

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Boris Jovanović

**PREDLOG IOT SISTEMA ZA SPRIJEČAVANJE
KRATKIH SPOJEVA NA BAGERU EKG – 15**

MASTER RAD

Podgorica, 2025.

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Boris Jovanović

**PREDLOG IOT SISTEMA ZA SPRIJEČAVANJE
KRATKIH SPOJEVA NA BAGERU EKG – 15**

MASTER RAD

Podgorica, 2025.

PODACI O STUDENTU

Ime i prezime: Boris Jovanović

Datum i mjesto rođenja: 15.01.1998. godine, Pljevlja, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:
Energetika i automatika, 2020.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija: Automatika i industrijska elektrotehnika

Naslov rada: Predlog IoT sistema za sprječavanje kratkih spojeva na bageru EKG-15

Fakultet/Akademija na kojoj je rad objavljen: Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 05.10.2022.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema i mentor: 23.11.2022.

Komisija za ocjenu/odbranu rada:

1. Prof. dr Milutin Radonjić, ETF Podgorica, predsjednik
2. Prof. dr Božo Krstajić, ETF Podgorica, mentor
3. Prof. dr Žarko Zečević, ETF Podgorica, član

Lektor: autolektura

Datum odbrane:

Datum promocije:

Izjava o autorstvu

Potpisani-~~a~~: **Boris Jovanović**

Broj indeksa/upisa: **5/20**

Izjavljujem

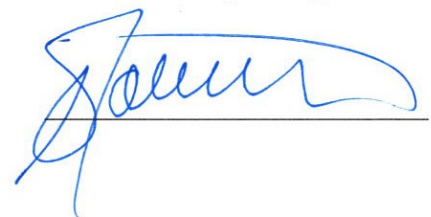
da je master rad pod nazivom

"Predlog IoT sistema za spriječavanje kratkih spojeva na bageru EKG-15"

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predloženi master rad ni u cjelini ni u djelovima nije bio predložen za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedio/la autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

U Podgorici, 25.06.2025. godine

Potpis magistranda



PREDGOVOR

U ovom master radu predloženo je *IoT* rješenje za spriječavanje kratkih spojeva u pogonskim DC motorima bagera EKG-15. Problem kratkih spojeva je identifikovan od strane inženjera sektora održavanja Rudnika uglja Pljevlja. Oni su uočili da tokom eksploatacije često dolazi do zaglavljivanja korpe bagera u stijenske mase površinskog kopa, što dovodi do zakočenja rotora na DC motorima pogona dizanja, tj. dolazi do pojave tzv. režima kratkog spoja. Proizvođač je predvidio vremenski interval u kojem motor može raditi u režimu kratkog spoja bez štetnih posledica. Međutim, uočeno je da u praksi često dolazi do prekoračenja maksimalno dozvoljenog vremena, čime se skraćuje radni vijek motora. Do oštećenja usled dugotrajnog preopterećenja najčešće dolazi na četkicama i komutatoru DC motora, što za posledicu ima česte ispade bagera iz pogona. Ovakvi kvarovi uzrokuju ne samo zastoje od nekoliko nedelja ili mjeseci, već i značajne troškove za nabavku i zamjenu oštećenih komponenata. Na osnovu navedenog, jasno proizilazi da problem kratkih spojeva ima veliki uticaj na smanjenje efikasnosti bagera, a samim tim i cjelokupnog procesa eksploatacije uglja.

Cilj istraživanja koja su prezentovana u ovom radu bio je analiza postojećeg rješenja i razvoj sistema za spriječavanje oštećenja DC motora nastalih usled dugotrajnih preopterećenja izazvanih kratkim spojevima. Primjena sistema treba da obezbijedi veću efikasnost procesa eksploatacije i redukovanje troškova održavanja bagera.

Predloženi sistem zasniva se na primjeni koncepta interneta stvari (*IoT*) i prediktivnog održavanja. Poseban fokus stavljen je na industrijsku primjenu *IoT*-a – *Industrial Internet of Things (IIoT)*. *IIoT* omogućava integraciju senzora, uređaja i softverskih rješenja u jedinstvenu mrežu koja omogućava kontinuirano praćenje i analizu ključnih parametara nekog procesa u realnom vremenu. U kontekstu ovog rada, koncept *IIoT*-a je iskorišćen za praćenje vrijednosti struje u motorima pogona dizanja, automatsko prepoznavanje režima kratkog spoja i brzo reagovanje u cilju zaštite motora od oštećenja. Kombinovanjem tehnologija *IIoT*-a i prediktivnog održavanja, razvijen je sistem koji doprinosi prelasku sa reaktivnog i preventivnog na prediktivno održavanje, čime se omogućava donošenje odluka na osnovu prikupljenih podataka i predikcija, a ne samo iskustva i periodičnih pregleda.

Izvod rada

Problematika kratkih spojeva u pogonskim DC motorima bagera EKG-15 predstavlja značajan izazov u procesu eksploatacije uglja u Rudniku uglja Pljevlja. Usled čestog zakočenja rotora pri zaglavljivanju korpe u stijenske mase motori ulaze u tzv. režim kratkog spoja. Zbog nepostojanja adekvatnog sistema zaštite trajanje ovog režima često prelazi maksimalno dozvoljeno vrijeme, dovodeći do oštećenja motora kao posledice dugotrajnog preopterećenja. Oštećenja se najčešće javljaju na četkicama i komutatoru motora. Ovi kvarovi uzrokuju česte zastoje i povećavaju troškove održavanja, čime se umanjuje efikasnost rada bagera i rudarskog procesa u cjelini. Istraživanja u okviru ovog rada sprovedena su na bageru EKG-15 koji je angažovan u površinskom kopu Rudnika uglja Pljevlja.

U cilju prevazilaženja ovog problema, u radu je predloženo tehničko rješenje zasnovano na principima industrijskog interneta stvari (*IIoT*) i prediktivnog održavanja. Predloženi sistem omogućava kontinuirano mjerenje struje armature pomoću šant otpornika, mikrokontrolersku obradu signala i automatsku zaštitu motora isključenjem pogona kada se detektuje prekoračenje dozvoljenog trajanja kratkog spoja.

Rezultati laboratorijskog testiranja prototipa pokazuju da sistem efikasno detektuje režim kratkog spoja, signalizira pojavu kratkog spoja rukovaocu i automatski zaustavlja motore ukoliko je kritično trajanje kratkog spoja prekoračeno. Pored toga, sistem omogućava skladištenje podataka o kratkim spojevima na SD kartici i *cloud* platformi radi kasnije analize. Prikupljeni podaci iskorišćeni su za implementaciju koncepta prediktivnog održavanja, koji omogućava efikasniju procjenu stanja četkica i pravovremeno planiranje njihove zamjene.

Doprinos ovog istraživanja ogleda se u razvoju niskobudžetnog, modularnog i lako integrabilnog sistema koji produžava radni vijek DC motora, povećava pouzdanost rada bagera, smanjuje operativne troškove i unaprijeđuje cjelokupan proces eksploatacije. Sistem je skalabilan i može se primijeniti i na druge modele bagera poput EKG-12.5, čime predstavlja osnovu za dalja istraživanja i širu industrijsku primjenu.

Ključne riječi: industrijski *IoT*, prediktivno održavanje, kratak spoj, DC motor, bager EKG-15.

Abstract

The problem of short circuits in the DC motors of the EKG-15 excavator represents a significant challenge in the coal extraction process at the Pljevlja Coal Mine. Due to frequent rotor locking when the bucket becomes stuck in rocky masses, the motors enter the so-called short-circuit regime. In the absence of an adequate protection system, the duration of this regime often exceeds the maximum allowed time, leading to motor damage as a result of prolonged overload. The most common damages occur on the brushes and the commutator. These failures cause frequent downtimes and increased maintenance costs, thereby reducing the efficiency of both the excavator and the overall mining process. The research presented in this thesis was conducted on an EKG-15 excavator operating in the open-pit mine of the Pljevlja Coal Mine.

To solve this problem, a technical solution based on the principles of Industrial Internet of Things (IIoT) and predictive maintenance has been proposed. The developed system enables continuous monitoring of armature current using a shunt resistor, microcontroller-based signal processing, and automatic motor protection by disabling the drive when the allowed short-circuit duration is exceeded.

Laboratory testing of the prototype shows that the system effectively detects the short-circuit regime, signals its occurrence to the operator, and automatically stops the motors if the critical duration is exceeded. In addition, the system enables storage of short-circuit data on an SD card and cloud platform for further analysis. The collected data has been used for the implementation of predictive maintenance concept, allowing a more efficient assessment of brush wear and timely planning of their replacement.

The contribution of this research lies in the development of a low-cost, modular, and easily integrable system that extends DC motor lifespan, increases equipment reliability, reduces operational costs, and improves the overall excavation process. The system is scalable and can be adapted to other excavator models, such as the EKG-12.5, therefore providing a basis for further research and wider industrial application.

Keywords: Industrial IoT, predictive maintenance, short circuit, DC motor, EKG-15 excavator.

*Sa zahvalnošću i poštovanjem posvećujem
porodici i rodnim Pljevljima.*

Srdačnu zahvalnost dugujem mentoru, prof. dr Božu Krstajiću, za nesebičnu pomoć, stručne savjete i podršku tokom izrade ovog master rada.

Zahvalnost izražavam i inženjerima Sektora oržavanja u Rudniku uglja Pljevlja – Bogoljubu Đondoviću, Dragiši Preradoviću, Miloju Bajiću i Draganu Vranešu – na dragocjenim sugestijama, kao i na ustupljenom materijalu koji je dao izuzetan doprinos kvalitetu ovog istraživanja.

Sadržaj

1. UVOD	12
1.1. Industrijski IoT i Industrija 4.0	13
1.2. Prediktivno održavanje	16
2. BAGER EKG-15	21
2.1. Glavni pogoni bagera	22
2.2. Ormari za upravljanje i zaštitu	24
2.3. Upravljačka kabina	26
3. ANALIZA KRATKOG SPOJA KOD DC MOTORA BAGERA EKG-15	30
3.1. Režim kratkog spoja DC motora	30
3.2. DC motori pogona dizanja	32
3.3. Kratki spojevi u DC motorima pogona dizanja	33
4. IOT SISTEM ZA DETEKCIJU KRATKOG SPOJA	35
4.1. Princip rada sistema	35
4.2. Arhitektura sistema	36
4.3. Nedostaci sistema	37
5. PREDLOG IOT SISTEMA ZA SPRIJEČAVANJE KRATKIH SPOJEVA	40
5.1. Način rada i arhitektura sistema	40
5.2. Podsystem za upravljanje (mikrokontroler)	42
5.3. Podsystem za mjerenje struje armature motora	43
5.3.1. Analiza signala sa šant otpornika	43
5.3.2. Obrada signala sa šanta i dovođenje na ulaz mikrokontrolera	45
5.4. Podsystem za signalizaciju kratkog spoja	47

5.5. Podsystem za automatsku zaštitu motora	48
5.5.1. Sistem upravljanja pogonom dizanja	48
5.5.2. Hardverski dio podsystema za automatsku zaštitu motora	51
5.5.3. Softverski dio podsystema za automatsku zaštitu motora	52
5.6. Podsystem za komunikaciju i skladištenje podataka	55
5.6.1. Hardverski dio podsystema za komunikaciju i skladištenje podataka	55
5.6.2. Softverski dio podsystema za komunikaciju i skladištenje podataka	57
5.7. Implementacija koncepta prediktivnog održavanja	59
6. PROTOTIP SISTEMA	62
6.1. Hardverska struktura i organizacija prototipa	62
6.2. Testiranje prototipa	64
6.3. Prikaz podataka o kratkim spojevima	69
6.3.1. Prikaz podataka na <i>cloud</i> platformi ThingSpeak	69
6.3.2. Prikaz podataka skladištenih na memorijskoj kartici	70
7. ZAKLJUČAK	72
LITERATURA	74

1. UVOD

Termin *Internet of Things* (engl. internet stvari), skraćeno *IoT*, prvi put se pominje 1999. godine. Njegov tvorac je Kevin Ešton, jedan od osnivača katedre za radiofrekventnu identifikaciju (*RFID*) na Masačusetskom tehnološkom institutu (*MIT*). Jedna od definicija ovog pojma *IoT* uređaj definiše kao bilo koji fizički uređaj ili živo biće koji je povezan na Internet, i koji bez direktnog uticaja čovjeka šalje i prima podatke u svrhu obavljanja neke funkcije. U literaturi se pojam *IoT*-a definiše i kao mreža međusobno povezanih fizičkih objekata, sa jedinstvenim identifikacionim adresama, koja pruža određene inteligentne usluge. Neki autori ga definišu i kao globalnu mrežu jedinstveno adresabilnih objekata, međusobno povezanih standardnim komunikacionim protokolima [1]. Često se uz ovakve uređaje vezuje pojam „pametni uređaji“, jer posjeduju sposobnost samostalnog prikupljanja i razmjene podataka, kao i izvršavanja određenih funkcija bez neposredne intervencije čovjeka. *IoT* uređaji mogu biti različiti predmeti iz čovjekove svakodnevice – poput pametnih satova, sijalica, električnih trotineta, veš mašina, korpi za otpatke ili medicinskih mjerača, kao što je mjerač krvnog pritiska. Onog momenta kada se neki od ovih uređaja poveže na Internet i dobije svoju IP (internet protokol) adresu, on postaje *IoT* uređaj. Povezivanje na Internet, međusobna komunikacija i komunikacija *IoT* uređaja sa korisnicima može se vršiti kablovskom vezom ili upotrebom bežičnih tehnologija (*Wi-Fi*, *Bluetooth*, mobilne mreže, sateliti i sl.) [2].

Imajući u vidu ubrzan razvoj informaciono-komunikacionih tehnologija u protekloj deceniji, nije iznenađujući podatak da je broj aktivnih *IoT* uređaja uveliko premašio broj ljudi na Zemlji. Prema podacima iz 2022. godine, u svijetu postoji blizu 14,5 milijardi aktivnih *IoT* uređaja, dok je, poređenja radi, 2015. godine njihov broj iznosio oko 3,6 milijardi (četiri puta manje), a ovakav trend rasta će se nastaviti i u narednim godinama [3]. Navedene brojke pokazuju da su ovi uređaji pronašli svoje mjesto u savremenom svijetu, da imaju širok spektar primjene (industrija, zdravstvo, obrazovanje, svakodnevni život...), te zbog toga zadovoljavaju potrebe velikog broja korisnika različitih profila.

Kada se uzmu u obzir navedeni statistički podaci, postavlja se pitanje šta to *IoT* uređajima omogućava tako ekspanzivan razvoj, tj. šta to čini *IoT* tehnologije tako univerzalnim u pogledu primjene?

Univerzalnost primjene *IoT*-a ogleda se u njegovoj sposobnosti da se integriše u širok spektar domena ljudske djelatnosti, čime odgovara na potrebe krajnjih korisnika različitih profila – od pojedinaca i domaćinstava, do industrije, javne uprave i zdravstvenih sistema.

Temelj ove prilagodljivosti leži u modularnoj prirodi *IoT* sistema: kombinacija senzora, aktuatora, mrežne povezanosti i analitičkih alata omogućava projektovanje rješenja specifičnih za određeni kontekst primjene. Kako navodi Greengard [2], *IoT* predstavlja ključnu komponentu digitalne transformacije, jer omogućava kreiranje „inteligentne okoline“ sposobne za autonomno prikupljanje, razmjenu i interpretaciju podataka. Upravo zbog toga, *IoT* se ne percipira kao tehnologija ograničena na samo jednu industriju, već kao infrastruktura budućnosti čija fleksibilnost omogućava njenu masovnu adaptaciju.

Na industrijskom nivou, primjena *IoT*-a obuhvata proizvodne procese, logistiku, energetska efikasnost i održavanje mašinske opreme, gdje podaci dobijeni u realnom vremenu omogućavaju donošenje optimizovanih odluka i smanjenje operativnih troškova [4]. U urbanim sredinama, *IoT* je ključan za koncept pametnih gradova, gdje doprinosi unaprijeđenju upravljanja resursima, saobraćajem, otpadom i komunalnim uslugama. U sektoru zdravstva, personalizacija medicinskih usluga postaje moguća zahvaljujući *IoT* uređajima za kontinuirano praćenje vitalnih parametara, čime se omogućava pravovremena intervencija i unaprijeđenje preventivne zdravstvene njege. S druge strane, u potrošačkom segmentu, *IoT* zadovoljava zahtjeve za automatizacijom i personalizacijom kroz pametne uređaje za svakodnevnu upotrebu u domaćinstvu, koji doprinose većem komforu, bezbjednosti i kvalitetu života.

U tom kontekstu, kako se navodi u [4], *IoT* više ne predstavlja samo tehničku inovaciju, već strateški okvir za dizajniranje inteligentnih sistema koji se prilagođavaju specifičnim potrebama korisnika i različitim poslovnim modelima.

Posebna pažnja u okviru ovog poglavlja biće posvećena industrijskom *IoT*-u (*Industrial IoT*) i prediktivnom održavanju (*Predictive Maintenance*) koji čine okosnicu ovog rada.

1.1. Industrijski IoT i Industrija 4.0

Posljednjih godina *IoT* koncept je napravio ozbiljan proboj u sferu industrije nudeći rješenja koja pružaju veću efikasnost, pouzdanost i održivost proizvodnje, a sve to uz redukciju troškova. Industrijski *IoT* (*IIoT*) se može definisati kao tehnološki ekosistem međusobno povezanih mašina, alata, proizvodnih linija, senzora, mrežne opreme i sl. koji vrši prikupljanje podataka, analizu, monitoring i preduzimanje akcija u industrijskim okruženjima [2].

Kada se govori o *IIoT*-u, treba pomenuti da je on sastavni dio koncepta Industrija 4.0, koji je pokrenut 2011. godine u Njemačkoj i predstavlja tzv. Četvrtu industrijsku revoluciju [5]. Ovaj koncept zasnovan je na kreiranju sajber-fizičkih sistema (*Cyber-Physical Systems*), odnosno digitalnoj transformaciji industrije, koja podrazumijeva:

- primjenu *IoT* uređaja [5];
- primjenu infomaciono – komunikacionih tehnologija u cilju prikupljanja i obrade velike količine podataka koja se generiše u industrijskim postrojenjima [5], [6];
- *cloud computing* – skladištenje podataka na udaljenom serveru-*cloud*, bez korišćenja sopstvene hardverske ili softverske infrastrukture [5];
- *M2M (machine-to-machine)* komunikaciju između uređaja u industrijskim sistemima [5], [7];
- autonomno donošenje odluka u realnom vremenu uz primjenu vještačke inteligencije [6], [7];
- digitalizaciju proizvoda i usluga [6], [7].

Jedna od tekovina, a ujedno i krajnji cilj, industrije 4.0 je stvaranje pametnih fabrika (*Smart Factories*), u kojima su implementirane navedene tehnologije u cilju optimizacije procesa proizvodnje [6].

Nezaobilazan element industrije 4.0 su senzori, koji predstavljaju oči i uši savremenih industrijskih postrojenja, a svaki od njih se može posmatrati kao zaseban *IoT* uređaj. U radu [8], pametni senzor je definisan kao uređaj koji se sastoji od mikroprocesora, komunikacionog modula i modula za obradu signala. Kao glavne prednosti ovakvih senzora istaknute su mogućnosti samodijagnostike, pametne kalibracije, daljinskog konfigurisanja i kablovske ili bežične komunikacije sa drugim uređajima. U kontekstu priče o sensorima važno je osvrnuti se na prikupljanje i prikazivanje podataka sa senzora. Autori rada [9] prezentuju sistem za monitoring stanja opreme u industrijskim pogonima u cilju redukovanja broja neočekivanih ispada mašina u pogonu. Za povezivanje senzora, komunikacionog *Arduino Ethernet* modula i implementaciju upravljačkog algoritma korišćena je *Arduino UNO* mikrokontrolerska platforma, a za kreiranje grafičkog korisničkog interfejsa korišćen je softver *LabVIEW*.

Područja primjene *IoT*-a u industriji obuhvataju širok dijapazon segmenata industrijskih procesa, kao što su upravljanje i nadgledanje proizvodnje, kontrola kvaliteta, upravljanje resursima, bezbjednost i zaštita zaposlenih i imovine, održavanje opreme itd. Budući da se ovaj rad bavi primjenom *IoT* tehnologija i prediktivnog održavanja u rudarskoj inudstriji, u nastavku će biti napravljen osvrt dominantno na istraživanja i rješenja koja postoje na tom polju.

U rudarstvu je upotreba *IoT* tehnologija uglavnom orjentisana u pravcu prediktivnog održavanja, koje podrazumijeva pravovremeno prepoznavanje kvarova i praćenje stanja komponenata koje se tokom rada troše (npr. mehaničko, električno, termičko habanje). Primjena prediktivnog održavanja omogućava blagovremeno planiranje zamjene ili popravke dijelova, čime se povećava pouzdanost opreme i smanjuje broj neplaniranih zastoja [10], [11].

Iskopavanje rude samo po sebi je veoma izazovan posao, koji se obavlja u ekstremnim radnim uslovima i sa sobom nosi brojne opasnosti kako za rudare, tako i za životnu sredinu. Nesigurnost u procjeni rezervi rude, nepoznat sastav stijena, obezbjeđivanje energije za iskopavanje, oscilacije cijena rude, bezbjednost ljudi i opreme, samo su neki od izazova koji predstavljaju svakodnevicu u rudarskoj industriji [12]. Upravo zbog toga, ova oblast je sa inženjerskog aspekta veoma inspirativna, što pokazuju različita rješenja koja se bave nekim od navedenih problema. Jedno takvo rješenje izloženo je u radu [13], a tiče se implementacije *IIoT* sistema za monitoring procesa ekstrakcije olova i cinka iz rude u realnom vremenu. Praćenjem i regulacijom parametara niza hemijskih reakcija i mehaničkih dejstava na rudu obezbjeđuje se optimizacija cjelokupnog procesa ekstrakcije. Rad [14] govori o izazovima uspostavljanja robusne *IIoT* komunikacione infrastrukture u podzemnim rudnicima, kako bi se omogućio protok informacija i upravljanje u realnom vremenu, a samim tim smanjio rizik od potencijalnih havarija. Takođe, u radu su dati predlozi za razvoj i unaprijeđenje „*Self – Advancing Goaf Edge Support Systems (SAGES)*“ (tehnologija koja se koristi u podzemnim rudnicima kako bi se spriječilo urušavanje i obezbijedila sigurnost radnog prostora, prim. aut.) sistema, koristeći mogućnosti koje pružaju *IoT* tehnologije. U radu [15] je dat pregled istraživanja iz oblasti „*Wireless Sensor Network (WSN)*“ (engl. bežična senzorska mreža), čiji je cilj povećanje stepena bezbjednosti rudara u podzemnim rudnicima kroz praćenje koncentracije otrovnih i zapaljivih gasova kao što su metan (CH_4), vodonik-sulfid (H_2S), ugljen-monoksid (CO), ugljen-dioksid (CO_2), oksidi sumpora (SO_x), oksidi azota (NO_x) itd. Grupa autora u [16] takođe se bavi integracijom bežičnih senzorskih mreža u cilju pravovremenog alarmiranja zaposlenih u slučaju bilo kakvih abnormalnih stanja u podzemnim rudnicima uglja. Prezentovano rješenje, za obradu signala sa senzora i upravljanje alarmnim sistemom, koristi mikrokontrolersku platformu *Arduino*, koja je upotrijebljena i u sistemu koji je opisan u ovom master radu. Još jedno rješenje koje koristi *Arduino* platformu predstavili su autori u [17]. Ovo rješenje takođe se bavi problematikom bezbjednosti rudara tokom obavljanja radnih zadataka. Zasniva se na monitoringu temperature, vlažnosti i koncentracije opasnih gasova (metan, ugljen-monoksid) pomoću senzora postavljenih na rudarskom šlemu. Koncept „pametnog“ *IIoT* šlema za rudare izložen je i u radovima [18] i [19]. Autori rada [20] prezentuju *low-cost* (engl. ekonomičan, povoljan) *IIoT* sistem za upravljanje voznim parkom u površinskom kopu, koji ima za cilj optimizaciju performansi bagera za utovar i kamiona za transport rude. Optimizacija se ostvaruje kroz praćenje vremena utovara, brzine i lokacije kamiona, planiranje rute kamiona, proračun dnevne količine utovarene rude itd. Rad [21], baveći se problematikom oštećenja rudarskih mašina sa zglobnim mehanizmom okretanja usled dinamičkog preopterećenja, dijelom ulazi u domen prediktivnog održavanja. U ovoj publikaciji opisan je *IIoT* sistem koji čine senzori za mjerenje vibracija i položaja zglobnog mehanizma mašine tokom rada. Na osnovu izmjerenih parametara analizirani su faktori koji uzrokuju preopterećivanje mašine, a samim tim i skraćenje radnog vijeka. Problematikom komunikacije u podzemnim rudnicima bavili su se autori u [22]. Oni su se fokusirali na *VANET (Vehicle Ad-hoc NETWORK)* mreže, koje predstavljaju jedan vid komunikacije između

vozila u rudarskim okruženjima. Njihov predlog je protokol za usmjeravanje zasnovan na metaheuristici optimizacije kolonijom mrava za *VANET*-ove u podzemnim rudnicima.

Osim navedenih primjena *IIoT*-a, koje su bliske predmetu istraživanja ovog master rada, postoji još mnoštvo oblasti u kojima je *IIoT* našao primjenu (automobilska industrija, građevinska industrija, agroindustrija itd.) [23].

1.2. Prediktivno održavanje

Prije definisanja pojma prediktivnog održavanja, treba se osvrnuti na sami pojam održavanja, iz kojeg su se vremenom razvili svi ostali tipovi održavanja (preventivno, prediktivno, korektivno, reaktivno itd.). Održavanje podrazumijeva niz postupaka koji obezbjeđuju stalnu funkcionalnost nekog sistema ili uređaja, sa ciljem postizanja optimalnih performansi, što dužeg radnog vijeka i što nižih troškova [24], [25]. Ovi postupci uključuju otklanjanje kvarova, zamjenu potrošnih djelova, podešavanje parametara, kalibraciju, poboljšanje postojećeg stanja (modernizacija sistema) i sl.

U doba prve industrijske revolucije, intervencije koje su se ticale održavanja sistema su vršene isključivo reaktivno. Takav koncept zadržao se sve do 50-ih godina prošlog vijeka, kada se javila potreba za preventivnim djelovanjem u cilju spriječavanja kvarova i produženja radnog vijeka mašina. Osim toga, zaključeno je da iznenadni kvarovi mašina dovode do visokih troškova, koji su često mogli biti izbjegnuti da je pravovremeno reagovano. Tako je nastao sledeći stadijum održavanja – preventivno održavanje. Suština preventivnog održavanja je preduzimanje niza planiranih aktivnosti prije pojave kvara na sistemu. Svrha ovakvog planskog pristupa održavanju jeste smanjenje vjerovatnoće za pojavu kvara, što omogućava kontinuitet u radu, veću pouzdanost i duži radni vijek sistema [24].

Trenutno aktuelni stadijum u održavanju je prediktivno održavanje. Vrijeme njegovog nastanka se ne može precizno definisati, u literaturi se uglavnom navodi početak 21. vijeka, a neki autori njegov nastanak i razvoj vezuju za pojavu Industrije 4.0 [26]. To je vid održavanja, koji je baziran na monitoringu i dijagnostici komponenti sistema ili procesa u realnom vremenu, kako bi se na vrijeme otkrili znakovi koji ukazuju da može doći do kvara ili smanjenja učinkovitosti. Blagovremenim preduzimanjem odgovarajućih akcija u odnosu na detektovane neispravnosti, mogu se izbjeći iznenadni ispadi sistema, duži zastoji u radu i skupe popravke sistema, što uzrokuje visoke troškove i smanjuje efikasnost. Zato je jedan od osnovnih zadataka prediktivnog održavanja da obezbijedi optimalne performanse sistema [27], [28]. Domen prediktivnog održavanja obuhvata mnoštvo elemenata iz domena Industrije 4.0: *Internet of Things*, senzori, rad sa velikim količinama podataka, *Cloud computing*, vještačka inteligencija [26]. Otuda i ne iznenađuje pomenuta činjenica da pojedini autori ova dva

koncepta posmatraju uporedo.

Prediktivno održavanje se primjenjuje u gotovo svim sferama industrije. Sve više se primjenjuje u energetici (naročito u elektranama), pomorskim sistemima, postrojenjima za eksploataciju resursa (nafta, prirodni gas). Jedan je od ključnih segmenata Industrije 4.0 i koncepta fabrika budućnosti. U oblasti sajber bezbjednosti se koristi za praćenje i otkrivanje prijetnji u računarskim sistemima i mrežama [27].

Kada je riječ o benefitima prediktivnog održavanja, među prvima treba istaći smanjenje troškova održavanja i operativnih troškova kroz optimizaciju vremena i resursa. Prema podacima Deloitte-a iz 2022. godine, prediktivno održavanje smanjuje vrijeme zastoja sistema 5-15%, uz povećanje produktivnosti rada 5-20% [29]. Autori u [26] navode da primjena prediktivnog održavanja dovodi do smanjenja ukupnih troškova održavanja 25-30%, vrijeme dijagnostike kvara smanjuje se 70-75%, povrat investicije u ovaj oblik održavanja je desetostruk, a sve to rezultira porastom proizvodnje za 20-25%.

Pojmove preventivnog i prediktivnog održavanja ne bi trebalo poistovjećivati, iako imaju određenih sličnosti. Razlike između ova dva tipa održavanja mogu biti ilustrovane na primjeru održavanja automobila. U preventivno održavanje automobila spadaju sve planske aktivnosti koje su propisane od strane proizvođača ili ovlašćenih servisera. To su intervencije koje se izvode periodično na sistemima automobila za koje postoje određeni vremenski okviri u kojima se garantuje njihov pouzdan rad. Ove intervencije uključuju zamjenu motornog ulja, zamjenu kočione i rashladne tečnosti, zamjenu filtera (npr. ulja, goriva, vazduha), zamjenu remenica, pneumatika itd. Sve nabrojane aktivnosti vrše se posle određenog vremenskog perioda (obično godinu dana), ili određenog broja pređenih kilometara (obično 10-15 hiljada km). Nakon što se ispuni jedan od ova dva uslova, preporučljivo je preduzeti mjere preventivnog održavanja što je moguće prije, kako bi se smanjila vjerovatnoća pojave kvara na nekom od nabrojanih elemenata. Međutim, to ne znači da će doći do sigurnog otkazivanja nekog od sistema, već da nakon ispunjenja nekog od navedena dva uslova proizvođač ne garantuje pouzdan i bezbjedan rad tih sistema, zbog promjena koje nastaju tokom vremena (povećava se viskoznost motornog ulja, pneumatici se troše, filteri gube filtraciona svojstva itd.). Sa druge strane, prediktivno održavanje automobila obuhvata senzore koji se nalaze u različitim sistemima automobila i konstantno prate stanje vozila, a shodno vrijednostima mjerenih parametara, na kontrolnoj tabli se prikazuju obavještenja ili upozorenja kako bi se vozaču ukazalo na moguću pojavu kvara, smanjenja performansi i drugih neželjenih stanja. U zavisnosti od proizvođača, modela i starosti vozila, varira broj i tip senzora kojima je ono opremljeno. Najčešće su to senzori kojima se mjeri temperatura motora, nivo kočione tečnosti, pritisak u pneumaticima, nivo zaprljanosti *DPF* filtera (engl. *Diesel Particulate Filter*) itd. Pravovremenim alarmiranjem vozača o potencijalnom problemu u nekom od sistema izbjegava se pojava većih kvarova, a samim tim i neplaniranih troškova [30], [31], [32].

Sušтина savremenog održavanja podrazumijeva maksimizaciju radnog vijeka opreme i minimizaciju troškova održavanja [33]. Da bi se ovo postiglo neophodan je konstantan monitoring stanja sistema, kako bi se omogućila rana detekcija kvarova ili njihovo spriječavanje. U zavisnosti od konkretnog sistema, različiti su parametri koji se mjere, veoma često su to temperatura, vibracije, zvuk, stanje podmazanosti i sl. [34]. Da bi navedena mjerenja postala upotrebljiva, potrebno je proći kroz tri etape: prikupljanje podataka, obrada podataka i odlučivanje o preduzimanju akcija, što je opisano u [35]. Značajan broj istraživanja ide u pravcu primjene vještačke inteligencije pri rješavanju problema koji se javljaju u domenu prediktivnog održavanja. Primjer takvog istraživanja je [36], gdje se neuralne mreže koriste za estimaciju preostalog korisnog radnog vijeka ležajeva (engl. *remaining useful lifetime*) u rotacionim mašinama. Problematikom ležajeva bave se i autori [37], gdje se primjenom mašinskog učenja vrši monitoring stanja i detekcija oštećenja na ležajevima u mašinama za brušenje. Rad [38] takođe se bavi rotacionim mašinama, tj. dijagnostikom kvarova rotacionih mašina korišćenjem različitih algoritama vještačke inteligencije. U [39] predstavljen je metod zasnovan na sličnosti između testnog i referentnog vibracionog signala. Referentni vibracioni signal se generiše za svako operativno stanje mašine, a dalje se kroz Furijeove transformacije vrši izdvajanje karakteristika iz prikupljenih vibracionih signala. Pokazalo se da ovaj metod daje izuzetno visoku tačnost, uz daleko manje računarske zahtjeve u odnosu na metode mašinskog učenja. Posljednjih godina objavljen je značajan broj istraživanja i iz oblasti akustične dijagnostike kvarova rotacionih mašina. Rad [40] bavi se problematikom analize akustičnih signala koje emituju motori sa komutatorom. Autor je posmatrao pet karakterističnih stanja motora jednosmjerne struje, od kojih su četiri stanja nepoželjna (kvarovi), a peto je normalno radno stanje. Na taj način došlo se do visokog procenta uspješnog prepoznavanja kvara, koji se kretao u rasponu 88,4 – 96,2%. Autori u [41] daju poređenje metoda prediktivnog održavanja industrijskih mašina za obradu različitih sirovina. Sa jedne strane analiziraju metode koje se oslanjaju na mjerenje vibracija u samim mašinama, dok sa druge strane analiziraju metode koje primjenjuju praćenje zvučnih signala unutar ili izvan mašina i na osnovu njih određuju stanje mašine. U radovima [42] i [43] autori prezentuju uređaj za akviziciju i obradu zvučnih signala iz mlinova za ugalj sa konstantnom brzinom rotacije, u cilju pravovremenog prepoznavanja oštećenja i potencijalnih kvarova. Primjenom neuralne mreže implementirane na *Raspberry Pi 3B* mikrokontroleru autori [43] su postigli prosječnu tačnost algoritma od čak 99% u realnim uslovima rada (termoelektrana). Rad [44] obrađuje primjenu prediktivnog održavanja u rudarskoj industriji i metode za analizu velikih količina podataka zasnovane na *cloud* tehnologiji. Primjerima sistema održavanja transportnih traka i mašina za utovar i istovar (LHD mašine) ilustriran je značaj prediktivnog održavanja i upotrebe napredne analize podataka za poboljšanje efikasnosti rada i produženje radnog vijeka mašina u rudarstvu. U [45] dat je teorijski okvir za razvoj ekspertnog sistema koji će se baviti problematikom prediktivnog održavanja bagera u površinskim kopovima. Autori prezentuju arhitekturu ovog sistema baziranu na pravilima koja se odnose na održavanje određenih sistema u bageru (motor, hidraulični sistem, transmisioni sistem, kočioni

sistem, električni i sigurnosni sistem, sistem vješanja). Sveobuhvatan pregled istraživanja u oblasti održavanja i dijagnostike kvarova rotacionih mašina dat je u radu [46]. Autori tog rada daju uvid u razvojni put ove oblasti u periodu od 1998. do 2019. godine, kao i palnove za buduća istraživanja, ističući značaj rotacionih mašina za modernu industriju.

U kontekstu industrije 4.0, prediktivno održavanje doprinosi realizaciji koncepta inteligentne industrije, odnosno stvaranju ranije pomenutih pametnih fabrika. Rezultat primjene ovog oblika održavanja su smanjeni troškovi održavanja i vrijeme zastoja, uz povećanu produktivnost i kvalitet proizvodnje. U okviru industrije 4.0, prediktivno održavanje se prepliće sa industrijskom *IoT* tehnologijom (*IIoT*), što se uočava kroz brojna rješenja na ovom polju, koja se dominantno oslanjaju na primjenu *IoT*-a [47].

Arhitekturu inteligentnog sistema prediktivnog održavanja predstavila je grupa autora u [48], oni su formirali jednu vrstu opšteg obrasca sistema prediktivnog održavanja, koji objedinjuje različite tehnologije (*IoT*, mašinsko učenje, ekspertni sistemi itd.) i počiva na principima industrije 4.0. Veza prediktivnog održavanja i *IoT*-a opisana je i u radu [49], gdje su navedene metode i smjernice za razvoj jeftinih, tzv. *low-cost*, sistema prediktivnog održavanja u industriji 4.0. Cilj ovakvog pristupa je omogućavanje da ovakva rješenja budu pristupačna i manjim proizvodnim preduzećima. Rezultat istraživanja je *low-cost* sistem za monitoring temperature i vibracija u centrima za obradu materijala CNC mašinama. Nedavno je kompanija Siemens Energy u saradnji sa kompanijom Gecko Robotics predstavila sistem za brže i efikasnije inspekcije i nadzor u industriji. Riječ je o robotu koji koristi ultrazvučne talase za pregled stanja stacionarne opreme, kao što su cjevovodi, silosi, rezervoari i sl. Pregled ovakvim robotizovanim sistemom traje čak 10 puta kraće od ručnog pregleda, a pri tome zahtijeva i četiri puta manje osoblja nego manuelna inspekcija [50]. Još jedan primjer sistema za prediktivno održavanje, u koji je integrisan *IoT*, dat je u [51]. Riječ je o sistemu za monitoring i predviđanje stanja jedne vrste mašina koje se koriste u prehrambenoj industriji.

Pored uvodnog, ovaj rad se sastoji od još šest poglavlja:

- U drugom poglavlju biće opisan bager EKG-15, koji je predmet istraživanja ovog rada. Biće prikazane njegove tehničke karakteristike, način rada i primjena.
- U trećem poglavlju će biti dat uvid u analizu uzroka i posljedica pojave kratkih spojeva unutar DC pogona predmetnog bagera pri procesu iskopavanja uglja u rudniku.
- U četvrtom poglavlju će biti posvećena pažnja postojećem pokušaju rješavanja problema kratkih spojeva na motorima bagera EKG-15. Dakle, biće analiziran rad prototipa sistema koji vrši detekciju kratkih spojeva.
- U petom poglavlju će biti detaljno opisan dizajn *IoT* sistem za spriječavanje kratkih spojeva. Biće prikazana blok šema i detaljno opisane sve komponente

sistema i njegove funkcije.

- U šestom poglavlju sadrži prikaz prototipa i rezultate njegovog testiranja.
- U sedmom poglavlju će biti dat zaključak, odnosno analiza rezultata rada predloženog sistema i smjernice za buduća istraživanja.

2. BAGER EKG-15

U ovom poglavlju je opisan bager EKG-15, njegove specifikacije, performanse i način rada. Riječ je bageru ruske kompanije IZ-KARTEX, koja je najveći ruski proizvođač rudarske opreme i opreme za iskopavanje. U martu 1958. godine, kompanija je predstavila prvi model bagera sa oznakom EKG-8 [52]. Od tada, pa do kraja 2019. godine, IZ-KARTEX je proizveo preko 3800 bagera tipa EKG, od kojih je preko 1000 i dalje u funkciji [53]. Od 2016. godine IZ-KARTEX je dio konglomerata UZTM-KARTEX LLC, koji čine još i Uralmashplant JSC i Foundry Manufacturing (ogranak IZ-KARTEX-a), a koji danas predstavlja vodećeg proizvođača rudarske, građevinske i opreme za proizvodnju čelika [52].

EKG-15 pripada grupi električnih bagera sa užadima (engl. *Electric Rope Shovels*), ovakva konfiguracija omogućava precizno upravljanje korpom i efikasno podizanje teških tereta. Robusna konstrukcija ih čini veoma pouzdanim i izdržljivim u izuzetno zahtjevnim radnim uslovima, kakvi se mogu sresti u površinskim kopovima, gdje se dominantno koriste. Nosivost korpe (kašike) za utovar je znatno veća od one koju imaju hidraulični bageri. Pogon ovih bagera je električni, što im daje prednost na više nivoa - imaju nižu potrošnju energije po toni otkopanog materijala u odnosu na bagere sa dizel motorima, ekološki su prihvatljiviji i imaju duži radni vijek. Sve navedeno za rezultat ima niže operativne troškove i veću produktivnost ovih mašina u odnosu na konkurente [54].

Proizvodnja modela EKG-15 počela je osamdesetih godina, a u periodu od 2010. do početka 2020. proizvedeno je preko 60 bagera ovog tipa i njegovih modifikacija [53]. Iz dokumentacije proizvođača [55] izdvojene su opšte karakteristike relevantne za istraživanja sprovedena u okviru ovog master rada. Radi preglednosti, pomenute karakteristike prikazane su u tabeli 2.1 koja je data u nastavku.

Tabela 2.1. Opšte karakteristike bagera EKG-15.

Zapremina korpe	15 [m ³]
Nosivost korpe	32,5 [t]
Vrijeme ciklusa operacije¹	28 [s]
Radna masa bagera	700 [t]
Visina nivoa očiju operatera	8,5 [m]
Tip elektromehaničkog pogona	generator-motor
Snaga napojnog transformatora	1250 [kVA]
Napon napajanja (rudarski kabl)	6 [kV]

¹ Vrijeme ciklusa operacije (engl. *operation cycle time*) je vrijeme koje je potrebno bageru da izvrši jednu operaciju koja podrazumijeva: zahvatanje materijala korpom, podizanje korpe, prenos materijala i istovar.

Sva istraživanja koja su sprovedena u svrhu izrade ovog rada, odrađena su na bageru EKG-15, koji se nalazi u površinskom kopu „Potrlica“ Rudnika uglja Pljevlja (RUPV). Pomenuti bager proizveden je 1986. godine i prikazan je na slici 2.1, gdje se djelimično može uočiti i konfiguracija terena u površinskom kopu.



Slika 2.1. Bager EKG-15 u Površinskom kopu „Potrlica“ (RUPV).

2.1. Glavni pogoni bagera

Fokus rada je najvećim dijelom stavljen na analizu električnih i elektromehaničkih sistema u bageru, pa će im u nastavku biti posvećena posebna pažnja. Bager EKG-15 posjeduje četiri glavna pogona, koji vrše četiri različite funkcije. To su pogoni: dizanja (spuštanja) korpe, uvlačenja (izvlačenja) korpe, okretanja (rotacije) bagera i pogon kretanja bagera.

Pogon dizanja (spuštanja) je mehanizam koji omogućava vertikalno kretanje korpe

bagera i ima ulogu u podizanju ili spuštanju utovarenog materijala. Pogon dizanja čine dva redno vezana motora jednosmjerne struje (DC) snage po 500 kW, čija je nominalna brzina 1.000 obr/min ili 1.250 obr/min, zavisno od vrijednosti struje pobude. Niža brzina se koristi pri većim opterećenjima kada je potreban veći obrtni moment i preciznije upravljanje, dok se viša brzina primjenjuje pri manjim opterećenjima (manji obrtni moment), čime se povećava efikasnost i smanjuje trajanje radnog ciklusa. Od sva četiri pogona, ovaj pogon ima najveću snagu jer je izložen najvećim opterećenjima zbog direktnog savladavanja gravitacione sile koja djeluje na masu utovarenog materijala. Vertikalno dizanje tereta zahtijeva visoku i konstantu silu, naročito pri pokretanju iz mirovanja, tj. kada je materijal tek utovaren i treba započeti dizanje, za šta je potreban najveći obrtni moment.

Pogon uvlačenja (izvlačenja) se koristi za usmjeravanje korpe prema materijalu koji treba utovariti, a u sadejstvu sa pogonom dizanja i okretanja omogućava pozicioniranje korpe u radnom prostoru bagera i zahvatanje materijala, zbog čega se često naziva i „pogon kopanja“. Snaga ovog pogona iznosi 200 kW, a čini ga jedan DC motor čija je nominalna brzina 750 obr/min.

Pogon okretanja je zadužen za rotaciju bagera oko svoje vertikalne ose. Ovaj pogon omogućava promjenu orijentacije bagera i postavljanje korpe u željenom pravcu. Čine ga tri redno vezana DC motora od kojih svaki ima snagu 220 kW, a njihova nominalna brzina iznosi 600 obr/min.

Pogon kretanja se odnosi na mehanizam koji omogućava pokretanje gusjenica i kretanje bagera naprijed i nazad. Ovaj pogon se sastoji od dva redno vezana DC motora, oba snage po 200 kW, a njihova nominalna brzina je 750 obr/min. Svaki motor je opremljen elektromagnetnom kočnicom, koja služi za zaustavljanje ovog pogona. Maksimalna brzina kretanja bagera iznosi 0,72 km/h.

Napajanje za motore glavnih pogona obezbjeđuju tri generatora jednosmjerne struje. Rotaciju osovine ovih generatora omogućava trofazni sinhroni motor, koji se napaja sa glavnog napojnog transformatora (tabela 2.1). Osovine ove četiri mašine su mehanički spregnute i rotiraju brzinom 1.000 obr/min (sinhrona brzina). Ova grupa mašina vezana je u takozvani Vard Leonardov sistem² za regulaciju brzine DC motora. Svaki od tri DC generatora, vezan je za DC motor(e) odgovarajućeg pogona, tako da jedan generator napaja jedan pogon. Izuzetak predstavlja pogon kretanja bagera, koji čine dva DC motora, jer za

² Vard Leonardov sistem patentiran je 1891. godine, a koristi se za upravljanje brzinom DC motora u širokom opsegu, uz zadovoljenje termičkog limita mašine. Ovaj sistem čine tri mašine: motor konstante brzine, DC generator sa nezavisnom pobudom i DC motor čijom se brzinom upravlja. Motor konstante brzine (obično asinhroni) pokreće osovinu DC generatora i definiše njegovu brzinu obrtanja. Pobuda DC generatora definiše napon na njegovim krajevima, koji je ujedno i napon na namotaju rotora (armature) DC motora. Do nominalne vrijednosti, brzina DC motora reguliše se pobudom DC generatora koji ga napaja, a za brzine veće od nominalne vrši se smanjivanje pobude DC motora [56], [57].

njihovo napajanje nije predviđen poseban generator. U situacijama kada je potrebno kretanje bagera sa jednog na drugo mjesto, funkciju napajanja ova dva motora preuzimaju DC generatori pogona okretanja (rotacije) bagera i uvlačenja (izvlačenja) korpe.

Na slici 2.1.1 prikazana je opisana grupa mašina, smještenih u pogonskoj prostoriji bagera. Sa lijeva na desno raspored mašina je sljedeći: DC generator pogona dizanja, trofazni sinhroni motor, DC generator pogona okretanja, DC generator pogona uvlačenja korpe.



Slika 2.1.1. DC generatori za napajanje pogonskih motora i sinhroni motor.

2.2. Ormari za upravljanje i zaštitu

Pored generatora i dijela pogonskih motora, u pogonskoj prostoriji bagera nalaze se i tri ormara u kojima su smještene upravljačke i zaštitne komponente. U nastavku će, u kratkim crtama, biti opisana uloga svakog od njih.

Ormar za upravljanje sinhronim motorom – u njemu su smješteni elementi koji vrše regulaciju pobude (struje rotora) trofaznog sinhronog motora, koji obezbjeđuje obtanje osovina tri DC generatora za napajanje pogonskih motora bagera. Ovaj sistem omogućava motoru da održi konstantu brzinu i sinhronizaciju sa promjenljivim opterećenjem, tj. sprječava tzv. ispad iz sinhronizma usled povećanja opterećenja.

Ormar za upravljanje glavnim pogonima – u njemu se nalaze kontroleri za regulaciju brzine DC motora pogona dizanja (spuštanja), uvlačenja (izvlačenja) korpe i okretanja, kao i

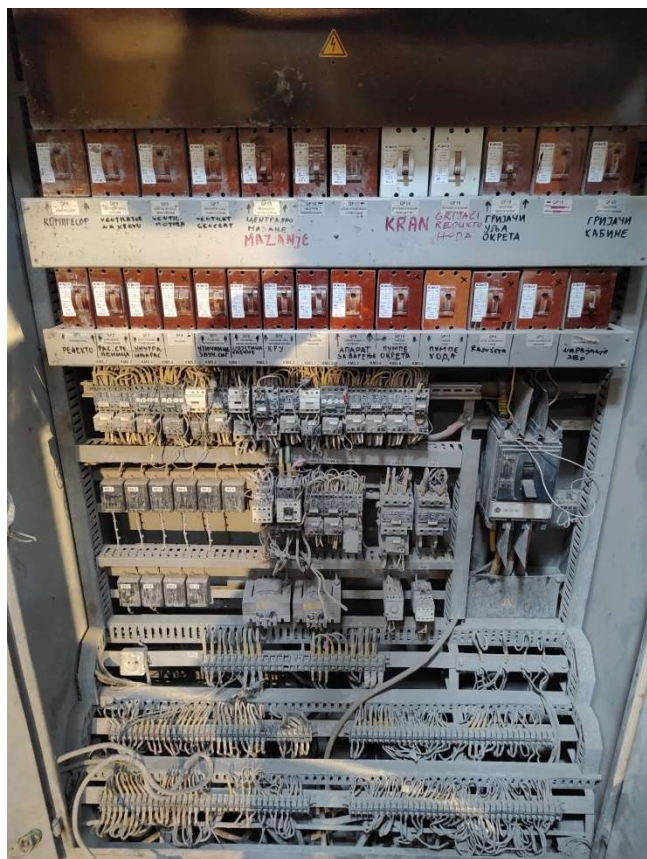
kontroleri koji vrše upravljanje DC generatorima za napajanje navedenih motora. Slika 2.2.1 prikazuje opisani ormar i pripadajuće komponente. U gornjoj polovini ormara nalaze se četiri kontrolera, koji su po načinu rada slični programabilnim logičkim kontrolerima, PLC-ovima (engl. *Programmable Logic Controller*). To su dva kontrolera tipa ПТЭМ-2P-22Ц4М, jedan ПТЭМ-2P-22Ц4 i jedan HKY ЭГ-ПЦ-Y2. Međutim, kod njih ne postoji mogućnost promjene upravljačkog algoritma koji je fabrički integrisan u kontroler. Ovi kontroleri upravljaju pobudnom strujom motora gore navedenih pogona. Četvrti kontroler (HKY ЭГ-ПЦ-Y2, krajnje desno) je glavni i koordiniše rad ostalih, a sa njima serijski komunicira putem RS-485 standarda. Iznad kontrolera nalaze se ampermetri, koji omogućavaju vizuelno praćenje vrijednosti pobudnih struja motora. U donjoj polovini ormara nalaze se tri kontrolera (dva ПТЭМ-2P-22Ц4М i jedan ПТЭМ-2P-22Ц4) koji upravljaju generatorima. Na panelima iznad njih smješteni su mjerni priključci i instrumenti koji pokazuju vrijednosti struje i napona na krajevima generatora, kao i vrijednost struje pobude.



Slika 2.2.1. Ormar za upravljanje glavnim pogonima.

Ormar opšte potrošnje – može se definisati i kao razvodni ormar namijenjen pomoćnim sistemima u bageru. U njemu se nalaze priključci za sve ostale potrošače, kao što

su rasvjeta, utičnice, upravljački džojstici, krovni ventilatori, ventilatori za hlađenje motora, pumpe za podmazivanje, grijači kabine itd. Ormar sadrži prekidačke i zaštitne elemente poput prekidača, kontaktora i osigurača. Svi navedeni sistemi rade sa parametrima niskonaponske distributivne mreže (230/400 V, 50 Hz). Napajanje za ovaj ormar obezbeđuje poseban transformator 6/0,4 kV, koji se nalazi izvan glavne pogonske prostorije bagera. Unutrašnjost ormara opšte potrošnje prikazana je na slici 2.2.2.



Slika 2.2.2. Ormar opšte potrošnje.

2.3. Upravljačka kabina

Upravljanje bagerom vrši rukovalac iz upravljačke kabine smještene na prednjoj desnoj strani bagera, na visini od oko 8,5 metara (nivo očiju rukovaoca). U kabini se nalaze dva komandna panela, sa lijeve i desne strane sjedišta. Na njima se nalaze upravljačke palice (džojstici) za upravljanje glavnim pogonima, prekidači za uključenje i isključenje određenih sistema i analogni ampermetri, koji pokazuju vrijednosti struje pogonskih motora. Na slici 2.3.1 prikazana je unutrašnjost upravljačke kabine.



Slika 2.3.1. Unutrašnjost upravljačke kabine.

Na slici 2.3.2 prikazan je lijevi komandni panel. Upravljačka palica, u zavisnosti od izabranog radnog režima bagera, zadaje komande za kretanje bagera naprijed-nazad (režim kretanja), odnosno uvlačenje-izvlačenje korpe (režim kopanja). Upravljanje operacijama kretanja i kopanja vrši se pomjeranjem palice naprijed ili nazad. Pomjeranjem palice ulijevo otvara se korpa, i na taj način se vrši istovar, dok se pomjeranjem udesno oglašava zvučni signal. Otpuštanjem se palica vraća u nulti (neutralni) položaj. Pored palice, na panelu se nalazi taster, pet prekidača, dva analogna ampermetra i svjetlosni indikatori statusa. U nastavku su dati opisi funkcija pomenutih elemenata:

- STOP taster za zaustavljanje cijelog pogona u slučaju havarije;
- Prekidač za izbor radnog režima kopanja ili kretanja;
- Prekidač za uključenje krovnih ventilatora pogonske prostorije;
- Prekidač za uključenje ventilatora za hlađenje pogonskih motora;
- Prekidač za upravljanje bubnjem na koji je namotan kabl za napajanje bagera;
- Prekidač za uključenje kompresora;
- Analogni ampermetar za mjerenje pobudne struje sinhronog motora;
- Analogni ampermetar za mjerenje struje armature motora pogona uvlačenja korpe.



Slika 2.3.2. Lijevi komandni panel.

Desni komandni panel prikazan je na slici 2.3.3. Palica desnog komandnog panela upravlja operacijama dizanja i spuštanja korpe, kao i operacijama rotacije bagera u lijevu ili desnu stranu. Pomjerenjem palice naprijed korpa se spušta, dok se pomjerenjem nazad korpa podiže. Rotacija bagera u željenom smjeru vrši se pomjerenjem palice u lijevu ili desnu stranu. Kao i u prethodnom slučaju, otpuštanjem se palica vraća u nulti (neutralni) položaj. Osim palice, na panelu su smještena tri tastera, tri prekidača, dva analogna ampermetra i svjetlosni indikatori statusa. U produžetku su opisane njihove funkcije:

- STOP taster za zaustavljanje svih komandi;
- Taster za uključenje bagera (svih sistema u bageru);
- Taster za isključenje kontrolera glavnih pogona;
- Prekidač za uključenje pogona dizanja;
- Prekidač za uključenje pogona uvlačenja korpe;
- Prekidač za uključenje pogona okretanja;
- Analogni ampermetar za mjerenje struje armature motora pogona dizanja;
- Analogni ampermetar za mjerenje struje armature motora pogona okretanja.



Slika 2.3.3. Desni komandni panel.

3. ANALIZA KRATKOG SPOJA KOD DC MOTORA BAGERA EKG-15

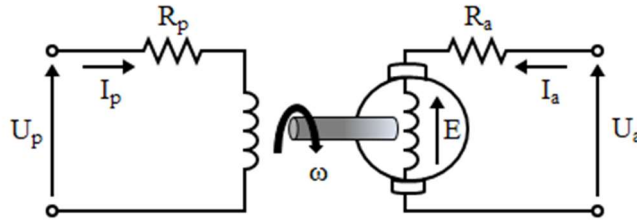
U ovom poglavlju definisan je problem pojave kratkih spojeva u DC motorima pogona dizanja, uz detaljnu analizu njihovih uzroka i posledica. Kako bi se ova problematika sagledala u punom kontekstu, neophodno je prethodno opisati radne uslove koji vladaju u površinskom kopu „Potrlica“.

U radnom okruženju površinskog kopa „Potrlica“ mehanizacija je izložena ekstremnim radnim uslovima. Prema podacima Zavoda za hidrometeorologiju i seizmologiju, temperatura vazduha u Pljevljima tokom godine varira u širokom opsegu, pa se tokom zimskih mjeseci nerijetko spušta i ispod -20°C , dok u ljetnjim mjesecima temperatura doseže skoro 40°C [58]. Konfiguracija terena u površinskom kopu predstavlja dodatni izazov kako za mašine, tako i za rukovaoce. Strukturu zemljišta u kopu „Potrlica“ čine slojevi više različitih materijala od kojih preovladavaju naslage mrkog lignita, cementnog laporca, laporovitih krečnjaka, šljunka, pijeska i glinovitih materijala [59]. Treba napomenuti da RUPV predstavlja glavni zamajac energetskog sistema Crne Gore, što postavlja dodatni zahtjev pred opremu – nužnost pouzdanosti i neprekidnog rada.

3.1. Režim kratkog spoja DC motora

Režim kratkog spoja DC motora predstavlja stanje u kojem je rotor zakočen, a na namotaje statora i rotora dovedeni su napon pobude i napon armature. U literaturi na engleskom jeziku za režim kratkog spoja obično se koriste termini *stalling* i *locked rotor condition*. Do ovog stanja dolazi kada je moment opterećenja na osovini motora veći od maksimalnog momenta koji motor može da postigne. Tada kroz namotaje rotora (armature) protiče maksimalna struja, čija je vrijednost znatno veća od nominalne. Proticanje ove struje u dužem vremenskom intervalu može dovesti do oštećenja motora usled pregrijavanja.

Ovaj režim može se opisati i matematički, služeći se zamjenskom šemom DC motora sa nezavisnom pobudom koja je prikazana na slici 3.1.1. Veličine U_p , I_p , R_p označavaju napon pobude, struju pobude i otpornost namotaja pobude (statora) respektivno. Sa druge strane, veličine U_a , I_a , R_a označavaju napon armature, struju armature i otpornost namotaja armature (rotora) respektivno. Indukovana elektromotorna sila (E) javlja se kao posledica kretanja provodnika rotorskog namotaja u magnetnom polju statora, a njen smjer je suprotan od smjera primijenjenog napona na krajevima rotora.



Slika 3.1.1. Zamjenska šema DC motora sa nezavisnom pobudom.

Ukoliko se na namotaje statora motora dovede napon pobude, u mašini se formira magnetno polje. Postepenim dovođenjem napona na krajeve rotora (armature) kroz provodnike namotaja rotora počinje da teče struja. Budući da se ovi provodnici nalaze u magnetnom polju, na njih će djelovati Lorencova sila, što rezultuje pokretanjem rotora. Naponske jednačine kola statora i rotora date su izrazima (3.1.1) i (3.1.2):

$$U_p = R_p I_p, \quad (3.1.1)$$

$$U_a = E + R_a I_a. \quad (3.1.2)$$

Magnetni fluks koji stvara pobudni namotaj siječe strujne konture koje obrazuju navojci rotorskog namotaja. Usled rotacije rotora brzinom ω dolazi do promjene fluksa kroz pomenute strujne konture. Ova promjena rezultuje indukovanjem elektromotorne sile u namotaju rotora, čiji je izraz dat formulom (3.1.3):

$$E = k\omega\phi, \quad (3.1.3)$$

iz koje se može zaključiti da je ukupna indukovana elektromotorna sila proporcionalna proizvodu brzine motora i magnetnog fluksa ispod pola, koji se može smatrati konstantnim pri konstantnoj pobudnoj struji. Parametar k je konstanta koja zavisi od konstrukcionih karakteristika mašine.

Prinudnim zakočenjem rotora, motor se uvodi u tzv. režim kratkog spoja (engl. *Motor Stall Condition*). Brzina okretanja osovine tada je jednaka nuli ($\omega = 0$), pa je samim tim i indukovana elektromotorna sila data izrazom (3.1.3) takođe jednaka nuli ($E = 0$). Iz jednačine (3.1.2) može se izraziti vrijednost struje armature:

$$I_a = \frac{U_a - E^0}{R_a} = \frac{U_a}{R_a}. \quad (3.1.4)$$

Iz izraza (3.1.4) se zaključuje da je u slučaju zakočenog rotora vrijednost struje armature

maksimalna. Tada se struji armature „protivi” samo otpornost namotaja armature.

Kao što je ranije rečeno, ovako velika vrijednost struje rotora je problematična i može oštetiti motor. Poznato je da četkice DC motora mogu kratkotrajno da podnesu struju koja je dvostruko veća od nominalne [57]. Zbog toga se često događa da u slučajevima dugotrajnog preopterećanja motora dođe do pregorijevanja četkica, a oštećenja se mogu javiti i na komutatoru i na namotajima armature.

3.2. DC motori pogona dizanja

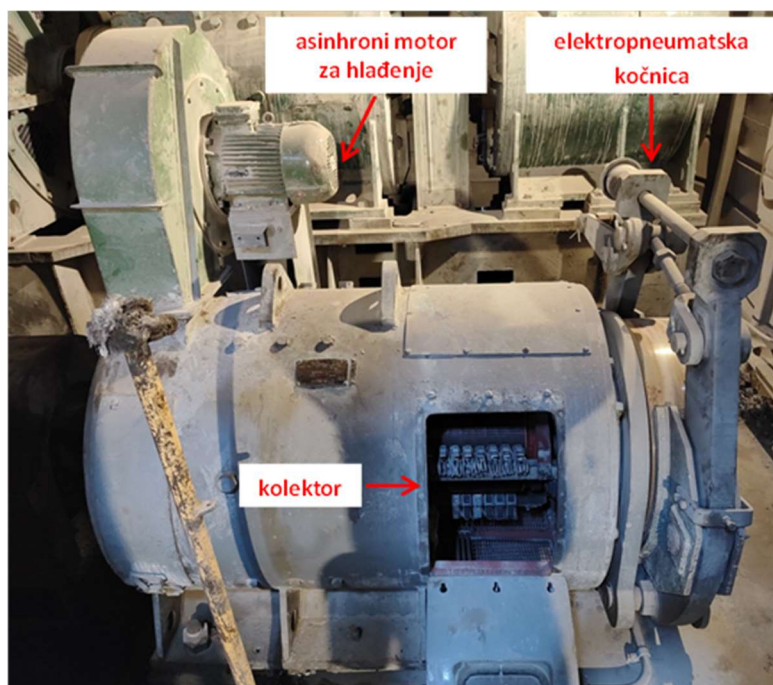
Pogon dizanja ukratko je opisan u poglavlju 2.1, gdje je navedeno da se sastoji od dva identična redno vezana DC motora sa nezavisnom pobudom. Takođe je istaknuto da pogon dizanja ima najveću snagu od sva četiri glavna pogona – 1.000 kW (500 kW + 500 kW).

Karakteristike motora pogona dizanja nalaze se na nazivnoj pločici prikazanoj na slici 3.2.1. Na osnovu navedenih podataka može se zaključiti da se radi o jednosmjernom (DC) motoru sa nezavisnom pobudom, čija nominalna mehanička snaga na osovini iznosi 500 kW. Nominalni napon rotorskog kola je 440 V, dok je odgovarajuća nominalna struja rotora 1.210 A. Napon pobude iznosi 110 V, a nominalna struja pobude može imati vrijednosti: 15,5 A ili 11 A. U zavisnosti od izabrane vrijednosti struje pobude, motor ostvaruje dvije različite nominalne brzine: 1.000 obr/min i 1.250 obr/min. Maksimalno dozvoljeno povećanje temperature namotaja armature, kao i namotaja pobude, iznosi 85 °C u odnosu na ambijentalnu temperaturu. Stepen korisnog dejstva motora je 94%, a njegova masa iznosi 4.280 kg.



Slika 3.2.1. Nazivna pločica motora pogona dizanja.

Motori pogona dizanja mehanički su povezani preko reduktorskog mehanizma, tako da njihove osovine funkcionišu kao jedna zajednička osovina za sinhronizovano podizanje tereta. Reduktor omogućava smanjenje brzine pogona, odnosno brzine podizanja i spuštanja tereta, uz povećanje obrtnog momenta. Slika 3.2.2 prikazuje jedan od motora pogona dizanja, sa otvorenim vratima za pristup kolektoru. Motor je opremljen elektropneumatskom kočnicom za prinudno zaustavljanje pogona, koja se aktivira sa komandnog panela. Budući da su motori izloženi izuzetno velikim opterećenjima, tokom rada dolazi do njihovog zagrijavanja kao posledica Džulovih gubitaka u namotajima motora i trenja između različitih djelova mehanizma motora (npr. trenje u ležajevima, trenje između četkica i komutatora). Hlađenje vrši trofazni asinhroni motor snage 5,5 kW, koji je montiran sa gornje strane kućišta pogonskog motora. Ovaj motor se napaja sa ormara opšte potrošnje, o kojem je bilo riječi u prethodnom poglavlju.



Slika 3.2.2. DC motor pogona dizanja.

3.3. Kratki spojevi u DC motorima pogona dizanja

Za pristup ležištima lignita, nužno je izvesti postupak otkopavanja i uklanjanja nepotrebnih materijala. Pored ranije pomenutih materijala, teren je pretežno sastavljen od laporca, koji se javlja u formi sedimentnih stijena, u čiji sastav ulaze i brojni glinoviti materijali. Debljina ovih naslaga doseže desetine metara [59].

Prilikom otkopavanja, korpa bagera prolazi kroz stijenske mase nailazeći na snažan otpor. Iako su pogoni bagera dimenzionisani za savladavanje ovakvih opterećenja i podizanje izuzetno velikih masa materijala, često dolazi do zaglavljivanja korpe u pomenute naslage. Rukovalac tada najčešće poseže za palicom pogona dizanja, budući da se radi o pogonu najveće snage. Međutim, čest je slučaj da motori ne mogu da savladaju opterećenje - rotor ostaje nepomičan, iako je na njega doveden napon. Tada motor ulazi u režim kratkog spoja i kroz namotaje armature protiče maksimalna vrijednost struje, koja iznosi 2.200 A [60]. Prema podacima proizvođača motor u ovom stanju može ostati najduže 9 sekundi bez oštećenja [61]. Drugim riječima, ako rukovalac duže od 9 sekundi ne otpusti palicu postoji opasnost od oštećenja pogonskih motora. O učestalosti ovog problema najbolje govore procjene da se tokom jedne smjene dogodi oko 40 kratkih spojeva [62].

Oštećenja uzrokovana preopterećenjem najčešće se javljaju na komutatoru i četkicama DC motora. Komutator je naročito osjetljiv na nagle promjene brzine i opterećenja, a upravo ta dva faktora su prisutna kod ulaska u režim kratkog spoja. Rad u režimu kratkog spoja iznad propisanog vremena dovodi do oštećenja komutatorskih pločica usled pregrijavanja. Ovo predstavlja ozbiljan problem, jer može dovesti do kratkih spojeva u namotajima armature. U tom slučaju potrebna je zamjena namotaja armature. Posledice kratkih spojeva manifestuju se i na četkicama. Povećano trenje i visoke temperature uzrokuju abraziju i ubrzano trošenje četkica, a samim tim i skraćenje njihovog radnog vijeka. Struja kratkog spoja protiče kroz namotaje armature i dovodi do njihovog ubrzanog trošenja (habanja). Namotaji su tada izloženi jakom termalnom naprezanju, što može dovesti do oštećenja izolacije, ili otkaza čitavog namotaja [63].

Zamjena komutatora, kao i zamjena namotaja armature, predstavljaju značajan trošak. Prema podacima dobijenim od službe održavanja RUPV-a, zamjena komutatora na motoru pogona dizanja košta oko 7.000 €, dok troškovi zamjene armature dostižu približno 10.000 €. Cijena novog motora kreće se u rasponu od 50.000 do 60.000 €. Ipak, još veći izazov za kompaniju kakva je RUPV predstavlja zastoj mašine usled kvara. U slučaju oštećenja uzrokovanih kratkim spojem, bager može biti van pogona i po nekoliko sedmica, što dovodi do značajnog pada produktivnosti u procesu eksploatacije uglja i uzrokuje dodatne troškove.

Navedene posledice problema kratkih spojeva predstavljaju dovoljan motiv za dalje istraživanje i razvoj rješenja u cilju spriječavanja štetnih efekata ovih pojava. U skladu sa zahtjevima koje je uprava RUPV-a postavila, fokus je stavljen na unaprijeđenje zaštite pogona i procesa upravljanja, pri čemu je potrebno da rukovalac pravovremeno dobije jasan signal ukoliko motor uđe u režim kratkog spoja, kao i kada se približi kritičnom vremenskom pragu od 9 sekundi. Ukoliko dođe do prekoračenja ovog vremena, sistem mora automatski reagovati zaustavljanjem pogona na način koji je bezbjedan za rukovaoca i bager. U narednom poglavlju analiziran je postojeći sistem za detekciju kratkih spojeva, koji je poslužio kao osnova za razvoj sistema prezentovanog u ovom master radu.

4. IOT SISTEM ZA DETEKCIJU KRATKOG SPOJA

Dosadašnji pokušaji rješavanja problema kratkih spojeva rezultirali su razvojem sistema za detekciju kratkih spojeva. Autori ovog rješenja su fokus stavili na detekciju kratkog spoja i upozoravanje rukovaoca zvučnim signalom [62], [64]. Zbog čega ovakav sistem sam nije dovoljan da riješi problem, već je potrebno sveobuhvatnije rješenje, biće objašnjeno u nastavku poglavlja.

4.1. Princip rada sistema

U radovima [62] i [64] autori su predstavili prototip *IoT* sistema za detekciju kratkih spojeva u DC motorima pogona dizanja na bageru EKG-15. U nastavku je ukratko izložen koncept sistema i glavni zaključci iz dva navedena istraživanja.

Osnovna funkcija pomenutog sistema je mjerenje struje motora i reagovanje na pojavu kratkog spoja emitovanjem zvučnog signala. U svrhu mjerenja struje opterećenja, proizvođač je u rotorsko kolo oba DC motora ugradio po jedan otpornik (šant) otpornosti $34,1 \mu\Omega$. Jedan takav otpornik nalazi se i u rotorskom kolu DC generatora kojim se napajaju motori pogona dizanja. Kada kroz šant protiče struja kratkog spoja (2.200 A), napon na njemu iznosi 75 mV.

U prvobitnoj verziji sistema [64] mjereni su naponski signali sa šantova u DC motorima i dovođeni na ulaze mikrokontrolera. Iz praktičnih razloga, u modifikovanoj verziji [62] autori su se odlučili za praćenje napona na šantu u kolu generatora. Taj naponski signal predstavlja ulazni parametar sistema.

Prije nego što se ovaj signal dovede na ulaz mikrokontrolera, on prolazi kroz kolo za obradu signala, kako bi ga mikrokontroler mogao pravilno interpretirati. U trenutku pojave kratkog spoja, tj. kada se na ulazu mikrokontrolera pojavi napon koji odgovara definisanoj graničnoj vrijednosti, mikrokontroler započinje mjerenje vremena.

Ako stanje kratkog spoja traje duže od tri sekunde, sistem aktivira zvučni signal u upravljačkoj kabini, čime se rukovalac upozorava da su motori pogona dizanja u režimu kratkog spoja. Istovremeno, sistem bilježi da je došlo do kratkog spoja i nastavlja da mjeri njegovo trajanje. Od tog trenutka, rukovalac na raspolaganju ima još šest sekundi da motor izvede iz ovog režima (npr. puštanjem komandne palice ili oslobađanjem zaglavljene korpe). Ukoliko se to ne učini u predviđenom vremenskom okviru, postoji značajan rizik od trajnog oštećenja motora usled dugotrajnog preopterećenja.

Da bi se dobila kompletna slika o kratkim spojevima, sistem skladišti relevantne podatke o kratkim spojevima na memorijskoj kartici, a pored toga vrši i slanje tih podataka na *cloud* platformu putem mobilne mreže. Na taj način službi održavanja se omogućava uvid u rad rukovalaca i detaljnija analiza uticaja preopterećenja na bager.

Testiranje sistema pokazalo je smanjenje broja kratkih spojeva za oko 60%. Takođe, uočeno je skraćanje trajanja kratkih spojeva, pri čemu je u 80% slučajeva trajanje iznosilo manje od pet sekundi [62], [64].

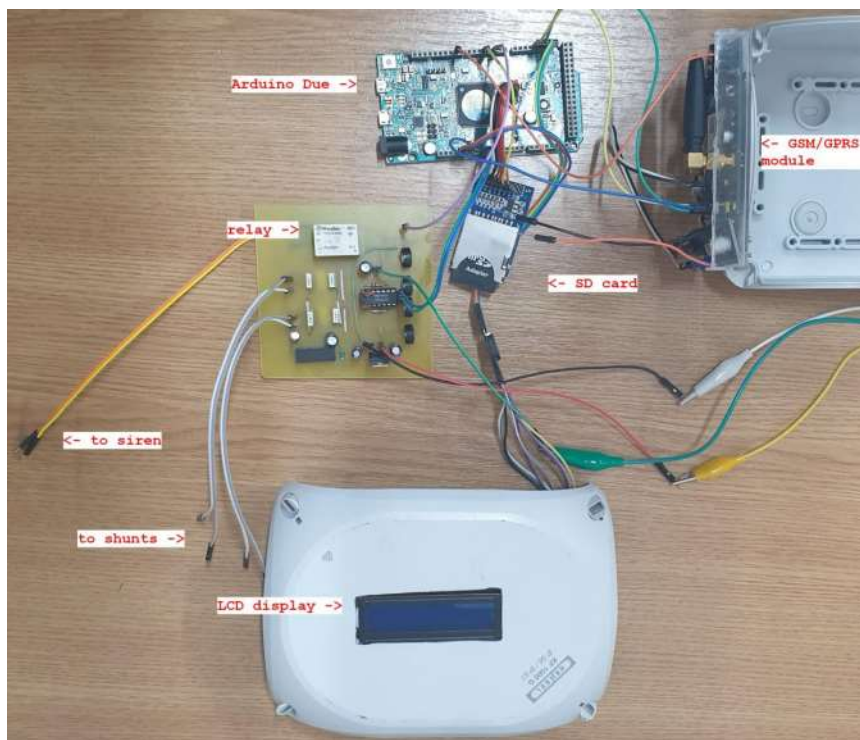
4.2. Arhitektura sistema

Centralna komponenta sistema je mikrokontroler *Arduino Due*. Na jedan od njegovih analognih ulaza dovodi se naponski signal sa šanta, koji prethodno prolazi kroz posebno projektovano kolo za obradu signala, u kojem se transformiše u oblik pogodan za očitavanje od strane mikrokontrolera. Kolo za obradu naponskog signala sa šanta ima višestruku ulogu - vrši galvansko razdvajanje šanta od ostatka sistema, pojačava signal sa šanta i prilagođava izlazni signal opsegu od 0 do 3,3 V. Važno je naglasiti da napon na šantu mijenja polaritet u zavisnosti od smjera rotacije motora. S obzirom na to da mikrokontroler nije u mogućnosti da očitava negativne vrijednosti napona, ovaj aspekt je takođe uzet u obzir prilikom projektovanja kola za obradu signala.

Sistem je opremljen modulima koji su kompatibilni sa navedenim mikrokontrolerom i omogućavaju mu izvršavanje određenih operacija. Komunikacioni GSM/GPRS modul *SIM808* šalje podatke o detektovanim kratkim spojevima na *cloud* platformu putem mobilne GPRS mreže. Iako je područje površinskog kopa „Potrlica“ pokriveno mobilnom mrežom, dostupnost mreže nije zagarantovana u svakom trenutku. Kako bi se izbjegao gubitak podataka zbog prekida signala mobilne mreže, autori su iskoristili i *Diligent PmodSD* modul za upisivanje i očitavanje podataka sa memorijske SD kartice. Na taj način se u slučaju neuspješnog slanja podataka na *cloud*, obezbjeđuje čuvanje tih podataka na memorijskoj kartici. Za potrebe analize kratkih spojeva, veoma je važan podatak o tačnom vremenu njihove detekcije. U tu svrhu u sistem je ugrađen i *Real Time Clock (RTC)* modul, koji pruža podatak o vremenu.

Zvučno upozorenje u kabini emituje sirena, čiju aktivaciju vrši relej povezan na izlaz mikrokontrolera. Ako kratak spoj traje tri sekunde ili duže, aktivira se sirena i emituje zvučno koje traje dok god motori rade u režimu kratkog spoja.

Slika 4.2.1 prikazuje prototip sistema za detekciju kratkih spojeva, koji su dizajnirali autori u okviru radova [62] i [64]. Na slici se uočava i LCD displej, čija je uloga prikaz informacija o trenutnom statusu sistema, greškama u radu i sl.



Slika 4.2.1. Prototip IoT sistema za detekciju kratkih spojeva [64].

4.3. Nedostaci sistema

Rezultati testiranja prototipa sistema za detekciju kratkih spojeva pokazuju značajan iskorak u rješavanju dugogodišnjeg problema kompanije RUPV. Ipak, predloženo rješenje ima određenih nedostataka, pa se može reći da samo djelimično rješava problem. To je stav i samih autora sistema, koji ističu izostanak aktivnosti u pogledu spriječavanja kratkih spojeva, te navode da je najveći prostor za nadogradnju upravo na tom polju [62].

Postojeći sistem alarmira rukovaoca tri sekunde nakon pojave kratkog spoja, to znači da rukovocu ostaje još šest sekundi za reakciju. Za tih šest sekundi rukovalac može pokušati da savlada otpor koji blokira korpu angažovanjem maksimalne snage, zadržavajući motore pogona dizanja u režimu kratkog spoja. Druga opcija je puštanje palice, što dovodi do zaustavljanja pogona i pada struje motora na nulu. Nakon toga rukovalac može pokušati da zauzme položaj korpe koji će manje opteretiti pogonske motore. U teoriji, ove dvije varijante reakcija na kratak spoj bi trebalo da spriječe oštećenja motora, ili da tu mogućnost svedu na najmanju moguću mjeru.

Međutim, u praksi je situacija značajno drugačija zbog mnoštva faktora koji u prethodnom teorijskom razmatranju nisu uzeti u obzir. Na prvom mjestu, rukovalac nema

informaciju o protoku vremena i mora da se osloni na sopstvenu procjenu. Tako se može dogoditi da rukovalac u dužem periodu pravi kratka prekoračenja dozvoljenih 9 sekundi, što dovodi do postepenog slabljenja komponenti motora (najčešće četkica i komutatora). Predloženi sistem ni na koji način ne predviđa ovakve situacije, što znači da rukovalac nema informaciju o eventualnom prekoračenju dozvoljenog vremena.

Sa aspekta brzine donošenja odluke, interval od šest sekundi za određene rukovaoca, a naročito one sa manje iskustva, može biti nedovoljan. Ovo ne samo da može rezultirati odlukom koja šteti mašini, već na duži period može smanjiti i efikasnost rukovaoca.

Još jedan problematičan faktor je nedostatak vizuelne signalizacije koja bi upozorila rukovaoca da su motori u kratkom spoju. Iako se na komandnom panelu (poglavlje 2.3) nalazi analogni ampermetar koji pokazuje trenutnu vrijednost struje motora, njegova pozicija (bočno od rukovaoca) je takva da rukovalac ne može istovremeno posmatrati korpu i očitavanje ampermetra. Očitavanje dodatno otežava i dizajn samog ampermetra, što se uočava na slici 4.3.1 koja prikazuje ampermetar pogona dizanja. Primjećuje se da su cifre i podioci na skali veoma teško uočljivi zbog malih dimenzija instrumenta i prašine koja je praktično neizbježna prilikom rada u rudniku. Svjetlosna refleksija na plastičnom prozirnrom oklopu ampermetra dodatno otežava očitavanje. Autori predloženog prototipa nisu išli u pravcu kreiranja vizuelne signalizacije koja bi bila dopuna zvučnoj signalizaciji, što ostavlja dodatni prostor za poboljšanja signalizacije kratkog spoja.



Slika 4.3.1. Ampermetar pogona dizanja (označen crvenom bojom).

Uzevši u obzir sve navedene faktore, može se zaključiti da i ljudski faktor predstavlja jedan od značajnih uzroka pojave kratkih spojeva. Bilo da se radi o nedostatku iskustva rukovaoca ili o trenutnoj pogrešnoj procjeni, na samom početku lanca događaja koji dovode

do oštećenja motora često se nalazi upravo čovjek, tj. rukovalac. Jedan od osnovnih ciljeva sistema koji će biti detaljno opisan u narednim poglavljima jeste da minimizira uticaj subjektivnih grešaka, odnosno nedostatka vještina i iskustva rukovaoca, na pojavu oštećenja izazvanih kratkim spojevima u motorima bagera EKG-15.

5. PREDLOG IOT SISTEMA ZA SPRIJEČAVANJE KRATKIH SPOJEVA

Sistem iz naslova ovog poglavlja najjednostavnije se može definisati kao automatizovani IoT sistem za zaštitu DC motora od posledica rada u režimu kratkog spoja. Drugim riječima, sistem spriječava oštećenja DC motora usled preopterećenja. Prilikom izrade ovog rješenja djelovanje je usmjereno na ispunjenje ciljeva i kriterijuma koji podrazumijevaju izradu funkcionalnog uređaja, uz što manje troškove (engl. *low-cost*), koji ne remeti rad ostalih sistema i ne mijenja strukturu upravljačkih algoritama implementiranih u kontrolerima bagera. Takođe, ovakvo rješenje ne nosi rizik po rukovaoca i osoblje koje opslužuje mašinu. Predloženi sistem može se posmatrati kao udruženo djelovanje pet podsistema:

- podsistem za upravljanje (mikrokontroler);
- podsistem za mjerenje struje motora;
- podsistem za signalizaciju kratkog spoja;
- podsistem za automatsku zaštitu motora;
- podsistem za komunikaciju i skladištenje podataka.

Prije nego što se pređe na analizu navedenih podsistema, biće opisan sistem kao cjelina, njegov način rada i arhitektura.

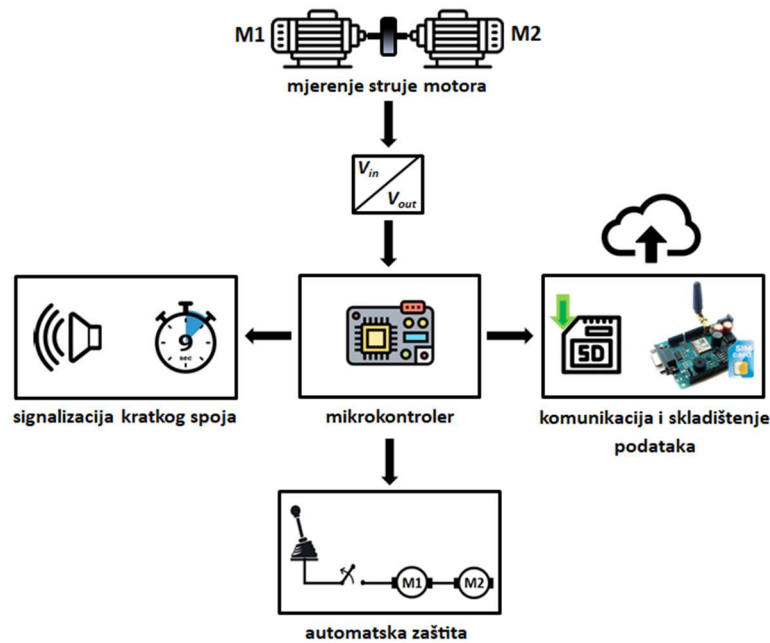
5.1. Način rada i arhitektura sistema

Osnovni zadatak sistema je kontinuiran monitoring vrijednosti električne struje kroz motore pogona dizanja. Imajući u vidu da je struja motora reda hiljada ampera (ampermetri na bageru su baždareni za opseg od -3 do +3 kA), jasno je da se vrijednost struje kroz namotaje motora ne može mjeriti direktno. Predznaci „+” i „-” odnose se na smjer rotacije osovine motora (dizanje/spuštanje). Kako bi se došlo do podatka o vrijednosti ove struje, koristi se naponski signal sa otpornika koji je vezan redno sa rotorskim kolima oba motora pogona dizanja (tzv. šant). Vrijednost naponskog signala sa šanta je reda nekoliko desetina mV. Detaljno objašnjenje načina mjerenja ovog signala biće dato u potpoglavlju koje slijedi.

Pomenuti signal dovodi se na ulaz mikrokontrolera, koji vrši njegovo očitavanje i shodno upravljačkom algoritmu vrši određene akcije. Pa tako u slučaju detektovanja struje kratkog spoja (2.200 A), mikrokontroler počinje da mjeri vrijeme proticanja ove struje.

Istovremeno sa detekcijom kratkog spoja, mikrokontroler šalje podatak o trajanju kratkog spoja (u sekundama) na sedmosegmentni displej koji je pozicioniran naspram rukovaoca, tako da ovaj u svakom trenutku zna koliko dugo se pogon nalazi u režimu kratkog spoja, a da pritom ne mora da skreće pogled sa korpe za utovar. Osim vizuelne informacije o trajanju kratkog spoja, rukovalac dobija i zvučno upozorenje koje se generiše kada motori uđu u režim kratkog spoja. Ako rukovalac ignoriše vizuelnu i zvučnu signalizaciju, nastavljaajući da održava pogon u kritičnom režimu, reagovalac podsistem zaštite i zaustaviće pogon. Do aktiviranja zaštite dolazi kada trajanje kratkog spoja premaši propisanih 9 sekundi. Tada mikrokontroler generiše signal koji simulira vraćanje upravljačke palice u nulti položaj, što dovodi do smanjenja struje pogonskih motora na nulu. Pogon ostaje zaustavljen narednih 10 sekundi, kako bi se snizila temperatura namotaja. Na taj način se eliminiše mogućnost da motori u izuzetno kratkom vremenskom intervalu ponovo uđu u kratak spoj, što bi moglo da dovede do oštećenja namotaja rotora koji su u trenutku reagovanja zaštite zagrijani blizu maksimalne dozvoljene temperature (85°C u odnosu na ambijentalnu temperaturu).

Komunikacioni dio sistema omogućava da se svaki kratak spoj zabilježi, odnosno sačuva i učini dostupnim za kasniju analizu. Ovo se vrši tako što se po okončanju kratkog spoja, podaci o vremenu detekcije i trajanju kratkog spoja putem mobilne mreže šalju na udaljeni server (*cloud*), a istovremeno se skladište i na memorijskoj kartici kako bi se spriječio gubitak podataka u slučaju nesuspješnog slanja na *cloud*. Ovim mehanizmom, zaposlenima u sektoru održavanja omogućava se detaljna analiza kratkih spojeva u motorima pogona dizanja. Time se pruža kompletniji uvid u efikasnost rada rukovalaca i u dinamiku opterećenja pogona bagera. Arhitektura opisanog sistema prikazana je blok šemom na slici 5.1.1.



Slika 5.1.1. Arhitektura IoT sistema za spriječavanje kratkih spojeva.

5.2. Podsystem za upravljanje (mikrokontroler)

Mikrokontroler je centralna komponenta predloženog *IoT* sistema za sprječavanje kratkih spojeva. On diktira rad svih ostalih elemenata sistema, pa će iz tog razloga biti prvi obrađen.

Za potrebe ovog sistema odabrana je mikrokontrolerska platforma *Arduino Mega 2560 Rev3*. U osnovi ove platforme nalazi se mikrokontroler *ATmega2560*, koji radi na frekvenciji od 16 MHz, raspolaže sa 256 KB fleš memorije, 8 KB SRAM i 4 KB EEPROM memorije. Ploča sadrži 54 digitalna ulazno/izlazna pina, od kojih 15 ima mogućnost impulsno širinske modulacije (PWM) i 16 analognih ulaznih pinova. Preporučeni opseg napona napajanja ploče je 7-12 V (DC). Opseg radne temperature mikrokontrolera se kreće od -40 do 85°C. Programiranje mikrokontrolera vrši se u Arduino IDE razvojnom okruženju [65].

Digitalni pinovi na ulazu mogu da detektuju dva naponska stanja – nisko (0 V) i visoko (5 V). Ako je digitalni pin konfigurisan kao izlazni, generisaće takođe dva naponska stanja 0 V ili 5 V. Digitalni pinovi sa mogućnošću impulsno širinske modulacije (PWM) na izlazu mogu generisati 256 različitih naponskih stanja iz opsega 0-5 V.

Analogni pinovi rade samo kao ulazni, i imaju mogućnost očitavanja naponskog signala iz opsega 0-5 V, sa rezolucijom 10 bita, što znači da mogu registrovati 1024 različita naponska nivoa.

Opisani mikrokontroler posjeduje performanse koje zadovoljavaju zahtjeve predloženog *IoT* sistema. Ono što dodatno preporučuje ovu platformu za upotrebu u navedene svrhe, jeste njena kompatibilnost sa različitim modulima, koji se najčešće koriste u *IoT* sistemima (bežična komunikacija, skladištenje podataka, mjerenje vremena i sl.). Takođe, sama platforma uz pomenute module je relativno lako dostupna na tržištu po pristupačnim cijenama.

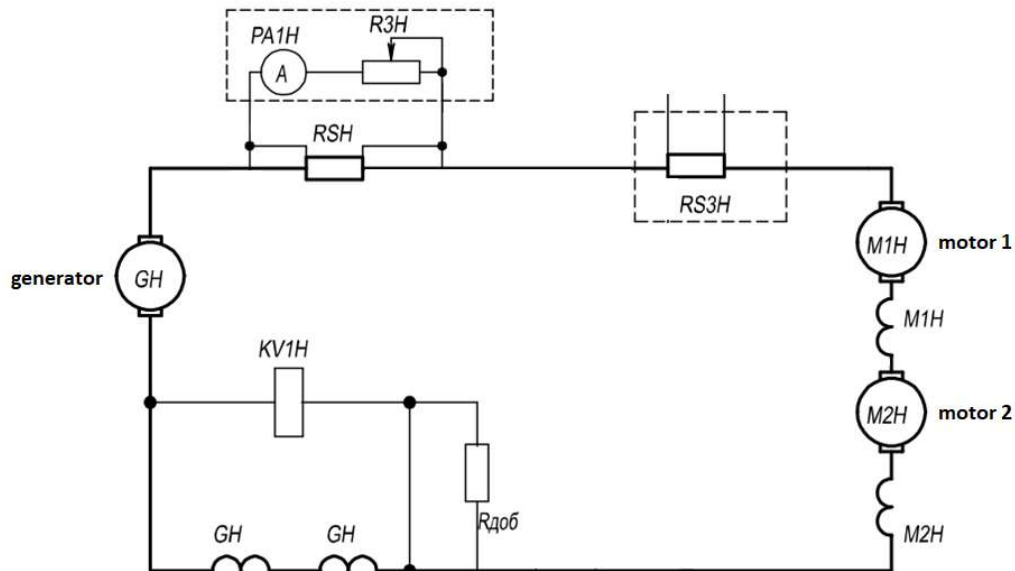
Na slici 5.2.1 prikazana je mikrokontrolerska ploča *Arduino Mega 2560 Rev3*, koja je korišćena u razvoju prototipa predloženog sistema.



Slika 5.2.1. Mikrokontrolerska ploča *Arduino Mega 2560 Rev3*.

5.3. Podsystem za mjerenje struje armature motora

Podsjećanja radi, pogon dizanja čine dva redno vezana DC motora snage po 500 kW, čije osovine su mehanički spregnute reduktorom koji se nalazi između njih. Napajanje motora vrši DC generator sa nezavisnom pobudom snage 1.000 kW, čiji nominalni napon na krajevima iznosi 900 V. Slika 5.3.1. prikazuje električnu šemu dijela pogona dizanja. Otpornici *RSH* i *RS3H* su tzv. šantovi, koji su redno vezani između generatora i motora. Oni imaju ključnu ulogu u mjerenju struje motora. Kroz njih protiče struja koju generator isporučuje motorima. Njihova otpornost mora da bude praktično zanemarljiva u odnosu na otpornost ostatka kola, kako ne bi doveli do značajnijeg pada napona na krajevima generatora i dodatnih Džulovih gubitaka u kolu. U slučaju bagera EKG-15, njihova otpornost iznosi $34,1 \mu\Omega$, a pad napona pri proticanju struje generatora je reda mV.

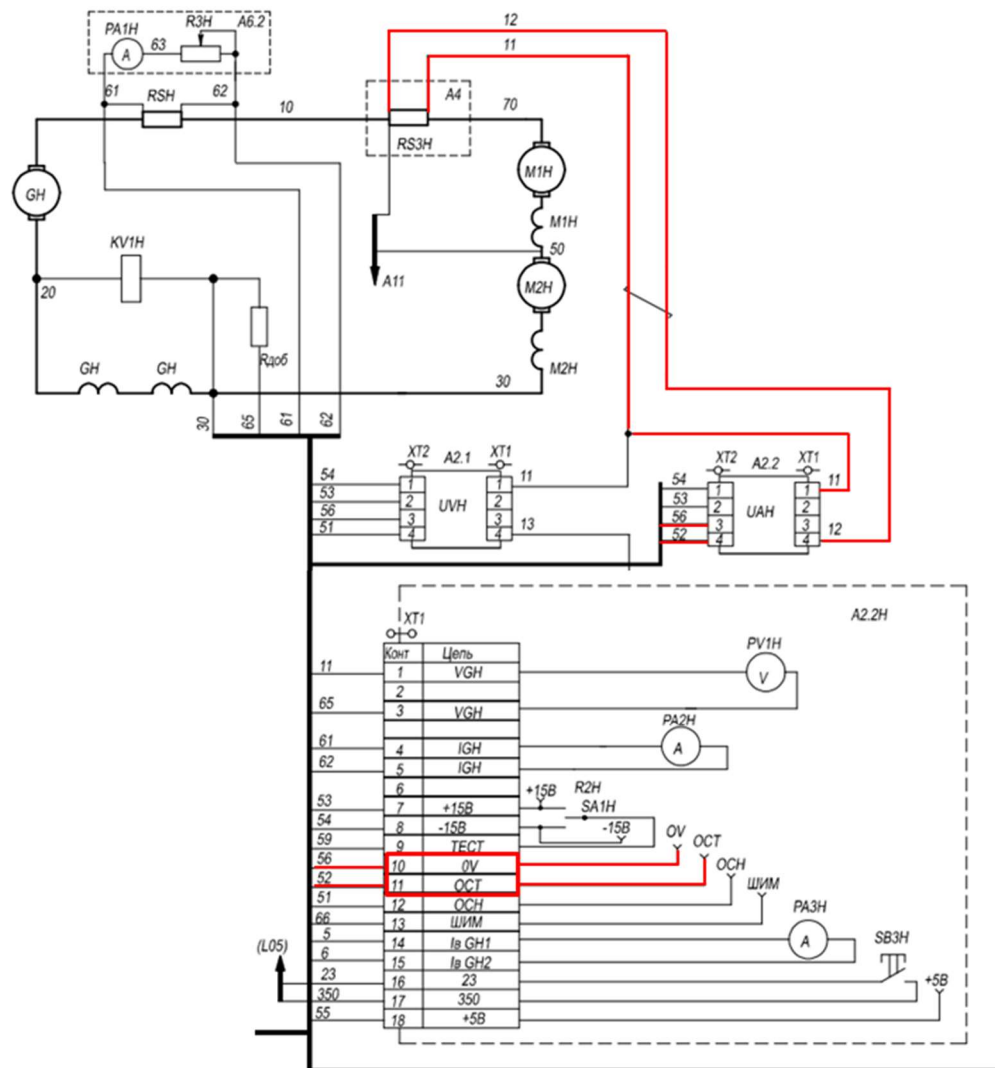


Slika 5.3.1. Električna šema dijela pogona dizanja.

5.3.1. Analiza signala sa šant otpornika

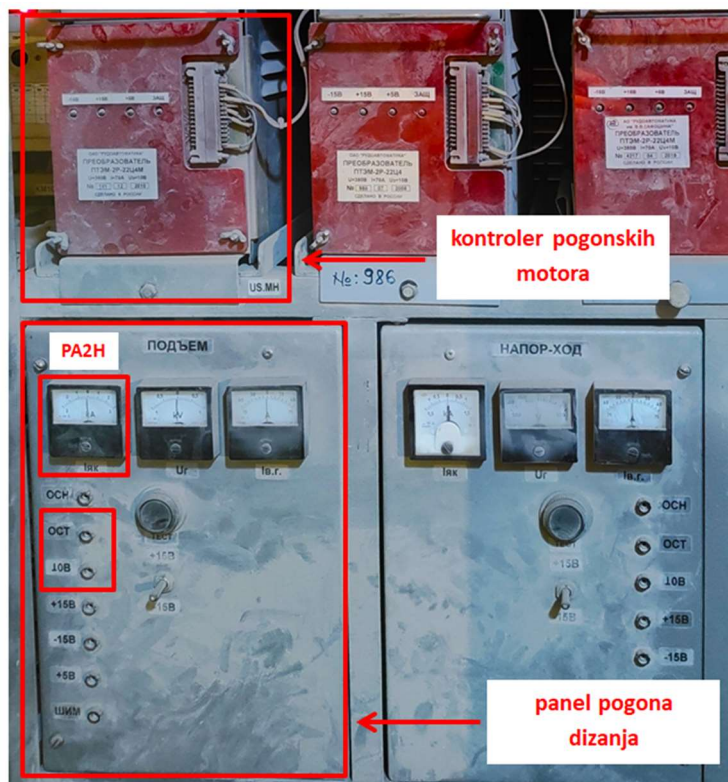
Na slici 5.3.1.1 prikazana je detaljnija šema pogona dizanja [66], koja se nalazi u dokumentaciji proizvođača, a autoru je ustupljena od strane zaposlenih u službi održavanja RUPV-a. Ova šema prikazuje kontroler pogona dizanja (*A2.2H*), kao i ulazne i izlazne signale kontrolera. Naponski signal sa krajeva šanta *RSH* (61, 62) dovodi se do ampermetra u upravljačkoj kabini (*PA1H*), gdje se pomoću potencijometra *R3H* vrši kalibracija ampermetra kako bi prikazivao realnu vrijednost struje u opsegu od -3 do +3 kA. Ovaj signal (61, 62) se dovodi i na ulaze 4 i 5 kontrolera, a na izlaznim pinovima (*IGH*, *IGH*) sa ampermetra *PA2H*

očitava se vrijednost struje generatora. Ampermetar *PA2H* montiran je na spoljnoj strani kontrolera pogona dizanja. Predmetni podsistem za mjerenje struje motora koristi signal sa šanta *RS3H*. Naponski signal (11, 12) sa ovog šanta se dovodi na ulaz senzora *UAH* koji vrši indirektno mjerenje jačine električne struje. U uputstvu za upotrebu bagera EKG-15 [60] se navodi da strujni senzor *UAH* na ulazu dobija naponski signal sa šanta *RS3H* u opsegu od -75 do +75 mV, a na izlazu generiše napon proporcionalan ulaznom. Napon od ± 75 mV odgovara vrijednosti struje kroz motore ± 3 kA. Struji motora u režimu kratkog spoja (rus. стопорный ток генераторов) vrijednosti ± 2.200 A, odgovara napon na šantu koji iznosi ± 55 mV. Senzor vrši pojačavanje ulaznog napona i galvansko razdvajanje ulaznog od izlaznog signala pomoću optoizolatora. Na izlazu iz senzora dobija se pojačan naponski signal (52, 56) u opsegu od -10 do +10 V. Ovaj signal dovodi se na ulaze 10 i 11 kontrolera, i prenosi se na izlazne pinove označene sa *OV* i *OCT*. Navedeni signali obilježeni su na šemi crvenom bojom.



Slika 5.3.1.1. Električna šema pogona dizanja sa označenim signalima od interesa.

U nastavku je prikazana slika 5.3.1.2 na kojoj se nalaze kontroler i panel pogona dizanja, sa označenim izlaznim pinovima $0V$ i OCT , koji su izvedeni tako da se na njih mogu priključiti različiti mjerni instrumenti. Na slici je takođe označen ampermetar $PA2H$, koji prikazuje struju generatora, tj. struju kroz pogonske motore.



Slika 5.3.1.2. Kontroler pogona dizanja.

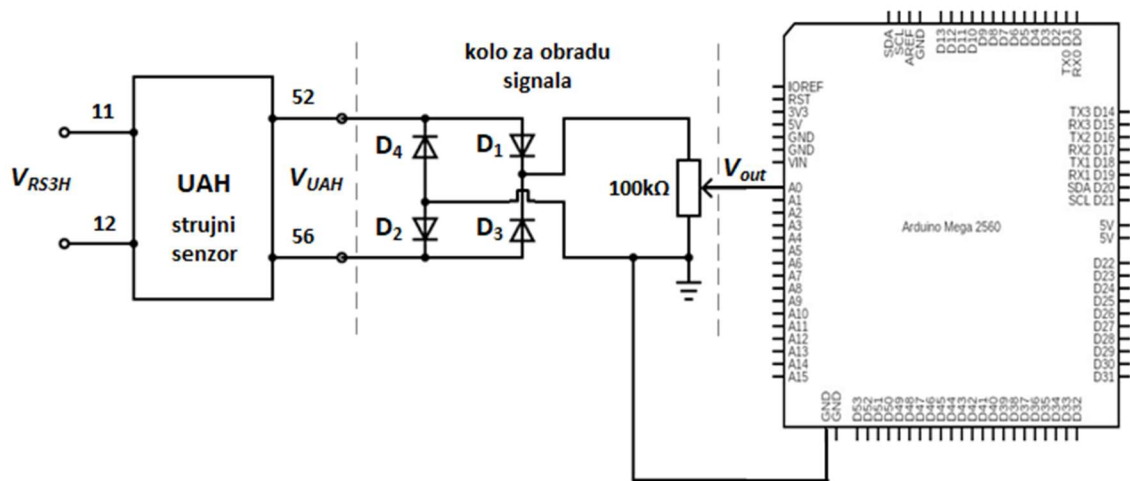
5.3.2. Obrada signala sa šanta i dovođenje na ulaz mikrokontrolera

U prethodnom potpoglavlju detaljno je analiziran signal sa šant otpornika $RS3H$. Prikazan je put naponskog signala od otpornika do kontrolera pogona dizanja. Funkcija podsistema za mjerenje struje motora je prilagođavanje ovog signala u oblik koji može očitati mikrokontroler.

Mikrokontroler *Arduino Mega 2560 Rev3*, na svojim analognim ulazima može očitavati napon iz opsega od 0 do 5 V. Budući da strujni senzor UAH na svom izlazu daje napon koji se kreće u opsegu od -10 do +10 V, potrebno je izvršiti pretvaranje ovog signala u oblik koji prepoznaje mikrokontroler. Prvi izazov je promjenjiv polaritet napona u zavisnosti od smjera okretanja osovine motora. Ovaj problem riješen je upotrebom ispravljačkih dioda u Grecovom spoju. Na taj način postiže se konstantan polaritet napona na analognom ulazu mikrokontrolera. Treba napomenuti da ovo rješenje ne ugoržava efikasnost rada sistema, jer za

sistem nije značajan podatak o smjeru struje kroz motore. Drugi izazov je vrijednost napona koja izlazi iz opsega od 0 do 5 V. Upotrebom potencijometra je izvršeno proporcionalno umanjenje ulaznog signala, tako da odgovara traženom opsegu. Na taj način, punom izlaznom opsegu senzora od ± 10 V odgovara maksimalnih 5 V na analognom ulazu mikrokontrolera.

Međutim, od posebnog interesa za predloženi sistem je naponski signal koji senzor *UAH* daje u režimu kratkog spoja. Tada na ulaznim pinovima senzora *UAH* vrijednost napona iznosi ± 55 mV (napon sa šanta *RS3H*), a na izlaznim pinovima senzora napon iznosi $\pm 7,33$ V. Nakon obrade u gore opisanom kolu, naponu od 7,33 V odgovara napon koji iznosi 3 V na izlazu kola. Prostije rečeno, u režimu kratkog spoja (struja motora 2.200 A) na analognom ulazu mikrokontrolera javlja se napon od 3 V. Šematski prikaz opisanog kola za obradu signala prikazan je na slici 5.3.2.1. Naponi V_{RS3H} , V_{UAH} i V_{out} odnose se na napon šanta *RS3H*, napon na izlazu iz strujnog senzora *UAH* i napon na izlazu iz kola za obradu signala respektivno. Radi preglednosti, ulazni (11, 12) i izlazni (52, 56) pinovi senzora označeni su kao na šemi sa slike 5.3.1.1.



Slika 5.3.2.1. Šema podsistema za mjerenje struje motora.

Posmatranjem kola za obradu signala može se postaviti pitanje svrsishodnosti primjene diodnog mosta u ovoj situaciji. Ovo pitanje se nameće zbog činjenice da dioda provodi kada je na nju doveden direktni napon, koji je jednak naponu praga diode. Napon praga (V_D) kod ispravljačkih dioda obično iznosi oko 0,7 V. Budući da u datom kolu, zavisno od polariteta V_{UAH} , provode parovi dioda D_1D_2 ili D_3D_4 , to znači da do provođenja dolazi pri $V_{UAH} \geq 2V_D$. Iz ovog se uočava da će izlazni napon kola (V_{out}) biti jednak nuli sve dok je apsolutna vrijednost ulaznog napona kola (V_{UAH}) manja od 1,4 V. Jednostavnije rečeno, sistem ne „vidi” struje koje na izlazu iz senzora *UAH* stvaraju napone čije se vrijednosti nalaze u opsegu od -1,4 do 0 V, ili opsegu od 0 do +1,4 V.

Kod senzora *UAH* zavisnost između ulaznog i izlaznog signala je linearna, pa se na osnovu toga lako može odrediti struja motora koja odgovara naponu od $\pm 1,4$ V na izlazu senzora *UAH*. Do nepoznate vrijednosti struje (I_x) dolazi se iz relacije (5.3.2.1) na osnovu poznatog odnosa struje motora i napona na izlazu senzora koji odgovara toj struji:

$$\frac{10V}{1,4V} = \frac{3000A}{I_x} \rightarrow I_x = 420A \quad (5.3.2.1)$$

Dobijena vrijednost predstavlja minimalnu vrijednost struje koju podsistem za detekciju kratkog spoja može da registruje. Ova struja je gotovo tri puta manja od nominalne struje motora (1.210 A) i preko pet puta manja od struje kratkog spoja (2.200 A).

Na osnovu navedenog može se zaključiti da opseg struja koje sistem ne može registrovati ni na koji način ne umanjuje preciznost, niti pouzdanost sistema, budući da je primarna uloga sistema detekcija struje kratkog spoja. Sa aspekta termičkih procesa u motoru, struje iz opsega od 0 do 420 A ne mogu dovesti do kritičnog zargijavanja mašine i posledičnog oštećenja budući da su im vrijednosti višestruko niže od nominalne.

Glavni segment podsistema je kolo za obradu signala sa strujnog senzora. Pri njegovom kreiranju težilo se što većoj jednostavnosti konstrukcije i izboru lako dostupnih komponenata sa pristupačnom cijenom, a uz to dovoljno pouzdanih i otpornih na uslove koji vladaju u bageru. Precizni potenciometar omogućava podešavanje izlaznog napona kola, što funkcioniše kao kalibracija sistema, a ujedno ostavlja mogućnost prilagođavanja opsega signala u slučaju primjene mikrokontrolera sa drugačijim karakteristikama ulaza.

5.4. Podsistem za signalizaciju kratkog spoja

Uloga podsistema za signalizaciju kratkog spoja je pružanje vizuelne i zvučne informacije o nastalom kratkom spoju u motorima pogona dizanja. Podsistem se sastoji od dva elementa: sedmosegmentnog displeja i sirene.

Sedmosegmentni displej dimenzija $12,2 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$ će biti smješten u upravljačkoj kabini naspram rukovaoca. Funkcija ovog displeja je prikaz trajanja režima kratkog spoja u realnom vremenu. Ova funkcionalnost omogućava rukovaocu bliži uvid u trenutno stanje, odnosno opterećenje pogona, a samim tim i veću sigurnost u upravljanju bagerom. Veoma važan faktor kod montiranja ovakvog vizuelnog indikatora je njegovo pozicioniranje u vidnom polju rukovaoca, budući da je tokom upravljanja njegova pažnja dominantno usmjerena na korpu za utovar i mjesto iskopavanja. Na ovaj način se umnogome kompenzuju manjkavosti dizajna i pozicije ampermetra za prikaz struje pogonskih motora. Podsjećanja radi, ampermetar pogona dizanja se nalazi sa desne bočne strane rukovaoca.

U kabini je smještena i sirena za emitovanje zvučnog upozorenja u momentu kada sistem detektuje kratak spoj. Oglašavanje sirene traje sve do prestanka kratkog spoja, ili isteka 9 sekundi kada reaguje automatska zaštita. Način emitovanja i trajanje zvučnog upozorenja može se prilagoditi zahtjevima rukovalaca.

5.5. Podsystem za automatsku zaštitu motora

Funkcija ovog podsistema je limitiranje trajanja kratkog spoja na maksimalno dozvoljenih 9 sekundi. To se postiže generisanjem signala koji simulira vraćanje upravljačke palice u neutralni položaj, što dovodi do zaustavljanja motora pogona dizanja. Na taj način spriječavaju se oštećenja motora usled dugotrajnih preopterećenja.

Prilikom kreiranja podsistema automatske zaštite težilo se da se modifikacije postojećeg sistema upravljanja svedu na minimum. Glavni razlog za to je činjenica da isključivo proizvođač može da vrši izmjene koje se tiču upravljačkog algoritma i komponenata sistema upravljanja. U protivnom, proizvođač ne može garantovati ispravan i pouzdan rad mašine. Sa druge strane, rješavanje problema kratkih spojeva podrazumijeva kreiranje posebnog sistema zaštite koji se kao nadogradnja implementira na postojeći sistem upravljanja pogonom. Kao što je to čest slučaj u inženjerskoj praksi, napravljen je kompromis između dva suprotstavljena zahtjeva - potrebe za dodatnom zaštitom i ograničenja u pogledu modifikacija sistema upravljanja.

Prije detaljnije analize podsistema za automatsku zaštitu, biće opisan sistem upravljanja pogonom dizanja.

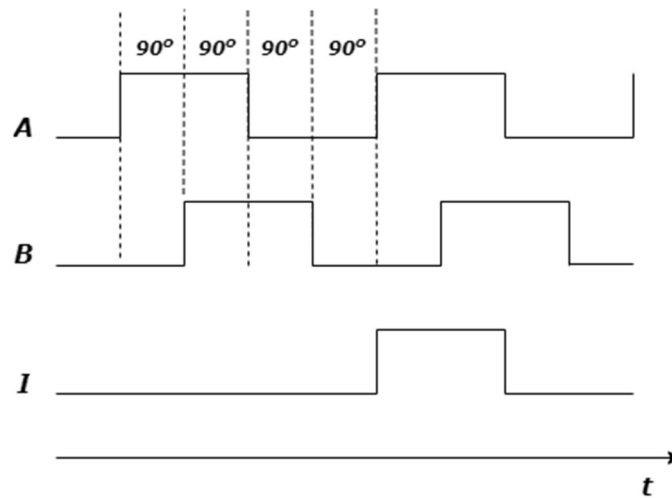
5.5.1. Sistem upravljanja pogonom dizanja

Iako se, spolja gledano, upravljanje pogonom dizanja svodi na pomjeranje upravljačke palice naprijed-nazad, u pozadini se odvijaju izuzetno složeni procesi između upravljačkih elemenata sistema.

Unutar desnog upravljačkog panela na kojem je smještena palica, nalazi se inkrementalni enkoder, koji je povezan sa palicom i služi za određivanje njenog položaja. Od položaja palice zavisi nivo snage pogona, odnosno brzina i moment motora. Shodno poziciji palice, kontroler pobude generatora vrši podešavanje vrijednosti pobudne struje generatora. Na taj način reguliše se napon na krajevima generatora, što u konačnom reguliše brzinu pogonskih motora. Povećavanjem pobudne struje generatora, povećava se napon na njegovim krajevima, a time i brzina motora (i obratno). Ovakva regulacija se primjenjuje za brzine od nulte do nominalne, dok se za brzine iznad nominalne vrši regulacija struje pobude pogonskih motora

(Vard Leonardov sistem), za šta je zadužen kontroler pobude motora. Smanjenjem pobudne struje motora, povećava se brzina motora, dok se povećanjem pobudne struje brzina motora smanjuje. Dovođenjem palice u nulti položaj motori se zaustavljaju. Pomjeranjem palice unaprijed vrši se spuštanje, a pomjeranjem palice unazad podizanje korpe za utovar. Idući od nultog ka dva krajnja položaja snaga motora se povećava, a u krajnjim položajima ima maksimalnu vrijednost.

Pomenuti inkrementalni enkoder na svom izlazu daje tri digitalna signala: A , B i I . Pri pomjeranju diska enkodera generišu se pravougaoni naponski impulsi A i B , koji su fazno pomjereni za 90° . Fazni pomak omogućava određivanje smjera kretanja enkoderskog diska, odnosno upravljačke palice. Ovi signali imaju dva naponska stanja: visoko (5 V) i nisko (0 V). Kada je enkoder zaustavljen, signali A i B imaju konstantne vrijednosti (0 V ili 5 V, zavisno od položaja). Treći signal I često se naziva referentni impuls. Njegova vrijednost iznosi 5 V samo kada je enkoderski disk (upravljačka palica) u nultom položaju, a u svim ostalim pozicijama vrijednost ovog signala je 0 V. Proizvođač u pratećoj dokumentaciji navodi da se ovaj signal može koristiti za resetovanje pozicije palice na nulu [60]. Slika 5.5.1.1 prikazuje izlazne signale iz inkrementalnog enkodera.



Slika 5.5.1.1. Izlazni signali iz inkrementalnog enkodera.

Na slici 5.5.1.2 je data šema dijela sistema upravljanja pogonom dizanja na kojoj su prikazani: desni upravljački panel ($A6.2$), kolo za galvansko odvajanje signala ($A2.1H$) i kontroler pobude generatora ($US.GH$). Unutar upravljačkog panela nalaze se dva inkrementalna enkodera BZH i BZS . Enkoder BZH zadužen je za pogon dizanja, tj. prati položaj palice pri pomjeranju naprijed-nazad, dok enkoder BZS ima ulogu u upravljanju pogonom okretanja i prati položaj palice po pravcu lijevo-desno. Od interesa za dalju analizu je enkoder pogona dizanja BZH .

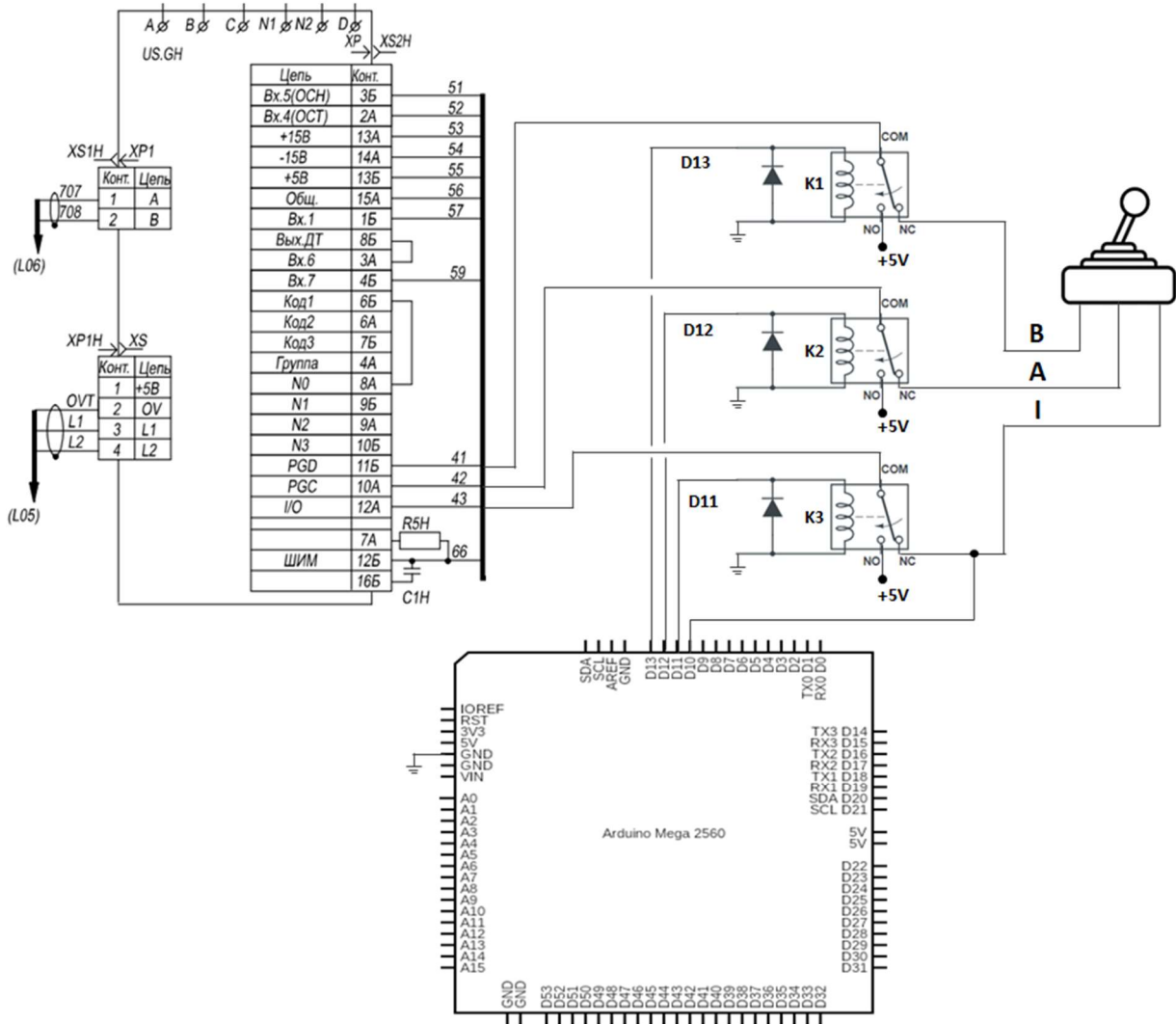
5.5.2. Hardverski dio podsistema za automatsku zaštitu motora

Kako bi se postigao kompromis pomenut u uvodnom dijelu poglavlja, sve modifikacije izvedene su na niskonaponskoj strani sistema, a upravljački algoritam ostao je nepromijenjen. Suštinska promjena u sistemu je promjena ulaznih parametara, tj. digitalnih signala koji se sa upravljačke palice dovode na ulazne pinove *PGD*, *PGC* i *I/O* kontrolera pobude generatora *US.GH*. Do promjene ovih signala dolazi pri prekoračenju maksimalno dozvoljenog trajanja kratkog spoja.

Na slici 5.5.2.1 prikazana je šema upravljanja pogonom dizanja, sa označenim komponentama podsistema za automatsku zaštitu od kratkog spoja. Signali *B* (41), *A* (42), *I* (43) sa palice dovode se na NC kontakte releja *K1*, *K2*, *K3* respektivno. Relejni COM kontakti *K1*, *K2*, *K3* povezani su na ulazne priključke kontrolera pobude *PGD*, *PGC* i *I/O* respektivno. Na NO kontakte sva tri releja sa mikrokontrolera se dovodi napon od 5 V. Referentni signal (*I*) enkodera, dovodi se na digitalni pin *D10* mikrokontrolera, što će biti objašnjeno u nastavku.

Pri normalnom režimu rada bagera, signali sa palice prenose se putem NC kontakata na priključke *PGD*, *PGC* i *I/O*, i tada sistem radi u skladu sa originalnom konfiguracijom. U slučaju kada mikrokontroler detektuje prisustvo kratkog spoja koji traje duže od 9 sekundi, aktiviraju se izlazni pinovi *D11*, *D12* i *D13*, koji šalju kontrolne signale ka relejima. Tada dolazi do otvaranja kontakata releja i prekida prenosa signala sa džojstika, dok se na priključke *PGD*, *PGC* i *I/O* dovodi napon od 5 V. U takvoj konfiguraciji, ako signali *A* i *B* ostanu konstantni, sistem prepoznaje da je enkoder zaustavljen. Ukoliko je istovremeno referentni signal *I* različit od nule, to znači da je enkoder zaustavljen upravo u nultom položaju. Na taj način se simulira puštanje, odnosno vraćanje palice u nulti položaj. U opisanom režimu, kontroler pobude generatora detektuje da se palica nalazi u nultom položaju, čak i kada je rukovalac fizički pomjera ili zadržava u proizvoljnom položaju. Ova funkcionalnost predstavlja dio sistema automatske zaštite, koji ostaje aktivan tokom 10 sekundi. U tom periodu onemogućeno je upravljanje pogonom dizanja, čime se omogućava hlađenje namotaja motora i smanjuje rizik od ponovne pojave kratkog spoja u kratkom vremenskom intervalu.

Na šemi je prikazano da se signal *I* sa enkodera dovodi na digitalni pin *D10* mikrokontrolera, koji je konfigurisan kao ulaz. Nakon isteka 10 sekundi djelovanja automatske zaštite, da bi upravljanje moglo da se nastavi, palica mora biti vraćena u neutralni (nulti) položaj. U suprotnom, upravljanje ostaje onemogućeno. Ovaj uslov je ključan jer zaštita simulira nulti položaj palice, pa kontroler pobude (*US.GH*) zaustavlja motore. Ako bi se nakon prestanka djelovanja zaštite palica zadržala u nekom drugom položaju, kontroler bi taj položaj pogrešno tumačio kao nulti, što može izazvati nepredvidivo i potencijalno opasno kretanje korpe bagera. U tom slučaju je potrebna ponovna kalibracija pozicije palice. Da bi se to spriječilo, stvarna pozicija palice mora biti nulta i usklađena sa signalima sistema zaštite.



Slika 5.5.2.1. Šema podsistema za automatsku zaštitu motora pogona dizanja.

5.5.3. Softverski dio podsistema za automatsku zaštitu motora

Softverski dio podsistema odnosi se na programski kod kreiran u Arduino IDE razvojnom okruženju, a koji se izvršava na mikrokontroleru. Njegova uloga je detekcija kratkog spoja i generisanje kontrolnih signala za upravljanje kontaktima releja, tj. upravljanje signalima za uključenje i isključenje automatske zaštite.

Da bi se kratak spoj detektovao na vrijeme, neophodno je kontinuirano praćenje vrijednosti struje motora. Kao što je objašnjeno u poglavlju 5.3.2, podatak o struji motora mikrokontroler dobija posredno, mjerenjem napona V_{out} na izlazu iz kola za obradu signala sa šanta. Kako bi se uz konstantno mjerenje napona V_{out} obezbijedilo i paralelno izvršavanje ostalih funkcija sistema, korišćen je hardverski interapt (prekid).

Za mjerenje trajanja kratkog spoja upotrijebljen je jedan od šest tajmera koje posjeduje mikrokontroler *Arduino Mega 2560 Rev3*. Na slici 5.5.3.1 dat je programski kod kreiran u Arduino IDE, koji prikazuje naredbe za definisanje promjenjivih, inicijalizaciju tajmera i njegovo povezivanje sa interapt funkcijom (engl. *Interrupt Service Routine-ISR*). Tajmer vrši generisanje prekida u jednakim vremenskim intervalima, u konkretnom slučaju na svakih 100 ms. To znači da se posle svakih 100 ms poziva interapt funkcija koja vrši niz operacija, koje će biti objašnjene u nastavku.

```
#include <TimerOne.h> // Uključenje TimerOne biblioteke
...
const int analogPin = A0; // Pin na koji se dovodi napon iz kola za obradu signala
const float targetVoltage = 3.000; // Napon na pinu A0 pri kratkom spoju
const int analogMax = 1023; // Maksimalna vrijednost analogRead funkcije
const float referenceVoltage = 5.000; // Referentni napon Arduino ploče (5V)

volatile unsigned long startTime = 0; // Detektovan kratak spoj (početak mjerenja)
volatile unsigned long elapsedTime = 0; // Proteklo vrijeme (trajanje kratkog spoja)
volatile bool measuring = false; // Da li se trenutno mjeri vrijeme (da/ne)
...
void setup() {
  Timer1.initialize(100000); // Inicijalizovanje tajmera na interval od 100 ms
  Timer1.attachInterrupt(timerIsr); // Povezivanje interapt funkcije sa tajmerom
  ...
}
```

Slika 5.5.3.1. Dio programskog koda koji vrši definisanje promjenjivih, inicijalizaciju tajmera i povezivanje interapt funkcije sa tajmerom.

Interapt funkcija je karakteristična po tome što nema argumente i ne vraća nikakvu vrijednost, a kreira se van glavne petlje. Zadatak funkcije koja je korišćena u ovom slučaju je mjerenje izlaznog napona V_{out} iz kola za obradu signala sa šanta i mjerenje trajanja kratkog spoja. Mjerenje napona V_{out} vrši se očitavanjem signala sa analognog pina A0, i to na svakih 100 ms.

Ukoliko se detektuje kritična vrijednost napona V_{out} , koja iznosi 3 V i odgovara struji kratkog spoja, sistem započinje mjerenje vremena. Kada vrijednost signala padne ispod kritične vrijednosti, mjerenje se zaustavlja. Kritičnu vrijednost napona moguće je precizno podešavati potenciometrom u kolu za obradu signala i na taj način obezbijediti što precizniji odziv sistema na pojavu kratkog spoja. Realizacija interapt funkcije prikazana je u kodu na slici 5.5.3.2.

```
void timerIsr() {
  int sensorValue = analogRead(analogPin); // Očitavanje signala
  float voltage = (sensorValue / (float)analogMax) * referenceVoltage; //Konverzija-[V]

  // Detekcija kratkog spoja: napon na ulaznom pinu je dostigao kritičnu vrijednost
  if (voltage >= targetVoltage && !measuring) {
    startTime = millis(); // Započinje se mjerenje vremena
    measuring = true; // Indikator - mjerenje u toku
    measurementFinished = false; // Postavljanje indikatora za završetak mjerenja
  }

  // Prestanak mjerenja: vrijednost signala je niža od granične vrijednosti
  if (measuring && (voltage < targetVoltage)) {
    measuring = false; // Indikator - mjerenje završeno
    measurementFinished = true; // Postavljanje indikatora za završetak mjerenja
  }}
```

Slika 5.5.3.2. Dio programskog koda koji prikazuje interapt funkciju.

Proračun trajanja kratkog spoja vrši se u glavnoj petlji, a taj podatak se koristi za vizuelnu signalizaciju i reagovanje automatske zaštite. Na slici 5.5.3.3 prikazan je dio koda koji vrši proračun trajanja kratkog spoja.

```
void loop() {
  ...
  if (measuring) {
    unsigned long currentTime = millis();
    elapsedTime = (currentTime - startTime) / 1000; // Trajanje kratkog spoja [s]
  }
  ...
}
```

Slika 5.5.3.3. Dio programskog koda koji izračunava trajanje kratkog spoja.

Pored navedenih funkcija, program za upravljanje sistemom automatske zaštite vrši i upravljanje relejima na koje se dovode signali sa inkrementalnog enkodera upravljačke palice, kako je to objašnjeno u prethodnom potpoglavlju.

Kod na slici 5.5.3.4 prikazuje realizaciju funkcije za upravljanje relejima, kao i njeno pozivanje u glavnoj petlji. Takođe su prikazani i uslovi za aktiviranje, odnosno deaktiviranje zaštitnih releja. Za aktivaciju zaštite neophodno je da trajanje kratkog spoja pređe dozvoljenu granicu od 9 sekundi. Sa druge strane, za deaktivaciju zaštite moraju biti zadovoljena dva uslova: prvi uslov je da aktivnost zaštite traje minimum 10 sekundi, a drugi uslov podrazumijeva da palica mora biti vraćena u neutralni položaj, što se detektuje mjerenjem I signala enkodera, koji u nultom položaju palice ima vrijednost 5 V. Ako bilo koji od dva uslova nije zadovoljen, pogon dizanja ostaje zaustavljen, a upravljanje je onemogućeno.

```
// Funkcija za aktiviranje releja (zaštite)
void SafetyRelaysON() {
  if (!relayActive) {
    digitalWrite(relay1, HIGH); // Aktiviranje releja 1
    digitalWrite(relay2, HIGH); // Aktiviranje releja 2
    digitalWrite(relay3, HIGH); // Aktiviranje releja 3
    relayStartTime = millis(); // Trenutak aktiviranja releja
    relayActive = true; // Postavljanje indikatora aktivnosti releja na "true"
  }

  // Glavna petlja
  void loop() {
    ...
    if (elapsedTime <= 9) {
      displayDigit(elapsedTime); // Prikazivanje trenutnog broja proteklih sekundi
    } else {
      SafetyRelaysON(); // Aktiviranje releja (zaštite)
      resetDisplay = true; // Postavljanje indikatora za reset 7-segmentnog displeja
      ...
    }

    if (relayActive) {
      displayMinus(); // Dok je zaštita aktivna, na 7-segmentnom displeju prikazan "-"
      if (millis() - relayStartTime >= 10000 && digitalRead(inputPin) == HIGH) {
        SafetyRelaysOFF(); // Deaktiviranje releja (zaštite)
        relayActive = false; // Resetovanje indikatora stanja releja
        resetDisplay = true; // Resetovanje prikaza na 7-segmentnom displeju
      }
    }
  }
}
```

Slika 5.5.3.4. Dio programskog koda koji vrši upravljanje zaštitnim relejima.

5.6. Podsystem za komunikaciju i skladištenje podataka

Nakon što svi prethodno opisani podsystemi obave svoje zadatke, kao poslednji u nizu na red dolazi podsystem za komunikaciju i skladištenje podataka. Zadatak ovog podsystema je evidentiranje svakog kratkog spoja, njegovog trajanja i vremena kada se dogodio. Ovi podaci skladište se na memorijskoj kartici i na *cloud* platformi ThingSpeak, koja omogućava njihovo skladištenje, vizuelizaciju i analizu u realnom vremenu [67].

5.6.1. Hardverski dio podsystema za komunikaciju i skladištenje podataka

Za slanje podataka na platformu ThingSpeak korišćen je komunikacioni modul *SIM900*, koji omogućava bežično povezivanje putem GSM i GPRS standarda. Zahvaljujući ovim mogućnostima, *SIM900* je pogodan za primjenu u IoT uređajima, gdje se zahtijeva prenos podataka na daljinu. Modul omogućava pristup internetu, slanje i prijem SMS poruka, kao i uspostavljanje glasovnih poziva. Napajanje modula je eksterno: 12 V, 1 A (DC).

Komunikacija sa mikrokontrolerom ostvaruje se preko UART interfejsa (RX i TX pinovi), koristeći AT komande za konfiguraciju i upravljanje funkcijama modula. Na slici 5.6.1.1 je prikazan modul *SIM900* koji je korišćen u izradi prototipa sistema.



Slika 5.6.1.1. Komunikacioni modul SIM900.

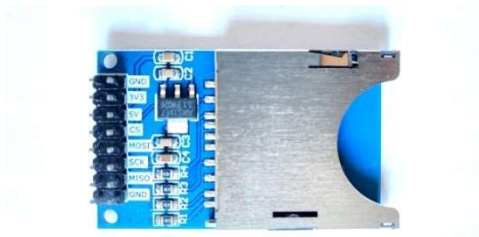
Kako bi se obezbijedio podatak o tačnom vremenu pojave kratkog spoja korišćen je modul *MH-Real Time Clock Modules 2 (RTC)*. *RTC* modul daje podatak o trenutnom vremenu i datumu u 12-časovnom ili 24-časovnom formatu. Modul ima mogućnost dvostrukog napajanja (sa mikrokontrolera i sa baterije), tako da i u slučaju prekida u radu mikrokontrolera nastavlja da funkcioniše. Korišćeni *RTC* modul je prikazan na slici 5.6.1.2.



Slika 5.6.1.2. *RTC* modul (*MH-Real Time Clock Modules 2*).

Uzimajući u obzir da se komunikacija sistema sa *cloud*-om ostvaruje putem mobilne mreže, moguće je da smetnje ili prekidi u mreži utiču na kvalitet komunikacije, što može dovesti do gubitka podataka o kratkim spojevima. Da bi se spriječio gubitak podataka usled neuspjelog slanja na *cloud*, u sistem je integrisan modul za memorijsku karticu *MH-SD Card Module*.

Podaci o svakom kratkom spoju upisuju se u tekstualni fajl na memorijskoj kartici, i na taj način ostaju dostupni za kasniju analizu. Za izradu prototipa sistema korišćena je SD kartica kapaciteta 8 GB. Taj memorijski prostor dovoljan je da uskladišti podatke o približno 140 miliona kratkih spojeva. Ako bi se svakog dana u godini skladištili podaci o 4000 kratkih spojeva, bilo bi potrebno oko 100 godina da se popuni sav memorijski prostor SD kartice. Opisani modul prikazan je na slici 5.6.1.3.



Slika 5.6.1.3. Modul za memorijsku karticu (MH-SD Card Module).

Upravljanje opisanim modulima i njihova integracija u sistem biće detaljnije objašnjeni u narednom potpoglavlju koje se bavi programskim kodom.

5.6.2. Softverski dio podsistema za komunikaciju i skladištenje podataka

Uloga navedenih hardverskih komponenti jasnije se sagledava kroz programski kod kojim su definisane njihove funkcije. Kod prikazan na slici 5.6.2.1 sadrži komande za uspostavljanje veze sa ThingSpeak platformom, pomoću GPRS modula *SIM900*.

```
// Niz AT komandi koje se izvršavaju pri uspostavljanju veze sa ThingSpeak platformom
struct ATCommand {
    const char* command;
    unsigned long interval; };
ATCommand atCommands[] = {
    {"AT", 200}, // Provjera komunikacije sa modulom
    {"AT+CPIN?", 200}, // Provjera pin koda SIM kartice
    {"AT+CREG?", 200}, // Provjera statusa registracije na mrežu
    {"AT+CGATT?", 200}, // Provjera povezanosti GPRS-a
    {"AT+CIPSHUT", 500}, // Reset IP sesije
    {"AT+CIPSTATUS", 500}, // Očitavanje statusa veze
    {"AT+CIPMUX=0", 200}, // Postavljanje režima jedne veze
    {"AT+CSTT="internet","\gprs","\gprs\"", 1000}, // APN podešavanja
    {"AT+CIICR", 2000}, // Uspostavljanje bežične mreže
    {"AT+CIFSR", 1000}, // Dobijanje lokalne IP adrese
    {"AT+CIPSPRT=0", 500}, // Prompt režim
    {"AT+CIPSTART="TCP","\api.thingSpeak.com","\80\"", 3000}, // Uspostavljanje veze
    {"AT+CIPSEND", 1000}, // Slanje na udaljeni server
    {"", 2000},
    {(char*)26, 2000}, // Kraj poruke
    {"AT+CIPSHUT", 200} }; Zatvaranje konekcije
```

Slika 5.6.2.1. Dio programskog koda za uspostavljanje veze sa cloud-om.

Podaci su na ThingSpeak platformi predstavljeni u formi grafikona, gdje je na horizontalnoj osi prikazano vrijeme pojave kratkog spoja, a na vertikalnoj trajanje kratkog spoja u sekundama. U poglavlju koje analizira prototip biće prikazana pomenuta vizuelizacija.

Slanje podataka o trajanju kratkog spoja vrši se setom komandi koje se nalaze u kodu na slici 5.6.2.2. Uočava se da postoje dva slučaja, prvi kada kratak spoj traje 9 sekundi ili kraće, i drugi kada trajanje premaši 9 sekundi. U prvom slučaju na *cloud* se šalje podatak o trajanju kratkog spoja, tj. broj sekundi (1-9), dok se u drugom slučaju šalje broj 10, koji označava reagovanje zaštite. Ova varijanta označavanja aktiviranja zaštite usvojena je zbog nemogućnosti platforme ThingSpeak da na istom grafikonu prikaže numeričke i tekstualne podatke. Za upisivanje i čitanje podataka sa ThingSpeak platforme potrebno je imati jedinstveni indentifikator, tzv. API ključ (engl. *API key*), koji omogućava serveru da prepozna korisnika ili aplikaciju koja traži pristup određenom segmentu platforme.

```
void sendATCommands() {
  if (shouldSendData) { // Provjera uslova za slanje podataka
    if (currentStep < 13) {
      gprsSerial.println(atCommands[currentStep].command);

    } else if (currentStep == 13) {
      String str;
      if (elapsedTime > 9) { // Trajanje kratkog spoja > 9 sekundi-aktivirana zaštita
        str = "GET https://api.thingspeak.com/update?api_key=GFBVJTPH1KBNSTF&field1=10";

      } else { // Trajanje kratkog spoja < 9 sekundi
        str = "GET https://api.thingspeak.com/update?api_key=GFBVJTPH1KBNSTF&field1=" +
          String(elapsedTime);}
    }
  }
}
```

Slika 5.6.2.2. Dio programskog koda za slanje podataka na *cloud*.

Kako bi se smanjio rizik od gubitka podataka u slučaju neuspjelog slanja na *cloud*, podaci o kratkom spoju se uporedo skladište i na memorijskoj kartici. Tako da, ukoliko dođe do problema sa signalom mobilne mreže i podaci ne budu poslani na *cloud*, oni neće biti izgubljeni, jer ostaju sačuvani na memorijskoj kartici. Podaci se na memorijskoj kartici čuvaju u vidu tekstualnog fajla koji sadrži podatke o kratkom spoju u formatu: datum, vrijeme i trajanje kratkog spoja. Vrijeme i datum se očitavaju sa *RTC* modula.

Ovakav vid dvostrukog skladištenja podataka obezbjeđuje veću pouzdanost sistema i omogućava dva načina za pristup i analizu podataka. Prvi način skladištenja podataka je pogodniji za udaljeno praćenje (engl. *remote monitoring*) rada pogona u realnom vremenu, a naročito kada je neophodan brz pristup podacima. Sa druge strane, skladištenje podataka na SD kartici omogućava jednostavno pristupanje podacima na terenu, u samom bageru. Tada je za očitavanje podataka neophodno posjedovati laptop računar sa čitačem SD kartica.

Na slici 5.6.2.3 nalazi se kod koji vrši upisivanje podataka o kratkim spojevima u tekstualni fajl pod imenom „EKG15_kratki_spojevi.txt” na SD kartici. Svaki zapis o kratkom spoju sadrži tri parametra: datum i vrijeme nastanka kratkog spoja i njegovo trajanje. Datum se zapisuje u formatu „dd.mm.gggg.”, vrijeme u formatu „hh:mm:ss”, dok se trajanje kratkog spoja prikazuje u sekundama.

```
File dataFile = SD.open("EKG15_kratki_spojevi.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
// Upis datuma i vremena u formatu: dd.mm.yyyy. hh:mm:ss
char dateTimeBuffer[20];
sprintf(dateTimeBuffer, "%02d.%02d.%04d. %02d:%02d:%02d",
now.Day(), now.Month(), now.Year(),
now.Hour(), now.Minute(), now.Second());
dataFile.print(dateTimeBuffer); // Upisivanje datuma i vremena
dataFile.print(" trajanje:");
// Ako je došlo do aktiviranja zaštite, u fajl se upisuje poruka
if (seconds > 9) {
dataFile.println("AKTIVIRANA ZAŠTITA (t>9[s])"); }
else { // U suprotnom upisuje se trajanje kratkog spoja u sekundama
dataFile.print(seconds);
dataFile.println(" [s]"); }
```

Slika 5.6.2.3. Dio programskog koda za upis podataka o kratkim spojevima na SD karticu.

5.7. Implementacija koncepta prediktivnog održavanja

Prema dokumentaciji RUPV-a [68], godišnje se na eksploataciji uglja efektivno radi 270 dana, 15 h dnevno. U istom dokumentu naveden je i podatak o godišnjem broju radnih sati bagera EKG-15, koji iznosi 2050 h. Za svu opremu u površinskom kopu „Potrlica” predviđeno je godišnje preventivno održavanje u trajanju od mjesec dana i tekuće nedeljno održavanje u trajanju od 10 h.

Na osnovu poznavanja specifikacija pogonskih motora i planova održavanja moguće je aproksimirati stanje pojedinih djelova motora (četkice, komutator, namotaji) ili ukazati na potrebu za remontom motora. Nakon određenog perioda korišćenja sistema na bageru, biće moguće napraviti vezu između ukupnog broja i trajanja kratkih spojeva sa stanjem komponenata motora, čime se može povećati tačnost pomenutih aproksimacija.

Poznato je da su četkice najosjetljivija komponenta DC motora, pa će im u ovom dijelu biti posvećena posebna pažnja. U motorima pogona dizanja koriste se elektrografitne četkice tip EG-14 2×(12,5×32×40) sa izolovanim provodnicima, bez indikatora istrošenosti [69], [70].

Uzevši u obzir karakteristike četkica EG-14 2×(12,5×32×40) [70] i smjernice iz [71], očekivani radni vijek četkica na DC motorima bagera EKG-15 može se procijeniti na 4000-5000 radnih časova. Treba naglasiti da radni vijek četkica zavisi od mnoštva faktora kao što su opterećenje motora, brzina motora, vrsta četkica, stanje komutatora, ambijentalni uslovi (prašina, vlažnost, temperatura) itd. [72]. Izlaganje motora ekstremnim radnim uslovima (česta i dugotrajna preopterećenja, rad pri ekstremno niskim ili visokim temperaturama) može značajno skratiti radni vijek četkica i izuzetno otežati planiranje njihove zamjene. Rad sa oštećenim, ili istrošenim četkicama često uzorkuje i oštećenja komutatora, što stvara dodatne

troškove i zastoje u radu. Ono što se može uraditi u pogledu redukovanja broja zastoja i produženja radnog vijeka četkica, a samim tim i motora, jeste kontinuirano praćenje stanja četkica i faktora koji na njih utiču [71].

Predloženi sistem za sprječavanje kratkih spojeva vrši monitoring pogonskih motora i preduzima akcije u trenucima ekstremnih opterećenja. Rezultat tih akcija je ograničavanje trajanja režima kratkog spoja (preopterećenja) na fabrički propisanih 9 sekundi, čime je izvršen značajan uticaj na produženje radnog vijeka četkica. Međutim, težak teren površinskog kopa „Potrlica” čini neizbježnom pojavu preopterećenja motora, a učestalost tih preopterećenja teško predvidljivom. Iako predloženi sistem limitira trajanje kratkih spojeva na propisanu vrijednost, njihova česta pojava i dalje u manjoj mjeri utiče na skraćenje radnog vijeka četkica, zbog pojačanog termičkog i mehaničkog habanja. Eksperimentalno je dokazano da je dominantan faktor u habanju četkica električna struja - njene nagle promjene i visoke vrijednosti usled kojih dolazi do izraženog efekta termičkog habanja zbog porasta Džulovih gubitaka u četkicama [72]-[74]. Opisani efekti naročito su izraženi u režimu kratkog spoja, jer dolazi do naglog porasta električne struje na maksimalnu vrijednost.

Sistem za sprječavanje kratkih spojeva pruža podatke o ukupnom broju i ukupnom trajanju evidentiranih kratkih spojeva, koji se mogu iskoristiti za monitoring i aproksimaciju stanja četkica, u cilju efikasnijeg planiranja njihove zamjene.

Na slici 5.7.1 je prikazan predlog indikatora stanja četkica u motorima pogona dizanja, odnosno preostalog radnog vijeka. Indikator je realizovan u okviru *cloud* platforme ThingSpeak. Aproksimacija je napravljena na osnovu poznatog godišnjeg broja radnih časova bagera (2050 h tokom 270 dana), procijenjenog radnog vijeka četkica (4000-5000 h) i empirijskog podatka o broju kratkih spojeva na dnevnom nivou (u prosjeku oko 40), dobijenog od zaposlenih u sektoru održavanja. Na bazi ovih podataka određen je približan broj kratkih spojeva u toku godine ($270 \times 40 = 10800$) i očekivani radni vijek četkica (2-2,5 godine). Iz navedenog se zaključuje da bi nove četkice trebalo da podnesu između 22000 i 27000 kratkih spojeva.



Slika 5.7.1. Indikator stanja četkica u zavisnosti od ukupnog broja kratkih spojeva.

Podatak o ukupnom trajanju kratkih spojeva zabilježenih u određenom periodu se može iskoristiti kao dodatni pokazatelj stanja četkica u slučajevima kada dinamika pojave kratkih spojeva značajno odstupa od predviđene (npr. stupanje novih rukovalaca u rad). U sklopu tekućeg nedeljnog održavanja, pri pregledu četkica mogla bi se dokumentovati njihova dužina i stanje na displeju koji prikazuje ukupno vrijeme rada u kratkom spoju. Na osnovu tih podataka je moguće napraviti vezu između vremena provedenog u kratkom spoju i nivoa istrošenosti četkica, što bi omogućilo još preciznije planiranje njihove zamjene.

Opravdanost monitoringa ukupnog broja kratkih spojeva i njihovog trajanja potkrijepljena je i činjenicom da je električno habanje četkica u režimu kratkog spoja od tri do pet puta brže nego pri radu u nominalnom režimu. Električno habanje je direktno proporcionalno kvadratu struje kroz četkice: $habanje \sim kI^2$, gdje je k konstanta koja zavisi od karakteristika četkica [75]-[77].

Relacija 5.7.1 određuje odnos habanja četkica u režimu kratkog spoja i u nominalnom režimu za DC motore u bageru EKG-15:

$$\frac{habanje_{ks}}{habanje_n} = \frac{kI_{ks}^2}{kI_n^2} = \frac{(2200A)^2}{(1210A)^2} \approx 1,82^2 \approx 3,31. \quad (5.7.1)$$

Iz navedenog proračuna proizilazi da je u slučaju motora bagera EKG-15 električno habanje četkica u režimu kratkog spoja 3,31 puta brže nego u nominalnom režimu. Imajući u vidu da je efekat habanja kumulativan, jasan je doprinos koji opisani način monitoringa daje produženju radnog vijeka četkica i efikasnosti održavanja motora.

Treba naglasiti da je predloženi monitoring stanja četkica osmišljen kao pomoćno sredstvo, koje treba da olakša predviđanje preostalog radnog vijeka i planiranje zamjene četkica u DC motorima pogona dizanja. Stoga ga ne bi trebalo posmatrati kao zamjenu za redovan preventivni pregled četkica, komutatora i ostalih djelova motora.

6. PROTOTIP SISTEMA

U ovom poglavlju opisan je prototip sistema, sa ciljem demonstracije osnovnih funkcionalnosti predloženog rješenja. Za razliku od prethodnih, ovo poglavlje prezentuje sistem kao cjelinu, prikazuje rezultate simulacije njegovog rada i omogućava analizu performansi sistema, kao i pregled potencijalnih prednosti i ograničenja u njegovom radu.

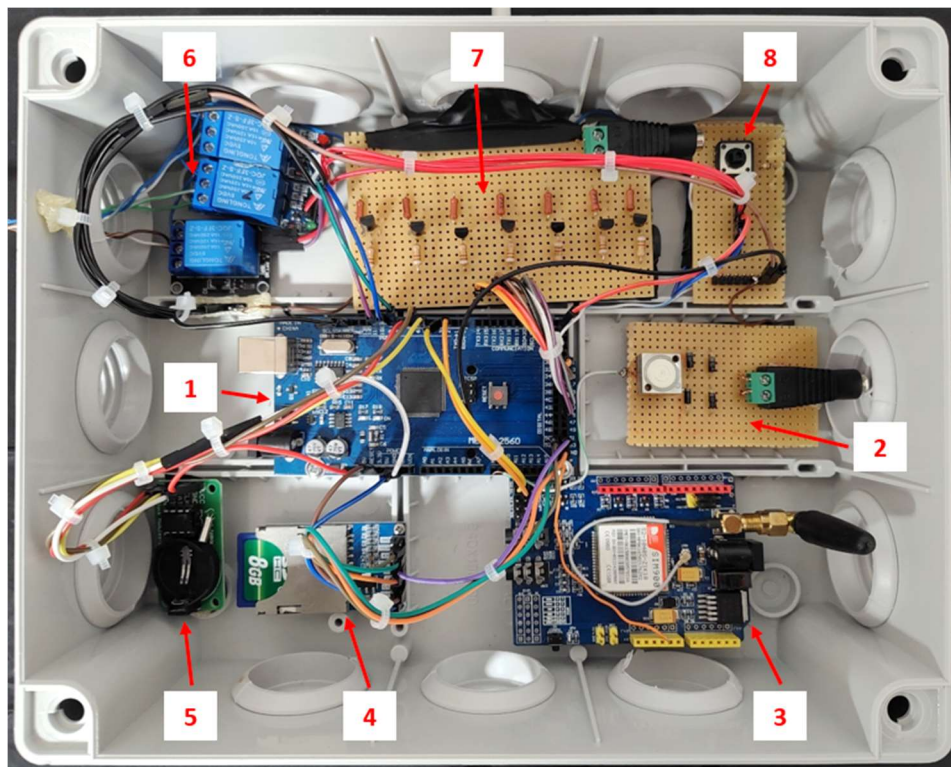
Prototip je testiran u laboratorijskim uslovima, i postigao je željene rezultate koji će biti prezentovani u nastavku ovog poglavlja.

6.1. Hardverska struktura i organizacija prototipa

Sve komponente sistema, izuzev displeja za signalizaciju trajanja kratkog spoja, smještene su unutar razvodne OG kutije sa stepenom zaštite IP55, što je čini pogodnom za upotrebu u industrijskim okruženjima. Kutija se smješta u pogonsku prostoriju bagera, u ormar za upravljanje pogonima, a displej za signalizaciju trajanja kratkog spoja smješta se u upravljačku kabinu.

Na slici 6.1.1 prikazan je prototip sistema sa numerisanim komponentama, koje su navedene u nastavku:

1. Mikrokontroler *Arduino Mega 2560 Rev3*;
2. Kolo za obradu signala sa senzora *UAH*;
3. Modul za SIM karticu *SIM900*;
4. Modul za SD memorijsku karticu;
5. *Real Time Clock (RTC)* modul;
6. Zaštitni releji;
7. Kolo za upravljanje sedmosegmentnim displejom;
8. Testni taster za simuliranje nultog (*I*) signala inkrementalnog enkodera.



Slika 6.1.1. Prototip IoT sistema za sprječavanje kratkih spojeva.

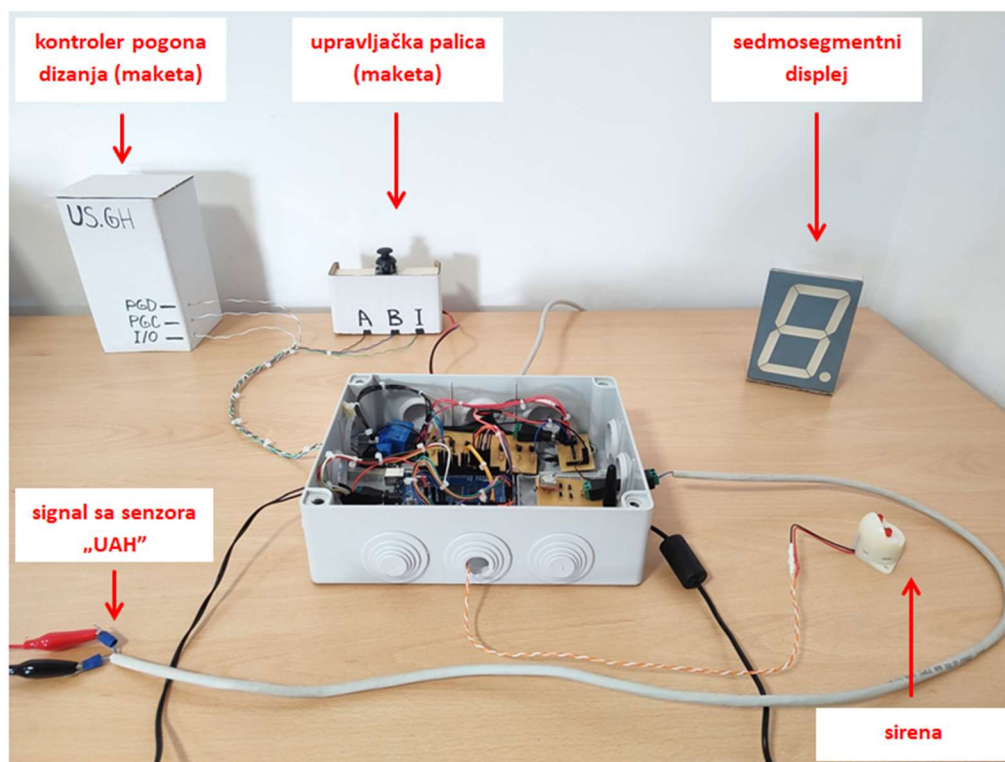
Sedmosegmentni displej dimenzija 12,2 cm × 9 cm za prikaz trajanja kratkog spoja u upravljačkoj kabini prikazan je na slici 6.1.2.



Slika 6.1.2. Sedmosegmentni displej za prikaz trajanja kratkog spoja.

Cjelokupan sistem u uslovima laboratorijskog testiranja prikazan je na slici 6.1.3. Kontroler pogona dizanja *US.GH* i upravljačka palica predstavljeni su uprošćenim maketama, kako bi se stekao jasniji uvid u rad sistema i međusobnu povezanost svih elemenata.

Laboratorijskim napajanjem AX-3005DBL-3 generiše se signal u opsegu od -10 V do +10 V, što odgovara izlaznom signalu *UAH* senzora, koji mjeri struju generatora pogona dizanja.



Slika 6.1.3. Prikaz prototipa u laboratorijskim uslovima.

6.2. Testiranje prototipa

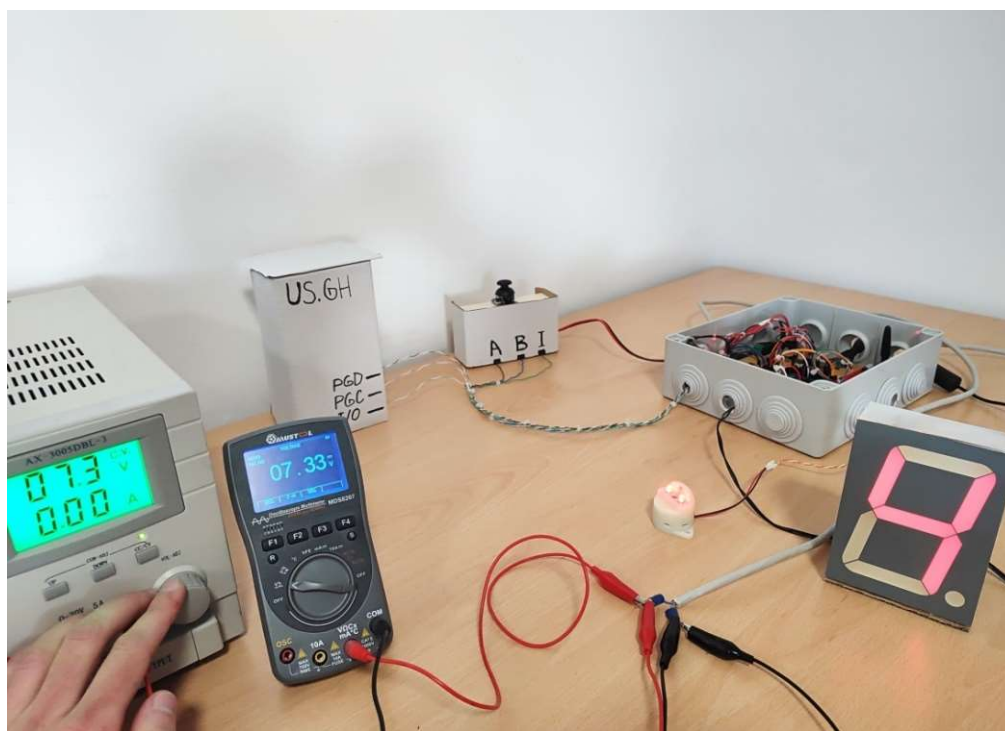
Glavni ulazni parametar sistema za spriječavanje kratkih spojeva je struja kroz motore pogona dizanja, koju mjeri senzor *UAH* i predstavlja kao naponski signal. Rad senzora *UAH* simuliran je korišćenjem laboratorijskog napajanja AXIOMET AX-3005DBL-3, a signal se dovodi na ulaz kola za obradu signala, čiji je rad detaljno opisan u poglavlju 5.3.2.

Pomoću izuzetno preciznog višekružnog potencijometra SP5-2 otpornosti 100 k Ω podešava se izlazni signal kola za obradu signala, pri čemu se vodi računa da ne pređe maksimalnu dozvoljenu vrijednost od 5 V na analognom pinu mikrokontrolera. Kada struja dostigne vrijednost kratkog spoja od 2.200 A, izlazni napon senzora *UAH* iznosi 7,33 V. U tom slučaju, izlazni napon kola za obradu signala iznosi 3 V, čime sistem detektuje kratki spoj i počinje da mjeri njegovo trajanje. Ova informacija se zatim prikazuje na sedmosegmentnom displeju smještenom u upravljačkoj kabini.

Slika 6.2.1 prikazuje reakciju sistema na pojavu kratkog spoja, odnosno njegovo

ponašanje pri dostizanju kritične vrijednosti napona od 7,33 V. Motori su tokom rada izloženi različitim opterećenjima, pri čemu vrijednost struje armature varira u rasponu 0-2.200 A. Strujni senzor *UAH* na osnovu te struje generiše proporcionalan izlazni napon u rasponu 0-7,33 V, tako da maksimalnoj struji (struji kratkog spoja) od 2.200 A odgovara napon senzora od 7,33 V. Pošto se napon sa senzora dovodi direktno do kola za obradu signala, laboratorijsko napajanje se može iskoristiti kao zamjena, tj. ekvivalent dijela sistema koji čine DC motori, šant i senzor *UAH*.

Simulacija rada sistema izvedena je pomoću laboratorijskog napajanja, promjenom izlaznog napona u opsegu 0–7,33 V, čime je oponašan rad motora pri promjenjivom opterećenju. Posebna pažnja posvećena je ponašanju sistema pri dostizanju kritične vrijednosti napona (7,33 V), jer u tom trenutku započinje mjerenje vremena i oglašavanje sirene, što je prikazano na slici 6.2.1. Promjena smjera rotacije osovine motora simulirana je zamjenom položaja priključaka na izlaznim terminalima napajanja, čime se mijenja polaritet napona na ulazu kola za obradu signala.



Slika 6.2.1. Testiranje prototipa - reakcija na kratak spoj.

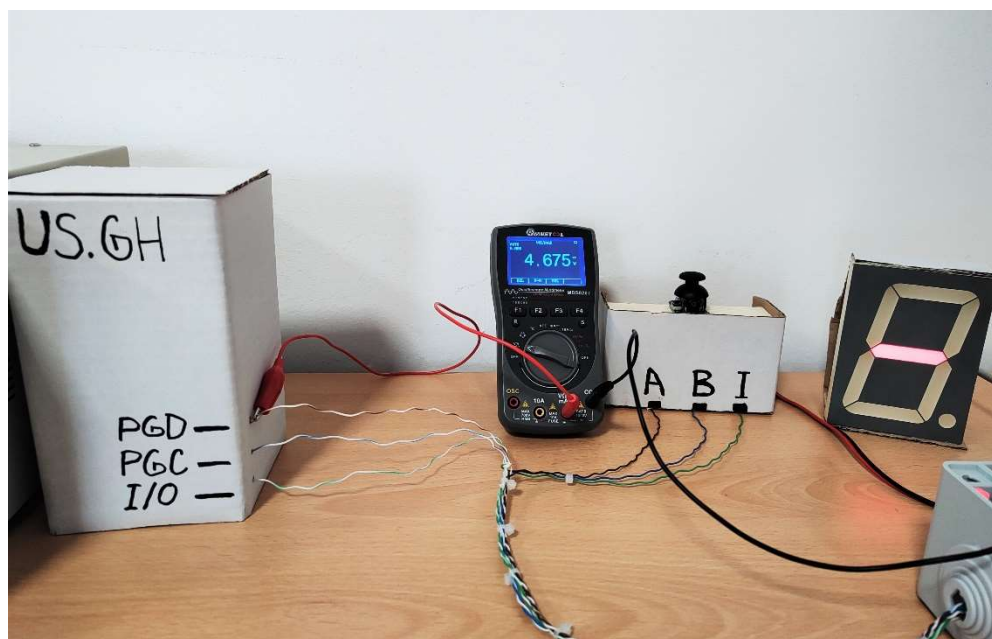
Kada trajanje kratkog spoja premaši 9 sekundi dolazi do aktiviranja podsistema zaštite, odnosno zaštitnih releja koji upućuju naponske signale od 5 V na ulazne pinove *PGD*, *PGC* i *I/O* kontrolera pobude generatora (*US.GH*). Na osnovu ove kombinacije ulaznih signala, kontroler zaključuje da je upravljačka palica vraćena u nulti položaj.

Prisustvo napona od 5 V na ulazima *PGD* i *PGC* signalizira kontroleru da je enkoderski disk zaustavljen, dok signal istog napona na ulazu *I/O* označava da se enkoder nalazi u referentnoj (nultoj) poziciji. Budući da su generator i motori pogona dizanja dio ranije objašnjenog Vard Leonardovog sistema, to znači da se regulacijom pobude generatora upravlja naponom armature pogonskih motora.

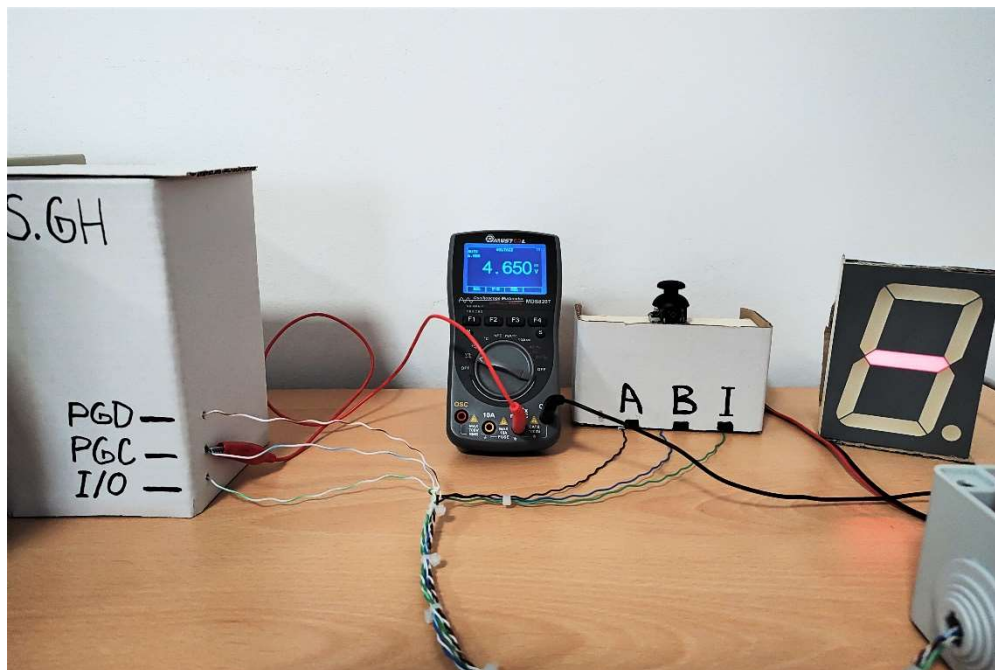
Aktiviranjem zaštite, kontroler *US.GH* smanjuje pobudnu struju generatora na nulu, čime se napon na njegovim krajevima takođe svodi na nulu. Posledično dolazi do smanjenja napona i struje armature oba motora na nultu vrijednost, što rezultira njihovim zaustavljanjem. Djelovanje zaštite traje 10 sekundi, nakon čega se kontroleru ponovo omogućava prijem signala sa upravljačke palice, a rukovaocu se omogućava da nastavi upravljanje.

Na slikama 6.2.2a, 6.2.2b i 6.2.2c prikazana je simulacija rada automatske zaštite. Prikazani su naponski signali koje sistem šalje na ulazne pinove *PGD* (slika 6.2.2a), *PGC* (slika 6.2.2b) i *I/O* (slika 6.2.2c), a njihove vrijednosti su vidljive na ekranu mjernog instrumenta.

Uočava se da je vrijednost ovih signala nešto niža od 5 V, što je rezultat tehničkih ograničenja mikrokontrolera i naponskih padova usled napajanja modula kao što su *RTC* i *SD* modul. Ipak, ovakvo odstupanje ne utiče na rad kontrolera *US.GH*, budući da se signal od 4,7 V, shodno standardima TTL logike (engl. *Transistor-Transistor Logic*), i dalje tumači kao logička jedinica. Simbol „-“ na sedmosegmentnom displeju signalizira rukovaocu da je zaštita aktivirana i da je upravljanje privremeno onemogućeno.



Slika 6.2.2a. Signal automatske zaštite na ulazu *PGD*.



Slika 6.2.2b. Signal automatske zaštite na ulazu PGC.



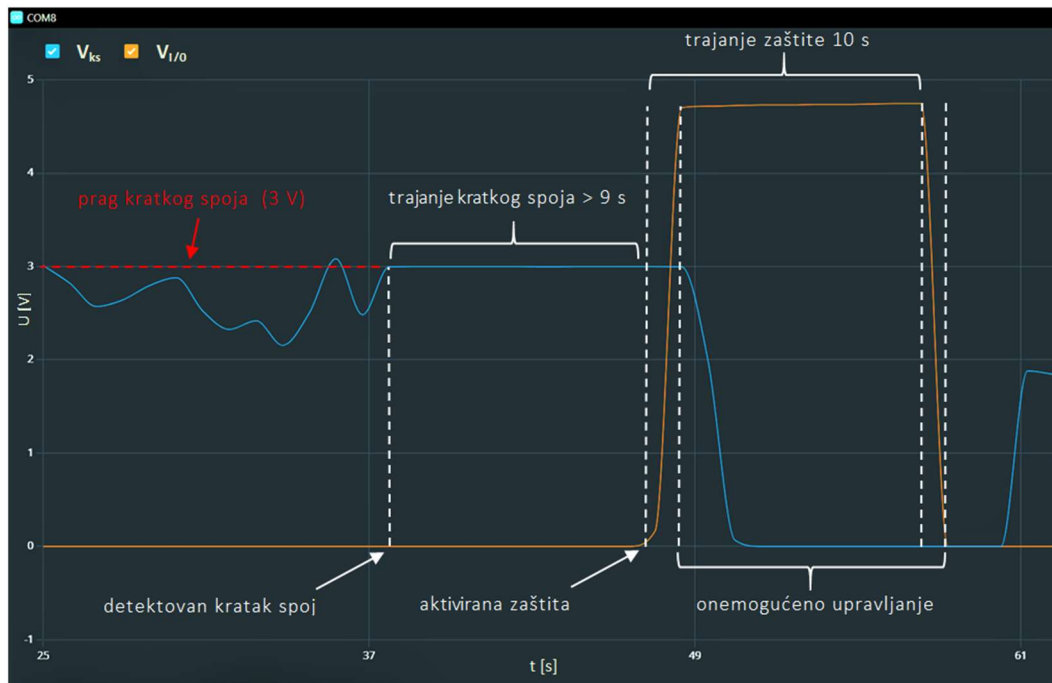
Slika 6.2.2c. Signal automatske zaštite na ulazu I/O.

Na slici 6.2.3 prikazan je vremenski dijagram simulacije signala u slučaju aktiviranja zaštite usled prekoračenja maksimalno dozvoljenog trajanja kratkog spoja. Signali su prikazani korišćenjem *Serial Plotter*-a iz *Arduino IDE* razvojnog okruženja. Plavom bojom je prikazan napon V_{ks} , koji se iz kola za obradu signala dovodi na ulaz mikrokontrolera i koristi

se za detekciju kratkog spoja. Žutom bojom je prikazan signal zaštite $V_{I/O}$, koji se dovodi na ulaz I/O kontrolera pobude $US.GH$. Radi preglednosti, signali sa ulaza PGD i PGC nisu prikazani, budući da imaju isti oblik i generišu se istovremeno sa $V_{I/O}$.

U prvoj trećini grafika signal V_{ks} se kreće u rasponu 2-3 V, što odgovara normalnom radu motora sa promjenjivim opterećenjem. U određenom trenutku napon prelazi 3 V (prag kratkog spoja), međutim zaštita se ne aktivira jer je trajanje kratkog spoja kraće od 9 sekundi. Posle nekog vremena signal ponovo dostiže prag kratkog spoja, ali ovog puta trajanje kratkog spoja prelazi 9 sekundi čime se ispunjava uslov za aktiviranje zaštite. Aktivacijom releja signal od 5 V se dovodi na ulaze PGD , PGC i I/O kontrolera pobude $US.GH$. Na grafiku se uočava pad napona V_{ks} na nulu nakon aktiviranja signala zaštite $V_{I/O}$, što odgovara zaustavljanju motora i nultoj struji armature, kao i nultom naponu na šantu. Zaštita ostaje aktivna 10 sekundi ($V_{ks} = 0$ V, $V_{I/O} \approx 5$ V), nakon čega se rukovaocu vraća mogućnost upravljanja.

Treba napomenuti da je opisani grafik rezultat laboratorijske simulacije rada sistema, pri čemu su zaustavljanje motora i pad napona na šantu na nultu vrijednost simulirani isključenjem napona laboratorijskog napajanja uz pomoć releja koji se aktivira signalom zaštite $V_{I/O}$. S tim u vezi, treba istaći da se ne može sa sigurnošću tvrditi da pojedini segmenti grafika, kao što su kašnjenja odziva i prelazni procesi, u potpunosti oslikavaju ponašanje sistema u realnim uslovima.



Slika 6.2.3. Djelovanje zaštite-prikaz napona kratkog spoja i signala zaštite I/O .

6.3. Prikaz podataka o kratkim spojevima

U okviru prethodnog poglavlja objašnjen je način skladištenja podataka na memorijsku karticu i *cloud* platformu ThingSpeak. U nastavku će biti prikazana vizuelizacija prikupljenih podataka o kratkim spojevima.

6.3.1. Prikaz podataka na *cloud* platformi ThingSpeak

ThingSpeak je *IoT* platforma zasnovana na *cloud*-u koja omogućava prikupljanje, skladištenje, analizu i vizuelizaciju podataka sa *IoT* uređaja u realnom vremenu. Prikupljeni podaci se čuvaju u tzv. kanalima, a svaki kanal sadrži osam polja koja mogu da skladište bilo koji tip podataka i tri dodatna polja za podatke o lokaciji i statusu kanala [67].

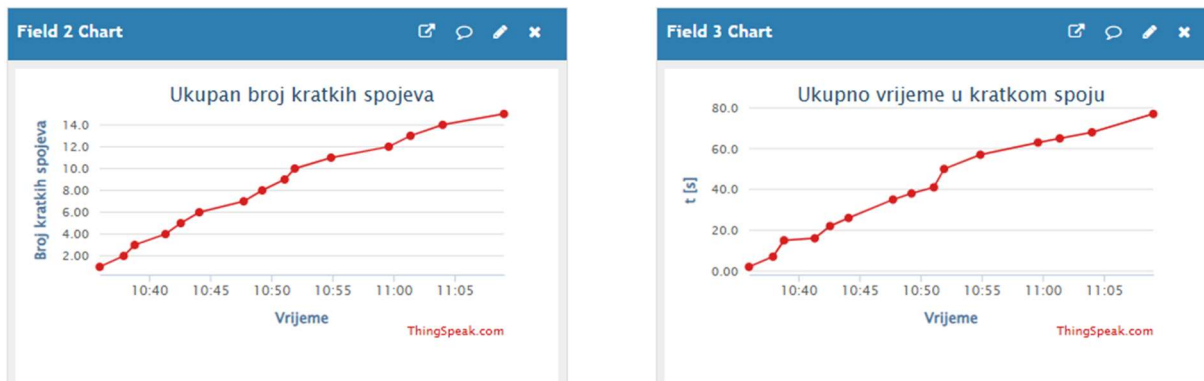
Podaci su u ovom slučaju vizuelizovani putem grafikona, numeričkih displeja i indikatora. Na slici 6.3.1.1 prikazan je grafik trajanja kratkih spojeva. U konkretnom slučaju prikazano je 15 kratkih spojeva sa različitim dužinama trajanja koji su simulirani tokom jednog od laboratorijskih testiranja prototipa u trajanju od oko 35 minuta. Na horizontalnoj osi grafika prikazano je vrijeme nastanka kratkog spoja, dok vertikalna osa prikazuje trajanje svakog kratkog spoja u sekundama.



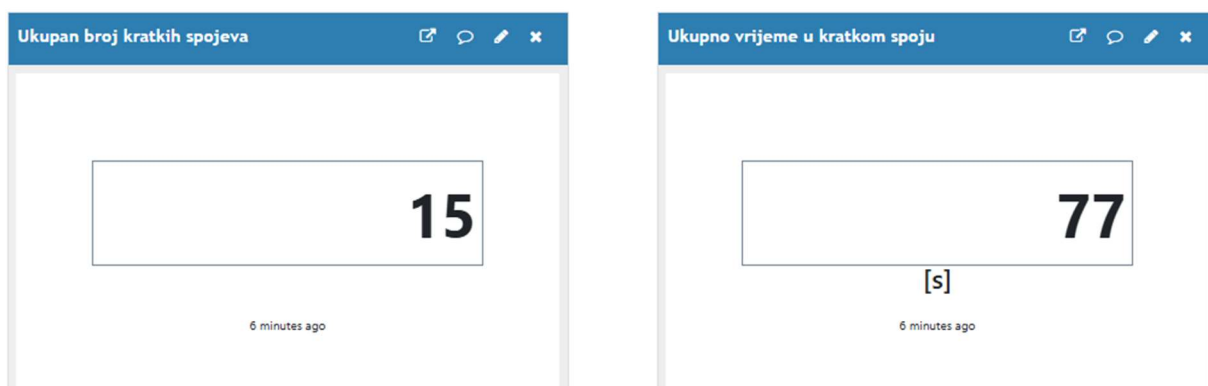
Slika 6.3.1.1. Grafik kratkih spojeva u motorima pogona dizanja.

Osim podataka o zabilježenim kratkim spojevima, na ThingSpeak-u se nalaze i podaci o ukupnom broju evidentiranih kratkih spojeva i ukupnom trajanju svih kratkih spojeva od momenta pokretanja sistema, koji su prikazani grafički i pomoću numeričkih displeja. Ova dva parametra značajna su za implementaciju ranije objašnjenog koncepta prediktivnog održavanja u rad sistema za spriječavanje kratkih spojeva.

Na slici 6.3.1.2 prikazani su grafici ukupnog broja i ukupnog trajanja evidentiranih kratkih spojeva, a slika 6.3.1.3 prikazuje numeričke displeje sa pomenutim podacima.



Slika 6.3.1.2. Grafički prikaz ukupnog broja i ukupnog trajanja evidentiranih kratkih spojeva.

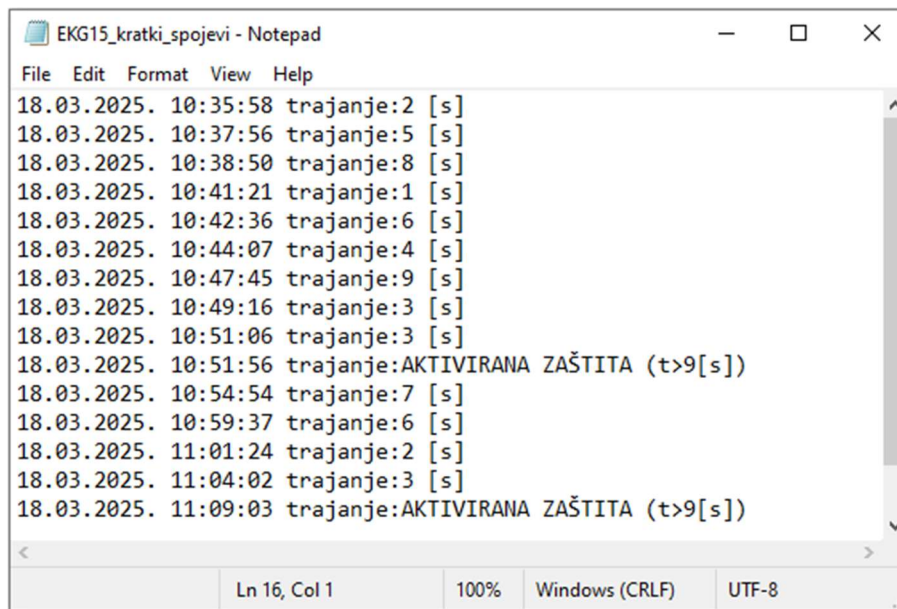


Slika 6.3.1.3. Numerički displeji sa podacima o ukupnom broju i trajanju kratkih spojeva.

6.3.2. Prikaz podataka skladištenih na memorijskoj kartici

Pored skladištenja na *cloud*-u, podaci o detektovanim kratkim spojevima skladište se i na memorijskoj kartici u vidu tekstualnog fajla pod imenom „EKG15_kratki_spojevi.txt”. Podaci se u fajl upisuju u formatu datum (dd.mm.gggg), vrijeme (hh:mm:ss) i trajanje kratkog spoja. Ako je trajanje kratkog spoja premašilo 9 sekundi, tada se u sekciji „trajanje” ispisuje da je došlo do aktiviranja zaštite. Ovako skladišteni podaci lako su dostupni za očitavanje prilikom redovnih nedeljnih obilazaka pogona bagera od strane službe za održavanje.

Na slici 6.3.2.1 prikazan je tekstualni fajl sa SD kartice u kojem su upisani podaci o kratkim spojevima evidentiranim tokom testiranja prototipa. Radi se o 15 kratkih spojeva koji su prikazani u formi grafika na slici 6.3.1.1.



Slika 6.3.2.1. Tekstualni fajl na SD kartici sa podacima o kratkim spojevima.

Na kraju treba naglasiti da je za potpuniju verifikaciju rada sistema, sa ciljem serijske upotrebe, neophodno testiranje u realnim uslovima rada, tj. u samom bageru. U ovom trenutku takvo testiranje nije moguće sprovesti zbog postojanja internih pravila i procedura RUPV-a o pristupu trećih lica postrojenjima i opremi. Otežavajuća okolnost u ovom slučaju je činjenica da predloženo rješenje, osim mjerenja signala, podrazumijeva i modifikaciju upravljačkih signala palice. Iako se originalni upravljački algoritam sistema ne mijenja, ipak se vrši izmjena ulaznih signala kontrolera pogona dizanja i integracija novih komponenata u upravljačku strukturu. To znači da bager, u koji bi se instalirao predloženi sistem, mora biti stavljen van redovnog pogona kako bi se izvršilo testiranje svih funkcionalnosti sistema, a sve to uz odobrenje i nadzor ovlašćenih stručnih lica iz RUPV-a.

7. ZAKLJUČAK

IoT sistem opisan u ovom radu je predlog *low-cost* rješenja za problem kratkih spojeva u motorima bagera EKG-15. Prilikom kreiranja sistema težilo se zadovoljenju tri osnovna kriterijuma.

Prvi kriterijum odnosi se na minimalne modifikacije postojećeg sistema upravljanja bagerom, pri čemu algoritam upravljanja pogonima ostaje nepromijenjen. Ovaj uslov je ispunjen time što se predloženi sistem u najvećem dijelu vremena ponaša kao mjerni uređaj – ne utiče direktno na rad pogona, već pasivno prati struju pogonskih motora i na osnovu njene vrijednosti detektuje prisustvo kratkog spoja. Zaštitna funkcija se aktivira tek kada kratak spoj traje duže od kritične vrijednosti (9 sekundi), nakon čega sistem reaguje i zaustavlja pogon. U tom smislu, jedina suštinska modifikacija u sistemu upravljanja ogleda se u prekidanju postojećeg signala sa komandne palice i uvođenju signala za zaustavljanje, koji dolazi sa mikrokontrolera na ulaz kontrolera pogona dizanja.

Drugi kriterijum odnosi se na jednostavnost korišćenja sistema od strane rukovalaca i osoblja zaduženog za održavanje bagera, kao i na preglednost prikaza podataka o kratkim spojevima, koji se čuvaju na SD kartici i prikazuju na *cloud*-u. Predloženi sistem je koncipiran tako da ne zahtijeva dodatnu obuku rukovalaca – dovoljno je kratko upoznavanje sa funkcijom i načinom rada uređaja za audio-vizuelnu signalizaciju kratkog spoja. Osoblje sektora za održavanje potrebno je upoznati sa načinom pristupa i analizom prikupljenih podataka o kratkim spojevima, radi lakše dijagnostike i planiranja preventivnih aktivnosti. Time je obezbijedena brza i efikasna integracija sistema u postojeće radne procese, bez narušavanja dinamike rada ili povećanja kompleksnosti za krajnje korisnike.

Treći kriterijum odnosi se na mogućnost buduće nadogradnje sistema. Rješenje je koncipirano tako da ostavlja prostor za dalji razvoj kroz uvođenje novih funkcionalnosti, ili kroz prilagođavanje postojećih u skladu sa promjenljivim zahtjevima u eksploataciji. Dodatna prednost predloženog sistema ogleda se u njegovoj primjenljivosti i na druge tipove bagera EKG, poput modela EKG-12.5, kod kojih je takođe prisutan problem pojave kratkih spojeva.

Iako je rad sistema uspješno simuliran u laboratorijskim uslovima, za potpunu verifikaciju njegovih performansi neophodno je sprovesti testiranje uređaja na samom bageru, u realnim uslovima eksploatacije, tokom dužeg vremenskog intervala (9-12 mjeseci). Tokom testnog perioda sistem bi trebalo izložiti uobičajenim, ali i ekstremnim uslovima rada, uz kontinuirano praćenje njegovog učinka. U okviru redovnog održavanja, preporučuje se sistematsko praćenje stanja pogonskih motora i poređenje sa dostupnom istorijom održavanja bagera, u cilju procjene uticaja sistema na produženje radnog vijeka motora. Takođe,

preporučuje se da se tokom testnog perioda u rad uključi veći broj različitih rukovalaca, kako bi se prikupila njihova zapažanja i iskustva u vezi sa upravljanjem bagerom u prisustvu sistema za spriječavanje kratkih spojeva. Povratne informacije dobijene od rukovalaca i tehničkog osoblja treba detaljno analizirati i koristiti kao osnovu za eventualne optimizacije sistema.

Rješavanje problema kratkih spojeva otvara prostor za dalja istraživanja, posebno u oblasti prediktivnog održavanja. Jedan od potencijalnih pravaca razvoja jeste implementacija naprednog sistema monitoringa i analize više ključnih parametara koji utiču na različite djelove motora (četkice, komutator, namotaji) koji direktno doprinose smanjenju njegovog radnog vijeka. Praćenje temperature i relativne vlažnosti vazduha u pogonskoj prostoriji, zajedno sa mjerenjem temperature kućišta, namotaja i ležajeva motora, može se integrisati sa prikupljenim podacima o kratkim spojevima. Na osnovu takve višedimenzionalne analize moguće je izvesti precizniju procjenu trenutnog stanja komponenata motora, kao i predikciju preostalog radnog vijeka, čime se značajno unaprijeđuje pouzdanost i efikasnost sistema održavanja. Za potrebe ovako dubokih analiza neophodno je koristiti mikrokontrolerske platforme znatno viših performansi od one koja je korišćena u ovom radu, kako bi se obezbijedila obrada i sinhronizacija većeg broja ulaznih parametara u realnom vremenu.

LITERATURA

- [1] A. S. Abdul-Qawy, Pramod P. J, E. Magesh, T. Srinivasulu „The Internet of Things (IoT): An Overview”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 5, no. 12, pp.71-82, 2015.
- [2] S. Greengard, „The Internet of Things”, *The MIT Press*, Cambridge, Massachusetts, 2015.
- [3] <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> (pristupljeno 28.01.2024.)
- [4] J. C. Cano, V. Berrios, B. Garcia, C. K. Toh, „Evolution of IoT: An Industry Perspective”, *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 1, no. 2, pp. 12-17, 2019. DOI: 10.1109/IOTM.2019.1900002
- [5] E. Sisinni, A. Saifullah, S. Han, U. Jennehag, M. Gidlund, „Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions“, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 4724–4734, 2018. DOI: 10.1109/TII.2018.2852491
- [6] H. Hirsch-Kreinsen, U. Kubach, R. Stark, G. von Wichert, S. Hornung, L. Hubrecht, J. Sedlmeir, S. Steglich, „Key themes of Industrie 4.0: Research and development needs for successful implementation of Industrie 4.0“, *Plattform Industrie 4.0 / acatech – National Academy of Science and Engineering*, Munich, 2019.
- [7] B. Sniderman, M. Mahto & M. J. Cotteleer, „Industry 4.0 and manufacturing ecosystems: Exploring the world of connected enterprises“, *Deloitte Insights*, Deloitte Services LP, 2016.
- [8] D. Gupta, V. H. C. de Albuquerque, A. Khanna, P. L. Mehta, Editors, „Smart Sensors for Industrial Internet of Things: Challenges, Solutions and Applications“, *Internet of Things: Technology, Communications and Computing*, Springer, 2021.
- [9] M. Ateeq, H. W. Picot, B. M. Abdullah, J. Cullen, „Industry 4.0 LabVIEW Based Industrial Condition Monitoring System for Industrial IoT System“, *2019 Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, pp. 1020–1025, 2019. DOI: 10.1109/DeSE.2019.00189
- [10] P. Gackowiec, M. Podobińska-Staniec, „IoT platforms for the Mining Industry: An Overview”, *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, pp. 267-272, Cracow, Poland, 2019. DOI: 10.29227/IM-2019-01-47
- [11] I. Mian, „IIoT Enabled Predictive Maintenance in the Mining Industry“, *Redline*

Communications, 2020.

- [12] F. Molaei, E. Rahimi, H. Siavoshi, S. G. Afrouz, V. Tenorio, „A Comprehensive Review on Internet of Things (IoT) and its Implications in the Mining Industry”, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, pp. 499–515, 2020. DOI: 10.3844/ajeassp.2020.499.515
- [13] C. Maheswari, E. B. Priyanka, S. Thangavel, S. V. R. Vignesh, C. Poongodi, „Multiple regression analysis for the prediction of extraction efficiency in mining industry with industrial IoT”, *Production Engineering*, vol. 14, pp. 457–471, 2020. DOI: 10.1007/s11740-020-00970-z
- [14] A. Singh, U. K. Singh, D. Kumar, „IoT in Mining for Sensing, Monitoring and Prediction of Underground Mines Roof Support”, *2018 4th International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, IEEE, pp. 1–5, Dhanbad, India, 2018. DOI: 10.1109/RAIT.2018.8389041
- [15] L. Muduli, D. P. Mishra, P. K. Jana, „Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review”, *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 106, pp. 48–67, 2018. DOI: 10.1016/j.jnca.2017.12.022
- [16] V. Aswani, G. P. S. Kumar, A. Lavanya, J. H. Kumar, P. Vashika, „Arduino Based Coal Mine Safety Monitoring and Alerting System for Workers”, *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, vol. 4, no. 6, pp. 2018–2021, 2022. DOI: 10.35629/5252-040620182021
- [17] Y. I. Khamis, M. Alawi, R. Athumani, W. M. Sanya, „An IoT Based Worker Safety Helmet Using Cloud Computing Technology”, *Tanzania Journal of Engineering and Technology (Tanz. J. Engrg. Technol.)*, vol. 41, no. 1, pp. 19–26, 2022. DOI: 10.52339/tjet.vi.769
- [18] J. R. Jagadeesh and R. Nagaraja, „IoT based Smart Helmet for unsafe event detection for mining industry”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 4, no. 1, pp. 1487–1492, 2017.
- [19] B. Priyanka, S. K. Satyanarayana, M. Anjali Sri Teja, Ch. Srikanth i G. Sanjana, „IoT based smart helmet for mining“, *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, vol. 10, no. 7, pp. 812–825, 2022.
- [20] H. Aguirre-Jofré, M. Eyre, S. Valerio, D. Vogt, „Low-cost internet of things (IoT) for monitoring and optimising mining small-scale trucks and surface mining shovels,” *Automation in Construction*, vol. 131, 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103918

- [21] P. Stefaniak, W. Koperska, A. Skoczylas, J. Witulska, P. Śliwiński, „Methods of Optimization of Mining Operations in a Deep Mine—Tracking the Dynamic Overloads Using IoT Sensor,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 79384-79394, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3291080
- [22] A. Chehri, T. El Ouahmani, N. Hakem, „Mining and IoT-based Vehicle Ad-hoc NETWORK: Industry opportunities and innovation“, *Internet of Things*, vol. 14, p. 100117, 2021. DOI: 10.1016/j.iot.2019.100117
- [23] P. K. Malik, R. Sharma, R. Singh et al., „Industrial Internet of Things and its applications in industry 4.0: State of the art“, *Computer Communications*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.11.016>
- [24] D. Tolmač, S. Prvulović, „Remont tehničkih sistema“, *Univerzitet u Novom Sadu Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin”*, Zrenjanin, 2000.
- [25] R. Roy, R. Stark, K. Tracht, S. Takata, M. Mori, „Continuous maintenance and the future: Foundations and technological challenges“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 65, no. 2, pp. 667–688, 2016. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.006
- [26] P. Poór, D. Ženišek, J. Basl, „Historical overview of maintenance management strategies: Development from breakdown maintenance to predictive maintenance in accordance with four industrial revolutions“, *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Pilsen, Czech Republic, July 23–26, 2019.
- [27] E. Lughofer, M. Sayed-Mouchaweh, „Predictive Maintenance in Dynamic Systems: Advanced Methods, Decision Support Tools and Real-World Applications“, *Springer Nature Switzerland AG*, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-05645-2
- [28] R. K. Mobley, L. R. Higgins, D. J. Wikoff, „Maintenance Engineering Handbook“, 7th ed., *McGraw-Hill*, New York, 2008. DOI: 10.1036/0071546464
- [29] <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/operations/articles/predictive-maintenance-and-the-smart-factory.html> (pristupljeno 03.09.2024.)
- [30] F. Arena, M. Collotta, L. Luca, M. Ruggieri, F. G. Termine, „Predictive Maintenance in the Automotive Sector: A Literature Review,” *Mathematics and Computers in Applied Sciences*, vol. 27, no. 2, 2022. DOI: 10.3390/mca27010002
- [31] <https://www.toyota.com/car-tips/basic-car-maintenance-tips-services-checklist/> (pristupljeno 04.09.2024.)
- [32] <https://www.bridgestonetire.com/learn/maintenance/ultimate-car-maintenance-checklist/#> (pristupljeno 04.09.2024.)

- [33] G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer, A. Hess, B. Wu, „Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems“, *John Wiley & Sons, Inc.*, Hoboken, NJ, 2006.
- [34] W. Zhang, M. P. Jia, L. Zhu, X. A. Yan, „Comprehensive overview on computational intelligence techniques for machinery condition monitoring and fault diagnosis“, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 30, pp. 782–795, 2017. DOI: 10.1007/S10033-017-0150-0
- [35] A. K. S. Jardine, D. Lin, D. Banjevic, „A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, pp. 1483–1510, 2006. DOI: 10.1016/J.YMSSP.2005.09.012
- [36] L. Ren, Y. Sun, J. Cui, L. Zhang, „Bearing remaining useful life prediction based on deep autoencoder and deep neural networks“, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, part C, pp. 71–77, 2018. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.04.008
- [37] S. Schwendemann, Z. Amjad, A. Sikora, „A survey of machine-learning techniques for condition monitoring and predictive maintenance of bearings in grinding machines“, *Computers in Industry*, vol. 125, p. 103380, 2021. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103380
- [38] R. Liu, B. Yang, E. Zio, X. Chen, „Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 108, pp. 33–47, 2018. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.02.016
- [39] S. Aburakhia, T. Tayeh, R. Myers, A. Shami, „Similarity-Based Predictive Maintenance Framework for Rotating Machinery“, *IEEE*, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.14550
- [40] A. Glowacz, „Acoustic-Based Fault Diagnosis of Commutator Motor“, *Electronics*, vol. 7, p. 299, 2018. DOI: 10.3390/electronics7110299
- [41] J. Coady, D. Toal, T. Newe, G. Dooly, „Remote acoustic analysis for tool condition monitoring“, *Procedia Manufacturing*, vol. 38, pp. 840–847, 2019. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.165
- [42] M. Radonjić, G. Kvaščev, M. Radulović, B. Krstajić, „One example of mobile hardware platform for sound acquisition in industrial environment“, *24th International Conference on Information Technology (IT)*, Žabljak, Montenegro, pp. 1–4, 2020. DOI: 10.1109/IT48810.2020.9070594.
- [43] M. Radonjić, S. Vujnović, A. Krstić, Ž. Zečević, „IoT System for Detecting the Condition of Rotating Machines Based on Acoustic Signals“, *Applied Sciences*, vol. 12, no. 9, p. 4385, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12094385>

- [44] P. Kruczek, A. Michalak, J. Wodecki, P. Stefaniak, A. Wyłomańska, N. Gomolla, P. Śliwiński, J. Hebda-Sobkowicz, R. Zimroz, „Predictive maintenance of mining machines using advanced data analysis system based on the cloud technology“, *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018, Springer Nature Switzerland AG*, pp. 459–470, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-99220-4_38
- [45] P. Kumar, R. K. Srivastava, „An expert system for predictive maintenance of mining excavators and its various forms in open cast mining“, *Proceedings of the 1st International Conference on Recent Advances in Information Technology | RAIT-2012*, 2012.
- [46] J. Chen, C. Lin, D. Peng, H. Ge, „Fault diagnosis of rotating machinery: A review and bibliometric analysis“, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224985 – 225003, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043743
- [47] T. Zonta, C. A. da Costa, R. R. Righi, M. J. de Lima, E. S. da Trindade, G. P. Li, „Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic literature review“, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 150, p. 106889, 2020. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106889
- [48] A. Cachada, J. Barbosa, P. Leitão, C. A. S. Geraldés, L. Deusdado, J. Costa, C. Teixeira, J. Teixeira, A. H. J. Moreira, P. M. Moreira, L. Romero, „Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture“, *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2018. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502489
- [49] E. Sezer, D. Romero, F. Guedea, M. Macchi, C. Emmanouilidis, „An Industry 4.0-enabled Low Cost Predictive Maintenance Approach for SMEs: A Use Case Applied to a CNC Turning Centre“, *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 2018. DOI: 10.1109/ICE.2018.8436307
- [50] „Robot-Enabled Ultrasonic Inspections: Rapid Ultrasonic Gridding (RUG) & Advanced Ultrasonic Inspections“, *Siemens Energy Global GmbH & Co. KG*, 2021. Dostupno na: www.siemens-energy.com (pristupljeno: 12.04.2022.)
- [51] A. Mujib, T. Djatna, „Ensemble Learning for Predictive Maintenance on Wafer Stick Machine Using IoT Sensor Data“, *2020 International Conference on Computer Science and Its Application in Agriculture (ICOSICA)*, IEEE, 2020. DOI: 10.1109/ICOSICA49951.2020.9243180
- [52] www.uralmash-kartex.ru (pristupljeno 29.10.2024.)
- [53] „UZTM-KARTEX Mining Equipment: Draglines and Electric Rope Shovels“, *UZTM KARTEX, Matera*, 2019. Dostupno na: <https://www.matera.be/assets/Uploads/Rope-shovels-and-draglines.pdf> (pristupljeno 29.10.2024.)

- [54] www.komatsu.com (pristupljeno 29.10.2024.)
- [55] „Экскаватор карьерный гусеничный ЭКГ-15: Техническое описание и характеристики“. Dostupno na: https://www.gtm.ru/upload/15_r.pdf (pristupljeno: 29.10.2024.)
- [56] C. L. Telford, R. H. Todd, „Darft: An investigation of the Ward Leonard system for use in a hybrid or electric passenger vehicle“, *Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2013)*, ASME, 2013. DOI:10.1115/DETC2013-12051
- [57] M. Čalasan, „Mašine jednosmjerne struje sa zbirkom zadataka i ilustrativnim primjerima“, *Akademski misao*, Beograd, 2020.
- [58] <http://meteo.co.me/> (pristupljeno 10.12.2024.)
- [59] Đ. Ostojić, „Fizički poremećaji tla u pljevaljskoj kotlini posredstvom industrijsko-energetskih objekata“, *Geographica Slovenica*, vol. 18, pp. 443-458, 1987.
- [60] A. M. Лузянин, „Низковольтное комплектное устройство НКУ ЭГ-РЦ-У2: Руководство по эксплуатации“, *ОАО Рудоавтоматика*, 2010. (Interni dokument, lično posjedovanje, 2024.)
- [61] B. Jovanović, M. Radonjić, B. Krstajić, „Predlog IoT sistema za spriječavanje kratkih spojeva na bageru EKG-15“, *XXVI Međunarodna konferencija Informacione tehnologije (IT) Zabljak*, 2022.
- [62] M. Radonjić, Ž. Zečević, B. Krstajić, „An IoT system for real-time monitoring of DC motor overload“, *Electronics*, vol. 11, 1555, 2022. DOI: 10.3390/electronics11101555
- [63] A. Hand, „Electric Motor Maintenance and Troubleshooting 2nd ed.“, *McGraw-Hill*, New York, 2011.
- [64] M. Radonjić, B. Krstajić, Ž. Zečević, „IoT system for short-circuit detection of DC motor at EKG-15 excavator“, *First International Conference ETIMA*, pp. 222-230, 2022.
- [65] <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/> (pristupljeno: 11.12.2024.)
- [66] „Схема электрическая принципиальная НКУ ЭГ-РЦ-У2“, *ОАО Рудоавтоматика*, 2010. (Interni dokument, lično posjedovanje, 2024.)
- [67] <https://thingspeak.com/> (pristupljeno 20.02.2025.)

- [68] „Eleborat procjene uticaja na životnu sredinu eksploatacije uglja na PK Potrlica” , *Rudnik uglja AD Pljevlja*. Dostupno na: <https://mans.co.me/wp-content/uploads/2015/10/ElaboratUticajaPKPotrlica.pdf> (pristupljeno: 22.03.2025.)
- [69] https://www.rupv.me/sites/rupv.me/files/107_18_drzaci_cetkica_poziv.pdf (pristupljeno: 22.03.2025.)
- [70] <https://ek.ck.ua/en/electrographitic-brush-eg14-12-5x32x40-k8-3/> (pristupljeno: 22.03.2025.)
- [71] R. J. Hamilton, „DC motor brush life“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 6, pp. 1682–1687, 2000. DOI: 10.1109/28.887222
- [72] W. G. Shin, S. H. Lee, „An analysis of the main factors on the wear of brushes for automotive small brush-type DC motor“, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24, no. 1, pp. 37–41, 2010. DOI: 10.1007/s12206-009-1135-4
- [73] W. G. Shin, Y. S. Song, Y. K. Seo, „Correlation analysis of brush temperature in brush-type DC motor for predicting motor life“, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 7, pp. 2151–2154, 2012. DOI: 10.1007/s12206-012-0534-0
- [74] Y. Feng, M. Zhang, Y. Xu, „Effect of the electric current on the friction and wear properties of the CNT–Ag–G composites“, *Carbon*, vol. 43, no. 13, pp. 2685–2692, 2005. DOI: 10.1016/j.carbon.2005.05.031
- [75] <https://helwigcarbon.com/wp-content/uploads/2018/07/brushholderbrochure.pdf> (pristupljeno: 30.03.2025.)
- [76] V. H. Pham, D. B. Le, T. D. Nguyen, „Wear behavior of graphic brush for motors in the high humidity of tropical climate with current“, *Tribology in Industry*, vol. 44, no. 4, pp. 625–631, 2022. DOI: 10.24874/ti.1311.05.22.10
- [77] G. Mirzaeva, R. E. Betz, T. J. Summers, „Evaluation of current density in DC motor brushes for mining machines based on air-gap field measurement“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1255–1263, 2010. DOI: 10.1109/TIA.2010.2049555

Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora: **Boris Jovanović**

Broj indeksa/upisa: **05/20**

Studijski program: **Automatika i industrijska elektrotehnika**

Naslov rada: **Predlog IoT sistema za spriječavanje kratkih spojeva na bageru EKG-15**

Mentor: **prof. dr Božo Krstajić**

Potpisani: **Boris Jovanović**

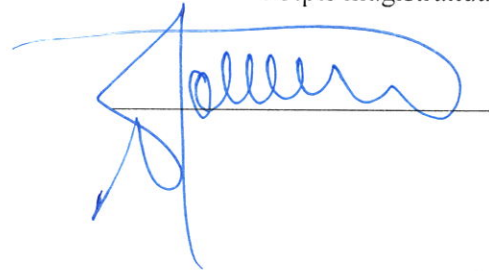
Izjavljujem

da je štampana verzija mog master rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva master nauka, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naslov master rada i datum odbrane rada.

U Podgorici, 23.10.2025. godine

Potpis magistranda

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized initial 'B' followed by a series of loops and a long horizontal stroke, written over a horizontal line.

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore pohrani moj master rad pod nazivom:

"Predlog IoT sistema za spriječavanje kratkih spojeva na bageru EKG-15"

koji je moje autorsko djelo.

Master rad sa svim priložima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

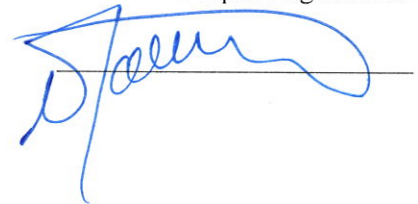
Moj master rad pohranjen u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (*Creative Commons*) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

U Podgorici, 23.10.2025. godine

Potpis magistranda



1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo - nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja djela.
4. Autorstvo - nekomercijalno - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerade.
5. Autorstvo - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda