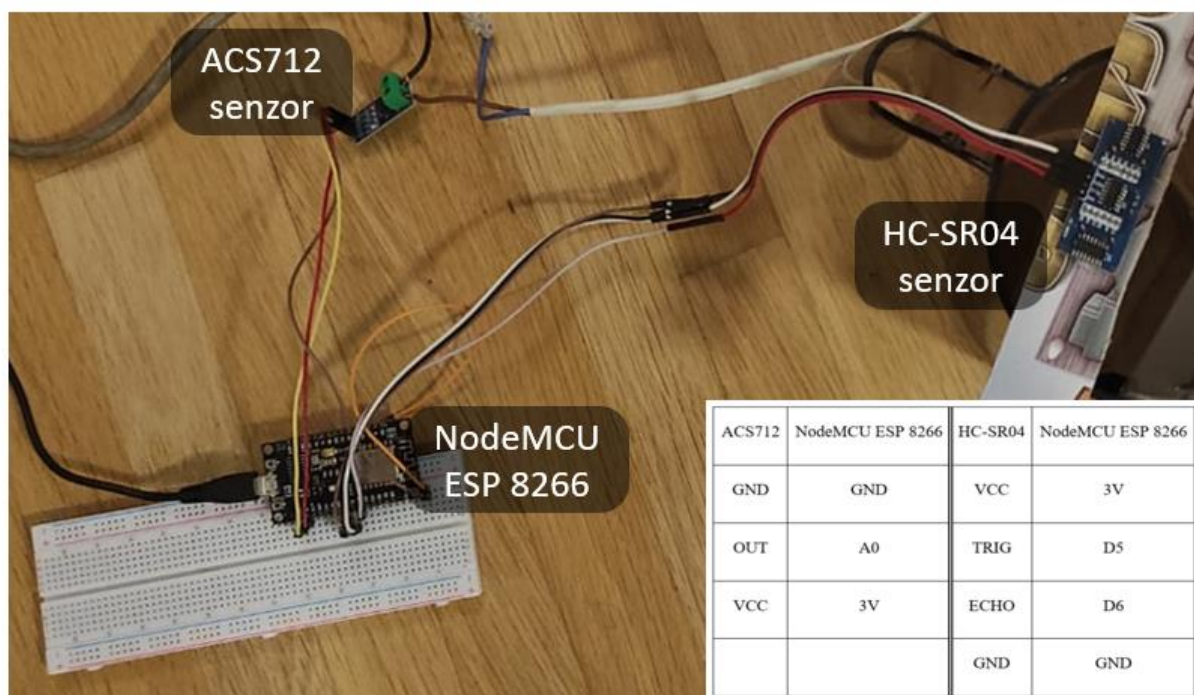
Ostale mogućnosti, također prikazane na slici 4.10., dijele se na vizualne – odabir boje i veličine grafa te funkcionalne – pripisivanje vrijednosti osima, postavke vremena, dodavanje formula i osvježavanje podataka. Chartbrew je unutar ovog rada korišten kao softver za vizualizaciju podataka u obliku grafova u stvarnom vremenu. Za potrebe ovog rad odabran je prikaz podataka u obliku linijskog grafa zbog najpreglednijeg prikaza kontinuirano ažuriranih podataka od mogućih grafova. Nakon uspješnog povezivanja s poslužiteljem, za pristup podacima iz baze podataka šalju se SQL upiti poput:


```
SELECT `snaga`, TIME(`vrijeme`) FROM `zavrzni_projekt`.
```

U konkretnom primjeru, Chartbrew tada dobiva podatke o snazi električne struje te vremenu u kojem je vrijednost očitana. Unutar sučelja prikazanog na slici 4.10. vrijednosti snage pripisuju se ordinati, a vrijeme očitavanja vrijednosti apscisi. S time su definirani svi parametri te se kontinuirano ažurirani podaci prikazuju na grafu prikazanom na slici 4.10.

4.3. Proces izrade digitalnog blizanca

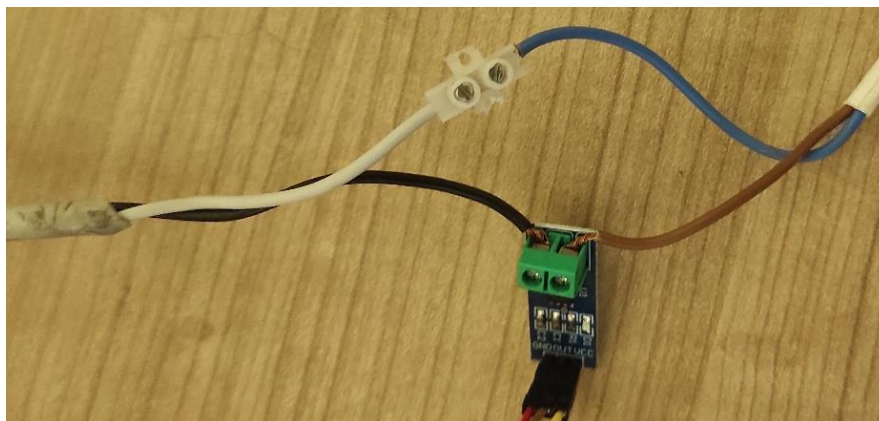
Senzori ACS712 za mjerenje jakosti i snage struje te HC-SR04 za mjerenje udaljenosti spojeni su kablovima na eksperimentalnu pločicu. Na istu eksperimentalnu pločicu spojen je i mikrokontroler NodeMCU ESP8266. Navedene komponente prikazane su na slici 4.11.



Slika 4.11. Ožičenje

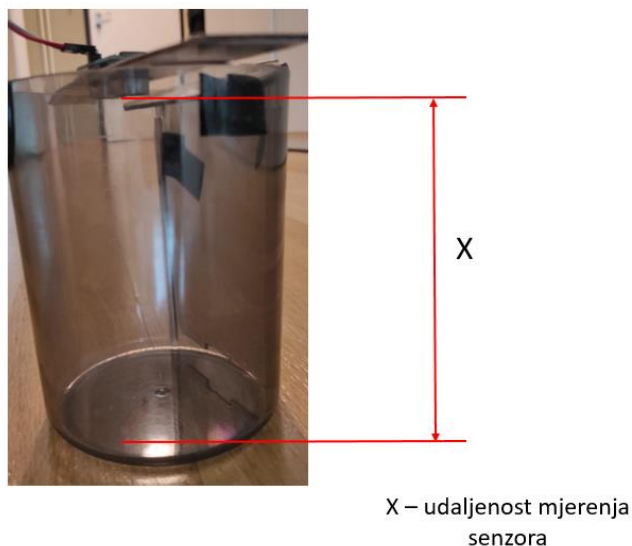
Senzor ACS712 spojen je serijski u strujni krug [Slika 4.12.] preko modificiranog produžnog kabela koji služi kao posrednik između izvora napajanja – napona gradske mreže te promatranog uređaja – sokovnika. Produžni kabel je modificiran na način da je na jednom

mjestu skinuta izolacija te je jedna od dvije provodne žice prerezana. Krajevi žice se tada umeću u priključke na senzoru te se njihova pozicija osigurava vijcima, time se zatvara strujni krug.



Slika 4.12. Integracija senzora u strujni krug

Za senzor HC-SR04 izrađeno je improvizirano postolje koje se postavlja iznad spremnika te osigurava stabilnost potrebnu za precizno mjerenje razine tekućine u posudi. Na slici 4.13. prikazana je maksimalna udaljenost, koju senzor mjeri u slučaju kad u posudi nema soka, u iznosu od 14 cm. Kada se posuda počinje puniti sokom, vrijednost udaljenosti pada.



Slika 4.13. Prikaz mjerenje udaljenosti senzora

NodeMCU ESP 8266 se prilikom prvog korištenja spaja USB kabelom na računalo gdje se programira unutar Arduino IDE okruženja. Tijekom narednih korištenja spaja se USB kabelom preko adaptera te kao izvor napajanja koristi napon gradske mreže. U Arduino IDE-u unutar „void setup“ funkcije, koja se inicijalizira jednom, definira se Wi-Fi mreža te piše kod koji spaja NodeMCU na navedenu mrežu. Sljedeći korak je pisanje koda za programiranje korištenih senzora unutar „void loop“ funkcije kojim će se vrijednosti očitane sa senzora prikazivati u obliku fizikalnih veličina u petlji dokle god je mikrokontroler spojen na izvor napajanja. Na kraju se nalazi kod za povezivanje s php skriptom uz pomoć koje se očitane podaci sa senzora zapisuju u MySQL bazu podataka. MySQL baza podataka umrežena je zahvaljujući uslugama poslužitelja – Google Cloud platforme. Unutar platforme potrebno je potvrditi IP adresu Wi-Fi mreže na koju se povezuje mikrokontroler. U bazi podataka kreirana je tablica unutar phpMyAdmin okruženja – softverskog alata namijenjenog za upravljanje administracijom MySQL-a. U tablici su definirani nazivi stupaca te tipovi podataka koji se unose u stupce [slika 4.14.].



		id	jakost_struje	snaga	udaljenost	vrijeme
<input type="checkbox"/>	Edit	77	0	0	13.67	2021-08-23 04:33:52
<input type="checkbox"/>	Edit	78	0	0	13.67	2021-08-23 04:33:54
<input type="checkbox"/>	Edit	79	0	0	13.66	2021-08-23 04:33:55
<input type="checkbox"/>	Edit	80	2.49	597.15	13.66	2021-08-23 04:33:57
<input type="checkbox"/>	Edit	81	1.59	380.72	13.66	2021-08-23 04:33:59
<input type="checkbox"/>	Edit	82	1.35	324.28	13.66	2021-08-23 04:34:01
<input type="checkbox"/>	Edit	83	1.1	263.67	13.6	2021-08-23 04:34:03
<input type="checkbox"/>	Edit	84	0.93	222.04	13.54	2021-08-23 04:34:04
<input type="checkbox"/>	Edit	85	1.37	328.31	14.33	2021-08-23 04:34:06
<input type="checkbox"/>	Edit	86	1.16	278.72	13.85	2021-08-23 04:34:08
<input type="checkbox"/>	Edit	87	1.11	267.43	13.43	2021-08-23 04:34:10
<input type="checkbox"/>	Edit	88	0.6	144.58	13.42	2021-08-23 04:34:11
<input type="checkbox"/>	Edit	89	0	0	13.42	2021-08-23 04:34:13
<input type="checkbox"/>	Edit	90	0	0	13.42	2021-08-23 04:34:15
<input type="checkbox"/>	Edit	91	0	0	12.83	2021-08-23 04:34:17
<input type="checkbox"/>	Edit	92	0	0	12.82	2021-08-23 04:34:18
<input type="checkbox"/>	Edit	93	0	0	12.83	2021-08-23 04:34:20

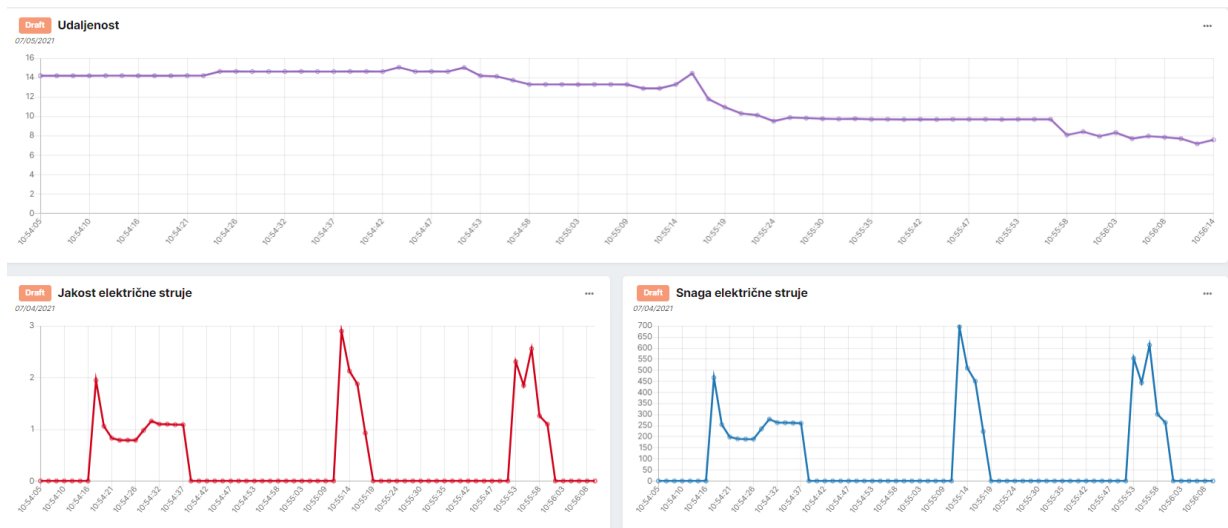
Slika 4.14. Tablica unutar MySQL baze podataka

„id“ predstavlja redni broj unosa podataka te se unose podaci tipa „integer“, odnosno cijeli brojevi. U stupce „jakost_struje“, „snaga“ i „udaljenost“ unose se podaci tipa „float“, odnosno brojevi s dvije decimale, te su u navedenim stupcima zabilježene vrijednosti očitane sa senzora. Posljednji stupac „vrijeme“ registrira vrijeme unosa podataka u bazu podataka, a tip podataka je „timestamp“. Iz slike 4.12. zaključuje se kako MySQL baza podataka pohranjuje svaki zapis očitanih vrijednosti sa senzora. Time se korisniku omogućuje uvid u historijske podatke rada uređaja.

MySQL baza podataka je preko poslužitelja povezana sa Chartbrew-om, web aplikacijom za vizualizaciju podataka. Za navedeno povezivanje također je potrebno potvrditi IP adresu Chartbrea na Google Cloud platformi. Kako bi se dohvatile vrijednosti snage električne struje i vrijeme očitavanja iz baze podataka, potrebno je poslati sljedeći SQL upit poslužitelju:

```
SELECT `snaga`, TIME(`vrijeme`) FROM `završni_projekt`
```

Za dohvaćanje vrijednosti jakosti električne struje i udaljenosti šalju se identični upiti, uz razliku da se „snaga“ u upitu zamijeni s „jakost_struje“ te „udaljenost“. Nakon uspješnog povezivanja s bazom podataka i dohvaćanjem rezultata, preostalo je odabrati vrstu grafa, definirati osi te odabrati boje i veličinu grafa. Za potrebe ovog rada odabrani su linijski grafovi u kojima su na apscisi definirane vrijednosti vremena, dok su na ordinati definirane očitane vrijednosti sa senzora – udaljenost te jakost i snaga električne struje. Krajnji rezultat su tri grafa koja se osvježavaju u stvarnom vremenu, a njihov konačan izgled prikazan je na slici 4.15.



Slika 4.15. Vizualizacija podataka

5. ANALIZA PODATAKA

Analiza očitanih podataka sa senzora spojenih na sokovnik omogućuje uvid u vršne i srednje vrijednosti jakosti i snage električne struje, potrošnju električne energije te dobivenu količinu tekućine. U okviru ove analize, usporedit će se rezultati dobiveni cijedenjem različitih vrsta voća – manga s korom, kruški, grejpa s korom i jabuka s peteljkom i bez. Gustoća, navedena u tablici 5.1., je bila ključan parametar prilikom odabira vrsta voća. Navedenim izborom pokriven je širok raspon gustoće čime se želi omogućiti prikupljanje podataka o performansama sokovnika tijekom različitih uvjeta rada u svrhu provođenja temeljite analize. Analiza obuhvaća podatke prikupljene u vremenskom periodu od dva tjedna. Sokovnik je tijekom navedenog perioda korišten u istom kućanstvu. Sokovnik i mikrokontroler su bili ukopčani na isti produžni kabel s prekidačem. Time se osiguralo da se podaci pohranjuju samo tijekom rada sokovnika. Tijekom navedenog vremenskog perioda, zabilježeno je pet zasebnih korištenja uređaja. Prema preporukama priručnika za korištenje, za cijedenje voća manje gustoće korištena je prva brzina rada elektromotora sokovnika, dok je za cijedenje voća veće gustoće korištena druga brzina. Navedena preporuka proizlazi iz pretpostavke da će voće veće gustoće stvarati veće opterećenje na oštrice i centrifugalnu posudu, a time i na samo vratilo povezano s elektromotorom. Iz tog razloga se preporučuje sokovnik odmah pokrenuti u većoj brzini jer prema formuli (1) veća kutna brzina vratila znači i veću maksimalnu snagu koju elektromotor dovodi vratilu.

$$P = M * \omega \quad (1)$$

gdje je:

P – Snaga elektromotora

M – Okretni moment elektromotora

ω – Kutna brzina vratila

Količina korištenog voća navedena je u tablici 5.1. Dvije varijable nisu kontrolirane tijekom procesa cijedenja. Prva je ručna sila pritiskanja klipa, naime za cijedenje većine ispitanih vrsta

voća niti nije bilo potrebno koristiti silu pritiskanja na klip. Jedino je jabuka s peteljkom pružala otpor cijedenju te je iz tog razloga bilo nužno primijeniti ručnu silu na klip. Druga nekontrolirana varijabla je brzina punjenja sokovnika voćem. Brzina punjenja je parametar koji ovisi o korisniku koji se služi sokovnikom.

Tablica 5.1. Vrijednosti korištenog voća

	Mango	Kruška	Jabuka	Grejp	Jabuka s peteljkom
Brzina	II	I	I	II	II
Ukupna masa [g]	200	210	280	350	160
Gustoća [$\frac{kg}{m^3}$]	700	592	650	912	750
Ukupni volumen [dm ³]	285.7	354.7	430.8	383.8	213.3
Količina	1	3	4	2	2
Volumen tekućine [mL]	80	196,25	251,2	314	137
Maksimalna snaga [W]	597	516,86	433	734,25	729
Prosječna snaga [W]	311,4	306,2	323,3	407,67	159,7

U tablici 5.1. prikazana je usporedba očitanih podataka sa senzora tijekom cijedenja pet različitih vrsta voća. Najveću maksimalnu snagu postigli su grejp i jabuka s peteljkom s približno 730 W što je očekivano jer imaju najveću gustoću te je, iz tog razloga, potrebno više

električne energije za njihovo cijedenje. Najveću prosječnu snagu u vrijednosti od 407,67 W postigao je grejp. Iz usporedbe početnog volumena voća te konačnog volumena iscijeđenog soka zaključuje se kako je najviše volumena iskorišteno, odnosno najviše soka dobiveno od grejpa, a najmanje od manga.

Zbog limitacija senzora, ne mjeri se stvarna snaga uređaja, već njegova prividna snaga. Za dobivanje vrijednosti prividne snage korištene su efektivne vrijednosti napona i jakosti struje. Efektivnu vrijednost jakosti struje očitava senzor, dok je za vrijednost napona pretpostavljena efektivna vrijednost napona gradske mreže. Prividna snaga izmjenične struje računa se prema sljedećem izrazu:

$$P_z = U * I \quad (2)$$

gdje je:

P_z – Prividna snaga izmjenične struje

$U = 220 \text{ V} = \text{konst.}$ – Efektivna vrijednost napona gradske mreže

I – Efektivna vrijednost jakosti električne struje (vrijednost očitana sa senzora)

Kako je vrijednost napona konstantna, električna snaga ovisi samo o očitanim vrijednostima električne struje sa senzora te su iz tog razloga krivulje u grafovima snage i jakosti električne struje jednake.

Za vrijednost maksimalne električne snage očitana je najveća vrijednost iz grafa, dok je za vrijednost prosječne električne snage korišten sljedeći SQL upit:

```
SELECT AVG(snaga) AS ProsjecnaSnaga FROM zavrzni_projekt
```

Volumen dobivene tekućine je varijabla koja ovisi o očitanim vrijednostima udaljenosti sa senzora, a računa se prema sljedećem izrazu:

$$V = r^2 * \pi * (h - x) \quad (3)$$

gdje je:

V – Volumen dobivene tekućine uslijed cijedenja voća

r – Polumjer posude

h – Udaljenost od dna posude do senzora

x – Udaljenost od površine tekućine do senzora

Vrijeme je neovisna, kontrolirana varijabla jer se podaci sa senzora očitavaju u jednakim vremenskim razmacima.

Slika 5.1. prikazuje grafove očitanih vrijednosti senzora za cijedenje manga s korom. S početnom pretpostavkom veće snage potrebne za cijedenje manga te poznatom većom gustoćom, sokovnik je pokrenut u drugoj brzini. Već na samom početku, sokovnik koristi približno 600 W električne snage, odnosno približno 2,5 A električne struje. Oštrice postepeno usitnjuju komade voća unutar sokovnika dok ne usitne sve. Tada više nema opterećenja nad oštricama, već jedino preostaje opterećenje usitnjenih komadića voća na rubove centrifugalne posude. Time se smanjuje okretni moment, a posljedično i snaga elektromotora koji pogoni vratilo s kojim su povezane oštrice i posuda. Iz tog razloga kroz sljedeća četiri očitana mjerenja slijedi pad snage i jakosti električne struje. Sljedeći rast utrošene snage električne struje slijedi nakon ubacivanja preostalih komada manga u sokovnik. Tada ponovno dolazi do povećanja vrijednosti okretnog momenta, čime i utrošene snage elektromotora. Nakon toga ponovno dolazi do pada navedenih vrijednosti iz istih razloga spomenutih ranije. Zadnjih pet mjerenja vrijednost snage i jakosti električne struje je jednaka nuli jer su svi komadi voća ocijedeni te je sokovnik isključen. Na grafu „Udaljenost“ prikazanom na slici 5.1. očito je kako do prve promjene vrijednosti dolazi kasnije nego na grafovima snage i jakosti električne struje. Prvi razlog tome je što snaga i jakost električne struje porastu s nule odmah u trenutku uključivanja uređaja. Drugi razlog je što sok nastaje tek kada oštrice počnu usitnjavati komade voća, a vrtnja

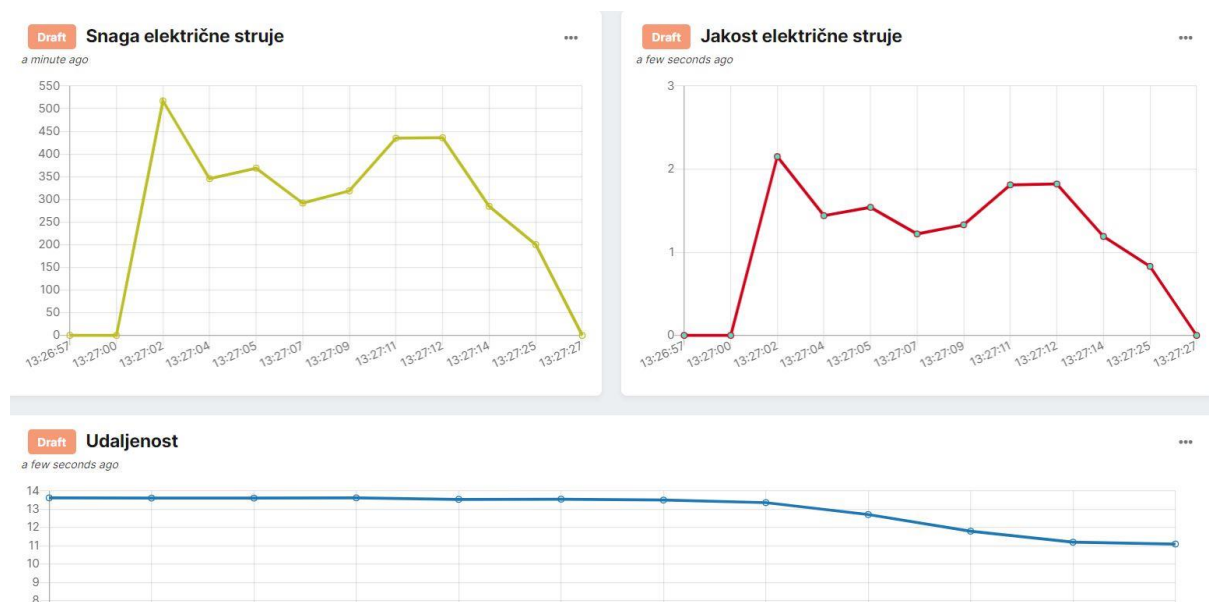
centrifugalne posude ocijedi usitnjene komadiće. Nakon toga, soku je i potrebni određeno vrijeme dok ne krene protjecati u posudu namijenjenu za pohranu soka. U usporedbi s ostalim voćem, vrijednost volumena proizvedenog soka je mala.



Slika 5.1. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za mango

Slika 5.2. prikazuje grafove očitanih vrijednosti senzora za cijedenje kruški. S početnom pretpostavkom manje snage potrebne za cijedenje kruški te poznatom manjom gustoćom, sokovnik je pokrenut u prvoj brzini. Već na samom početku, sokovnik koristi približno 520 W električne snage, odnosno približno 2,1 A električne struje. Kao i kod mangu, dolazi do smanjenja okretnog momenta te utrošene snage elektromotora. Sljedeća mjerenja variraju između 300 i 400 W, dok se nakon ponovnog ubacivanja komada kruški, uslijed povećanja okretnog momenta, vrijednost snage električne struje ponovno penje na 450 W. Zadnje mjerenje vrijednosti snage i jakosti električne struje je jednako nuli jer su svi komadi voća ocijedeni te je sokovnik isključen. Na grafu „Udaljenost“ prikazanom na slici 5.2. također do prve promjene vrijednosti dolazi kasnije nego na grafovima snage i jakosti električne struje iz istih razloga navedenih u slučaju mangu. Ovaj put je razlika između početne i konačne

vrijednosti značajno veća što dovodi do zaključka kako se cijedenjem kruške dobije veći volumen soka nego cijedenjem manga.



Slika 5.2. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za krušku

Slika 5.3. prikazuje grafove očitanih vrijednosti senzora za cijedenja jabuka. S početnom pretpostavkom manje snage potrebne za cijedenje jabuka te poznatom manjom gustoćom, sokovnik je pokrenut u prvoj brzini. U početku sokovnik koristi približno 430 W električne snage, odnosno približno 1,8 A električne struje. Kao i kod prethodnih voća, dolazi do smanjenja okretnog momenta te utrošene snage elektromotora. Jabuka se izrazito brzo usitnjavala te su se stoga komadići jabuke kontinuirano ubacivali u sokovnik. Iz tog razloga vrijednosti snage i struje ponovno rastu te se održavaju oko 300 W i 1,35 A. Zadnjih osam mjerjenja vrijednost snage i jakosti električne struje je jednaka nuli jer su svi komadi voća ocijedeni te je sokovnik isključen. U usporedbi s prethodna dva grafa udaljenosti, vidljivo je kako se udaljenost počinje smanjivati ranije što ukazuje na veći protok soka od jabuke, odnosno i na veći volumen cijedenog soka.



Slika 5.3. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za jabuku

Slika 5.4. prikazuje grafove očitanih vrijednosti senzora za cijedenja grejpa. S početnom pretpostavkom veće snage potrebne za cijedenje grejpa te poznatom većom gustoćom, sokovnik je pokrenut u drugoj brzini. U početku sokovnik ubačen grejp bez kore te sokovnik koristi približno 550 W električne snage, odnosno približno 2,1 A električne struje. Kao i kod prethodnih voća, dolazi do smanjenja okretnog momenta te utrošene snage elektromotora. Ponovnim punjenjem sokovnika grejpom, koji ovaj put ima koru, dolazi do novog vrhunca od 735 W i približno 3 A. Tada ponovno dolazi do povećanja vrijednosti okretnog momenta, čime i utrošene snage elektromotora. Nakon još jednog pada vrijednosti i ponovnog ubacivanja grejpa bez kore u sokovnik, dolazi do postepenog pada promatranih vrijednosti snage i jakosti električne struje. Graf ne završava nulom jer je produžni kabel, na koji je spojen sokovnik i mikrokontroler, ugašen odmah nakon isključivanja sokovnika. Kao i u slučaju jabuke, u usporedbi s prva dva grafa udaljenosti, vidljivo je kako se ona počinje smanjivati ranije što ukazuje na veći protok soka od grejpa, odnosno i na veći volumen cijedenog soka.



Slika 5.4. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za grejp

Slika 5.5. prikazuje grafove očitanih vrijednosti senzora za cijedenje jabuka s peteljka. Kako peteljke nisu bile odvojene, sokovnik je pokrenut u drugoj brzini. Već na samom početku, sokovnik koristi približno 730 W električne snage, odnosno približno 3 A električne struje. Kao i kod prethodnih voća, dolazi do smanjenja okretnog momenta te utrošene snage elektromotora. Sljedeća mjerenja variraju između 200 i 300 W. Uređaj i produžni kabel se tada isključuju na par minuta zbog čišćenja centrifugalne posude. Prilikom ponovnog ubacivanja jabuka s peteljka vrijednost se ponovno penje na približno 700 W. Nakon toga, ponovno dolazi do smanjenja okretnog momenta te utrošene snage elektromotora. Graf također ne završava u nuli jer je produžni kabel, na koji su spojeni sokovnik i mikrokontroler, ugašen odmah nakon isključivanja sokovnika. Potrebno je napomenuti kako je za ovo cijedenje, u svrhu pohrane soka, korištena čaša. Iz tog razloga je početna vrijednost udaljenosti 10 cm, a ne 14 cm kao tijekom ostalih mjerenja. Iz grafa udaljenosti je vidljivo kako jabuke s peteljka daju manje soka od jabuka bez koštica i peteljki. Zbog manje količine sočnih dijelova jabuke, dolazi do manjeg protoka te konačno i do manjeg volumena cijedenog soka.



Slika 5.5. Vizualizacija očitanih vrijednosti senzora za jabuke s petljkom

6. DISKUSIJA

6.1. Izazovi

Kao predmet realizacije implementacije tehnologije digitalnog blizanca odabran je kućanski uređaj sokovnik. Motivaciju za implementaciju pružili su analizirani radovi iz trećeg poglavlja. Implementacijom digitalnog blizanca na ostale kućanske uređaje stvara se podloga za nadogradnju kuće u pametnu kuću. Time se omogućuje praćenje i smanjenje potrošnje električne energije u svrhu smanjenja ekološkog otiska. Više je razloga zašto je sokovnik bio prikladan odabir za realizaciju implementacije tehnologije digitalnog blizanca. Integraciju senzora na uređaj bilo je moguće provesti bez potrebe za konstrukcijskim promjenama uređaja. Sokovnik se unutar kućanstva koristi prilično često čime se prikuplja veća količina podataka te je stoga pogodan za provođenje analize podataka. Konačno, kako uređaj koristi električnu energiju za obavljanje rada, analizom podataka moguće je utvrditi optimalnu potrošnju električne energije što je i cilj ove implementacije digitalnog blizanca.

Najveći softverski izazov bio je osmisliti funkcionalnu arhitekturu digitalnog blizanca. Prvi i drugi izbor baze podataka bile su „*Firebase*“ i „*Firestore*“ baze podataka, no one nisu odgovarale ciljevima ovog rada. Unutar *Firebase*-a podaci su se konstantno ažurirali u stvarnom vremenu, no nisu bili pohranjivani kako bi poslužili za daljnju analizu. „*Firestore*“ je pohranjivao historijske podatke, no nije bio podržan za povezivanje od strane aplikacije za vizualizaciju podataka. Nakon istraživanja i razmatranja svih mogućnosti u vezi promjene komponenti, odabrana je *MySQL* baza podataka koja je zadovoljila prethodno navedene kriterije. Manje izazove su predstavljale aktivnosti poput programiranja *NodeMCU* mikrokontrolera i integracije kodova oba senzora zajedno, pronalazak besplatnog poslužitelja za pohranu podataka te izrada više korisničkih računa zbog kratkog vremenskog perioda trajanja besplatnog probnog razdoblja *Google Cloud* servera te *Chartbrewa*. Uz potonje dolazi i ažuriranje IP adresa i ostalih podataka bitnih za povezivanje s navedenim softverima u slučaju povezivanja na server s nove lokacije.

Najvažniji korak dalje je omogućavanje interakcije između kućanskog uređaja sokovnika i korisnika ili ostalih kućanskih uređaja. Posljedično, moći će se omogućiti automatizirani tok podataka od digitalnog pandana prema fizičkom proizvodu sokovnika. Spomenuta interakcija korisnicima omogućuje djelomičnu kontrolu nad sokovnikom. Djelomična je iz razloga što proces cijedenja soka ne može biti u potpunosti automatiziran, odnosno potreban je korisnik kako bi ubacivao voće. No, korisniku se mogu pružiti mogućnosti poput isključivanja uređaja kada količina iscijeđenog soka dosegne određenu visinu posude definiranu od strane korisnika, računanja mjesečne potrošnje električne energije i određivanja približne cijene te isključivanje uređaja u slučaju prelaska unaprijed određene maksimalne vrijednosti električne energije. Nadalje, potrebno je osigurati okruženje sigurno od hakerskih napada i virusa koji se posljedično mogu proširiti na ostale uređaje povezane na zajedničku mrežu. Arhitektura prikazana u ovom radu može se implementirati na ostale kućanske uređaje uz moguće i korištenje drugačijih senzora.

6.2. Dodane vrijednosti

Ovakav način implementacije tehnologije digitalnog blizanca, prikazan na primjeru sokovnika, sa sobom nosi brojne dodane vrijednosti. Od spomenutih dodanih vrijednosti najviše profitiraju proizvođači, korisnici, tvrtke te njihovi zaposlenici. Od same faze konstruiranja korisnici mogu prema vlastitom ukusu personalizirati željeni proizvod što čine kupce zadovoljnima [21]. Pružanjem usluga poput prediktivnog održavanja proizvoda te mogućnosti nadogradnje i personalizacije proizvoda koje omogućuje digitalni bliznac, proizvođačima se proširuju tokovi prihoda [21]. Pružanjem usluga tijekom cjelokupnog radnog vijeka proizvoda, proizvođači posvećuju više pažnje kvaliteti proizvoda i usluga koje pružaju čime raste zadovoljstvo korisnika. Implementacija tehnologije digitalnog blizanca na već postojeći uređaj ili kupnja novog uređaja s već implementiranim digitalnim blizancem korisnicima omogućuje korištenje navedenog uređaja s optimalnim performansama. Time se omogućuje i optimalna potrošnja električne energije što korisnicima smanjuje troškove režija. Korištenjem digitalnih blizanaca tvrtke ostaju kompetitivne na tržištu, a njihovi zaposlenici mogu preuzeti nove radne uloge nadzornika dok digitalni blizanci obavljaju opasne ili monotone poslove [21].

Izrada funkcijske dekompozicije digitalnog blizanca sokovnika pomogla je identificirati potrebe korisnika te pružila uvid u funkcije proizvoda te tokove između njih. Time je omogućen i jasniji uvid u implementaciju tehnologije digitalnog blizanca na sokovnik. Također, kako se jasnije mogu uvidjeti funkcije uređaja te pripadajući tokovi, jednostavnije je i pronaći priliku za mjerenje, praćenje ili čak kontrolu i drugih vrijednosti uz potrošnju električne energije te razinu iscijeđenog soka. Kako je korišten senzor na posudi za sok, moguće je osmisliti način implementacije senzora za očitavanje količine iscijeđenih komadića voća. Time bi se mogao pružiti uvid u učinkovitost cijedenja sokovnika. Daljnjom analizom navedenih podataka pruža se mogućnost za povećanje učinkovitosti te optimizaciju performansi sokovnika.

6.3. Buduća istraživanja

Prema interpretaciji Kritzingera i sur. [7] iz drugog poglavlja, u ovome radu se na sokovnik implementirala druga razina digitalnog blizanca, odnosno digitalna sjena. Nakon omogućavanja automatiziranog toka i od digitalnog proizvoda prema fizičkom, čime se omogućuje interakcija između njih, otvara se prostor za buduća istraživanja. Buduća istraživanja uključuju integraciju tehnologije digitalnog blizanca s drugim tehnologijama [21]. Tako integracija Velikih skupova podataka (eng. *Big Data*) omogućuje kvalitetniji uvid u prikupljene podatke te kvalitetniju analizu istih u svrhu bržeg donošenja odluka vezanih uz promatrani proizvod. Integracija s virtualnom stvarnošću pruža mogućnost korištenja digitalnog blizanca u edukaciji jer omogućuje relativno jeftino rješenje vizualizacije različitih pojmova i koncepata korištenih u edukaciji. Korištenje tehnologija računalnih oblaka (eng. *Cloud Computing*) omogućava brže procesuiranje podataka te veće i jednostavnije mogućnosti pohranjivanja podataka.

7. ZAKLJUČAK

Korištenje digitalnog blizanca tijekom cjelokupnog životnog vijeka proizvoda popraćeno je mnogim prijetnjama, ali i mnogim prilikama. Transformacija regularnih kućanskih uređaja u pametne, međusobno povezivanje istih te konačno stvaranje pametnog doma korisnicima donosi mnogo koristi. Omogućuje se jednostavno praćenje potrošnje energije te automatizirano uključivanje i isključivanje uređaja čime se reducira potrošena energija, smanjuju troškovi korisnika te najvažnije čuva okoliš. Opasnost spomenutih prijetnji može se minimizirati uz mjere sigurnosti protiv napada hakera i virusa te mogućnost ručnog isključivanja uređaja u slučaju nepredviđenog i nekontroliranog ponašanja.

Izrada arhitekture potrebne za implementaciju tehnologije digitalnog blizanca zahtijevala je mnogo truda i vremena. Analiza podataka pokazala je kako je izrađena kvalitetna arhitektura sposobna prikupljati točne i smislene podatke u stvarnom vremenu uz pravilno ugrađene i programirane senzore te mikrokontroler s pristupom Internetu. Mogućnost slanja SQL upita unutar PhpMyAdmin okruženja i vizualizacija podataka pružena od strane Chartbrew softvera za vizualizaciju olakšali su korištenje podataka u svrhu analize istih.

Iz uspješno implementirane tehnologije digitalnog blizanca zaključuje se kako primjena ove tehnologije može biti veoma zahvalna. Čak i u ovim ranim fazama tehnologije digitalnog blizanca, ovaj rad je prikazao kako digitalni bliznac donosi mnogo koristi poput mjerenja potrošnje električne energije te prikupljanja podataka direktno vezanih uz performanse uređaja. Analiza prikupljenih podataka stvara temelje za povećanje učinkovitosti proizvoda, optimizaciju njegovih performansi te pruža mogućnost prediktivnog održavanja. Uspješna realizacija navedenih aktivnosti povećava zadovoljstvo korisnika proizvodom, produljuje životni vijek proizvoda, smanjuje potrošnju električne energije te smanjuje ekološki otisak.

LITERATURA

- [1] R. Geissbauer, J. Vedso, and S. Schrauf, "Industry 4.0: Building the digital enterprise," 2016.
- [2] A. Diez-Olivan, J. Del Ser, D. Galar, and B. Sierra, "Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0," *Inf. Fusion*, vol. 50, no. October 2018, pp. 92–111, 2019, doi: 10.1016/j.inffus.2018.10.005.
- [3] E. H. Glaessgen and D. S. Stargel, "The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles," *Collect. Tech. Pap. - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf.*, pp. 1–14, 2012, doi: 10.2514/6.2012-1818.
- [4] A. Parrott and L. Warshaw, "Industry 4.0 and the digital twin," *Deloitte Univ. Press*, pp. 1–17, 2017, [Online]. Available: <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>.
- [5] M. Grieves, "Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication - A Whitepaper by Dr . Michael Grieves," *White Pap.*, no. March, pp. 1–7, 2014.
- [6] R. Bohm, *Industrial internet of things*. 2018.
- [7] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- [8] Y. Natis, S. Jacobson, M. Reynolds, and A. Velosa, "Innovation Insight for Digital Twins — Driving Better IoT-Fueled Decisions," 2017.
- [9] "Data." <https://en.wikipedia.org/wiki/Data>.

- [10] B. R. Barricelli, E. Casiraghi, and D. Fogli, "A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications," *IEEE Access*, vol. 7, no. M1, pp. 167653–167671, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.
- [11] A. Rasheed, O. San, and T. Kvamsdal, "Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980–22012, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
- [12] D. Hempel, "Healthcare solution testing for future | Digital Twins in healthcare," 2017. <https://www.dr-hempel-network.com/digital-health-technology/digital-twins-in-healthcare/>.
- [13] C. Wildfire, "How can we spearhead city-scale digital twins?," 2021. <https://www.mottmac.com/views/how-can-we-spearhead-city-scale-digital-twins>.
- [14] "Smart Device." <https://www.techopedia.com/definition/31463/smart-device>.
- [15] S. Aheleroff *et al.*, "IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 43, no. December 2019, p. 101043, 2020, doi: 10.1016/j.aei.2020.101043.
- [16] H. U. Sakib, J. Anowar, W. Hasan, and M. Ashraful Amin, "Mobile based electronic home appliance remote control and power consumption monitoring using internet of things," *ITEC Asia-Pacific 2019 - 2019 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo, Asia-Pacific New Paradig. Shift, Sustain. E-Mobility*, vol. 12, 2019, doi: 10.1109/ITEC-AP.2019.8903911.
- [17] "What Is A Sensor and What Does it Do?," 2020. <https://dewesoft.com/daq/what-is-a-sensor>.
- [18] "ACS712 Current Sensor: Features, How it works, Arduino Guide," 2020. <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/02/15/acs712-current-sensor-features-how-it>

works-arduino-guide/.

- [19] “How HC-SR04 Ultrasonic Sensor Works & Interface It With Arduino.”
<https://lastminuteengineers.com/arduino-sr04-ultrasonic-sensor-tutorial/>.
- [20] “NodeMCU ESP8266 Detailed Review.” <https://www.make-it.ca/nodemcu-arduino/nodemcu-details-specifications/>.
- [21] K. Y. H. Lim, P. Zheng, and C. H. Chen, “A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives,” *J. Intell. Manuf.*, vol. 31, no. 6, pp. 1313–1337, 2020, doi: 10.1007/s10845-019-01512-w.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Arduino programski kod
- III. Php programski kod

Prilog II. Arduino programski kod

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <FilterDerivative.h>
#include <FilterOnePole.h>
#include <Filters.h>
#include <FilterTwoPole.h>
#include <FloatDefine.h>
#include <RunningStatistics.h>
#define ACS_Pin A0
#define WIFI_SSID "WIFI8266"
#define WIFI_PASSWORD "password8266"
#define host "192.168.123.129"
int trigPin = D5;
int echoPin = D6;
float vrijednost_ACS;
float frekvencija = 50;
float trajanje_signala = 40.0 / frekvencija;
float kalibracija_1 = 0;
float kalibracija_2 = 0.04615385;
float jakost_struje;
float snaga;
unsigned long printPeriod = 1000;
unsigned long previousMillis = 0;
```

```
RunningStatistics inputStats;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);

  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  pinMode(ACS_Pin, INPUT);

  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(WIFI_SSID);
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected");
  Serial.println("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

void loop()
```



```
float d, udaljenost;
digitalWrite(trigPin, LOW);
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(trigPin, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trigPin, LOW);
d = pulseIn(echoPin, HIGH);
udaljenost = ((d / 2) / 29.1) + 1.2;
if (isnan(udaljenost)) {
  Serial.print(F("Failed to read from sensor"));
  return;
}
Serial.print(udaljenost);
Serial.println(" cm");
inputStats.setWindowSecs( trajanje_signala );
for ( int n = 0; n < 5000; n++ ) {
  vrijednost_ACS = analogRead(ACS_Pin);
  inputStats.input(vrijednost_ACS);
  if ((unsigned long)(millis() - previousMillis) >= printPeriod) {
    previousMillis = millis();
    Serial.println( previousMillis );
    Serial.println( millis() );
    jakost_struje = float( kalibracija_1 + kalibracija_2 * inputStats.sigma());
```

```
snaga = float( ((jakost_struje - kalibracija_1) * 220));  
Serial.println( jakost_struje );  
Serial.println( snaga );  
if (jakost_struje < 0.25) {  
jakost_struje = 0;  
snaga = 0;  
}  
if ((jakost_struje - kalibracija_1) > 0.25) {  
Serial.print( "snaga: " );  
Serial.print( snaga );  
Serial.print( " W" );  
Serial.print( " Amps: " );  
Serial.println( jakost_struje - kalibracija_1 );  
Serial.println( " A" );  
delay(0);  
} else {  
Serial.print( "snaga: " );  
Serial.print( 0.00 );  
Serial.print( " W" );  
Serial.print( " Amps: " );  
Serial.print( 0.00 );  
Serial.println( " A" );  
delay(0);
```

```
}  
}  
}  
Serial.print("connecting to ");  
Serial.println(host);  
WiFiClient client;  
const int httpPort = 80;  
if (!client.connect(host, httpPort)) {  
Serial.println("connection failed");  
return;  
}  
client.print(String("GET http://192.168.123.129/zavrsni_projekt/connect.php?") +  
("&jakost_struje=") + jakost_struje +  
("&snaga=") + snaga +  
("&udaljenost=") + udaljenost +  
" HTTP/1.1\r\n" +  
"Host: " + host + "\r\n" +  
"Connection: close\r\n\r\n");  
while (client.available()) {  
String line = client.readStringUntil('\r');  
Serial.print(line); }  
Serial.println();  
Serial.println("closing connection"); }
```

Prilog III. Php programski kod

```
<html>
<body>
<?php
$dbname = 'zavrсни_projekt';
$dbuser = 'root';
$dbpass = "";
$dbhost = '35.239.157.232';
$connect = @mysqli_connect($dbhost,$dbuser,$dbpass,$dbname);
if(!$connect){
    echo "Error: " . mysqli_connect_error();
    exit(); }
echo "Connection Success!<br><br>";
$jakost_struje = $_GET["jakost_struje"];
$snaga = $_GET["snaga"];
$udaljenost = $_GET["udaljenost"];
$query = "INSERT INTO zavrсни_projekt (jakost_struje, snaga, udaljenost) VALUES ('$jako
st_struje', '$snaga', '$udaljenost')";
$result = mysqli_query($connect,$query);
echo "Insertion Success!<br>";
?>
</body>
</html>
```