

Mogućnosti primjene Arduino uređaja i njihove performanse pri mjerenju analognih signala

Sekulić, Kristijan

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:941265>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**MOGUĆNOSTI PRIMJENE ARDUINO UREĐAJA I
NJIHOVE PERFORMANSE PRI MJERENJU
ANALOGNIH SIGNALA**

Diplomski rad

Kristijan Sekulić

R 195

Zagreb, 2020.

MOGUĆNOSTI PRIMJENE ARDUINO UREĐAJA I NJIHOVE PERFORMANSE PRI MJERENJU ANALOGNIH SIGNALA

KRISTIJAN SEKULIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Stalna potreba za povećanjem sigurnosti, produktivnosti i profitabilnosti u rudarstvu potiče kontinuiran razvoj tehnologija za automatizaciju procesa u rudniku. Danas rudari svakodnevno koriste mnogo jednostavnih oblika automatizacije čega vjerojatno nisu niti svjesni. Ovaj se rad dotiče trenutne primjene tehnologija automatizacije u rudarstvu i razvoja istih koje će biti u komercijalne u bliskoj budućnosti. Primjer tehnologije koja se koristi za automatizaciju je Arduino – elektronička platforma temeljena na komponentama i programu koji su jednostavni za upotrebu i imaju razvijenu zajednicu otvorenog izvora. U okviru rada provedena su mjerenja osnovnom Arduino platformom u usporedbi s preciznim instrumentom za mjerenje sa svrhom određivanja performansi mjerenja Arduinom. Također, navedeni su neki primjeri postojeće primjene Arduina u automatizaciji kao i potencijalne mogućnosti primjene s obzirom na određene parametre.

Ključne riječi: Rudarstvo, automatizacija, Arduino, performanse mjerenja

Diplomski rad sadrži: 71 stranica, 9 tablica, 55 slika i 25 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Mentori: Dr.sc. Mario Klanfar, docent RGNF
Dr.sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Mario Klanfar, docent RGNF
Dr.sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF
Dr.sc. Želimir Veinović, docent RGNF
Dr.sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF
Dr.sc. Tomislav Korman, docent RGN

Datum Obrane: 14.02.2020., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

**APPLICATION POSSIBILITIES OF THE ARDUINO DEVICES AND
THEIR PERFORMANCE IN ANALOG SIGNAL MEASURING**

KRISTIJAN SEKULIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Constant need to improve safety, productivity and safety of mining is driving the continuous development of automation technologies in mines. Nowadays, many simple forms of automation are being used by miners every day but are probably unaware of it. This thesis touches on current implementation of automation technologies in mining industry and the development of those that will turn commercial in near future. One example of a technology used in automation is Arduino – an open-source electronics platform based on easy-to-use hardware and software. As part of the thesis, measurements were performed with basic Arduino platform and compared with those of precise measuring instrument for the purpose of determining Arduino measurement performance. Also, some examples of existing application of Arduino in automation are given, as well as potential application options considering the determined performance.

Keywords: Mining, automation, Arduino, measurement performance
Thesis contains: 71 pages, 9 tables, 55 figures and 25 references
Original in: Croatian
Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Supervisors: PhD Mario Klanfar, Assistant Professor
PhD Dalibor Kuhinek, Associate professor

Reviewers: PhD Mario Klanfar, Assistant Professor
PhD Dalibor Kuhinek, Associate professor
PhD. Želimir Veinović, Assistant Professor
PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor
PhD Tomislav Korman, Assistant Professor

Defence date: February 14th, 2020, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ARDUINO PLATFORMA	5
2.1. Arduino <i>hardware</i>	5
2.1.1. Analogni pinovi i A/D pretvornik (konverter)	7
2.1.2. Digitalni pinovi	8
2.2. Arduino <i>Software</i> (Arduino IDE)	10
3. POTENCIJALNE PRIMJENE U RUDARSTVU	12
3.1. Automatizacija	12
3.1.1. Zašto automatizirati u rudarstvu?	14
3.1.2. Kako provesti automatizaciju u rudarstvu?	16
3.1.3. Primjeri automatizacije u rudarstvu	18
3.2. Prikupljanje podataka (<i>Data Logging</i>)	24
3.3. Primjeri korištenja Arduino platforme na RGN fakultetu	25
4. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE	31
4.1. Princip mjerenja	32
4.2. Ispitivanje u svrhu određivanja točnosti i stabilnosti mjerenja	41
4.3. Ispitivanje brzine uzorkovanja (<i>sample rate</i>)	49
4.4. Direktna usporedba mjerenja Arduina i FLUKE8846A	52
5. REZULTATI I ANALIZA	56
5.1. Brzina uzorkovanja (<i>sample rate</i>)	56
5.2. Rezolucija mjerenja	56
5.3. Točnost i stabilnost mjerenja	57
6. ZAKLJUČAK	67
7. POPIS LITERATURE	69

POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Tehničke karakteristike Arduino UNO REV3	7
Tablica 3-1 Tehničke karakteristike <i>Komatsu</i> AHV-a (<i>Autonomous Haulage Vehicle</i>) (Slika 3-7)	21
Tablica 3-2 Tehničke karakteristike eksternog ADC-a MCP3304 (<i>Microchip</i> , 2020).....	30
Tablica 4.1 Rezultati mjerenja generiranih napona Arduino platformom za oba ADC-a	45
Tablica 4-2 Rezultati mjerenja ATmega328P uz napajanje litij-ionskom baterijom	47
Tablica 5-1 Rezultati i analiza podataka mjerenih ATmega328P	58
Tablica 5-2 Rezultati i analiza podataka mjerenih ATmega328P (napajanje baterijom)	61
Tablica 5-3 Rezultati i analiza podataka mjerenih MCP3304 (USB napajanje)	64
Tablica 5-4 Usporedba odstupanja i rasipa za sva tri mjerenja	66

POPIS SLIKA

Slika 1-1 Opasnost od urušavanja u rudniku, SAD (<i>ISHN</i> , 2017).....	1
Slika 1-2 Bušenje u rudniku Khomanani, Južna Afrika (<i>World Finance</i> , 2015).....	2
Slika 1-3 Daljinsko upravljanje strojem u opasnim uvjetima (<i>Alpha Technology</i> , 2019)	3
Slika 1-4 Eksplozija plina 19. studenog 2010. u rudniku Pike River u Greymouth-u, Novi Zeland (29 poginulih rudara) (<i>The Atlantic</i> , 2011)	3
Slika 1-5 Principijalni prikaz pametnog rudnika (<i>Mining Magazine</i> , 2019)	4
Slika 2-1 Arduino UNO REV3 s glavnim funkcionalnim komponentama (Arduino, 2020a).....	6
Slika 2-2 Primjena Arduina u mehatronici za upravljanje motorom preko aplikacije na pametnom telefonu (Dejan, <i>How to Mechatronics</i> , 2016)	6
Slika 2-3 Modulacija širine pulsa (PWM) (Arduino, 2020b)	9
Slika 2-4 Prozor Arduino <i>Software</i> -a s opisom glavnih elemenata	10
Slika 3-1 Princip funkcioniranja autonomnog transporta (<i>Asi Robots</i> , 2015a).....	13
Slika 3-2 Automatizirano bušenje minskih bušotina (<i>Orica</i> , 2018a).....	15
Slika 3-3 Analiza izbušenih minskih bušotina (<i>Orica</i> , 2018b).....	15
Slika 3-4 Spajanje dijelova sustava u funkcionalnu cjelinu (<i>ABB</i> , 2013).....	17
Slika 3-5 Centralizacija procesa s modernom kontrolnom sobom (<i>Asi Robots</i> , 2015b).....	17
Slika 3-6 Princip rada pseudolita	19
Slika 3-7 Budućnost autonomnog rudarskog transporta (<i>Equipment World</i> , 2016)	20
Slika 3-8 Autonomni sustav za određivanje fragmentacije odminiranog materijala na bageru (<i>Mining.com</i> , 2019a).....	23
Slika 3-9 Autonomni sustav za određivanje fragmentacije odminiranog materijala nad transportnom trakom (<i>Mining.com</i> , 2019b)	24
Slika 3-10 Uređaj za mjerenje tlaka (Juranko, 2018).....	26

Slika 3-11 Senzori SDP610 i RSC (zelene cjevčice) spojeni na Arduino (Kalinić, 2018)	27
Slika 3-12 Shema <i>logger</i> uređaja s Arduino platformom	29
Slika 3-13 Shematski prikaz ADC-a MCP3304 (<i>Microchip</i> , 2020)	30
Slika 4-1 Precizni multimetar FLUKE 8846A.....	31
Slika 4-2 Principijalna shema ispitivanja mjerenjem napona	32
Slika 4-3 Blok dijagram spajanja uređaja za određivanje točnosti i stabilnosti mjerenja	33
Slika 4-4 Primjer blok dijagrama virtualnog instrumenta u programu <i>LabVIEW</i>	34
Slika 4-5 Primjer prednjeg sučelja s upravljačkim elementima virtualnog instrumenta.....	35
Slika 4-6 Primjer prednjeg sučelja s grafičkim prikazom u virtualnom instrumentu	35
Slika 4-7 Blok dijagram s funkcijom prikupljanja uzoraka	36
Slika 4-8 Zapis rezultata u <i>excel</i> tablici	37
Slika 4-9 Arduino IDE kod za kontrolu i mjerenje Arduino platformom.....	38
Slika 4-10 Sučelje Arduino IDE-a nakon promjene iznosa intervala i broja uzorka	39
Slika 4-11 Prikaz rezultata mjerenja Arduino platformom	40
Slika 4-12 Mjerenje istosmjernog napona baterije preciznim voltmetrom FLUKE 8846A	41
Slika 4-13 Određivanje standardne devijacije (SD) mjerenja istosmjernog napona baterije	42
Slika 4-14 Mjerenje analognog napona mjerne kartice preko bloka SC-2345	42
Slika 4-15 Određivanje šuma referentnog voltmetra FLUKE 8846A	43
Slika 4-16 Određivanje referentnog napona Arduino platforme prije umjeravanja	44
Slika 4-17 Određivanje referentnog napona Arduino platforme nakon umjeravanja	44
Slika 4-18 Mjerenje napona baterije u strujnom krugu za vrijeme mjerenja Arduina.....	48
Slika 4-19 Arduino kod za određivanje brzine uzorkovanja ADC-a ATmega328P	49
Slika 4-20 Arduino kod za određivanje brzine uzorkovanja ADC-a MCP3304.....	50

Slika 4-21 Blok dijagram spajanja uređaja za direktnu usporedbu mjerenja.....	52
Slika 4-22 Blok dijagram virtualnog instrumenta za direktnu usporedbu mjerenja	53
Slika 4-23 Prednje sučelje <i>LabView</i> -a; prikaz šuma uz napajanje USB-priključkom	54
Slika 4-24 Prednje sučelje <i>LabView</i> -a; prikaz šuma uz napajanje baterijom.....	55
Slika 5-1 Rasipanje mjerenja Arduinom (ATmega328P) za napajanje USB-priključkom	59
Slika 5-2 Rasipanje mjerenja voltmetrom FLUKE za napajanje USB-priključkom	59
Slika 5-3 Odstupanje mjerenja Arduinom u odnosu na FLUKE za napajanje USB-portom	60
Slika 5-4 Rasipanje mjerenja Arduinom (ATmega328P) za napajanje baterijom.....	62
Slika 5-5 Rasipanje mjerenja voltmetrom FLUKE za napajanje baterijom.....	62
Slika 5-6 Odstupanje mjerenja Arduinom u odnosu na FLUKE za napajanje	63
Slika 5-7 Rasipanje mjerenja Arduinom (MCP3304) za napajanje USB-priključkom	65
Slika 5-8 Rasipanje mjerenja voltmetrom FLUKE za napajanje USB-priključkom za MCP	65
Slika 5-9 Odstupanje mjerenja MCP3304 u odnosu na FLUKE za napajanje USB-portom	66

POPIS KORIŠTENIH VELIČINA I ODGOVARAJUĆIH JEDINICA

VELIČINA	JEDINICA
----------	----------

Napon	V
-------	---

Frekvencija	Hz
-------------	----

1. UVOD

Rudarstvo je tisućljećima karakterizirano kao jedna od najopasnijih struka po život i zdravlje ljudi, to jest rudara. S vremenom su se razvile nove tehnologije u industriji i potreba za sirovinama je naglo rasla, što je dovelo do brojnih inovacija u rudarstvu, također vrijednost ljudskog života više nije bila zanemariva pa su porasle mjere sigurnosti i zaštite na radu. Uvjeti rada u većini dijelova svijeta uvelike su promijenjeni nabolje, a rudarstvo je doprinijelo svijetu mnogim inovacijama poput željeznice i dinamita. Ipak poznato je da nije jednak kriterij sigurnosti prisutan u cijelom svijetu, a tamo gdje je kriterij relativno visok i dalje postoje oni koji zaobilaze zadane smjernice ne bi li pritom uštedjeli, no niti u najrazvijenijim zemljama nesreće u rudarstvu nisu stran pojam, kako se svake godine dogodi barem jedna tragedija u jednoj od takvih zemalja. Nadalje, u zadnjih stotinjak godina većina poznatih nalazišta i ležišta sirovina nesmotreno su crpljena što je dovelo do ispitivanja novih mogućnosti i daljnjim razvojem tehnologije u industriji, primjerice tehnologija recikliranja, te razvoja istražnih metoda u rudarstvu, geologiji i geofizici. Pronađena su nova ležišta, ali na znatno većim dubinama i često u zahtjevnim formacijama (Slika 1-1 i Slika 1-2).



Slika 1-1 Opasnost od urušavanja u rudniku, SAD (ISHN, 2017)



Slika 1-2 Bušenje u rudniku Khomanani, Južna Afrika (*World Finance*, 2015)

Dakle, idealizirani uvjeti rada u takvim okolnostima za prioritet uzimaju sigurnost radnika, barem bi trebali. Što kada bi se broj rudara u rudniku smanjio na minimum? Odnosno, kada bi se njihov fizički položaj prebacio van neposredne i potencijalne opasnosti ili čak van rudnika (jame) općenito, a da se funkcionalnost procesa i svrhovitost rudara ne umanjuju. Daljinsko rudarenje (dobivanje rude) poznato je od polovice 20. stoljeća, no to je omogućilo sigurnost samo od neposrednih izvora opasnosti (detonacija, ozljeda pri radu, urušavanje čela uslijed kopanja itd.) (Slika 1-3), dok su opasnosti poput gorskog udara, eksplozije plina i urušavanja rudarskih prostorija stalan uzrok nesreća i tragedija do dana današnjeg (Slika 1-4).



Slika 1-3 Daljinsko upravljanje strojem u opasnim uvjetima (*Alpha Technology*, 2019)



Slika 1-4 Eksplozija plina 19. studenog 2010. u rudniku Pike River u Greymouth-u, Novi Zeland (29 poginulih rudara) (*The Atlantic*, 2011)

Rješenje leži u **automatizaciji** što većeg broja procesa, a svrhovitost radnika ne bi bila zamijenjena već promijenjena; rudar ne bi bio izložen opasnostima prilikom rada već bi nadgledao procese i elemente tog procesa (uređaji za bušenje, kopanje, pridobivanje i transport sirovine, oplemenjivanje itd.) koji nerijetko jesu opasni. Automatizacija je već neko vrijeme čest pojam u rudarstvu, a do kraja ovog stoljeća postojat će zamjetan broj tzv. *pametnih rudnika* (*smart mines*) koji će u svojoj cijelosti, od pridobivanja sirovine do skladištenja konačnog proizvoda ili poluproizvoda rudnika, biti automatizirani (Slika 1-1).



Slika 1-5 Principijelni prikaz *pametnog rudnika* (*Mining Magazine*, 2019)

Sustavi koji se koriste u automatizaciji često su skupi što ne ide u prilog malim kopovima i jamama gdje bi ulaganje u takav sustav bilo ekonomski neisplativo. Ipak, danas su velikoj većini dostupni višepatformni elektronički sklopovi i uređaji niske pristupačne cijene za svakog pojedinca kamo li za tvrtku koja ima rudnik u vlasništvu. Jedan takav programibilni sklop je Arduino, a ovaj rad pozabavit će se mogućnostima primjene takvog sklopa za mjerenja, prikupljanje podataka i automatizaciju u rudarstvu, te usporedbom istog s referentnim uređajem visoke točnosti pri mjerenju analognih signala.

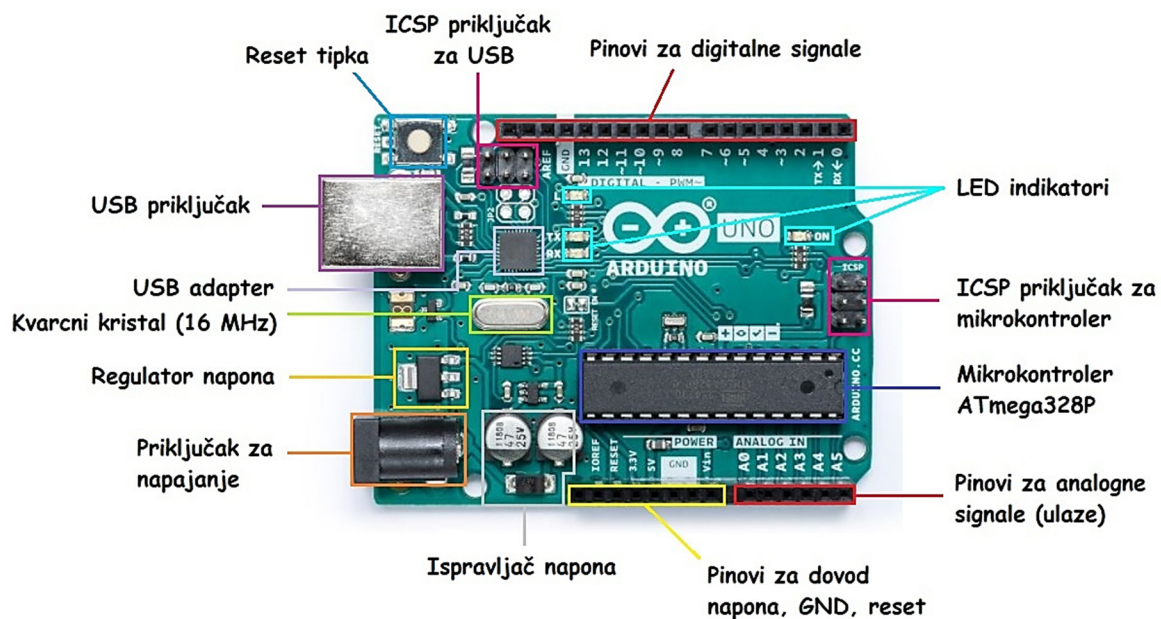
2. ARDUINO PLATFORMA

Arduino platforma je funkcionalna cjelina koju čini fizički (*hardware*) i programski (*software*) dio. Fizički dio predstavljaju elektroničke platforme najčešće u obliku programibilnih strujnih krugova, odnosno mikrokontrolera s integriranim ADC-om (*Analog to Digital Converter*), jednostavne izvedbe i jeftine izrade; najjednostavnije inačice ovih uređaja, nisu veće od kutije šibica. Drugi dio svakog Arduino sustava čini *software*, a način izvedbe je ono zbog čega su ovi uređaji danas jako popularni. Za programiranje mikrokontrolera da izvodi određeni proces po zadanim pravilima nije potreban programator (dodatan *hardware*), već je dovoljno uređaj spojiti najjednostavnijim oblikom na osobno računalo (PC - *Personal Computer*), primjerice USB priključkom (*Universal Serial Bus*) i prebaciti program s računala na uređaj. Naime, Arduino uređaji koriste *Arduino IDE* (*Integrated Development Environment*) - aplikaciju za programiranje koja je besplatna i dostupna za sve popularne operacijske sustave, kako za one računala poput *Windowsa* i *Linuxa*, tako i za one pametnih telefona i tableta kao što je *Android*. Također, cijeli programski dio sadrži na internetu bazu podataka otvorenog tipa ili izvora (*open source*) zbog čega je programiranje i rad s ovim uređajima maksimalno pojednostavljen i olakšan.

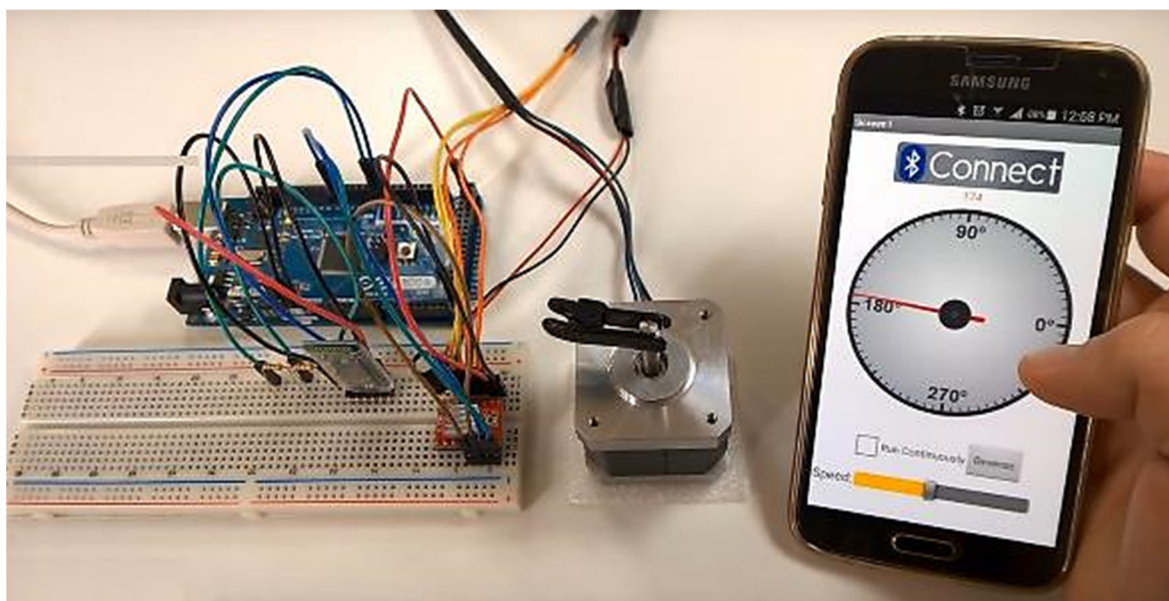
2.1. Arduino *hardware*

Arduino brend danas sadrži veliki raspon proizvoda od kojih je svaki idealan za određenu primjenu; od većih sklopova s velikom rezolucijom (neki i preko 32 bita) koji su idealni za primjenu u robotici i 3D printanju, do jako malenih sklopova koji se mogu integrirati u male uređaje poput daljinskih upravljača. Sklopovi koji podržavaju *bluetooth*, *Wi-Fi*, *IR* odašiljač (infracrveni odašiljač), razne senzore itd. Sklopovi poput *Arduino UNO*-a mogu imati širok spektar upotrebe gdje granicu mogućnosti predstavljaju samo ljudska mašta i dovitljivost (Slika 2-2).

Arduino UNO (Slika 2-1) je najrobusniji i najpopularniji primjerak među korisnicima. Uz mikrokontroler **ATmega328P** s integriranim ADC-om **rezolucije 10 bita** (2^{10}), sadrži još ukupno 20 priključaka (*pinova*) za ulaz i izlaz digitalnih i analognih signala, niz priključaka čija je funkcija dovod istosmjernog napona (3.3 V; 5 V; 7-20 V), uzemljenje (GND - *ground*), dovod referentnog analognog napona itd. Također sadrži: priključak za napajanje s A/D pretvornikom, USB priključak, USB adapter, LED signalizaciju, *reset* tipkalo, kvarcni kristal frekvencije 16 MHz (sat), regulator napona i ostalo (Tablica 2-1).



Slika 2-1 Arduino UNO REV3 s glavnim funkcionalnim komponentama (Arduino, 2020a)



Slika 2-2 Primjena Arduina u mehatronici za upravljanje motorom preko aplikacije na pametnom telefonu (Dejan, *How to Mechatronics*, 2016)

Tablica 2-1 Tehničke karakteristike Arduino UNO REV3 (Arduino, 2020)

Mikrokontroler	ATmega328P
Radni napon	5 V
Ulazni napon (preporučeni)	7 V – 12 V
Granični ulazni napon	6 V – 20 V
Digitalni ulazno/izlazni (U/I) pinovi	14 (od kojih 6 omogućuju PWM izlaz)
Digitalni PWM U/I pinovi	6
Analogni ulazni pinovi	6
Maksimalna istosmjerna struja za U/I pin	20 mA
Maksimalna istosmjerna struja za 3.3 V pin	50 mA
Brza (radna) memorija	32 KB (Atmega328P) od kojih se 0,5 KB koristi za podizanje sustava („bootloader“)
SRAM	2 KB (ATmega 328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Brzina sata (kvarcni kristal)	16 MHz
Broj ugrađenih LED	13
Duljina pločice	68,6 mm
Širina pločice	53,4 mm
Masa pločice	25 g

2.1.1. Analogni pinovi i A/D pretvornik (konverter)

A/D pretvornik sastoji se od 6 analognih pinova odnosno kanala označenih s A0 do A5 (Slika 2-1). Njegova je razlučivost (raspon) 10-bitna, što znači da je u mogućnosti očitati 1024 (2^{10}) razine analognog signala, te kao rezultat daje cjelobrojne vrijednosti (*integer*) od 0 do 1024 (vidi potpoglavlje 4.2.). To ga čini izuzetno primjenjivim za očitavanje napona elektroničkih senzora i omogućuje da se gotovo sve vrste elektroničkih senzora mogu spojiti na Arduino. Naravno, ukoliko su senzori prethodno prilagođeni radu s Arduino, njihovo je korištenje bolje i lakše.

Iako je glavna funkcija ovih kanala očitavanje analognih vrijednosti (napona), oni ujedno imaju potpunu funkcionalnost kao i U/I kanali opće namjene (*general purpose input/output pins*) ili GPIO. Takvi kanali barataju digitalnim U/I vrijednostima (binarni podaci). Dakle, ukoliko niti jedan od analognih kanala (A0 – A5) nije u upotrebi, a korisniku je potreban veći broj GPIO, oni se mogu koristiti u tu svrhu. Takva prenamjena očituje se i u smislu programiranja određenim naredbama, odnosno funkcijama koje su detaljno opisane na službenim stranicama Arduino proizvođača.

2.1.2. Digitalni pinovi

Svi digitalni pinovi na Arduinu, njih 14 (0 – 13), mogu se koristiti kao ulazni ili izlazni kanali. Kada se koriste kao ulazni kanali njihovi energetske zahtjevi su minimalni, gotovo zanemarivi (stanje visoke impedancije). To znači da su potrebni jako mali iznosi električne struje da bi se stanje pojedinog kanala prebacilo iz jednog u drugo stanje (npr. iz 0 u 1). Sukladno tome, omogućuju primjenu senzora visoke osjetljivosti kao jedan od primjera. Međutim, zbog te osjetljivosti, čest je slučaj da ovi kanali daju naizgled nasumične vrijednosti čak i kada ništa nije spojeno na njih; to su zapravo električni šumovi i lutajuće struje koje dopiru do tih kanala iz okoliša ili susjednih kanala. Ta se pojava još naziva *floating*, a može se eliminirati korištenjem *pull-up* i *pull-down* otpornika na ulazu kanala. Takvi *pull-up* otpornici ugrađeni su u ATmega328P čip (skraćeno ATmega) vrijednosti 20 k Ω , a aktiviraju se programski. Bitno je za napomenuti kako je zadnji pin u ovom nizu (13) serijski spojen na LED (*Light Emitting Diode*) i otpornik, te kada se koristi kao ulazni kanal daje mali napon (1,7 V umjesto 5 V). Stoga, kada se on mora koristiti kao ulazni digitalni kanal, preporučeno je da to bude u kombinaciji s vanjskim (dodanim) *pull-down* otpornikom vrijednosti 10 k Ω .

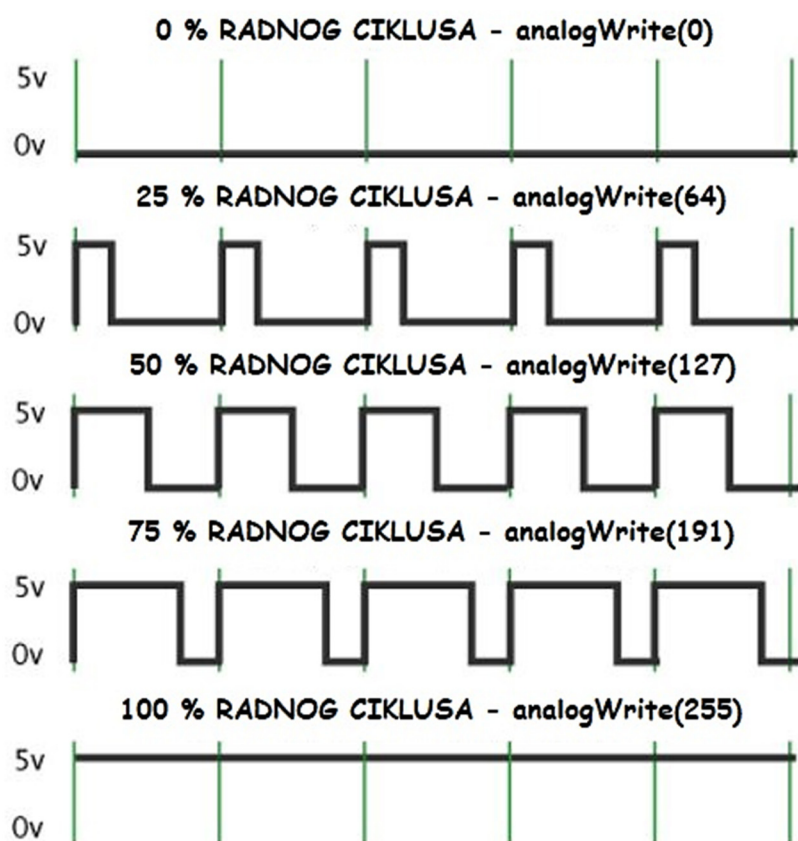
Kada se koriste kao izlazi, ovi pinovi su u tzv. stanju niske impedancije. To znači da kao izlaz mogu podnijeti značajnije iznose električne struje ± 40 mA. To je dovoljno za paljenje LED ili aktiviranje senzora, ali nedovoljno za većinu releja i elektromotora. Kratki spojevi u ovom slučaju mogu lako oštetiti komponente na pločici uključujući ATmega čip, pa se preporučuje spajanje izlaznih kanala i uređaja s otpornicima vrijednosti 470 Ω ili 1 k Ω .

Osim digitalnih izlaznih vrijednosti, pojedini kanali ili pinovi mogu simulirati analogne rezultate koristeći PWM (*Pulse Width Modulation*) tehnologiju. PWM ili modulaciju širine pulsa sadrže pinovi označeni sa simbolom „ $\sim$ ” ili češće „ $\sim$ ” (Slika 2-1); to su pinovi: ~ 3 , ~ 5 , ~ 6 , ~ 9 , ~ 10 i ~ 11 .

Modulacija širine pulsa omogućuje dobivanje analognih signala iz digitalnih podataka. Digitalni podaci koriste se za stvaranje signala koje možemo prikazati kao pravokutne valove. Oni predstavljaju dva stanja (binarni sustav) 0 i 1, gdje se 0 pridodaje vrijednost napona od 0 V, a 1 vrijednosti napona od 5 V. PWM određuje vremena trajanja tih dvaju stanja, to jest odnosom vremena trajanja stanja 0 i vremena trajanja stanja 1. Vrijeme neprekidnog trajanja stanja 1 naziva se širina pulsa. Moduliranjem, odnosno mijenjanjem te širine pulsa simuliraju se analogni podaci. Razina modulacije ovisi o frekvenciji koja kod Arduina iznosi oko 500 Hz, ona definira trajanje jednog radnog ciklusa.

Modulacija širine pulsa provodi se programski naredbom *analogWrite(x)*; gdje je x – vrijednosti 0 do 255. To je prikazano primjerom u nastavku (Slika 2-3) gdje se iz digitalnog signala postiže efekt promjenjive razine svjetlosti LED primjenom PWM metode:

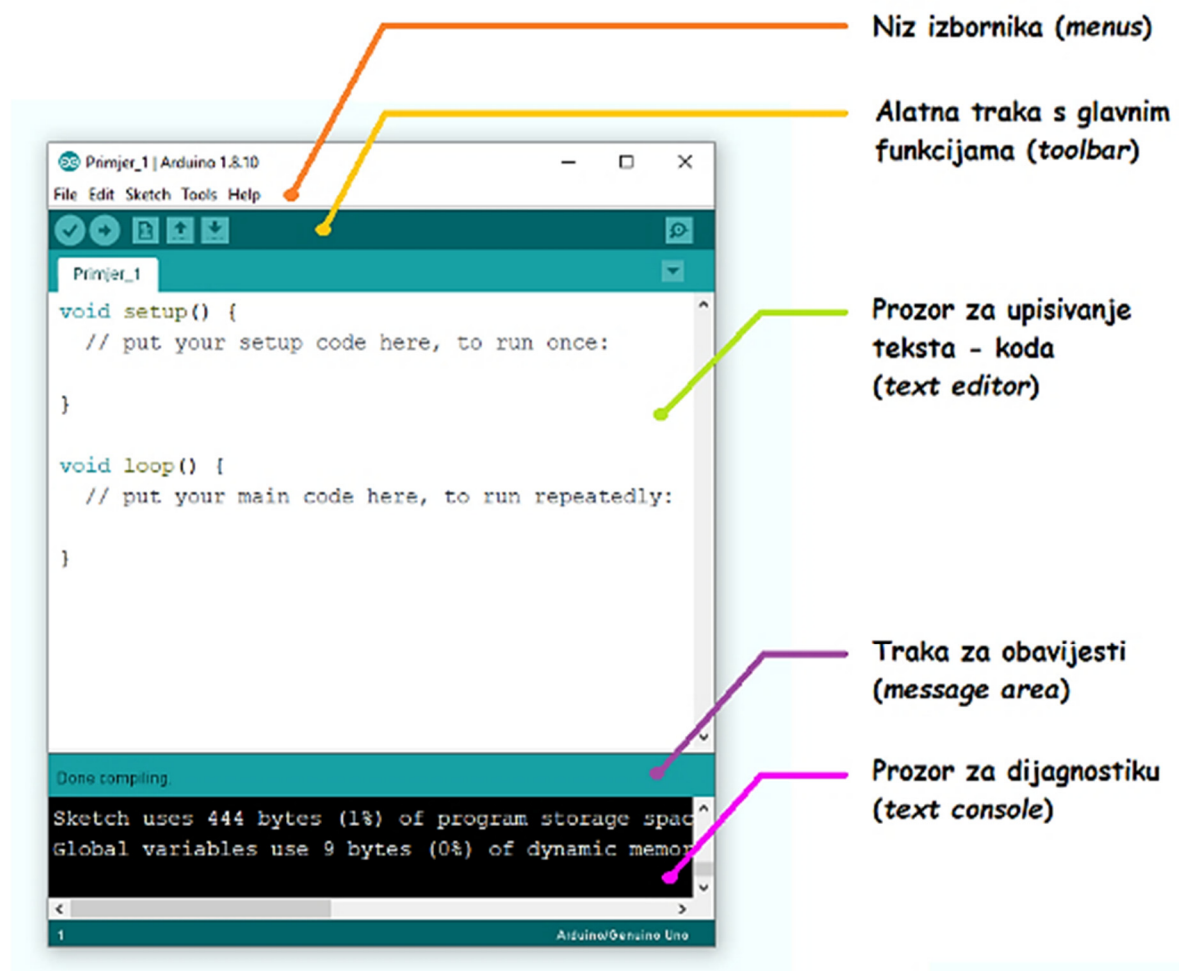
Efekt umanjene jačine svjetlosti ostvarit će se manjim odnosima vremena kada je upaljena i ugašena LED-ica, odnosno skraćivanjem radnog ciklusa (trajanja stanja 1). Za maksimalnu frekvenciju od 500 Hz, trajanje jednog radnog ciklusa (perioda) jednako je recipročnoj vrijednosti frekvencije, dakle 2 ms. To znači da za *analogWrite(255)*, zadani izlazni kanal davati će vrijednost 1 (napon 5 V) kroz cijelo trajanje jednog ciklusa, to jest 100 % radnog ciklusa; za *analogWrite(127)* upola manje, to jest 50 % radnog ciklusa itd. Zbog relativno velike frekvencije odnosno kratkog trajanja jednog ciklusa, konačni efekt **simulira** stagnaciju izlaznog napona na jednoj vrijednosti između 0 i 5 V.



Slika 2-3 Modulacija širine pulsa (PWM) (Arduino, 2020b)

2.2. Arduino Software (Arduino IDE)

Arduino sustav je zapravo alat kojem je dovoljno „reći“ što da radi šaljući set uputa u njegov mikrokontroler. Takva komunikacija postiže se Arduino IDE-om (*Integrated Development Environment*), a zasniva se na obradi podataka (*processing*). Arduino Software sadrži prozor za upisivanje teksta – **koda** (*text editor*), traku za obavijesti (*message area*), prozor za dijagnostiku (*text console*), alatnu traku s glavnim funkcijama (*toolbar*), te niz izbornika (*menus*) (Slika 2-4). Arduino Software se spaja s Arduino Hardware-om kako bi mu prenio programe (algoritme) i komunicirao s njima.



Slika 2-4 Prozor Arduino Software-a s opisom glavnih elemenata

Svaki Arduino kod sadrži dvije funkcije: **setup** i **loop**; s ključnom riječi koja prethodi **void** (*void setup (); void loop ()*) (Slika 2-4). Funkcija **setup ()** će se od pokretanja koda, pa sve do njegovog zaustavljanja ili resetiranja **provesti samo jednom**. Pod tu se funkciju upisuje početni kod za pripremu uvjeta, varijabli, pravila, pozivanje, odnosno otvaranje pojedinih programskih biblioteka itd. Nakon što se kreira početni kod koji deklarira varijable i zadaje početne vrijednosti uslijeđuje **loop ()** funkcija. Kao što joj sam naziv nalaže (*loop* – eng. *petlja*), ova funkcija neprekidno ponavlja zapis koda (vrti kod u petlji), te na taj način omogućuje programu da se mijenja i prilagođava sve dok se mikrokontroler, a time i sâm kod, ne resetira. Svrha funkcije je da **aktivno** kontrolira Arduino sustav.

Dok je većina upravljačkih sustava (*software-a*) za mikrokontrolere ograničena na operacijski sustav *Windows*, Arduino *Software* (IDE) primjenjiv je u operacijskim sustavima *Windows*, *Macintosh OSX*, *Linux*, *Android* i dr.

Mogućnosti Arduina su neizmjerne zbog razvijene ogromne *open-source* zajednice, posebice po pitanju Arduino *Software-a*. Tom ogromnom izboru mogućnosti pristupa se korištenjem **programskih biblioteka** (*libraries*). Njihovim korištenjem, funkcionalne mogućnosti Arduina mogu se proširiti baš kao i u većini drugih programskih platformi. Programske biblioteke pružaju dodatnu funkcionalnost za upotrebu u obliku **skica** ili **šablona** (*sketches*), odnosno linija koda koje su spremljene kao program, a mogu se koristiti kao potprogram; primjerice za komunikaciju s određenim *hardware-om* ili obradu posebnih podataka. Neke su programske biblioteke prisutne u originalnoj verziji Arduino IDE-a nakon preuzimanja istog, a mnoge se mogu besplatno preuzeti sa internetskih stranica Arduino zajednice. Također, sami možemo kreirati svoje programske biblioteke i dijeliti ih preko interneta s ostalima.

U zaključku, praktički beskrajn niz Arduino *hardware-a* koji su dostupni u svakojakim oblicima, primjenjivi u svim elektroničkim sustavima, kompatibilni s većinom drugih uređaja, te Arduino *software-a* koji je jednostavan, učinkovit i ima razvijenu zajednicu, kako mladih entuzijasta s novim idejama tako i iskusnih programera, zajedno čine Arduino potpuno primjenjivim u automatiziranim sustavima.

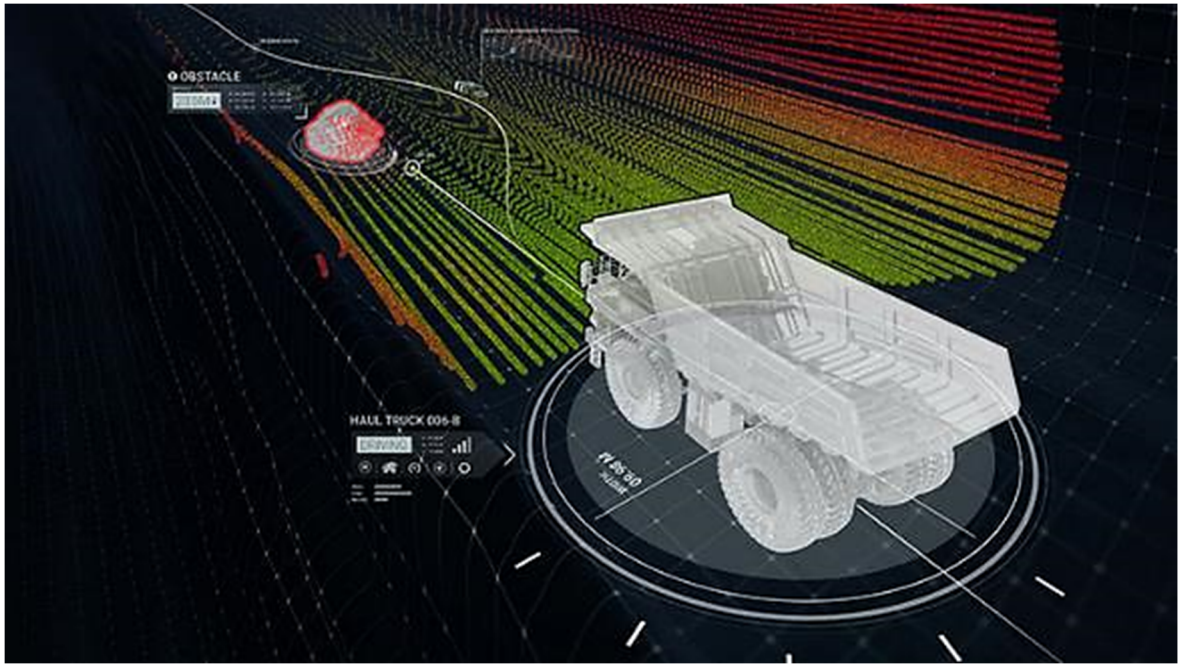
3. POTENCIJALNE PRIMJENE U RUDARSTVU

Arduino krasi vrline poput jeftine izrade i pouzdanosti, robusnosti i jednostavnosti. Iako je za upravljačke sustave u rudarstvu poput daljinskog preciznog upravljanja, snimanja laserom, robotike i mehatronike itd. još uvijek mudrije uložiti u neki certificirani i skuplji sustav, za neke druge grane sustava Arduino može više nego ispuniti zadaću. Idealan je u svrhu prikupljanja podataka, njihovo bilježenje i obradu.

3.1. Automatizacija

Automatizacija postoji već neko vrijeme u rudarstvu, prvi automatizirani procesi bili su u svrhu prikupljanja podataka. Mjerenje koncentracija i detekcija opasnih (toksičnih, otrovnih, nadražujućih, eksplozivnih itd.) plinova u jamama, mjerenja pomaka, deklinacija i ostalih geometrijskih promjena kopova, kosina, brazdi, podzemnih prostorija, odlagališta, mjerenja vlažnosti istih, detekcija prisutnosti vode, samo su neki od primjera korištenja automatiziranih sustava u samim počecima. Ipak rijetko je koji sustav bio dovoljno razvijen da, osim signaliziranja, alarmiranja i bilježenja (praćenja) podataka, poduzme konkretne korektivne mjere ili provede kompliciranije procese; ljudski faktor bio je nužan.

S eksponencijalnim rastom programske tehnologije nastali su gotovo nestvarni algoritmi sposobni ne samo izvršavati komplicirane procese, već učiti iz okoline u kojoj se ti procesi odvijaju (*AI - artificial intelligence, eng. umjetna inteligencija*). Takav program, u najjednostavnijem obliku, prepoznati će promjenu u promatranoj okolini i na temelju ulaznih podataka dati odgovarajući izlaz kao odgovor, uz kontrolu nadzornog tijela - čovjeka, koji može na temelju providnosti i iskustva prilagoditi izlaznu veličinu. Pritom će program zabilježiti danu korekciju i „naučiti“ iz nje za slučaj kada se slična situacija ponovi. Drugim riječima, što je dulje takav algoritam (program) aktivan to više postaje sofisticiraniji i samim time bolji. Već postoje kopovi u kojima je transport sirovine u potpunosti automatiziran to jest autonoman (funkcionira samostalno bez ljudskog nadgledanja), a čovjek samo kontrolira po volji proces iz jedne prostorije (Slika 3-1). U ne tako dalekoj budućnosti postojat će rudnici koji će od pridobivanja sirovine pa do njene prerade i oplemenjivanja biti u potpunosti automatizirani (*pametni rudnici*).



Slika 3-1 Princip funkcioniranja autonomnog transporta (*Asi Robots, 2015a*)

U mnogim industrijama, automatizacija se pokazala kao odlično rješenje jer je pridonijela uštedi energije, povećanju produktivnosti i iskoristivosti materijala, odnosno sirovina, povećanju sigurnosti, mogućnosti nadgledanja procesa itd. Takve industrije imaju jasno i detaljno definirane korake i cikluse, a često se koriste identični dijelovi i komponente sustava koji se automatizira, a procesi se odvijaju u dobro poznatim i kontroliranim uvjetima. Rudarstvo je ugrubo niz sustavno povezanih cjelina poput bušenja, miniranja, utovara, transporta itd. prilikom čega sustavne jedinice koje obavljaju te korake često rade u tandemu ili nekom sličnom odnosu (npr. utovar bagerima u dampere). Gotovo svaki korak u rudarskom procesu eksploatacije izvodi se u uvjetima velikog broja varijabli i nepredvidljivih situacija što otežava mogućnosti automatizacije, isto tako morali bi biti aktivni 365 dana u godini, 24 sata dnevno, a k tome se okoliš u kojem djeluju konstantno mijenja u svakom pogledu. To praktički onemogućuje primjenu konvencionalnih automatiziranih sustava drugih industrija na rudarstvo. Sustavi koji se koriste u rudarstvu moraju imati sposobnost prepoznavanja, razumijevanja i prilagođavanja promjenama kako bi uopće bili učinkoviti.

3.1.1. Zašto automatizirati u rudarstvu?

Danas, kada je takva tehnologija na sceni dovoljno dugo, a razvija se i unapređuje svakim danom teško je naći dobar argument zašto ne automatizirati (ABB, 2013). Neki od primjera zašto automatizirati:

- Kopovi i jame na teško pristupačnom ili nepristupačnom terenu
- Složena ležišta male isplativosti zahtijevaju veći stupanj produktivnosti
- Zaštita i sigurnost na radu u industriji poznatoj po opasnim uvjetima
- Energetska učinkovitost i manji broj ljudstva
- Čitavi pregled (perspektiva) velikog broja procesa kao dijelova cjeline
- Povećanje komunikacije između povezanih grupacija procesa

Ovakvi primjeri doveli su do razvoja vizije u rudarskoj industriji da se automatizacija zajedno s robotikom implementira u pojedine korake eksploatacije, a u bliskoj budućnosti na eksploataciju kao cjelinu. Takvi bi rudnici imali sljedeće karakteristike (Darling, 2011):

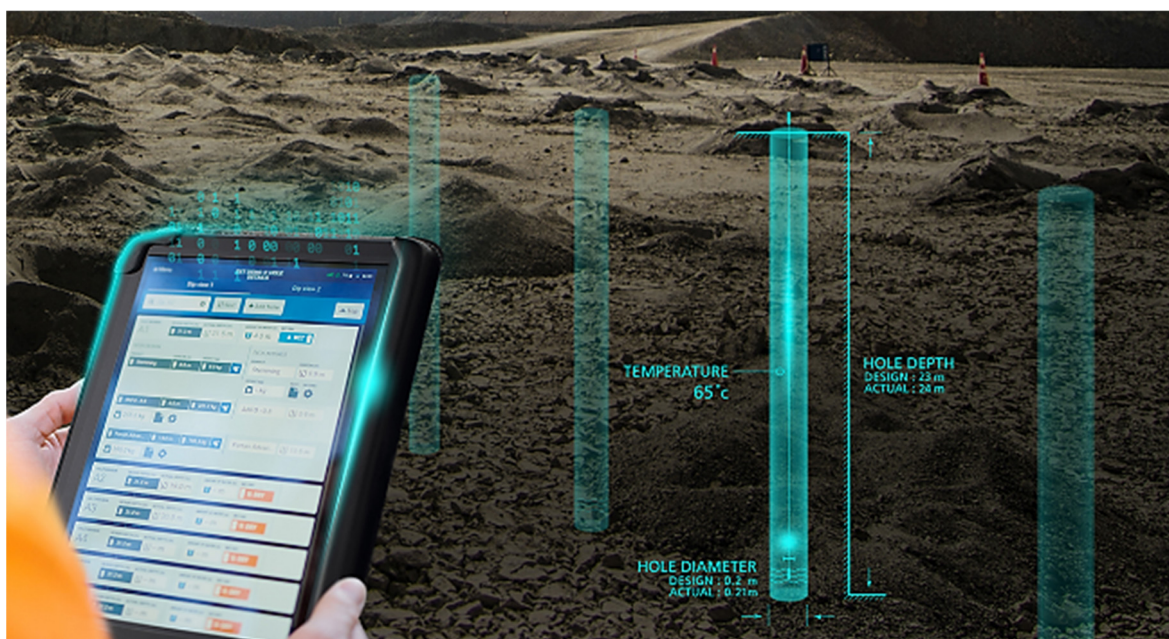
- Automatizirano praćenje opreme (strojeva) i radnika
- Automatizirano rukovanje sirovinom – damperi, utovarivači, transportne trake
- Pametne bušalice garniture – automatizirano bušenje, sposobnost prepoznavanja promjena karakteristika materijala koji se buši
- Autonomno i precizno kretanje i pozicioniranje rudarske opreme i strojeva
- Automatizirani mehanički sustavi u rudarstvu (dijagnostika kvara strojeva)
- Daljinsko nadgledanje procesa sa sigurne lokacije
- Inteligentna kontrola i upravljanje integrirani u svim procesima eksploatacije u svrhu optimizacije dobivanja sirovine (produktivnosti)

Nakon razvoja fokusa prema tehnologijama koje su povećale sigurnost i produktivnost, a smanjile broj potrebnih radnika; usredotočenje se nastavilo na tehnologije koje će ograničiti varijabilnost procesa i poboljšati njihovu preciznost. Drugim riječima da automatizacija omogući kontrolu strojeva tako da njihovi doprinosi i davanja budu jasno definirani. Primjerice automatizirani bager bi u ciklusu utovara dao manje promjenjivu vrijednost zapremine koju može napuniti, pa bi nastala mogućnost odabira idealnog kamiona (dampera) za transport. Preciznost se u rudarstvu odnosi na točno poznavanje lokacije i vremena odvijanja pojedinih procesa, te preciznost izvođenja samog procesa. Tako bi primjerice automatizirana bušalice garnitura točnije izvela bušenje prema zadanom projektu

miniranja (lokacija, promjer i dubina minske bušotine) korištenjem GPS (*Global Positioning System*) tehnologije, te drugih sustava koji sondama i senzorima mogu pratiti karakteristike tla i stijene koja se buši (Slika 3-2 i slika 3-3). Osim točno izvedenog sustava minskih bušotina (polje minskih bušotina), sustav može dati informacije o svojstvima stijene i ukazati na odabir vrste i količine eksploziva što bi u konačnici pozitivno utjecalo na konačan rezultat miniranja.



Slika 3-2 Automatizirano bušenje minskih bušotina (Orica, 2018a)



Slika 3-3 Analiza izbušenih minskih bušotina (Orica, 2018b)

Značajan doprinos ograničenja varijabilnosti procesa i poboljšane preciznosti jest to da pružaju faktor kontinuiranosti u eksploataciji. To znači da bi projektiranje rudnika, odnosno planiranje daljnjeg razvoja rudnika, proizvodnja i raspored radova bili izvođeni u skladu s okolinom, odnosno gdje je moguće ostvariti dobit. Nadalje, automatizacija omogućuje efikasniju kontrolu procesa u eksploataciji (slično kao u proizvodnoj industriji) gdje se pojedinačni procesi kao i cijela eksploatacija mogu optimizirati. Razvoj automatizacije u rudarstvu postati će katalizator u razvoju nove filozofije djelovanja u rudarstvu sličnoj onoj koja se razvila kroz predstavljanje novih metoda cjelovite kontrole kvalitete u proizvodnoj industriji (Darling, 2011).

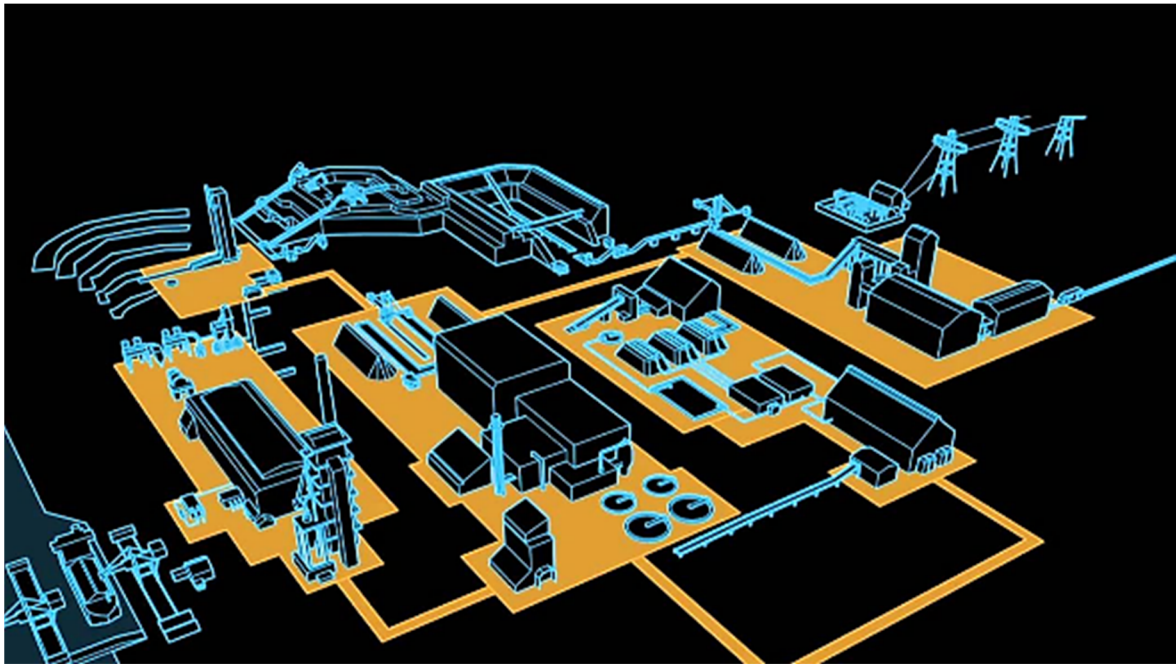
3.1.2. Kako provesti automatizaciju u rudarstvu?

U načelu, da bi se automatizirao neki proces u rudarstvu potrebno je spojiti **opremu**, **procesni sustav** (prikupljanje i obrada podataka) i **ljudstvo** u jednu funkcionalnu cjelinu (Slika 3-4). Inženjere odgovorne za pojedine, fizički odvojene, ali tehnološki povezane procese smjestiti u istu prostoriju (modernu kontrolnu sobu), omogućiti im tako neposrednu međusobnu komunikaciju zajedno sa sustavom praćenja i kontrole svakog od procesa (centralizacija procesa) (Slika 3-5). Omogućiti dostupnost informacija svakog procesa svim radnicima i u svakom trenutku na lokalnoj i centralnoj razini kontrolnim i upravljačkim sučeljima, ili putem pametnih telefona i tableta. Optimizacija svakog procesa eksploatacije, od pridobivanja sirovine do njenog napuštanja eksploatacijskog polja (ABB, 2013).

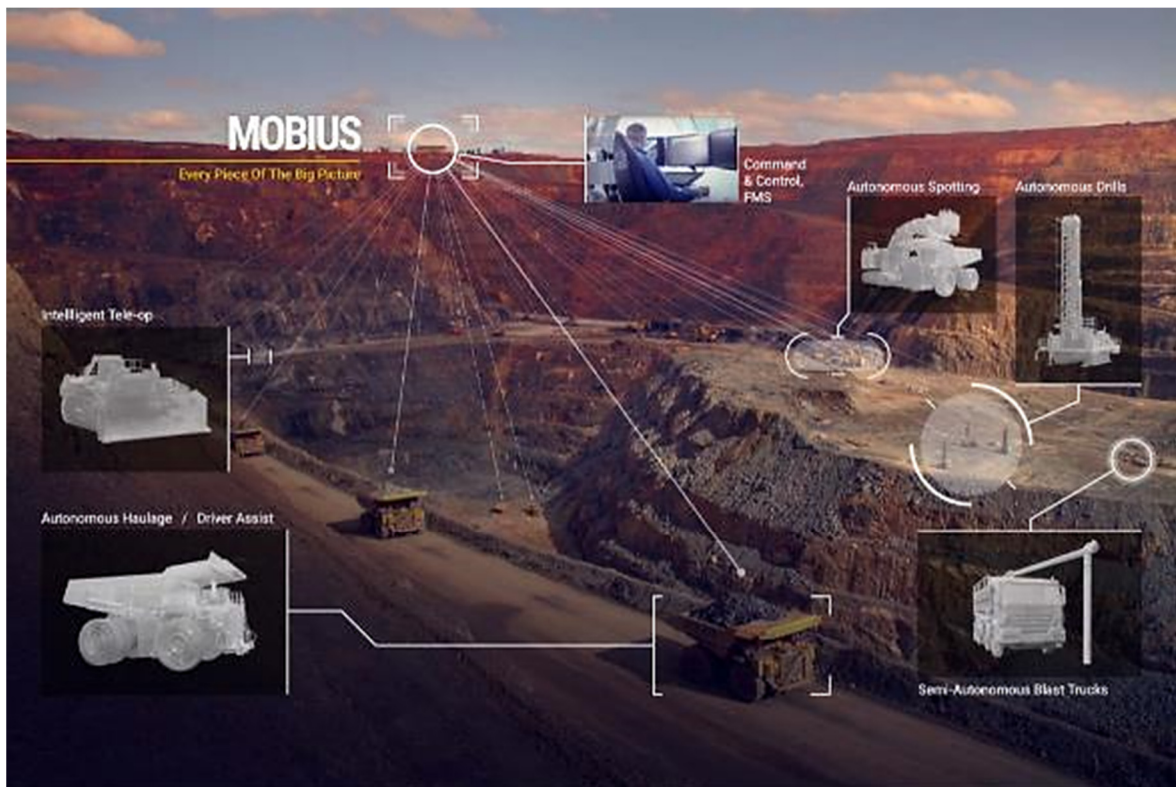
Integrirani izvori informacija u automatiziranom sustavu:

- Klasična trošila (npr. rasvjeta)
- PLC-ovi (*eng. Programmable Logic Controller*) i drugi kontroleri
- DCS-ovi (*eng. Distributed Control System*) ili sustavi za raspodjelu kontrole
- Sigurnosni sustavi (sonde i senzori)
- Pogoni i motori
- Planovi proizvodnje, dokumentacija, upravljanje imovinom
- Video i audio nadzor, komunikacijske aplikacije, internetske informacije
- Automatizirani strojevi i roboti

Arduino se može primijeniti kao uređaj za prikupljanje, obradu i pohranjivanje takvih informacija – **logger**; vidi **potpoglavlje 3.2.**). Može se koristiti za analizu i distribuciju istih, služiti kao odašiljač, senzor, upravljač i dr.



Slika 3-4 Spajanje dijelova sustava u funkcionalnu cjelinu (ABB, 2013)



Slika 3-5 Centralizacija procesa s modernom kontrolnom sobom (Asi Robots, 2015b)

3.1.3. Primjeri automatizacije u rudarstvu

Neki od primjera koji će se navesti i ukratko opisati u nastavku ovog potpoglavlja su u komercijalnoj upotrebi, a neki su još u stadiju eksperimentalne uporabe i usavršavanja na nekim kopovima. Detaljnijim informacijama sustava u razvoju je teško pristupiti zbog kompetentnosti korporacija na tržištu (Darling, 2011).

Autonomni transportni sustavi generalno se dijele u dvije skupine: **terenski autonomni sustavi** (*site-level systems* ili *office site manager*) i **strojni autonomni sustavi** (*machine-level systems* ili *onboard controls*).

Terenska automatizacija (*site-level automation*) pruža interakciju između čovjeka i planova rudarskih radova u programskom obliku, pristup podacima za praćenje napretka radova, te pružaju optimizaciju i kontrolu nad transportnim sustavima.

Planiranje razvoja rudnika (*mine planning*) zahtjeva značajniju ljudsku interakciju jer kao cilj može prioritizirati proizvodnju naspram troškova (trošenje energenata, kvarenje strojeva itd.) ili prioritizirati kratkoročnu proizvodnju naspram dugoročnoj produktivnosti (efikasnosti) rudnika. Izazov ovakvog sustava je osigurati da svi glavni (jasno definirani) i sporedni (mogući) ciljevi budu jasno preneseni sustavu većeg stupnja automatizacije.

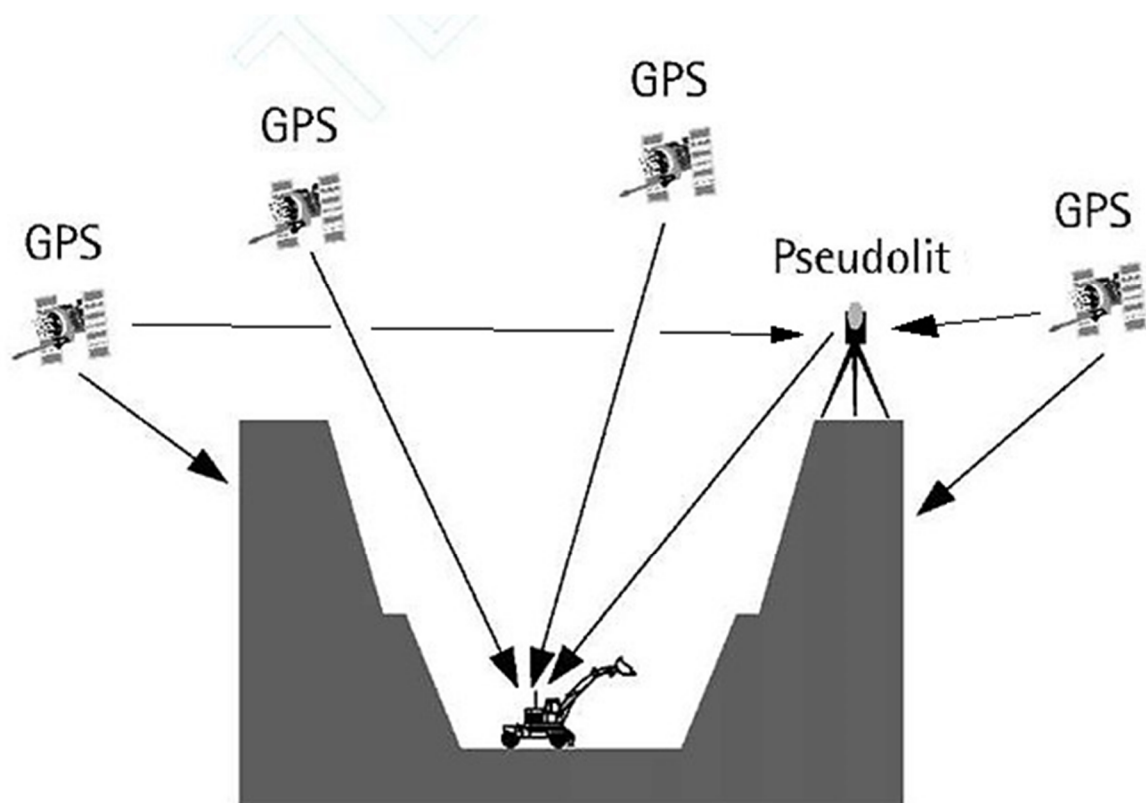
Kontrolni sustavi (*mine management*). Srećom iskustvo u ovakvim sustavima je već bogato. Ipak, u razvoju je nova generacija ovih sustava koja teži prilagodbi rada u **autonomnim** sustavima. Zahtijevati će puno detaljnije modele kopova i jama s puno novih mogućnosti da bi kontrolirali autonomnu opremu.

Strojni autonomni sustavi zahtijevaju sljedeće mogućnosti:

- Razumijevanje svoje svrhe i cilja (**planiranje visokog nivoa**)
- Snalaženje u prostoru (**pozicioniranje**)
- Poimanje okoline na temelju svoje lokacije (**percepcija**)
- Da je na temelju okoline i svoje pozicije u stanju isplanirati buduće djelovanje u skladu s dostizanjem vlastitog cilja (**planiranje radne faze**)
- Izvršavanje zadataka rane faze planiranja (**izvršavanje rane faze**)
- Snalaziti se u iznimnim situacijama

Planiranje visokog nivoa (*high-level planning*) odnosi se na mogućnost interpretacije smjernica koje daju **terenski autonomni sustavi**, te da temeljem njih odabere sljedeće radne korake. Primjerice ako se transportnom kamionu signalizira da dođe na mjesto utovara, mora biti u stanju odrediti put do tog mjesta, provjeriti dostupnost tim putem i osigurati da ispunjava uvjete i mogućnosti za izvršavanje zadatka.

Pozicioniranje (*positioning*) je mogućnost stroja da odredi svoj položaj u 3D prostoru, odnosno svoju lokaciju i orijentaciju. Za autonomne strojeve točnost pozicije i orijentacije je od kritične važnosti. Apsolutna točnost nije toliko bitna, već mogućnost registriranja položaja stroja u odnosu na model rudnika. Postoji velik broj sustava za pozicioniranje, ali svi kao osnovu imaju GPS. GPS može biti izuzetno precizan, ali često u kratkoročnom smislu, a u podzemnim rudnicima njegova je funkcionalnost upitna. Zbog toga se za primjenu u lokalnom području poput rudnika još koriste sustavi s **pseudolitim** (pseudo-sateliti) – praktički, satelit pozicioniran na terenu; i sustavi s terestričkim generatorima i odašiljačima signala sličnih satelitskim (*RF-ranging beacons*). Ti sustavi omogućuju razvoj osobnog terenskog sustava za pozicioniranje u kopovima i jamama, no često predstavljaju velike troškove investiranja i održavanja.



Slika 3-6 Princip rada pseudolita

Percepcija (*perception*) je nužna za autonomne strojeve kako bi imali dobro razumijevanje o okolini u kojoj se nalaze, to jest kako bi mogli detektirati objekte i prepreke koje ih okružuju, a katkad asistirati u procesu pozicioniranja. Ovaj sustav često zahtjeva informacije vezane za model rudnika i informacije sustava za pozicioniranje kako bi točno odredio i prijavio lokaciju objekata koji ga okružuju. Za prepoznavanje objekata koriste se tehnologije (senzori) poput radara, lasera, optičkih osjetila i sonara; zbog pouzdanosti i preciznosti često u kombinaciji.

Planiranje radne faze (*task-level planning*) definirano je uspostavljanjem nizom zadataka ili postupaka kojima se postiže zadani cilj, a obično se baziraju na pravilima ili ograničenjima. Logično, planiranje radne faze zavisno je o željenom cilju, broju ograničenja, varijabilnosti okoline i fleksibilnosti automatiziranog sustava. Jedan od češćih primjera planiranja radne faze je savladavanje (obilazanje) prepreka.

Izvršavanje rane faze (*primitive execution*) osnovna je operacija svakog automatiziranog stroja; primjeri takvih su: bušenje, niveliranje, rovanje, utovar, istovar, gradiranje (ocjenjivanje) i kontrola stabilnosti. U osnovi, ove operacije zahtijevaju kontinuiranu kontrolu u zatvorenoj petlji i vjerojatno su to operacije najprisnije vještini operatera.

Snalaženje u iznimnim situacijama (*exception handling*) odnosi se na sposobnost autonomnog stroja (Slika 3-7) da prepozna vlastitu nemogućnost svladavanja situacije koja je pred njim, odnosno da ne sadrži osnovne operacije kojima bi ispunio trenutni zadatak, te sukladno tome prekida uobičajen način rada – obično zaustavljajući se i tražeći pomoć.



Slika 3-7 Budućnost autonomnog rudarskog transporta (*Equipment World*, 2016)

Tablica 3-1 Tehničke karakteristike *Komatsu AHV-a (Autonomous Haulage Vehicle)*
(Slika 3-7)

Nominalna bruto masa	459 t
Nominalna zapremina	254 t
Bruto snaga	2700 ks
Maksimalna brzina vozila	65 km/h
Zakretni radijus	15,9 m
Duljina vozila	15 m
Širina vozila	8,5 m
Dimenzije guma	59/80R63

Tehnologije za daljnji razvoj automatizacije i robotike u rudarstvu su napredovale u zadnja tri desetljeća do te mjere da sada postoje komercijalni autonomni sustavi transporta u prodaji, za površinske kopove, a posebice za podzemne rudnike. Daljnji razvoj teži ka viziji pametnih rudnika, gdje će autonomni procesi i daljinsko upravljanje omogućiti radnicima boravak u relativno udobnim i klimatiziranim uvjetima kontrolnih soba, daleko od opasnosti. Prva generacija takvih rudnika biti će katalizator za daljnji rast efikasnosti, produktivnosti i korisnost strojeva.

Primjeri automatiziranih strojeva i sustava koji se danas primjenjuju u rudarstvu:

- Autonomni damperi u površinskim kopovima
- Automatizirani sustavi i strojevi za utovar i transport u podzemnim rudnicima
- Automatizirani dozeri
- Automatizirane bušaće garniture za bušenje minskih bušotina
- Automatizirani kopači (bageri)
- Automatizacija sustava na dugom čelu sirovine
- Automatizacija *dragline* bagera
- Daljinski operacijski centri

Primjer 1.

U klasičnim podzemnim rudnicima, 50 % energetske potrošnje opada na ventilaciju podzemnih hodnika i prostorija (ABB, 2013). Strojevi za utovar i transport često su pogonjeni dizel gorivom i emitiraju opasne ispušne plinove čija povećana koncentracija može dovesti u napast ljudsko zdravlje i život, stoga je dobra provjetrenost podzemnih prostorija ključna. Automatizirani sustav eksploatacije u takvom rudniku u svakom trenutku zna gdje se nalazi pojedini stroj pogonjen dizel gorivom, također senzorima za detekciju štetnih plinova i uređajima za mjerenje koncentracije istih (mogu biti montirani na same strojeve i u prostorijama rudnika) dobiva detaljnije informacije o stanju zraka u pojedinim dijelovima rudnika. Sukladno informacijama prilagođava brzinu vrtnje ventilatora, to jest kontrolira protok zraka u jami. Omogućava bolje prozračivanje prostorija gdje su strojevi aktivni, dok ostale prostorije, gdje je zrak zadovoljavajuće kvalitete, imaju nominalan (minimalan potreban) protok. Na taj se način osigurava ušteda energije i kvaliteta, odnosno sigurni radni uvjeti u jami.

Primjer 2.

Orica, najveći svjetski proizvođač industrijskog eksploziva nudi na raspolaganje digitalnu platformu za optimizaciju miniranja (*BlastIQ™*). U sustav se ručno unose informacije povezane s parametrima odminiranog materijala (veličina i oblik granulata dobivenog miniranjem, raspucanost, uglatost itd.) koji se prikupljaju s radilišta ili deponija sirovine. Ta su svojstva bitna za daljnju obradu (klasiranje, sitnjenje itd.), te su odraz kvalitete konačnog proizvoda ili polu proizvoda. Promjenom parametara miniranja (dubina i raspored minskih bušotina, debljina čepa, širina zaloma, vrsta i količina eksploziva itd.) mijenjaju se parametri odminiranog materijala. Točnost i pouzdanost tih podataka najviše ovisi o frekvenciji uzorkovanja, koje bi provodili ljudi zbog čega je to u suštini vodilo do pada produktivnosti, također ljudska pogreška pri utvrđivanju parametara nije zanemariva.

Razvoj novog automatiziranog sustava za kontrolu dimenzija odminiranog materijala (*FRAGTrack™*), koji je kompatibilan sa digitalnom platformom *BlastIQ*, određuje i snima dimenzije odminiranog materijala u stvarnom vremenu. Digitalna platforma prema tome optimizira parametre bušenja i miniranja čime povećava produktivnost u dugoročnom smislu.

Podaci o fragmentaciji se prikupljaju autonomno, posebnim uređajima za snimanje, montirani na prednjoj šasiji bagera i nad transportnim trakama (Slika 3-8 i slika 3-9). Time se omogućuje znatno veća frekvencija prikupljanja, odnosno veći broj podataka na raspolaganju za daljnju komparativnu analizu i vizualizaciju. Osim veće frekvencije i pouzdanosti informacija, više nije potrebno ručno uzorkovanje čime se uklanjaju radnici iz opasnih zona radilišta.

Sustav za snimanje čine posebne binokularne kamere (s dva objektiva) i inovativni algoritam za obradu hibridnih 2D/3D fotografija. Hibridni sustav obrade fotografija nadilazi sustave koji zasebno obrađuju 2D i 3D fotografije čime gube na preciznosti. Same kamere su robusne i izdržljive izvedbe, velike otpornosti na prašinu i udarce, a primjenjive su na temperaturama zraka od -30 °C do 45 °C (*Mining.com*, 2019).



Slika 3-8 Autonomni sustav za određivanje fragmentacije odminiranog materijala na bageru (*Mining.com*, 2019a)



Slika 3-9 Autonomni sustav za određivanje fragmentacije odminiranog materijala nad transportnom trakom (*Mining.com*, 2019b)

3.2. Prikupljanje podataka (*Data Logging*)

U prethodnim poglavljima i potpoglavljima više puta su se spominjali izrazi *prikupljanje podataka*, *prikupljanje informacija* i sl. Prikupljanje i snimanje podataka neizostavan je dio automatizacije.

Da bi nešto moglo biti automatizirano mora imati podatke kao ulazni dio na temelju kojih će davati određene izlazne podatke kao odgovor. U procesu automatizacije složenih procesa poželjan je što veći broj podataka odnosno informacija o trenutnom stanju nekog procesa ili jednog dijela tog procesa u jedinici vremena – što veća **frekvencija bilježenja podataka (*sample rate*)**. Naizgled najjednostavniji procesi u svojoj srži mogu biti jako komplicirani zbog kompleksnosti podataka, njihove količine i vremena u kojem se moraju obraditi.

Općenito, prikupljanje podataka podrazumijeva proces pridobivanja i pohranjivanja podataka kroz određeni vremenski period. Kod prijenosa, obrade i zapisa podataka bitno je ispuniti uvjete **točnosti**, **stabilnosti očitavanja** i **količine podataka po jedinici vremena (frekvencija)**. Podaci se mogu koristiti u svrhu analize specifičnih trendova ili snimanja određenih uvjeta i događaja nekog sustava u podatkovnom obliku s ciljem kontrole sustava i optimizacije procesa. *Data logging* omogućuje praćenje svih radnji kojima se podaci pohranjuju, kojima se pristupa podacima, te kojima se oni mijenjaju ili prilagođavaju.

Prikupljanje podataka otvara mogućnost snimanja aktivnosti koja se odvija na jednom ili više objekata, odnosno setu ili setovima objekata. U tipičnim slučajevima to su određeni događaji ili akcije, uvjeti, karakteristike; sve je u podatkovnom obliku i veže se za jedinicu vremena. Uređaj koji provodi ovu operaciju zove se *data logger* ili *data taker*, a u nekim literaturama je popularan naziv *data tracker* (skraćeno samo *tracker*).

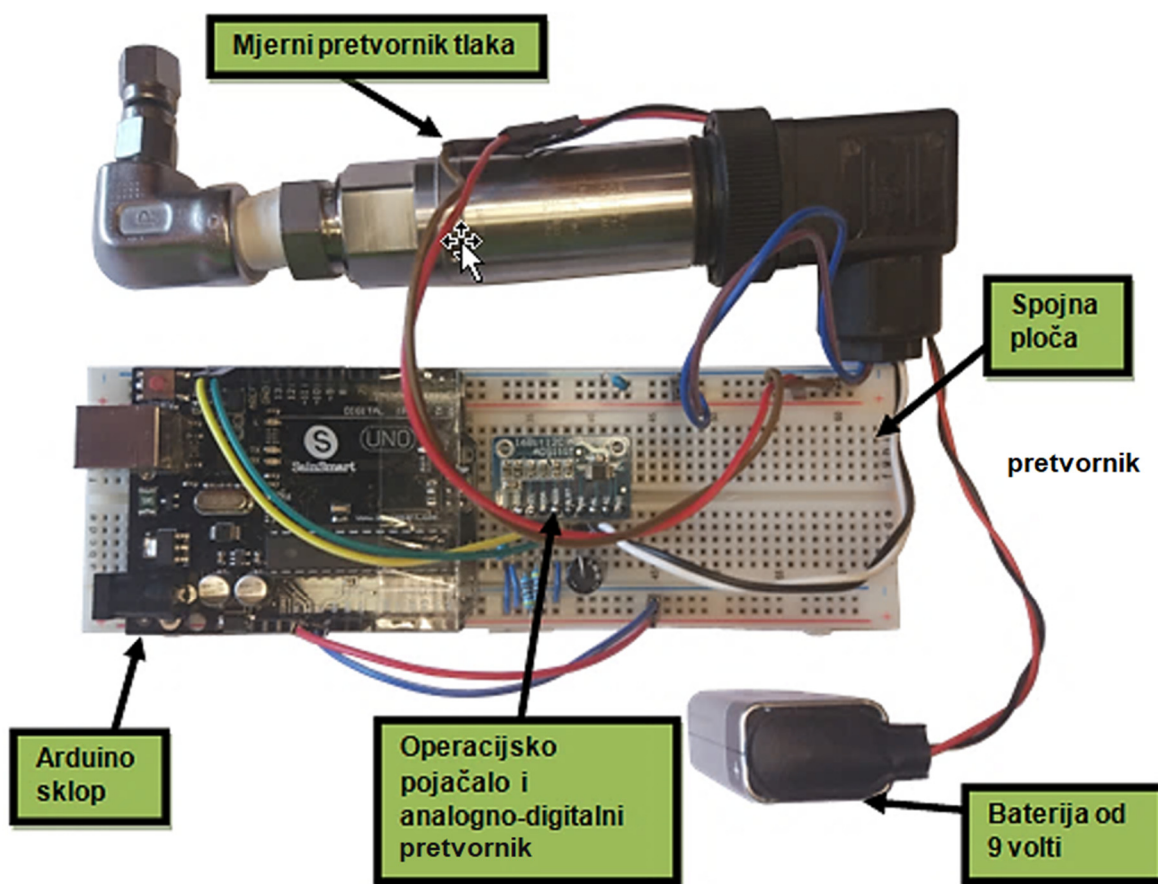
U rudarstvu, ti su uređaji odavno našli svoju svrhu; kontrola razine vode pomoću analognih ulaza, kontrola protoka, temperature i vlažnosti zraka u podzemnim prostorijama, kontrola sličnih uvjeta kod odvodnjavanja pumpama, u malim lokalnim meteorološkim stanicama ili stanicama za mjerenje promjena u geometriji kopa/jame, kontrola kvalitete zraka, kontrola i monitoring procesa (bušenje, transport, oplemenjivanje), pa čak i za praćenje i kontrolu kočionih sustava na transportnim strojevima itd.

3.3. Primjeri korištenja Arduino platforme na RGN fakultetu

U završnom radu *Izrada mjernog sustava za mjerenje potrošnje snage trošila u pogonu* (Modrić, 2016) opisana je upotreba Arduino sustava u svrhu trenutačnog mjerenja snage trošila *off-line* metodom (prikupljeni podaci se pohranjuju u stvarnom vremenu i kasnije obrađuju na računalu). U usporedbi s komercijalnim uređajem koji je mjerio *on-line* metodom (podaci se obrađuju prilikom mjerenja), Arduino se pokazao vjerodostojnim *loggerom* snage, te se uspješno koristio kao prijenosni automatizirani uređaj za mjerenje s napajanjem litij-ionskom baterijom, a jednim je punjenjem mogao raditi četiri dana.

Arduino se koristio kao instrument za određivanje mikroklimatskih parametara u radu: *Usporedba instrumenata za mjerenje mikroklimatskih parametara* (Belošević, 2017). Uređaj je bio sastavljen u kombinaciji sa dva senzora koji su mjerili vlagu, tlak i temperaturu. Automatiziranim prikupljanjem velikog broja podataka, uređaj se pokazao preciznim, pouzdanim i brzim. Omogućio je određivanje mikroklimatskih parametara: temperature i vlažnosti zraka; točnije od svih ispitanih analognih instrumenata. Uređaj je bio malih dimenzija, lagan i jednostavan za korištenje.

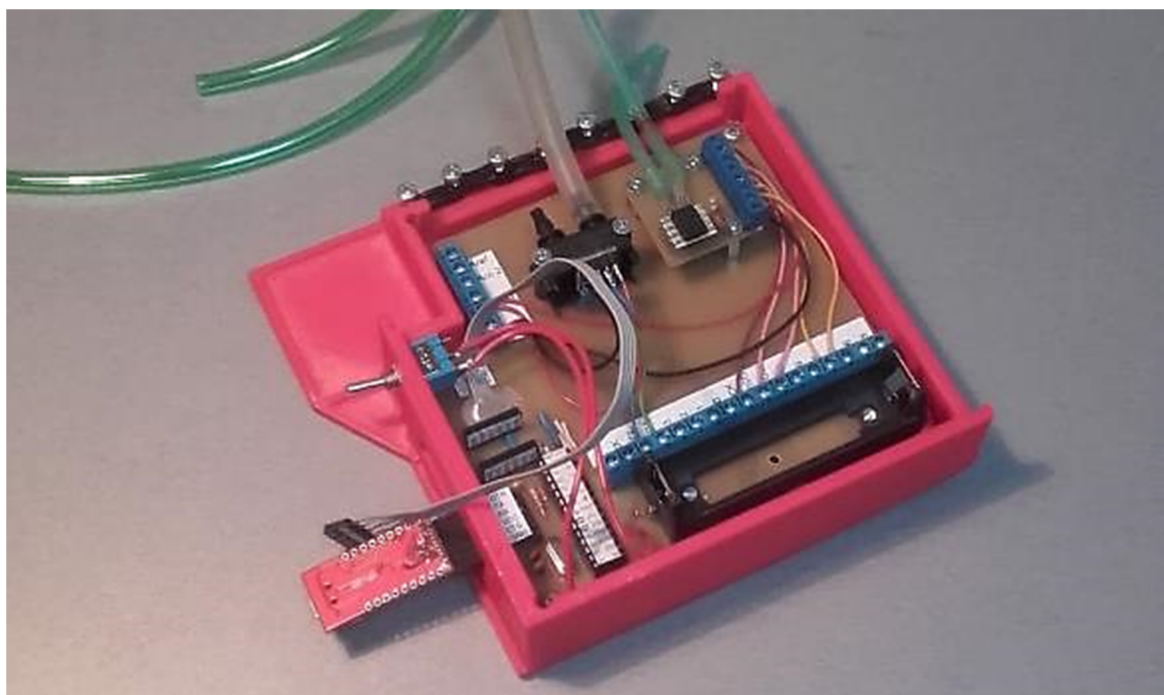
Mjerenje plinopropusnosti metodom padajućeg tlaka (Juranko, 2018) završni je rad u kojem se Arduino sustav koristio kao uređaj za automatizirano mjerenje tlaka (Slika 3-10). Uloga mu je bila prikupljati podatke u digitalnom obliku (jer je na ulazu imao dodatni A/D pretvornik s prepojačalom kao modul) u stvarnom vremenu i obrađivao podatke na način da je preračunavao u kodu podatke dobivene konverzijom (iz analognog u digitalni oblik) u vrijednosti promijene tlaka. Uređaj se pokazao uspješnim u dokazivanju hipoteze o mogućnosti preciznog mjerenja propusnosti uzoraka metodom padajućeg tlaka pomoću mjernog pretvornika tlaka (tlačnog senzora). Mogućnost automatizacije Arduino sustavom omogućuje mjerenja za uzorke izrazito male propusnosti gdje bi mjerenje trajalo jako dugo.



Slika 3-10 Uređaj za mjerenje tlaka (Juranko, 2018)

Arduino se koristio kao *logger* za podatke mjerenja diferencijalnih tlakova piezoelektričnim senzorom (RSC) i senzorom termalnog protoka (SDP610) u praktičnom dijelu završnog rada pod nazivom: *Usporedba instrumenata za mjerenje diferencijalnog tlaka zraka* (Kalinić, 2018). Mjerenjem su se utvrđivali opseg mjerenja, točnost i rezolucija različitih senzora za određivanje diferencijalnih tlakova. Ispitivanjem se pokazalo kako elektronički senzori spojeni na Arduino (Slika 3-11) imaju manju točnost od ručnih instrumenata za određivanje tlakova. No, imali su najveću rezoluciju izmjerenih podataka, postupak mjerenja bio je neusporedivo brži (ne zahtjeva vizualno očitavanje i preračunavanje), a proces mjerenja je automatiziran.

Kod ispitivanja u svrhu *Usporedbe mjerenja instrumenata za mjerenje brzine strujanja zraka* (Čunko, 2017) Arduino je imao sličnu ulogu. Također je služio kao *logger* za senzor termalnog protoka SDP610 (Slika 3-11, bijela cjevčica). Sklop su činili digitalni manometar kojim su se mjerio tlak u stvarnom vremenu u podzemnim prostorijama. Na računalu su se ti podaci obrađivali u iznose tlakova iz kojih se zatim računala brzina strujanja zraka u tim prostorijama. U usporedbi s drugim instrumentima davao je najveći broj podataka u jedinici vremena što je omogućilo usrednjavanje rezultata i veliku točnost. Za razliku od nekih instrumenata nije imao odstupanja u rezultatima dobivenih mjerenjem većih i rezultatima dobivenih mjerenjem manjih brzina strujanja zraka – najvjernije je pratio trend krivulje rezultata pouzdanog referentnog instrumenta.



Slika 3-11 Senzori SDP610 i RSC (zelene cjevčice) spojeni na Arduino (Kalinić, 2018)

Arduino platforma koristila se u jednom složenijem projektu: *Construction and testing of the measurement system for excavator productivity* (Klanfar et al., 2019).

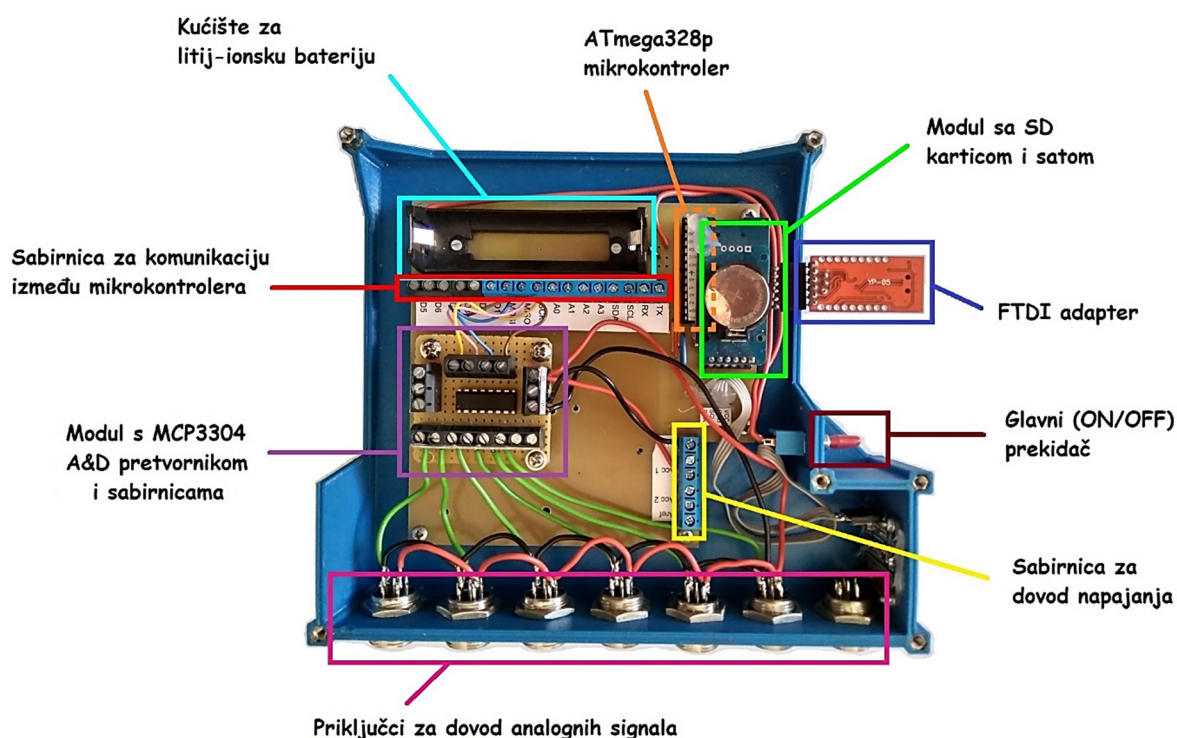
Bager kao najkorišteniji stroj u rudarstvu, građevinarstvu i geotehnici, predstavlja potencijalni uzrok troškova po pitanju potrošnje goriva i održavanja. Zbog toga se razvila ideja nadgledanja, odnosno snimanja njegove produktivnosti. Rezultati mjerenja moći će doprinijeti uštedi goriva, manjim troškovima održavanja, optimizaciji troškova radnih parametara i većoj radnoj efikasnosti. Međutim, takvi komercijalni sustavi nisu jeftini i pristupačni. Stoga se u ovom projektu osmislio mjerni sustav sastavljen od tri senzora tlaka, po jedan za svaku hidraulični cilindar bagera, tri senzora linearnog pomaka koji su se montirali na cilindre i inercijske mjerne jedinice. Njihova je funkcija interpretirati pokrete bagera u obliku podataka koji su potom *prikupljani*.

Bager se smatra višefunkcionalnim strojem čija radna efikasnost ponajviše ovisi o silama koje nastaju između njegovog radnog elementa (lopate) i stijene. U načelu, njegovu radnu efikasnost može se interpretirati kao količina materijala koju on iskopa, premjesti ili utovari u jedinici vremena. Taj podatak bitan je za proračun kapaciteta većih sustava koje u tehnološkom procesu sadrže bager. Nadalje, utvrđivanjem parametra poput idealne putanje lopate za zadanu visinu ili dubinu pri kopanju može se optimizirati rad bagera u svrhu smanjenja troškova u svakom pogledu.

Zbog velikog broja ulaznih kanala, i velike količine podataka, na Arduino platformu dodan je modul s čipom MCP3008-I/P. To je 12-bitni A/D pretvornik koji može imati 8 ulaznih (jednostruko referenciranih) kanala. Njegova je uloga bila prikupljati podatke senzora, obavljati A/D pretvorbu, kontrolirati napajanje i ostvariti komunikaciju s glavnim procesorom, to jest Arduino mikrokontrolerom ATmega328P. Bitno je spomenuti kako je za napajanje ovog uređaja bila dovoljna litij-ionska baterija napona 4 V. Ovako konstruiran *logger* ispunio je zadaću, imajući minimalnu brzinu uzorkovanja (*sample rate*) 39 Hz. To je više nego dovoljno za jedan radni ciklus bagera u kojem (ako traje više od 20 sekundi) *logger* zabilježi najmanje 780 podataka. Frekvencija je ovisila o kodu, odnosno nekoj od varijanti koda. Najveća se frekvencija (588 Hz) postignuta je samo očitavanjem podataka senzora, bez njihovog pohranjivanja ili obrade (matematičke). Pohranom podataka preko serijskog porta frekvencija opada (344 Hz), a pohranom na SD karticom značajnije (56 Hz). Ako se još doda matematička obrada podataka prilikom pohranjivanja serijskim portom frekvencija opada višestruko (172 Hz), a za SD karticu tada iznosi (51 Hz). Spomenuta minimalna frekvencija odnosi se na način rada kada se podaci obrađuju i pohranjuju na oba načina.

Uređaj se pokazao točnim s malim odstupanjima u mjerenju, i visokom rezolucijom. U budućnosti će još biti potrebno provesti ispitivanje u nešto težim uvjetima; npr. izlaganju ekstremnijim temperaturama i jačim vibracijama.

Uređaj korišten u svrhu ovog rada sličan je onom korištenom u prethodnom primjeru. Sadrži mikrokontroler **ATmega328P** kao Arduino platformu i **MCP3304** kao eksterni A/D pretvornik (Slika 3-13). Koristi se primarno kao *logger*, a sadrži dodatne module za pohranu podataka, komunikaciju, napajanje i dr. (Slika 3-12).



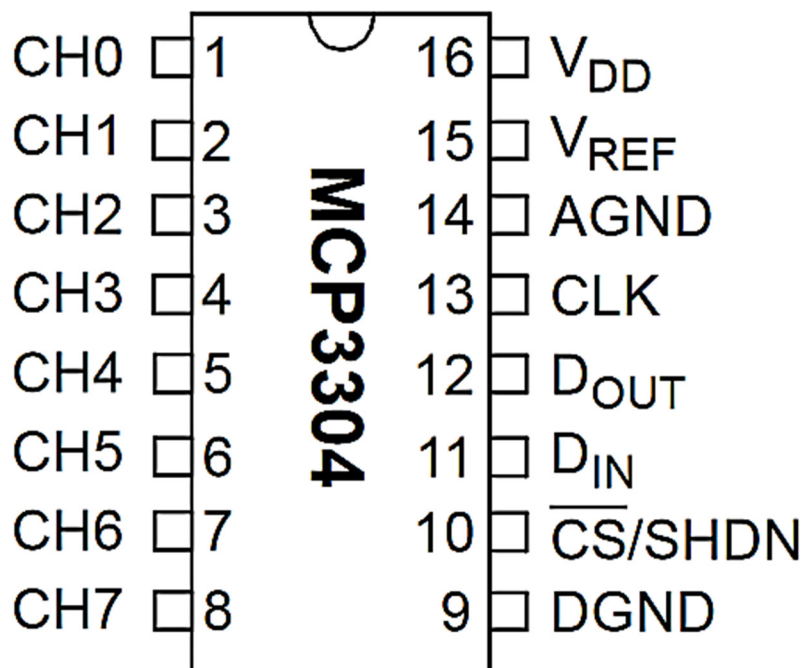
Slika 3-12 Shema *logger* uređaja s Arduino platformom

Modul sa SD karticom i taktom (RTC -*real time clock*) omogućuje pohranu podataka i praćenje istih u stvarnom vremenu, zbog čega uključuje malu bateriju koja konstantno napaja ovaj modul. FTDI adapter omogućuje komunikaciju (prijenos podataka) putem USB priključka. Sabirnica za dovod napajanja pruža dovod napajanja sa USB priključka ili litij-ionske baterije na ostale elemente uređaja. Druga sabirnica povezuje dva mikrokontrolera i omogućuje njihovu međusobnu komunikaciju i dovod napajanja na ATmega328P.

Tablica 3-2 Tehničke karakteristike eksternog ADC-a MCP3304 (*Microchip*, 2020)

Radni napon	2,7 V – 5,5 V
Maksimalna jačina el. struje (5 V)	450 μ A
Jačina el. struje u stanju mirovanja	50 nA – 1 μ A
Frekvencija uzorkovanja (2,7 V – 5 V)	50 kHz – 100 kHz
Ulazni pinovi	4 diferencijalno ili 8 jednostruko referenciranih
Ukupni broj pinova	16
Rezolucija	12 bit (+1 za predznak)
Komunikacija	SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)
Radna temperatura	-40 °C do +85 °C
LSB (maks. INL)	± 1 (razred B); ± 2 (razred C)
LSB (maks. DNL)	± 1

MCP3304 (skraćeno MCP) podržava mogućnosti mjerenja diferencijalnih signala. Malih je dimenzija, a zbog malene energetske potrošnje odličan je za rad prilikom napajanja baterijom. SPI tip komunikacije, visoka brzina prikupljanja podataka i 12-bitna rezolucija čine ga idealnim za spajanje s drugim mikrokontrolerima, poput ATmega328P.

**Slika 3-13** Shematski prikaz ADC-a MCP3304 (*Microchip*, 2020)

4. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE

Svrha laboratorijskih ispitivanja bila je usporedba Arduino platforme kao mjernog uređaja s nekim drugim uređajem veće preciznosti, te usporedba mjerenja provedenih Arduinovim ADC-om (ATmega328P) s eksternim ADC-om (MCP3304). Arduino čip ATmega328P i eksterni čip MCP3304 čine Arduino platformu, odnosno oba funkcioniraju pomoću Arduino *software*-a. Kao referentni uređaj za usporedbu koristio se precizni multimeter FLUKE 8846A (Slika 4-1).

Cilj je bio odrediti: **točnost**, **frekvenciju uzorkovanja (*sample rate*)** i **stabilnost mjerenja** (ovisno o izvoru napajanja) Arduino platforme.

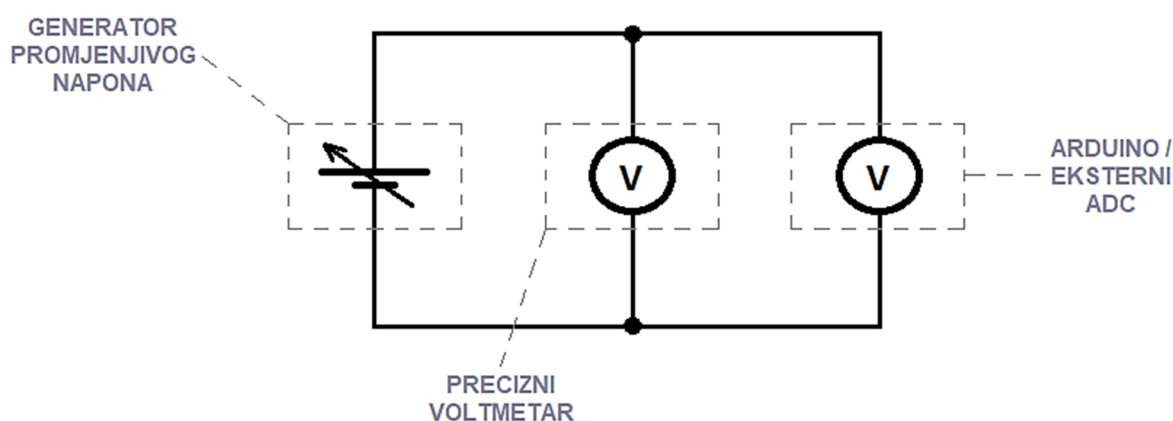


Slika 4-1 Precizni multimeter FLUKE 8846A

FLUKE 8846A koristio se kao referentni voltmetar (Slika 4-2). Svake se godine umjerava u *Primarnom elektromagnetskom laboratoriju* FER-a. Kod umjeravanja se koriste naponi u rasponu od 0 V do 5 V, pa se FLUKE koristi na mjernom području od 10 V. Prema specifikaciji na tom mjernom području multimeter može mjeriti napone s prikazom 10,00000 V to jest uz rezoluciju od 10 μ V. Točnost mu je, u periodu od godinu dana 0,0024 % izmjerene vrijednosti plus 0,0005 % od mjernog područja. Raspon odstupanja je dakle od 50 μ V (kada mjeri 0 V) do 290 μ V (kada mjeri 10 V), to jest 170 μ V kada mjeri 5 V.

4.1. Princip mjerenja

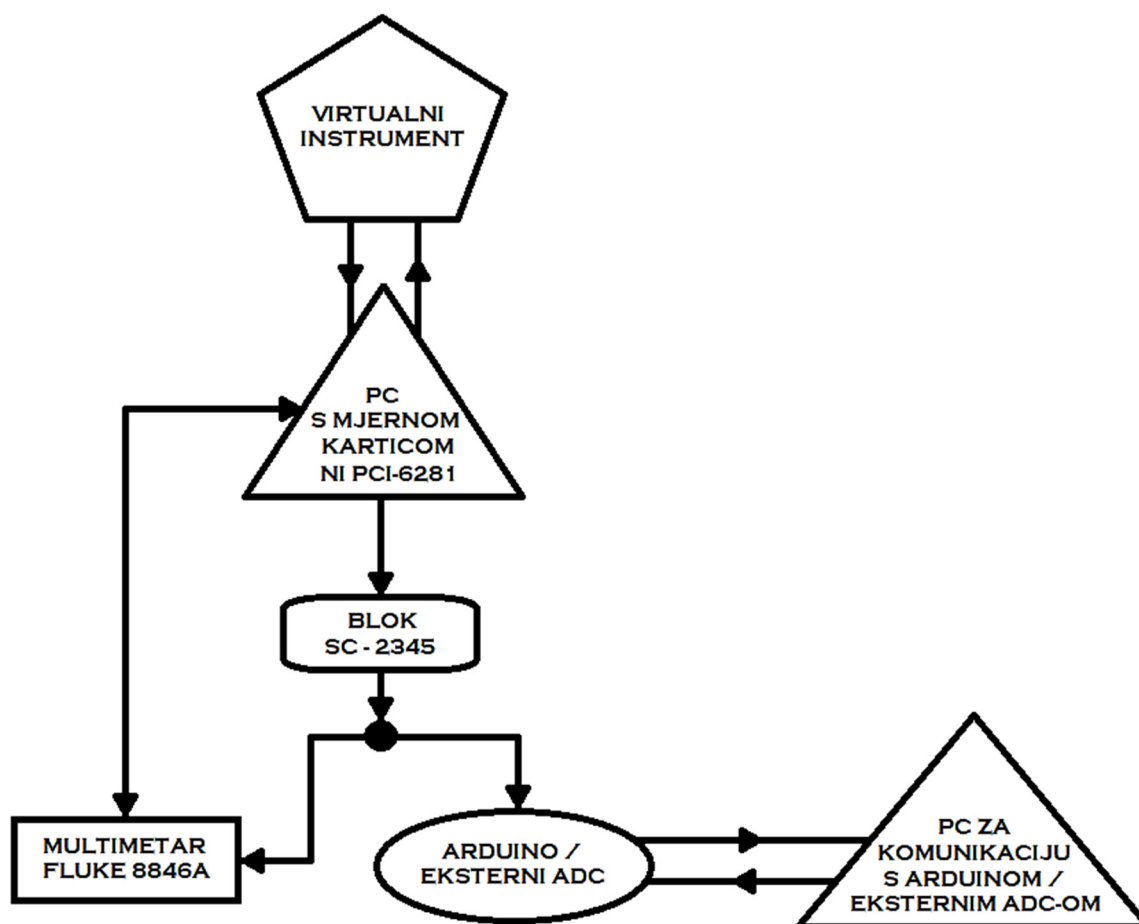
Generatoru promjenjivog napona u paralelu se spoji precizni voltmetar FLUKE i Arduino platforma (Slika 4-2). Potom je napon generatora postepeno povećavan pa smanjivan i mjereno Arduinom i referentnim voltmetrom. Na kraju su izmjerene vrijednosti Arduinom uspoređene s mjerenjima referentnog voltmetra FLUKE.



Slika 4-2 Principijelna shema ispitivanja mjerenjem napona

Stvarni sustav za izvođenje ispitivanja nešto je složeniji, ali u načelu jednostavan i praktičan. Generator promjenjivih napona je mjerna kartica **NI PCI-6281** u osobnom računalu (PC). Računalo ima ulogu sučelja sa posebnim programom kojim se upravlja mjernom karticom, odnosno naponom koji ona daje. Mjerna kartica spojena je posebnim kabelom na blok za kondicioniranje signala **SC-2345** preko kojeg se mogu spojiti mjerni uređaji. U ovom slučaju to su precizni multimetar FLUKE i Arduino platforma, s dva ADC-a. Nadalje, Arduino platforma je USB priključkom spojena na drugo računalo za komunikaciju s Arduino IDE-om. FLUKE je dodatno povezan USB priključkom s računalom koje sadrži mjernu karticu jer se njegovim radom i mjerenjima upravlja preko istog programa kao mjerna kartica.

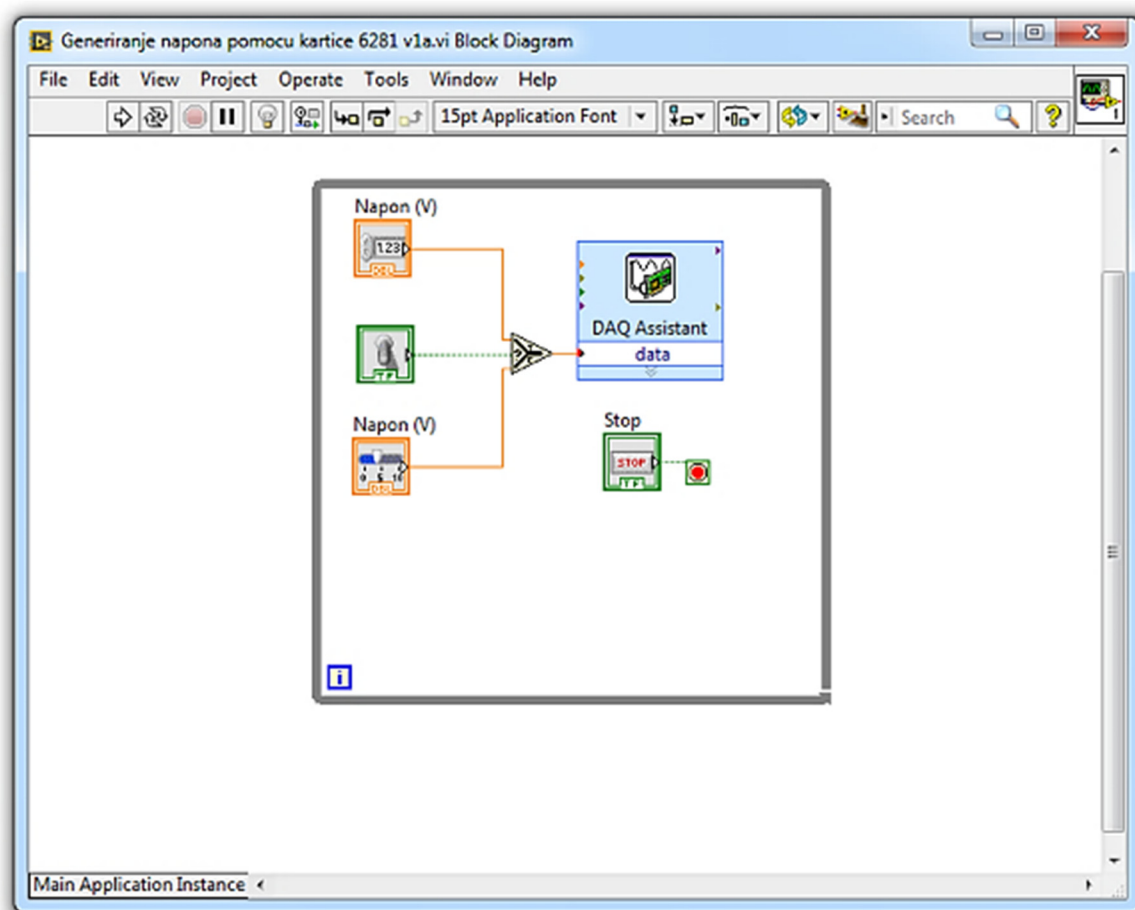
Princip spajanja navedenih uređaja u svrhu ispitivanja za određivanje **točnosti stabilnosti mjerenja** prikazan je blok shemom (Slika 4-3). Za direktnu usporedbu mjerenja Arduina i FLUKE-a princip spajanja je bio malo drugačiji (Slika 4-21), a objasniti će se u nastavku (vidi potpoglavlje 4.4.).



Slika 4-3 Blok dijagram spajanja uređaja za određivanje **točnosti i stabilnosti mjerenja**

Generator promjenjivih napona je **mjerna kartica NI PCI-6281** integrirana u osobno računalo (PC) kao posebni modul. Ima dva analogni izlaza sa 16-bitnom rezolucijom i rasponom izlaznih napona od -10 V do 10 V, te brzinom od 2,86 milijuna uzoraka u sekundi (jednokanalni režim rada). Karticom se upravlja koristeći **virtualni instrument** koji se izrađuje u programu **LabView**. On radi na principu vizualnog programiranja (slaganje i povezivanje kućica – funkcija). Program se radi posebno za svaku mjernu proceduru.

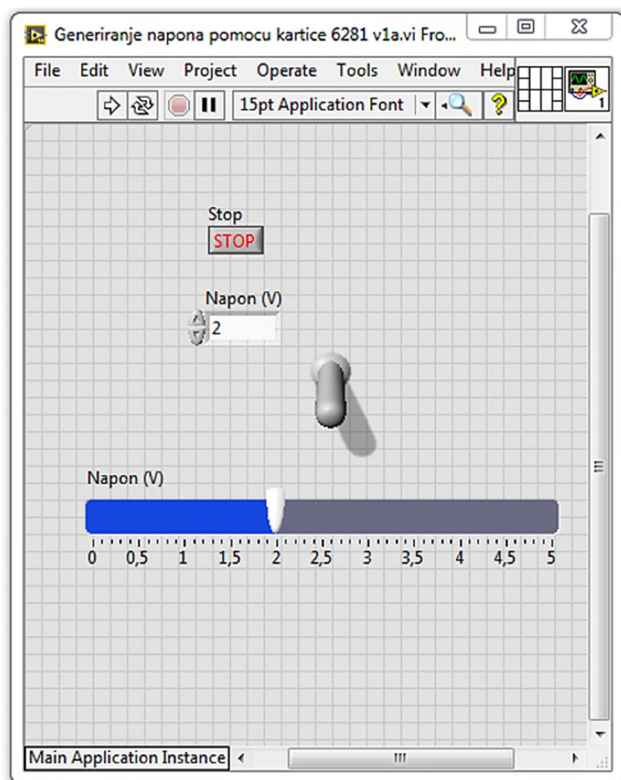
Virtualni instrument sastoji se od dva sučelja (prozora): blok dijagrama i prednjeg sučelja (*front panel*). Blok dijagram (Slika 4-4) predstavlja funkcionalni dio virtualnog instrumenta. U njemu se mogu jednostavno, povezivanjem kućica, konstruirati i kontrolirati programi ili algoritmi prema kojima će upravljati vanjskim uređajima i instrumentima.



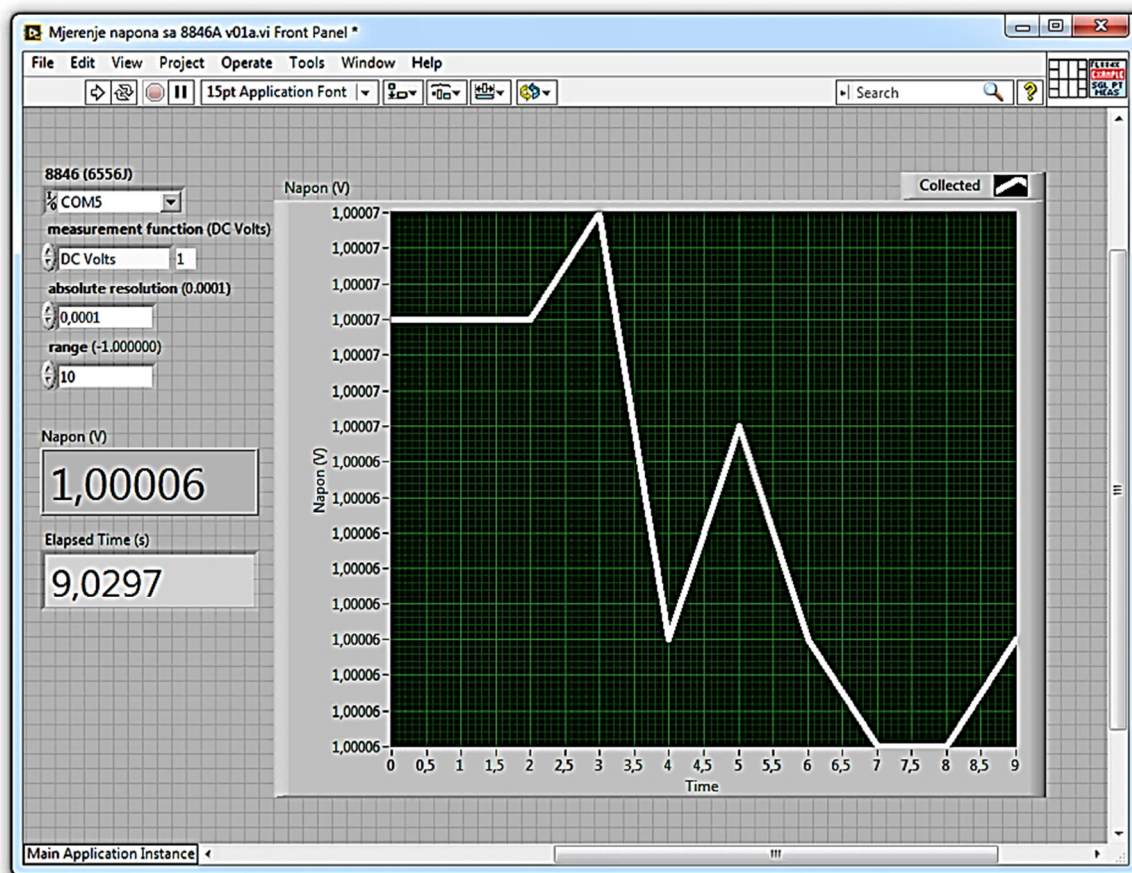
Slika 4-4 Primjer blok dijagrama virtualnog instrumenta u programu *LabVIEW*

Za ovo umjeravanje napravljena su dva virtualna instrumenta. Prvi omogućava biranje željenog izlaznog napona, a drugi automatizirano prikupljanje deset uzoraka s referentnog voltmetra FLUKE. Na slici 4-4 prikazan je prozor jednostavnog blok dijagrama čija je funkcija kontinuirano davanje određenog iznosa napona.

Prozori prednjeg sučelja predstavljaju upravljačko-informativni dio virtualnog instrumenta koji je aktivan tek kada se pokrene program blok dijagrama. Oni mogu sadržavati tipkala i prekidače, pomične skale i potenciometre kao upravljačke komponente (Slika 4-5) ili npr. prikaze grafova slične onima na osciloskopu kao informativne komponente (Slika 4-6).



Slika 4-5 Primjer prednjeg sučelja s upravljačkim elementima virtualnog instrumenta

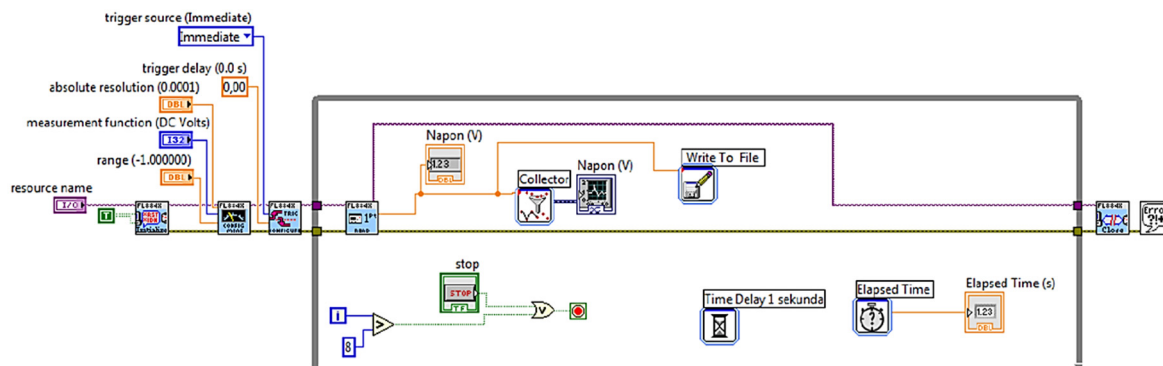


Slika 4-6 Primjer prednjeg sučelja s grafičkim prikazom u virtualnom instrumentu

Na slici 4-5 prikazan je jedan prozor prednjeg sučelja blok dijagrama sa slike 4-4 On sadrži kućicu za unos broja, prekidač i pomičnu skalu određenog raspona. Kućica i skala služe za unos iznosa željenog napona, a prekidač u ovom slučaju služi za odabir koji će se koristiti od ta dva. Na slici 4-6 može se vidjeti primjer drugačijeg prednjeg sučelja koje prikazuje povratnu komponentu to jest grafički prikaz izmjerenih uzoraka napona u određenom intervalu.

Drugi kreirani virtualni instrument (Slika 4-7) služi za komunikaciju s FLUKE-om. Zadaća mu je prilikom pokretanja prikupiti **deset** mjerenja koje daje FLUKE u međusobnom vremenskom razmaku od **jedne sekunde**. Također, iste podatke će prikazati u obliku dijagrama (Slika 4-6) i zapisati ih u obliku *Excel* tablice (Slika 4-8).

Kada se generatorom napona narine određena vrijednost, FLUKE ju mjeri u stvarnom vremenu. Pokretanjem ovog virtualnog instrumenta program će kroz devet sekundi (prvo mjerenje u nultoj sekundi) obaviti prikupljanje podataka u obliku mjerenih vrijednosti koje je FLUKE mjerio u trenutku svakog uzimanja pojedinog podatka (uzorka).



Slika 4-7 Blok dijagram s funkcijom prikupljanja uzoraka

	A	B	C	D	E	F	G
1	Untitled						
2	0.00012						
3	0.00011						
4	0.00012						
5	0.00013						
6	0.00012						
7	0.00012						
8	0.00012						
9	0.00013						
10	0.00013						
11	0.00013						
12							
13							

Slika 4-8 Zapis rezultata u *excel* tablici

Uzorkovanje, bilježenje i prikaz mjerenog napona Arduino platformom nije moguće bez pripremljenog koda u Arduino IDE-u (Slika 4-9). Kod se pokreće ručno prilikom svakog mjerenja, a ima mogućnost odabira **broja uzoraka** koji će uzeti, njihov **vremenski interval**, te kojim će ADC-om obavljati mjerenje (ATmega328P ili MCP3304). Broj uzoraka i interval odgovarao je mjerenju FLUKE-om za jednostavnu usporedbu. Na koji način su se birali ti parametri opisano je u nastavku.

```

#include <SPI.h>

const int ADC_Pin = 8;
int ch = 0; //Kanal na ADC-u
int analogPin = A0;
int measurement[500];
int sample_number = 50;
int interval = 20;

void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    Serial.begin(9600);
    Serial.setTimeout(5000);
    pinMode (ADC_Pin, OUTPUT);
    digitalWrite(ADC_Pin, HIGH);
    // initialize SPI:
    SPI.begin();
}

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:

    while (! Serial.available() ) {
    }

    char command = Serial.read();

    switch (command) {
        case 'A': {
            for (int i=0;i<=sample_number-1;i++){
                digitalWrite(ADC_Pin, LOW);           //activate Chipselect
                SPI.transfer(0x0C | (ch >> 1));        //4bits 0, startbit, SGL = 1, 2 Channelbits (D2, D1)
                byte hi = SPI.transfer(ch << 7);        //lowest Channelbit (D0), rest dont care; return= first 2
                                                         returnbits undef, nullbit, Signbit, 4 highest databits
                byte lo = SPI.transfer(0x00);           //send dont care; return= 8 lowest databits
                digitalWrite(ADC_Pin, HIGH);           //deactivate Chipselect
                measurement[i] = ((hi & 0x0f) << 8) + lo; //combinig the 2 return Values
                delay(interval);
            }
            for (int i=0;i<=sample_number-1;i++){
                Serial.println(measurement[i]);
            }
            break;
        }
        case 'B': {
            for (int i=0;i<=sample_number-1;i++){
                measurement[i] = analogRead(analogPin);
                delay(interval);
            }
            for (int i=0;i<=sample_number-1;i++){
                Serial.println(measurement[i]);
            }
            break;
        }
        case 'I': {
            Serial.println("Enter interval");
            while (! Serial.available() ) {
            }
            interval = Serial.parseInt();
            Serial.println(interval);
            break;
        }
        case 'S': {
            Serial.println("Enter smample number");
            while (! Serial.available() ) {
            }
            sample_number = Serial.parseInt();
            Serial.println(sample_number);
            break;
        }
    }
}

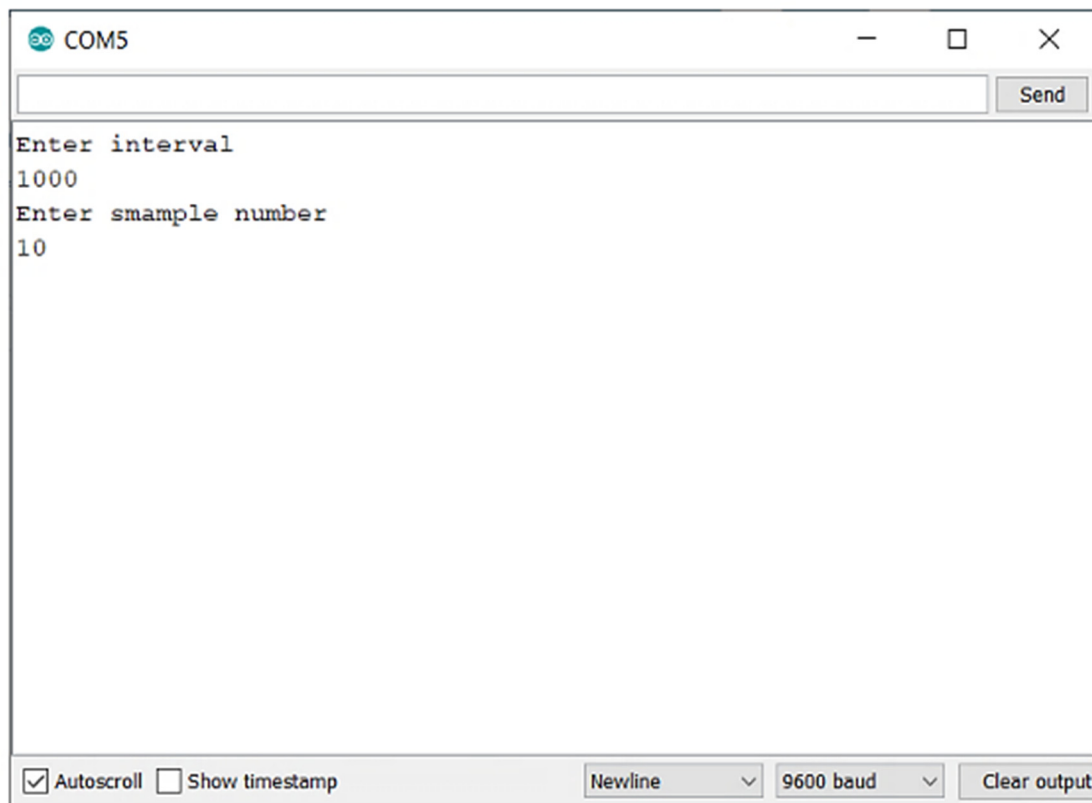
```

Slika 4-9 Arduino IDE kod za kontrolu i mjerenje Arduino platformom

Kod je jednostavne strukture; glavni dio programa provodi se u petlji (*loop*), a sadrži niz naredbi poput *switch* i *case* koje su funkcionalno povezane. Kako se kod vrti konstantno u petlji svaka od naredbi *case* provjerava da li je ispunjen određeni uvjet, odnosno jesu li u prozor za interakciju s kodom unesene određene vrijednosti. Kod će reagirati na unose određenih vrijednosti, odnosno slova: S, I, A i B.

Utipka li se slovo S i pritisne *enter* na tipkovnici, kod će pozvati naredbu za unos vrijednosti količine uzorka, te će prikazati tekst u prozoru sučelja koji će zatražiti da se potom upiše brojana vrijednost, odnosno koliko se uzoraka želi. Upisom nekog cijelog broja (*integer*) kod će promijeniti količinu uzoraka koju će uzeti pri sljedećem mjerenju.

Na isti se način, upisom slova I, može promijeniti vremenski interval između uzimanja svakog pojedinog uzorka u **milisekundama** (Slika 4-10).

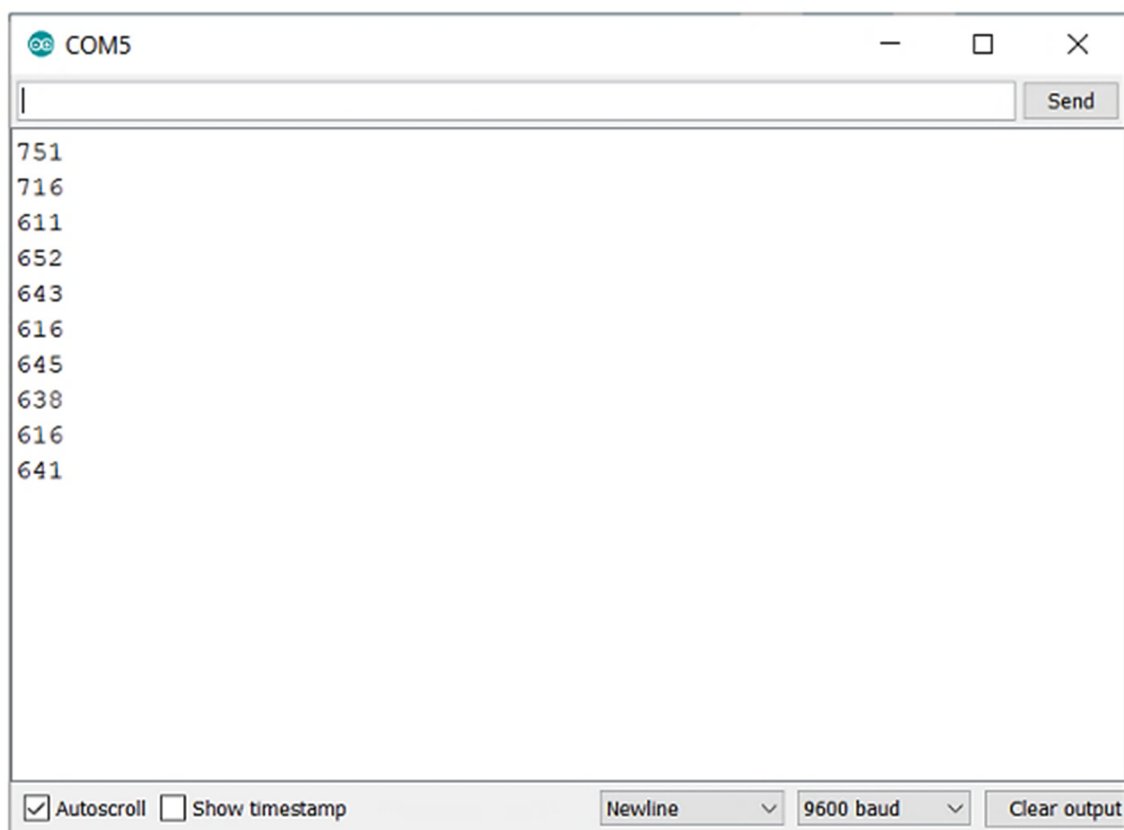


Slika 4-10 Sučelje Arduino IDE-a nakon promjene iznosa intervala i broja uzorka

Ako se npr. utipka „I“ i pritisne *enter*, prikazat će se tekst *Enter interval*, nakon čega treba utipkati cjelobrojnu vrijednost vremenskog intervala u milisekundama. Daljnjim unosom slova „S“ prikazat će se tekst *Enter sample rate*, te se sada može unijeti željeni broj uzoraka.

Upiše li se za interval (I) vrijednost 1000, a broj uzoraka (S) 10, u sljedećem će mjerenju kod narediti preko mikrokontrolera jednom od ADC-a (Atmega328p ili MCP 3304) da uzme uzorak, zatim pričeka 1000 milisekundi (jednu sekundu) nakon čega će opet uzeti uzorak, a taj će postupak provesti 10 puta. Uređaj će uzeti 10 uzoraka u 9 sekundi. Nakon što se odredi broj uzorka i interval, te se vrijednosti ne mijenjaju sve dok se ne pozove naredba za promjenu istih.

Kada se želi započeti mjerenje utipka se „ A ” ili „ B ”. U prvom će slučaju mjerenje biti izvršeno A/D pretvornikom ATmega328P, a u drugom eksternim A/D pretvornikom MCP3304. Za vrijeme mjerenja na sučelju se redom ispisuju dobiveni podaci (Slika 4-11).

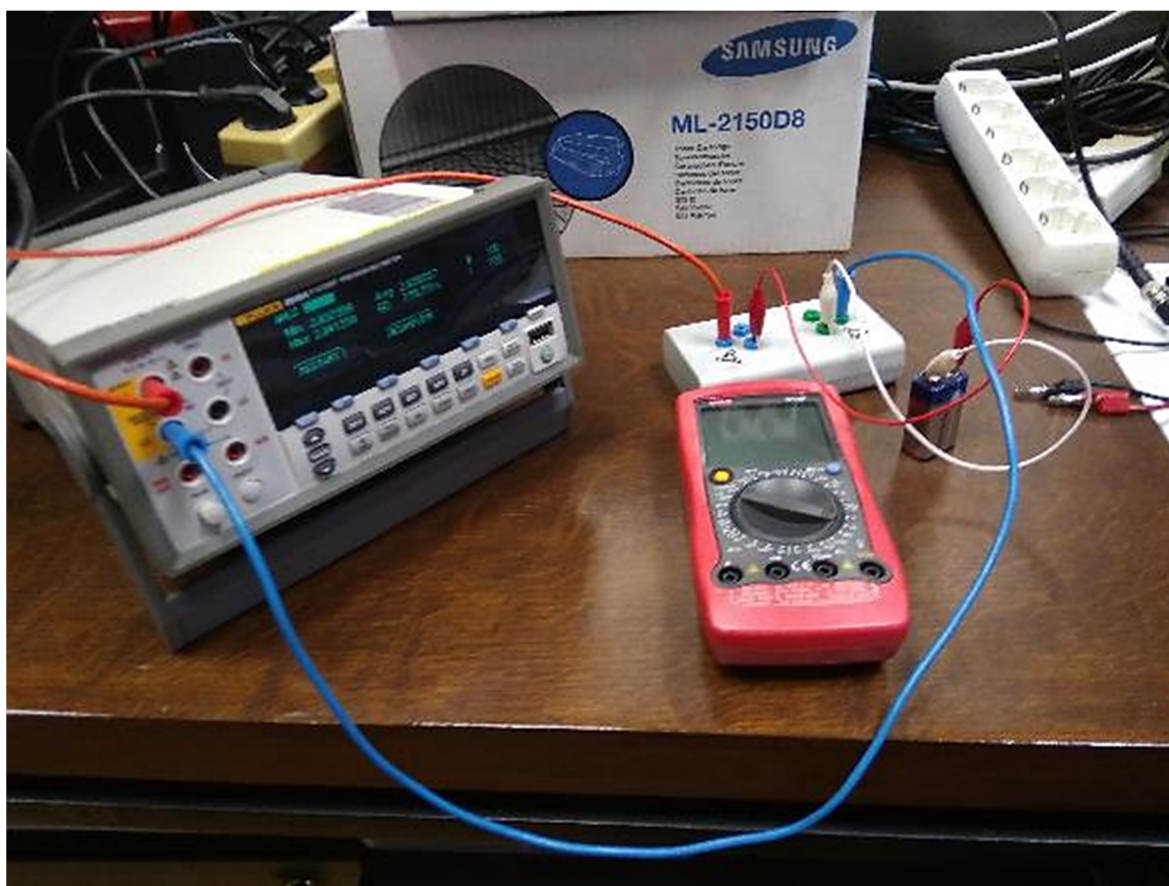


Slika 4-11 Prikaz rezultata mjerenja Arduino platformom

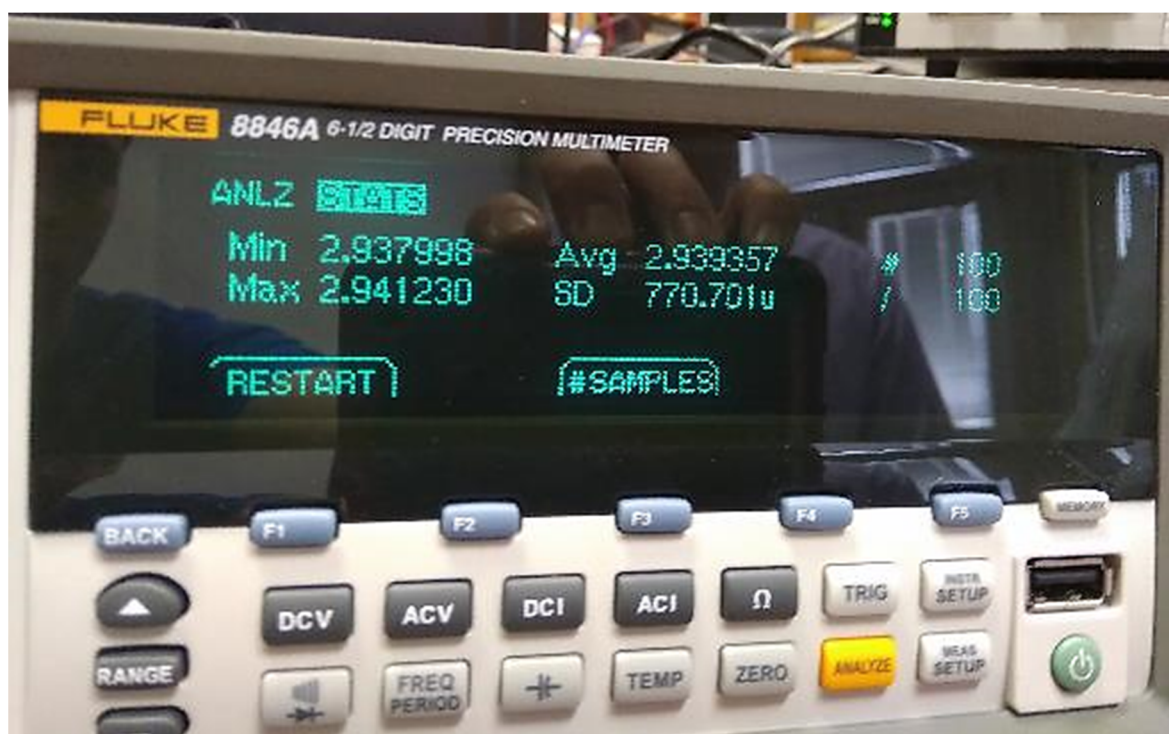
4.2. Ispitivanje u svrhu određivanja točnosti i stabilnosti mjerenja

Prije početka mjerenja, na referentni voltmetar FLUKE 8846A spojen je kratkospojnik preko ulaznih stezaljki te je obavljen niz od 100 mjerenja. Mjerenjima je određena standardna devijacija od oko **50 nV** koja predstavlja mjeru šuma samog instrumenta.

Zatim je postupak ponovljen s baterijom istosmjernog napona spojenom na ulaz voltmetra (Slika 4-12) i određena je standardna devijacija od **770,701 μV** (Slika 4-13).



Slika 4-12 Mjerenje istosmjernog napona baterije preciznim voltmetrom FLUKE 8846A



Slika 4-13 Određivanje standardne devijacije (SD) mjerenja istosmjernog napona baterije

Referentni voltmetar je na kraju spojen na analogni izlaz mjerne kartice (Slika 4-14), i na isti način se odredila standardna devijacija od **2,43193 μ V** (Slika 4-15).



Slika 4-14 Mjerenje analognog napona mjerne kartice preko bloka SC-2345



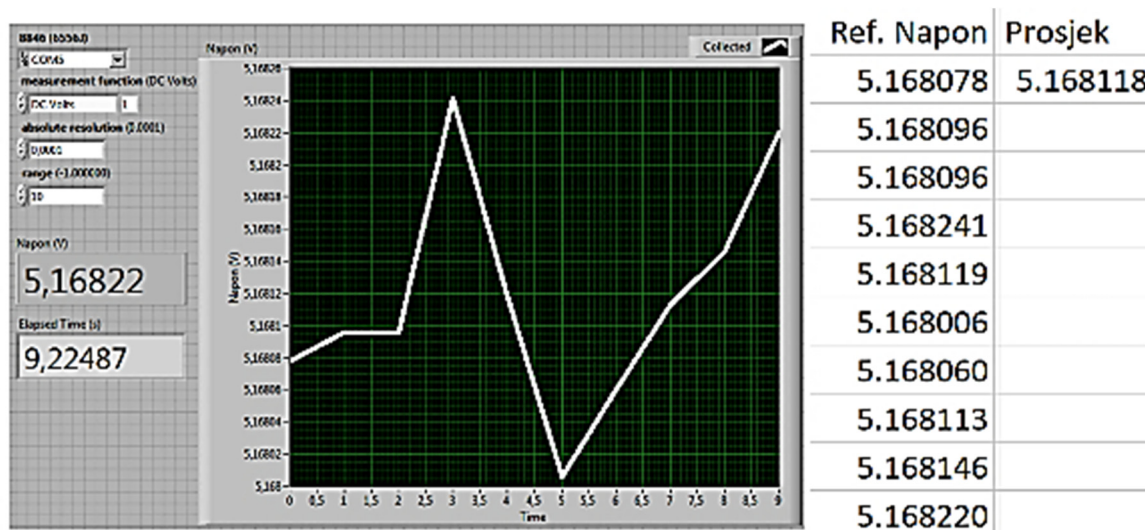
Slika 4-15 Određivanje šuma referentnog voltmetra FLUKE 8846A

Iz ovog preliminarnog ispitivanja može se zaključiti da referentni voltmetar FLUKE ima jako mali šum i da naknadna mjerenja imaju dominantnu komponentu šuma iz izvora napona (2 do 4 reda veličine veći), drugim riječima, **doprinos smetnji referentnog instrumenta može se zanemariti.**

Nakon izvedenog preliminarnog ispitivanja referentnog voltmetra uređaji su spojeni prema blok dijagramu navedenog u prethodnom poglavlju (Slika 4-3), a napajanje Arduino platforme izvedeno je preko USB-priključka; moglo se započeti mjerenje:

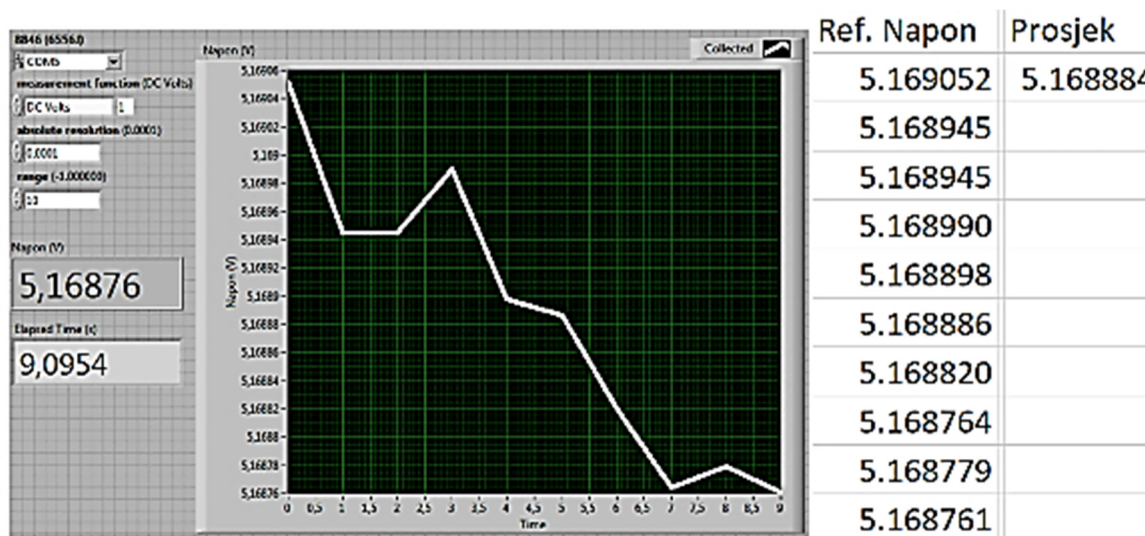
- Najprije je FLUKE-om određen referentni napon Arduino platforme preko virtualnog uređaja tako da se izračunala srednja vrijednost od 10 izmjerenih vrijednosti (vrijednost prelazi 5 V – moguće mjeriti do 5 V) (Slika 4-16)
- Zatim se provelo umjeravanje na način da je mjeren napon od 0 V do 5 V generiran mjernom karticom NI PCI-6281; mjerilo se u 11 razina tako da se u svakoj razini napon povećao za 0,5 V (0; 0,5; 1; 1,5 itd.)
- U svakoj se razini mjerenja uzimalo 10 uzoraka u intervalima od 1 sekunde (mjerenje je trajalo 9 sekundi jer se prvi uzorak izmjerio trenutno - pokretanjem programa)
- Mjerenje referentnim voltmetrom FLUKE i Arduino platformom provodilo se paralelno za prvi A/D pretvornik (ATmega328P)
- Za drugi A/D pretvornik MCP3304 ponavljano je mjerenje na svakoj od ispitnih razina naknadno

- Nakon zadnje razine (mjerena 5 V), još jednom je izmjeren referentni napon Arduino platforme referentnim voltmetrom FLUKE (Slika 4-16)
- FLUKE je svako mjerenje bilježio u obliku Excel tablice (po jedna za svaku razinu), dok je Arduino platforma mjerenje svake razine ispisivala na sučelju Arduino IDE-a koji su se zatim kopirali u Excel tablicu za kasniju analizu (Tablica 4-1)



Slika 4-16 Određivanje referentnog napona Arduino platforme prije umjeravanja

Mjerenje referentnim voltmetrom FLUKE je u svakoj razini mjerenja izgledalo kao na slici 4-16 za promjenjive iznose napona.



Slika 4-17 Određivanje referentnog napona Arduino platforme nakon umjeravanja

Usporedbom referentnih napona A/D pretvornika prije i poslije umjeravanja vidi se da je razlika između jednaka 766 μV što je zanemarivo. Referentni napon nije se promijenio nakon mjerenja.

A/D pretvornici Arduino platforme ne daju napon kao rezultat mjerenja, već broj koraka rezolucije - odnosi mjerenog i referentnog napona. Iz tih se vrijednosti napon mora izračunati tako da se broj koraka rezolucije pomnoži s referentnim naponom. Vrijednosti tih odnosa ovise o rezoluciji pretvornika i naponu koji se mjeri. ATmega328P ima integriran **10-bitni** pretvornik što znači da će za napon 0 V do iznosa referentnog napona davati cjelobrojne vrijednosti **0 do 1024** (2^{10}). MCP3304 je eksterni **12-bitni** ADC, dakle on će za isti raspon napona davati cjelobrojne vrijednosti 4 puta veće, **0 do 4096** (2^{12}) (Tablica 4-1).

Tablica 4.1 Rezultati mjerenja generiranih napona Arduino platformom za oba ADC-a

Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)		0		0.5		1		1.5		2	
A-ATmega328P (jed. napon= 5.052 mV) M-MCP3304 (jed. napon=1.262 mV)		A	M	A	M	A	M	A	M	A	M
	0	0	99	388	198	783	293	/	392	1575	
	0	0	98	/	197	786	294	1182	394	/	
	0	0	97	387	198	781	295	/	396	1582	
	/	0	95	385	/	784	297	1177	396	1582	
	0	0	95	385	197	781	295	1179	395	1572	
	0	0	96	/	197	/	295	1179	395	1573	
	/	0	96	386	198	/	293	1179	393	1582	
	0	0	97	385	196	783	297	1183	394	1583	
	0	0	98	/	194	783	294	1176	395	1571	
	0	0	97	384	199	784	/	1176	395	1576	

Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)		2.5		3		3.5		4		4.5		5	
A-ATmega328P (jed. napon= 5.052 mV) M-MCP3304 (jed. napon=1.262 mV)		A	M	A	M	A	M	A	M	A	M	A	M
	492	1967	594	2367	694	2776	793	3153	891	/	987	3952	
	493	1967	594	2376	691	2767	791	3159	892	/	989	3952	
	492	/	592	/	693	2756	790	/	892	3552	990	3952	
	494	1975	592	2368	692	/	794	3152	889	3552	987	3952	
	492	/	594	2367	691	/	791	/	890	/	990	3952	
	/	/	594	2367	691	2767	790	3167	889	3551	990	3968	
	493	/	591	2367	691	2759	791	3166	892	3552	987	3960	
	492	1967	595	/	690	2767	793	3152	890	/	987	3944	
	492	1983	594	2367	694	2688	792	3155	892	/	990	3960	
	494	/	593	2368	693	2759	792	3168	890	3551	992	3964	

Izračun mjerenog napona je jednostavno: najprije se odredi napon koraka rezolucije (jedne razine) tako da se iznos referentnog napona u voltima podjeli s brojem razdioba rezolucije. 10-bitni A/D pretvornik ima 1024 razine, znači da ima 1023 razdiobe, 12-bitni ima 4096 razina, to jest 4095 razdioba. Dobiveni količnik predstavlja napon koraka rezolucije. Tom vrijednošću se pomnoži izmjerena vrijednost odnosa mjerenog i referentnog napona da bi se dobio iznos napona koji se mjerio (vidi potpoglavlje 5.4., tablica 5-1, tablica 5-2 i tablica 5-3). Znakom „/“ u tablici 4.1 označene su izmjerene vrijednosti koje su zbog anomalija u sustavu previše odstupale od prosječne vrijednosti odnosa mjerenog i referentnog napona, te stoga nisu uzete u obzir.

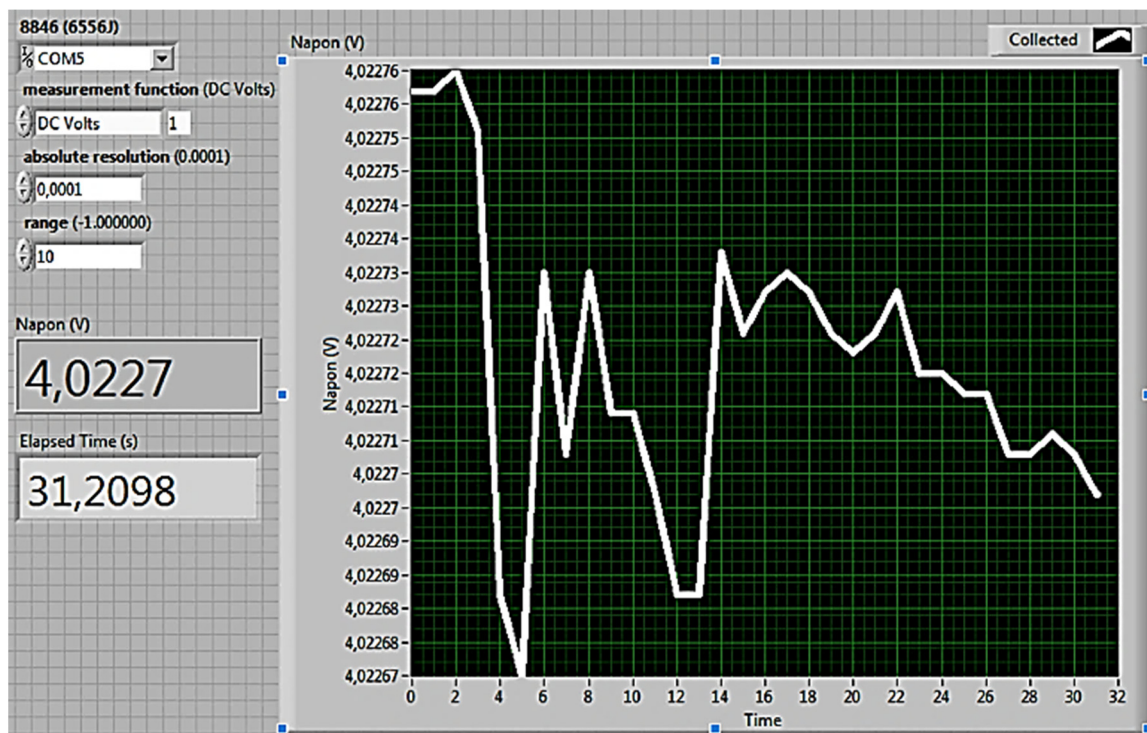
Za ADC integriran u ATmega328P ponovljeno je umjeravanje uz napajanje Arduino platforme litij-ionskom baterijom **Samsung INR18650-29E** nazivnog napona 3,7 V i kapaciteta 2900 mAh:

- Najprije je izmjeren napon baterije referentnim voltmetrom FLUKE8846A; napon je iznosio 4,0352674 V
- Zatim je izmjeren napon baterije u strujnom krugu Arduino platforme kao referentni napon, vrijednosti 4,005746 V
- Obavljeno je umjeravanje u rasponu 0 V do 4 V (napon koji daje baterija); napon je generiran mjernom karticom NI PCI-6281; umjeravanje se provodi u 9 razina s povećanjem napona od 0,5 V za svaku iduću razinu
- U svakoj se razini tokom mjerenja uzimalo 10 uzoraka u intervalima od 1 sekunde, a FLUKE i Arduino provodili su mjerenja istovremeno
- Nakon svake razine, odnosno povećanja napona, referentnim je voltmetrom mjeren napon baterije u strujnom krugu Arduino platforme
- Podaci mjerenja FLUKE-a zapisani su u *Excel* tablice za svaku razinu pojedinačno, dok su vrijednosti odnosa mjerenog i referentnog napona dobiveni mjerenjem Arduino platforme nakon svake razine kopirani sa sučelja IDE-a u *Excel* tablicu za daljnju obradu (Tablica 4.2)
- Nakon umjeravanja provedeno je dodatno mjerenje baterije u strujnom krugu Arduino platforme za vrijeme mjerenja ADC-a ATmega328P u svrhu boljeg razumijevanja ponašanja baterije; mjerenje referentnim voltmetrom započeto je 3 sekunde prije početka mjerenja ADC-a, a uzeto je 32 uzorka kroz vrijeme od 31 sekunde (Slika 4-18)

Tablica 4-2 Rezultati mjerenja ATmega328P uz napajanje litij-ionskom baterijom

Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	0	0.5	1	1.5	
Referentni napon litij-ionske baterije (V)	4.02178	4.02180	4.02330	4.02335	
	0	125	253	381	
	0	125	253	381	
	0	125	253	380	
	0	125	253	380	
	0	125	253	381	
	0	125	253	380	
	0	125	253	381	
	0	125	253	381	
	0	125	253	380	
	0	125	253	381	
Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	2	2.5	3	3.5	4
Referentni napon litij-ionske baterije (V)	4.022314	4.023090	4.023000	4.023000	4.022915
	508	636	763	891	1018
	508	636	763	891	1018
	508	636	763	891	1018
	508	636	763	891	1018
	508	636	763	891	1018
	508	636	763	891	1018
	508	636	763	891	1018
	508	636	763	891	1018
	508	636	763	891	1018
	508	636	763	891	1018

Može se primijetiti kako nema odstupanja između uzoraka mjerenja u svakoj razini osim kod mjerenja napona 1,5 V. Uzorci su jednakih vrijednosti jer uz napajanje baterijom ne postoje dovoljno jaku šumovi da ih ADC registrira i omete mjerenje. Kod mjerenja 1,5 V vrijednosti se razlikuju zato što je iznos napona prilikom konverzije iz analognog u digitalni signal na granici dviju razina pa je šum uzrokovao prelaza s niže na višu razinu.



Slika 4-18 Mjerenje napona baterije u strujnom krugu za vrijeme mjerenja Arduina

Na slici 4-3 vidi se veća promjena napona baterije nakon treće sekunde - u trenutku početka mjerenja vanjskog napona (iz generatora – mjerne kartice) ADC-om Arduina. Radi se o padu napona u vrijednosti od $90 \mu\text{V}$ što je zanemarivo.

4.3. Ispitivanje brzine uzorkovanja (*sample rate*)

Brzina uzorkovanja odnosi se na maksimalan broj uzoraka koji ADC može prikupiti u jedinici vremena. Drugim riječima to je frekvencija kojom ADC operira.

Za potrebe određivanja ovog parametra napisana su dva koda u Arduino IDE-u; po jedan za svaki ADC, ATmega328P (Slika 4-19) i MCP3304 (Slika 4-20).

Princip algoritma za oba koda je jednak:

- Prvo neka se zabilježi stvarno vrijeme (koristi se RTC)
- Zatim se pokrene naredba za očitavanje 10 000 uzoraka maksimalnom mogućom brzinom
- Sada se opet zabilježi stvarno vrijeme RTC-a
- Izračunaj razliku zabilježenih vremena i prikaži ju na serijskom monitoru (sučelju Arduino *software*-a)
- Ponovi cijeli ciklus nakon dvije sekunde

```
ADC_ATmega328p_SampleRateTest
int val;

void setup() {
  // set the slaveSelectPin as an output:
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  int long start_sampling = millis();
  for (int count=0;count<10000;count++){
    val = analogRead(A0);
  }
  int long stop_sampling = millis();
  Serial.println(stop_sampling-start_sampling);
  delay(2000);
}
```

Slika 4-19 Arduino kod za određivanje brzine uzorkovanja ADC-a ATmega328P

```

ADC_MCP3304_sample_rate_test

#include <SPI.h>
const int ADC_Pin = 8;
const int SD_Pin = 4;
int ADC_Channels[8] = {1,1,1,1,1,1,0,0};
int adcValue;
SPISettings MCP3044(1000000, MSBFIRST, SPI_MODE0);
String file = "datalog.txt";
time_t tm;

void setup() {
    // set the slaveSelectPin as an output:
    Serial.begin(115200);
    Wire.begin();
    pinMode (ADC_Pin, OUTPUT);
    pinMode (SD_Pin, OUTPUT);
    digitalWrite(ADC_Pin, HIGH);
    digitalWrite(SD_Pin, HIGH);
    tm = RTC.get();           //save time form RTC
}

int count = 0;
void loop() {
    SPI.beginTransaction(MCP3044);
    for (int i=0;i<=7;i++){
        if (ADC_Channels[i] == 1){
            digitalWrite(ADC_Pin, LOW);
            SPI.transfer(0x0C | (i >> 1));
            byte hi = SPI.transfer(i << 7);
            byte lo = SPI.transfer(0x00);
            digitalWrite(ADC_Pin, HIGH);
            adcValue[i] = ((hi & 0x0f) << 8) + lo;
            count = count +1;
            if (count > 10000) {
                Serial.print("g");
                count = 0;
            }
        }
    }
}

```

Slika 4-20 Arduino kod za određivanje brzine uzorkovanja ADC-a MCP3304

Mjerena veličina i iznos mjerenja nisu bitni za ovu vrstu ispitivanja. Ciklus se ponavlja svake dvije sekunde radi provjere konzistentnosti.

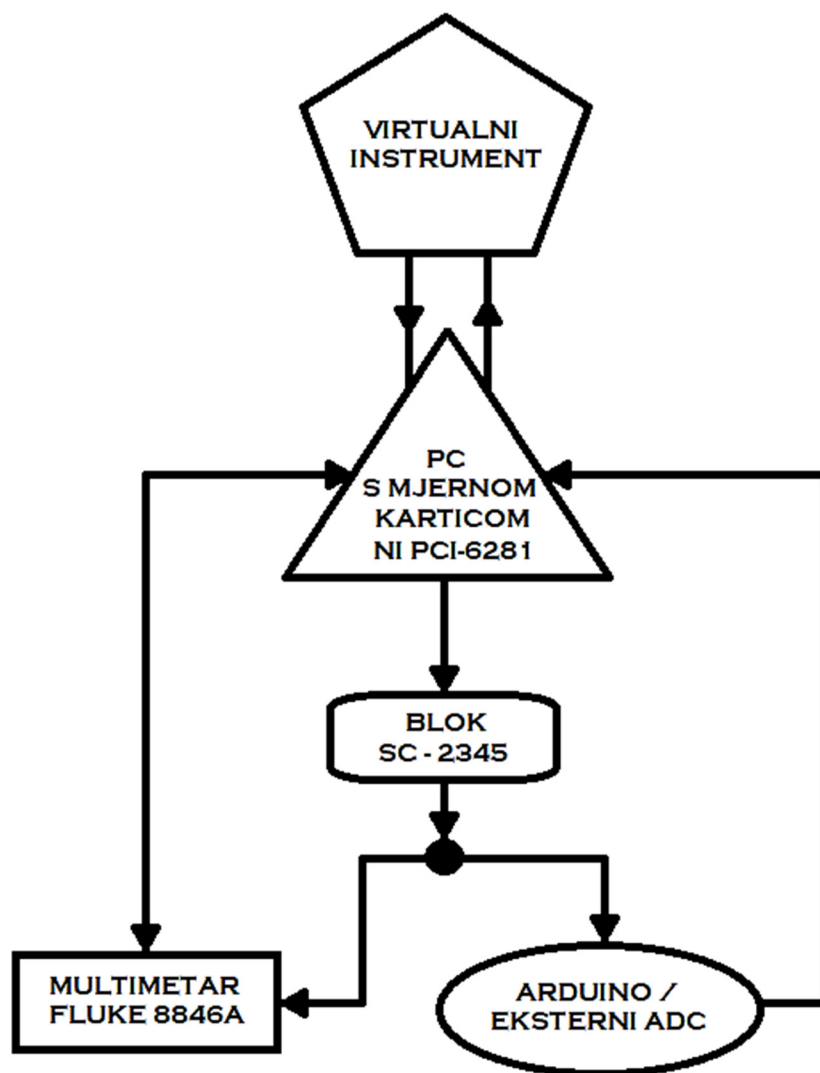
Za ADC ATmega328P izmjerena je razlika vremena **1120 ms**, a za ADC MCP3304 samo **222 ms**.

Izračun frekvencije i usporedba mjerenja biti će opisani u idućem poglavlju (vidi potpoglavlje 5.1)

4.4. Direktna usporedba mjerenja Arduina i FLUKE8846A

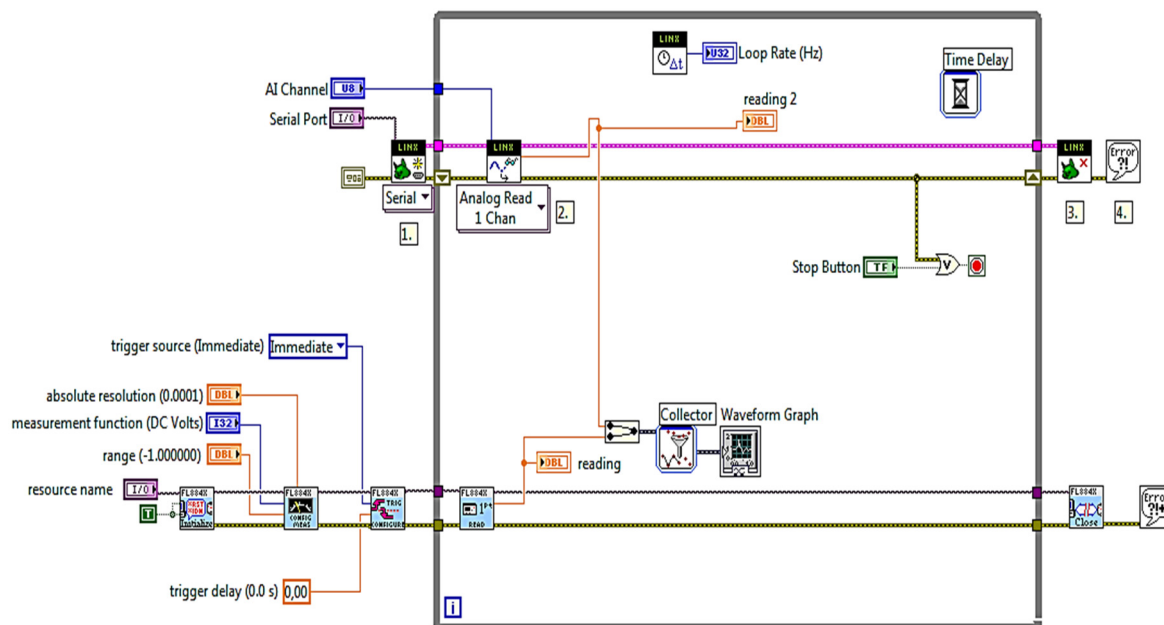
U svrhu ovog ispitivanja, princip spajanja uređaja je malo drugačiji u odnosu na prvo ispitivanje (Slika 4-21). Potrebno je mjerene vrijednosti koje mjere FLUKE 8846A i Arduino platforma prikazati u *LabView*-u na istom grafikonu kako bi se vidjela korelacija rada instrumenta.

Kreiran je novi virtualni instrument u *LabView*-u (Slika 4-22) koji daje na izlaz (mjernu karticu) željeni napon, kontrolira mjerenje oba uređaja, a mjerene vrijednosti oba instrumenta bilježi u istu Excel tablicu, te ih iscrtava na zajednički grafikon u stvarnom vremenu. Funkcija se vrti u beskonačnoj petlji do zaustavljanja programa.



Slika 4-21 Blok dijagram spajanja uređaja za direktnu usporedbu mjerenja

U ovom je slučaju Arduino platforma također spojena na prvi PC USB-priključkom kako bi komunicirala s *LabView* programom, odnosno virtualnim instrumentom.

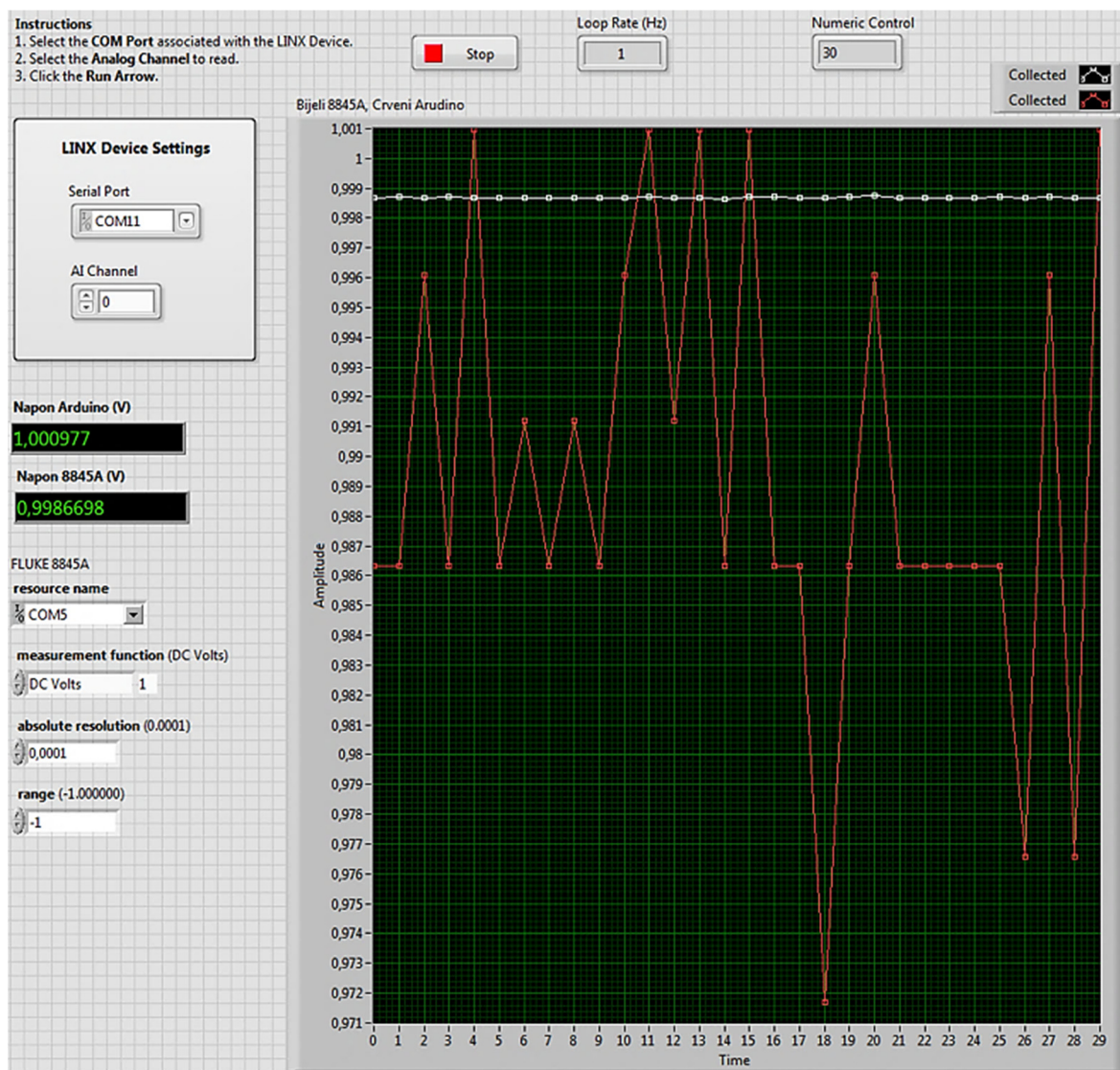


Slika 4-22 Blok dijagram virtualnog instrumenta za direktnu usporedbu mjerenja

U razmatranje su uzeta dva slučaja; prvi uključuje Arduino platformu kada je, za vrijeme mjerenja, priključena na izvor napajanja preko USB-priključka, a drugi kada je izvor napajanja platforme litij-ionska baterija.

Svrha ovog ispitivanja je okviran pogled na različitosti u rezultatima mjerenja Arduino platformom i preciznim voltmetrom FLUKE8846A. U ovom će poglavlju rezultati biti prikazani grafički (Slika 4-23 i slika 4-24) na prednjem sučelju virtualnog instrumenta u *LabView*-u, a u idućem poglavlju će se analizirati rezultati dobiveni prvobitnim mjerenjem (vidi potpoglavlje 5.3.). Ti će se rezultati također prikazati grafički u *Excel*-u, a šum u Arduinou će predstavljati **grafovi rasipanja** (Slika 5-1 i slika 5-4)

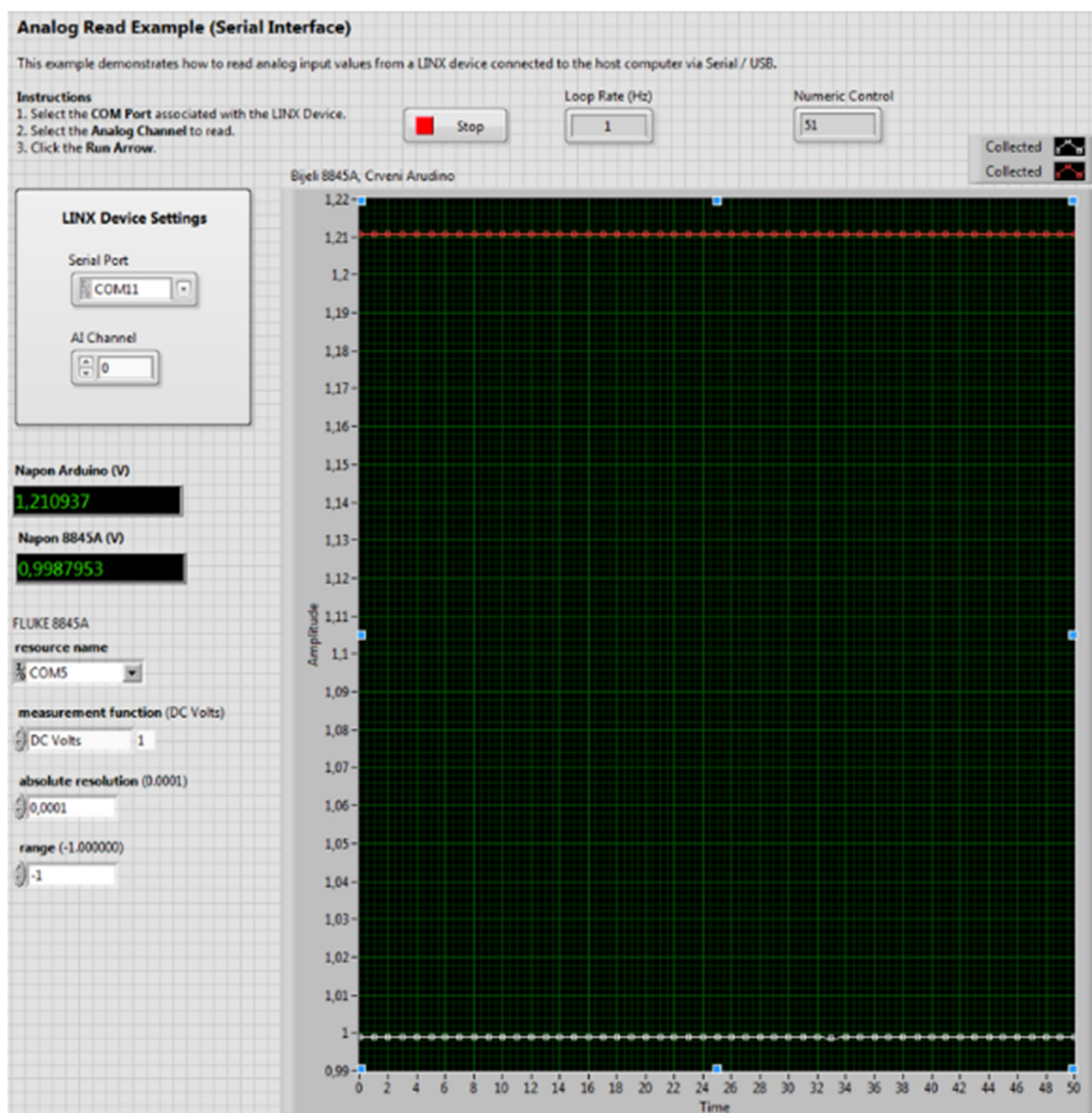
U prvom se slučaju narinuo napon od 1 V i pokrenuo program virtualnog instrumenta. Program je uzeo 30 uzoraka mjerenja Arduina i FLUKE-a paralelno (istovremeno) u razmacima od jedne sekunde, te je rezultate prikazao grafom (Slika 4-23) na kojem je mjerenje voltmetra FLUKE prikazano bijelom linijom, a mjerenje Arduina crvenom.



Slika 4-23 Prednje sučelje *LabView*-a; prikaz šuma uz napajanje USB-priključkom

Iz grafikona je jasno vidljivo kolebanje iznosa mjerenja, to jest devijacije koje su posljedica šumova u uređaju zbog nesavršenosti napajanja USB-priključkom koji ujedno služi za komunikaciju u ovom slučaju.

Za drugi slučaj se napajanje Arduino platforme prebacilo na istosmjerni napon litij-ionske baterije. Sada se USB-priključkom provodila samo komunikacija s virtualnim instrumentom na PC-u. Mjerenje se ponovilo, ali sada s 51 uzorkom. *LabView* je rezultate ponovno prikazao grafom (Slika 4-24) na kojem je mjerenje voltmetra FLUKE prikazano bijelom linijom, a mjerenje Arduina crvenom.



Slika 4-24 Prednje sučelje *LabView*-a; prikaz šuma uz napajanje baterijom

Sada je jasno vidljivo kako su devijacije znatno manje, gotovo neprimjetne zbog toga što ne postoji izraženi šum za vrijeme mjerenja Arduinom, ali vrijednosti odstupaju za iznos razlike referentnog i stvarnog napona platforme Arduina.

5. REZULTATI I ANALIZA

U ovom poglavlju obradit će se, analizirati, usporediti i prokomentirati rezultati mjerenja i ispitivanja iz prethodnog poglavlja.

5.1. Brzina uzorkovanja (*sample rate*)

Određuje se brzina uzorkovanja ili **frekvencija** za ADC ATmega328P i ADC MCP3304. Ispitivanjem u Arduino programu dobivene su dvije vrijednosti - razlike vremena početka i završetka uzorkovanja 10 000 uzoraka (vidi potpoglavlje 4.3.). To su vremenski intervali, to jest vremenski period potreban određenom ADC-u da prikupi 10 000 uzoraka.

Za ATmega328P period je iznosio 1 120 ms, odnosno **1,12 s** za 10 000 uzoraka, a za MCP3304 222 ms, odnosno **0,222 s** za 10 000 uzoraka. Frekvencija je recipročna vrijednost periodu, prema tome ako se broj uzoraka podijeli s periodom koji je bio potreban da se isti prikupe, dobit će se broj uzoraka koji je pojedini ADC prikupio u jednoj sekundi; drugim riječima izračunat će se frekvencija ili brzina uzorkovanja.

Sukladno navedenom, za **ATmega328P** brzina uzorkovanja iznosi **8928 Hz**, a za **MCP3304** brzina uzorkovanja iznosi **45 045 Hz**. MCP3304 se pokazao kao 5 puta brži ADC od ATmega328P u prikupljanju podataka.

5.2. Rezolucija mjerenja

Potpoglavlje 4.2. pozabavilo se rezolucijama ADC-a ATmega328P i MCP3304. Već je spomenuto kako ATmega s 10-bitnim ADC-om sadrži 1023 podioke mjernog raspona, a MCP 4095 kao 12-bitni ADC. Već se sada može zaključiti kako MCP ima 4 puta veću rezoluciju od ATmega. Osim o rezoluciji čipa (bitovima), rezolucija mjerenja ovisi i o referentnom naponu; što je on veći to je rezolucija manja, odnosno manja je osjetljivost na promjenu mjerene veličine.

Ako za referentni napon ADC-a uzmemo vrijednost izmjerenu ispitivanjem prema poglavlju 4.2. iznosa **5.168118 V** i zatim se on podijeli s brojem podioka dobit će se najmanji rezolutni (napon koraka rezolucije) napon pojedinog ADC-a.

Za **ATmega** taj napon iznosi **5,052 mV**, a za **MCP** **1,262mV**. To znači da će ATmega registrirati minimalnu promjenu napona od 5,052 mV, a MCP čak 4 puta manji.

5.3. Točnost i stabilnost mjerenja

Točnost i stabilnost mjerenja napona određuju se analiziranjem mjerenih vrijednosti napona i uspoređivanjem vrijednosti umjeravanog uređaja (Arduino platforma) s referentnim voltmetrom visoke točnosti (FLUKE).

Izmjerene vrijednosti dobivene ispitivanjem prema poglavlju 4.2. unesene su u tablice; provedena je konverzija uzoraka, odnosno proračun iz vrijednosti odnosa mjerenog i referentnog napona u stvarne vrijednosti napona, za sva tri slučaja ispitivanja. Nadalje, izračunate su srednje vrijednosti rezultata mjerenja Arduinom i voltmetrom FLUKE, njihovo međusobno odstupanje i standardna devijacija.

Rezultati za odstupanje prikazane su pomoću *Excel*-a linijskim grafikonom, a standardne devijacije stupićastim dijagramima u nastavku. Grafičkim prikazom dobivenih rezultata odstupanja određena je **točnost** Arduino uređaja za pojedini slučaj (Slika 5-3 i slika 5-6) i ADC-a MCP3304 (Slika 5-9). S druge strane, stupićasti dijagrami prikazuju devijacije izazvane šumovima u sklopovima za vrijeme mjerenja, te je iz njih je određena **stabilnost mjerenja**.

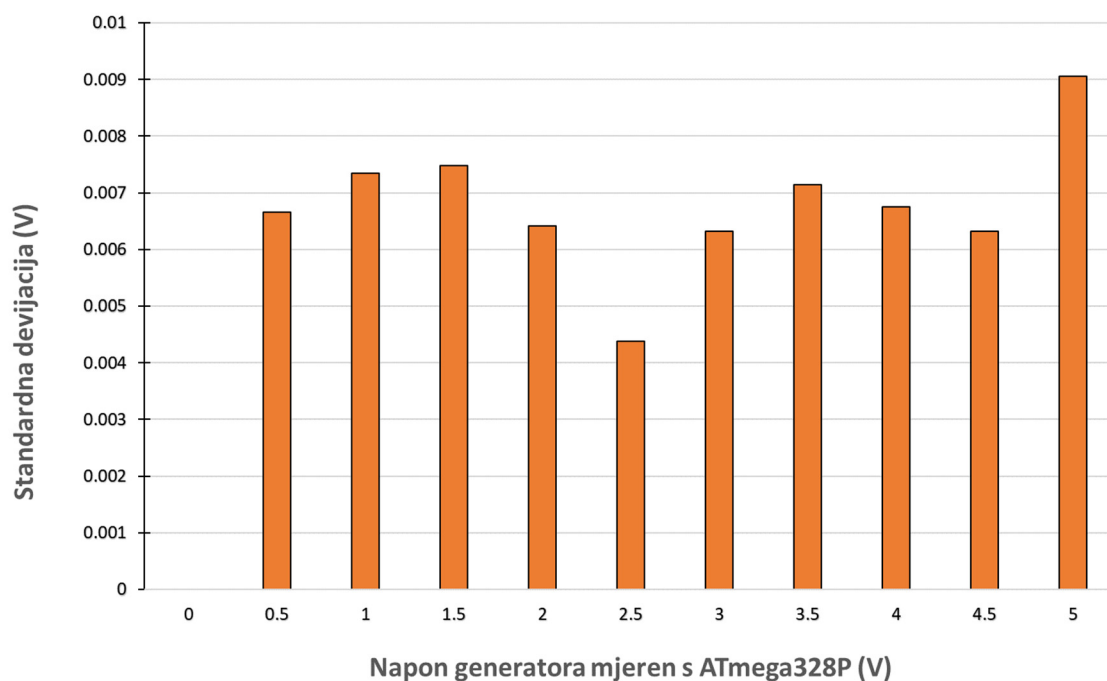
U potpoglavlju 4.4. ustanovljeno je kako stabilnost mjerenja Arduino platforme ovisi o vrsti napajanja uređaja. Kada je napajanje bilo izvedeno USB-priključkom, Arduino je tokom mjerenja bilježio jači šum (Slika 4-23), dajući zbog toga približne vrijednosti pravoj (mjerenoj referentnim voltmetrom FLUKE 8846A) uz stalne devijacije. Kod napajanja litij-ionskom baterijom mjerene vrijednosti bile su međusobno neusporedivo sličnije (Slika 4-24), ali se izmjerena vrijednost razlikovala od stvarne za razliku vrijednosti referentnog i mjerenog napona. Za očekivati je da će u nastavku rezultati standardne devijacije mjerenja biti izraženiji kod rezultata dobivenih mjerenjem uz napajanje preko USB-priključka.

Rezultati konverzije i parametri, za Arduino platformu koja se napajala preko USB-priključka, a koristila je ATmega328P pretvornik, prikazani su u tablici 5-1, dok su dijagrami standardne devijacije (rasipanja), te dijagram odstupanja prikazani slikama u nastavku.

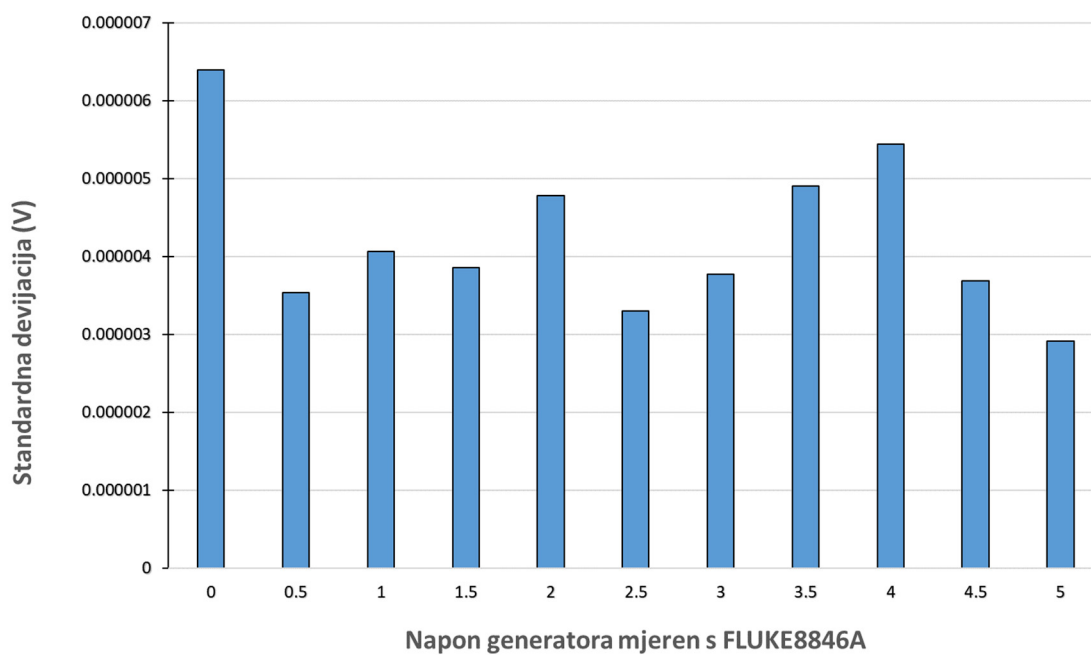
Tablica 5-1 Rezultati i analiza podataka mjerenih ATmega328P (USB napajanje)

Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	0		0.5		1			
A- ATmega328P (V) F- FLUKE8446A (V)	A	F	A	F	A	F		
	0	0.000122	0.500140	0.499956	1.000281	1.000063		
	0	0.000113	0.495088	0.499962	0.995229	1.000060		
	0	0.000116	0.490037	0.499956	1.000281	1.000063		
	/	0.000125	0.479933	0.499962	/	1.000060		
	0	0.000122	0.479933	0.499959	0.995229	1.000063		
	0	0.000116	0.484985	0.499959	0.995229	1.000072		
	/	0.000119	0.484985	0.499968	1.000281	1.000063		
	0	0.000131	0.490037	0.499959	0.990177	1.000069		
	0	0.000131	0.495088	0.499962	0.980073	1.000063		
	0	0.000128	0.490037	0.499962	1.005333	1.000069		
Srednja Vrijednost (V)	0	0.000122	0.489026	0.499961	0.995790	1.000065		
Odstupanje (V)	-0.000122		-0.010934		-0.004274			
Standardna devijacija (V)	0	6.4E-06	0.006651	3.54E-06	0.007340	4.06E-06		
Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	1.5		2		2.5		3	
A- ATmega328P (V) F- FLUKE8446A (V)	A	F	A	F	A	F	A	F
	1.480214	1.500224	1.980354	2.000307	2.485546	2.500133	3.000842	3.000270
	1.485265	1.500218	1.990458	2.000310	2.490598	2.500127	3.000842	3.000279
	1.490317	1.500215	2.000562	2.000319	2.485546	2.500127	2.990739	3.000282
	1.500421	1.500215	2.000562	2.000310	2.495650	2.500136	2.990739	3.000279
	1.490317	1.500215	1.995510	2.000316	2.485546	2.500133	3.000842	3.000279
	1.490317	1.500212	1.995510	2.000316	/	2.500127	3.000842	3.000276
	1.480214	1.500215	1.985406	2.000322	2.490598	2.500127	2.985687	3.000276
	1.500421	1.500209	1.990458	2.000310	2.485546	2.500130	3.005894	3.000284
	1.485265	1.500215	1.995510	2.000313	2.485546	2.500130	3.000842	3.000279
	/	1.500215	1.995510	2.000310	2.495650	2.500127	2.995790	3.000279
Srednja Vrijednost (V)	1.489195	1.500215	1.992984	2.000313	2.488914	2.500130	2.997306	3.000278
Odstupanje (V)	-0.011021		-0.007330		-0.011216		-0.002972	
Standardna devijacija (V)	0.007484	3.86E-06	0.006412	4.79E-06	0.004375	3.3E-06	0.006323	3.77E-06
Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	3.5		4		4.5		5	
A- ATmega328P (V) F- FLUKE8446A (V)	A	F	A	F	A	F	A	F
	3.506035	3.500374	4.006175	4.000220	4.501264	4.500330	4.986248	5.000440
	3.490879	3.500368	3.996071	4.000223	4.506316	4.500339	4.996352	5.000446
	3.500983	3.500368	3.991019	4.000211	4.506316	4.500333	5.001404	5.000438
	3.495931	3.500362	4.011227	4.000217	4.491160	4.500333	4.986248	5.000443
	3.490879	3.500362	3.996071	4.000217	4.496212	4.500336	5.001404	5.000443
	3.490879	3.500368	3.991019	4.000229	4.491160	4.500339	5.001404	5.000440
	3.490879	3.500362	3.996071	4.000220	4.506316	4.500336	4.986248	5.000440
	3.485827	3.500368	4.006175	4.000226	4.496212	4.500339	4.986248	5.000446
	3.506035	3.500374	4.001123	4.000226	4.506316	4.500342	5.001404	5.000446
	3.500983	3.500374	4.001123	4.000217	4.496212	4.500339	5.011508	5.000443
Srednja Vrijednost (V)	3.495931	3.500368	3.999608	4.000221	4.499748	4.500337	4.995847	5.000443
Odstupanje (V)	-0.004437		-0.000613		-0.000589		-0.004596	
Standardna devijacija (V)	0.007144	4.9E-06	0.006757	5.44E-06	0.006323	3.69E-06	0.009053	2.92E-06

Iz rezultata standardne devijacije vidi se da je rasipanje mjerenja dobivenog Arduinoom do **9 mV** (Slika 5-1), a rasipanje referentnog voltmetra do **6,5 μV** (Slika 5-2), što je oko 1400 puta manje.

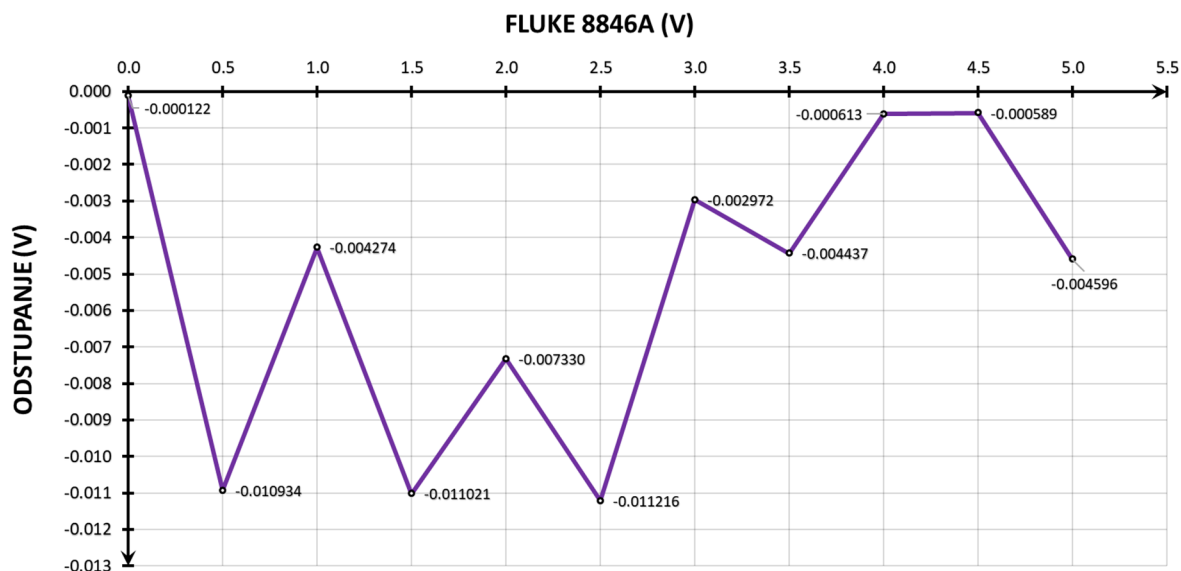


Slika 5-1 Rasipanje mjerenja Arduinoom (ATmega328P) za napajanje USB-priključkom



Slika 5-2 Rasipanje mjerenja voltmetrom FLUKE za napajanje USB-priključkom

Točnost mjerenja izrazit će se najvećim odstupanjem mjernog uređaja (Arduina s ATmega328P) od mjerenja referentnim preciznim voltmetrom (FLUKE 8846A) i postotkom odstupanja od mjernog raspona (5 V). Na dijagramu odstupanja (Slika 5-3.) vidljivo je kako se najveće odstupanje dogodilo kod mjerenja napona 2,5 V, a iznosilo je **-11,22 mV** što je **0,2244 %** raspona mjerenja.

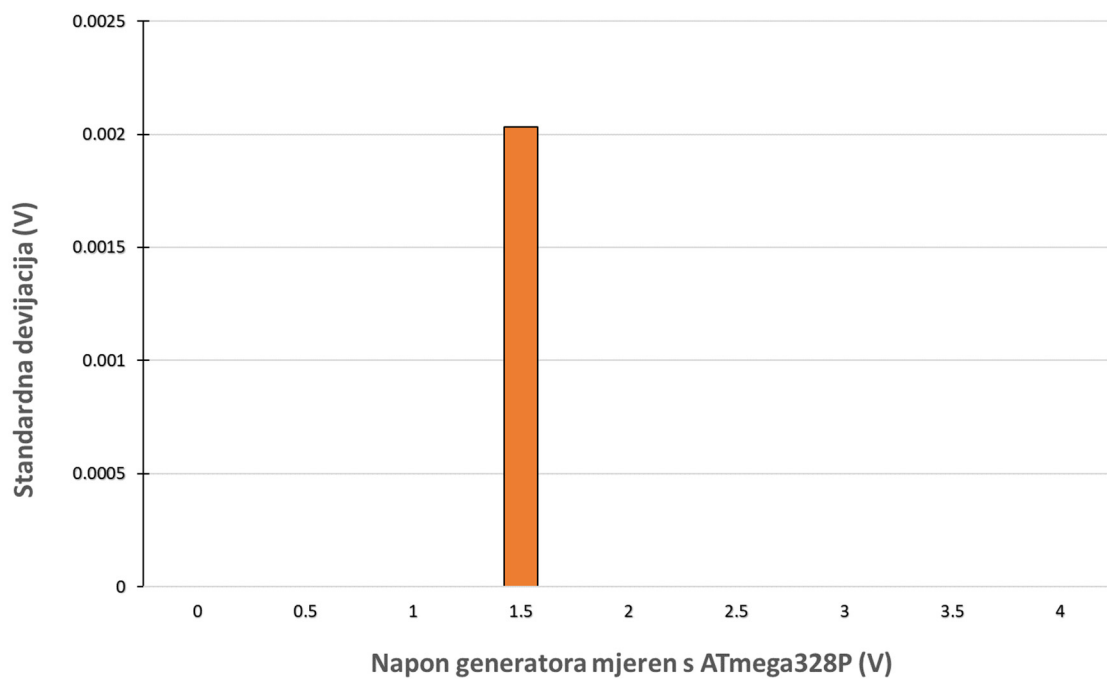


Slika 5-3 Odstupanje mjerenja Arduinoom u odnosu na FLUKE za napajanje USB-portom

Rezultati drugog ispitivanja (Tablica 5-2), gdje je Arduino kao izvor napajanja imao litij-ionsku bateriju, pokazuju da je rasipanje mjerenja Arduinoom jednako nuli (Slika 5-4) osim kod 4. mjerenja (mjerenje napona 1,5 V) jer je iznos mjerenog napona bio na granici faza prilikom pretvorbe iz analognog u digitalni signal. To ne znači da je mjerenje Arduinoom postalo bolje, nego da A/D pretvornik na Arduinou ima lošiju rezoluciju, pa ne može očitati malu promjenu šuma koji uzrokuje baterija, to jest šum baterije ne prelazi korak rezolucije ATmega328P. Zato je podatak o standardnoj devijaciji matematički ispravan ali besmislen kao mjera rasipanja.

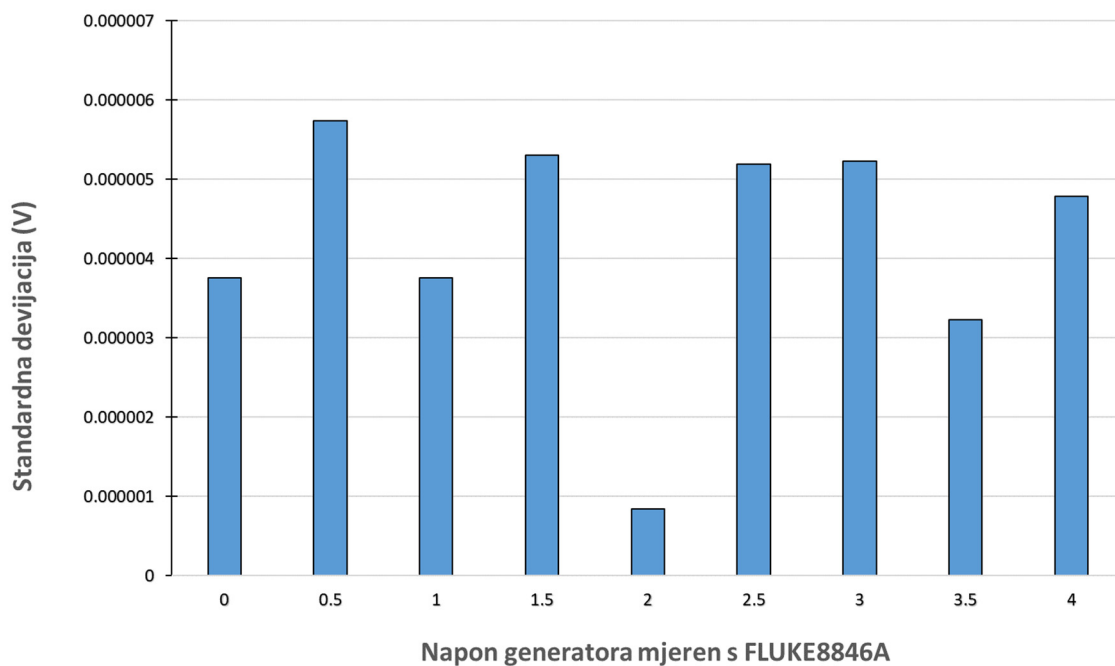
Tablica 5-2 Rezultati i analiza podataka mjerenih ATmega328P (napajanje baterijom)

Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	0		0.5		1	
	A	F	A	F	A	F
A- ATmega328P (V) F- FLUKE8446A (V)	0	0.000122	0.491422	0.499971	0.995010	1.000072
	0	0.000128	0.491422	0.499977	0.995010	1.000078
	0	0.000119	0.491422	0.499965	0.995010	1.000075
	0	0.000131	0.491422	0.499968	0.995010	1.000072
	0	0.000122	0.491422	0.499974	0.995010	1.000084
	0	0.000128	0.491422	0.499974	0.995010	1.000075
	0	0.000128	0.491422	0.499962	0.995010	1.000078
	0	0.000128	0.491422	0.499968	0.995010	1.000072
	0	0.000128	0.491422	0.499965	0.995010	1.000075
	0	0.000125	0.491422	0.499959	0.995010	1.000078
Srednja Vrijednost (V)	0	0.000126	0.491422	0.499968	0.995010	1.000076
Odstupanje (V)	-0.000126		-0.008546		-0.005066	
Standardna devijacija (V)	0	3.75E-06	0	5.74E-06	0	3.75E-06
Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	1.5		2		2.5	
	A	F	A	F	A	F
A- ATmega328P (V) F- FLUKE8446A (V)	1.498432	1.500230	1.997395	2.000307	2.501159	2.500136
	1.498432	1.500224	1.997395	2.000305	2.501159	2.500127
	1.494500	1.500221	1.997395	2.000307	2.501159	2.500127
	1.494500	1.500230	1.997395	2.000307	2.501159	2.500136
	1.498432	1.500227	1.997395	2.000307	2.501159	2.500136
	1.494500	1.500221	1.997395	2.000307	2.501159	2.500136
	1.498432	1.500215	1.997395	2.000307	2.501159	2.500142
	1.498432	1.500224	1.997395	2.000305	2.501159	2.500130
	1.494500	1.500224	1.997395	2.000307	2.501159	2.500130
	1.498432	1.500233	1.997395	2.000307	2.501159	2.500127
Srednja Vrijednost (V)	1.496859	1.500225	1.997395	2.000307	2.501159	2.500133
Odstupanje (V)	-0.003366		-0.002911		0.001026	
Standardna devijacija (V)	0.002031	5.3E-06	0	8.43E-07	0	5.19E-06
Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	3		3.5		4	
	A	F	A	F	A	F
A- ATmega328P (V) F- FLUKE8446A (V)	3.000537	3.000290	3.503903	3.500371	4.003253	4.000217
	3.000537	3.000282	3.503903	3.500374	4.003253	4.000214
	3.000537	3.000282	3.503903	3.500371	4.003253	4.000223
	3.000537	3.000279	3.503903	3.500368	4.003253	4.000223
	3.000537	3.000287	3.503903	3.500365	4.003253	4.000217
	3.000537	3.000273	3.503903	3.500374	4.003253	4.000214
	3.000537	3.000287	3.503903	3.500368	4.003253	4.000220
	3.000537	3.000284	3.503903	3.500371	4.003253	4.000211
	3.000537	3.000282	3.503903	3.500365	4.003253	4.000211
	3.000537	3.000290	3.503903	3.500371	4.003253	4.000223
Srednja Vrijednost (V)	3.000537	3.000284	3.503903	3.500370	4.003253	4.000217
Odstupanje (V)	0.000253		0.003533		0.003035	
Standardna devijacija (V)	0	5.23E-06	0	3.22E-06	0	4.79E-06



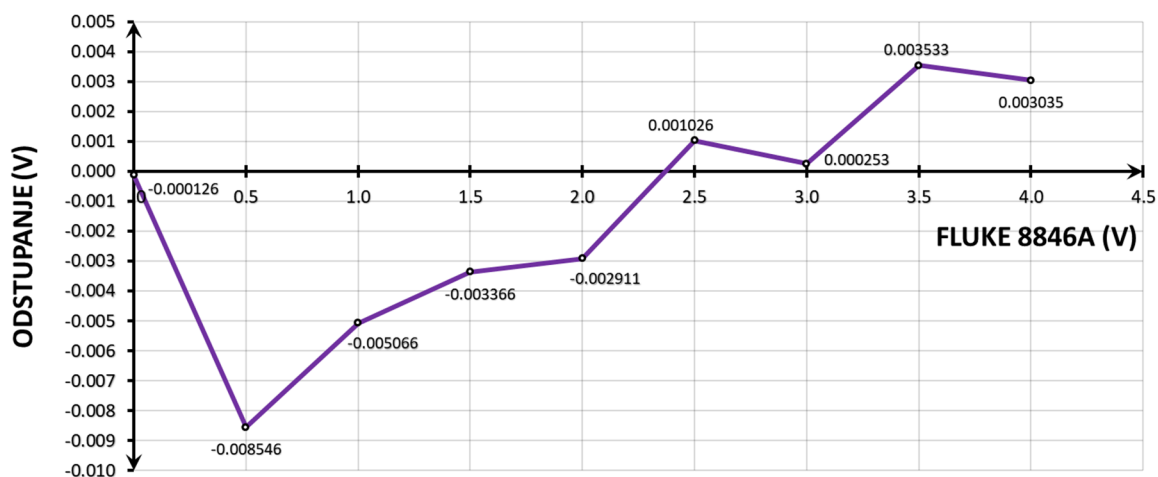
Slika 5-4 Rasipanje mjerenja Arduinom (ATmega328P) za napajanje baterijom

Referentni instrument ima slično rasipanje kao u prvom setu mjerenja do **6 μ V** (Slika 5-5).



Slika 5-5 Rasipanje mjerenja voltmetrom FLUKE za napajanje baterijom

Na dijagramu odstupanja (Slika 5-6) može se očitati najveće odstupanje ATmega u odnosu na FLUKE kod drugog mjerenja napona 0,5 V. Odstupanje iznosi **-8,55 mV** što u opsegu mjerenja do 4 V iznosi čini **0,2138 %**.

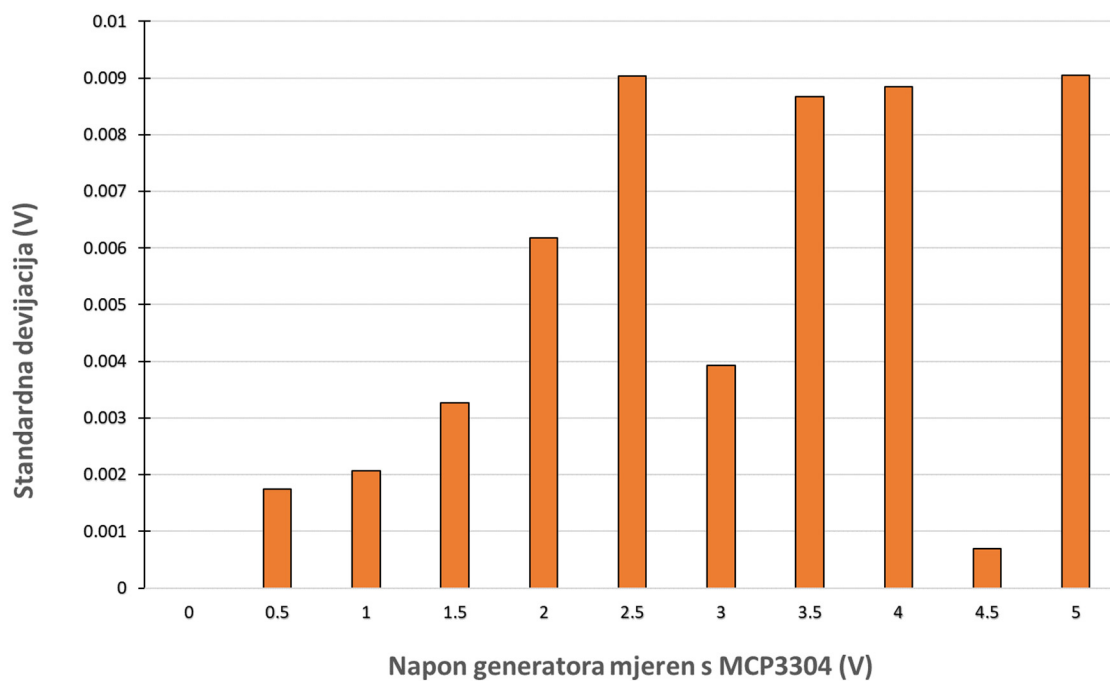


Slika 5-6 Odstupanje mjerenja Arduinom u odnosu na FLUKE za napajanje

Treći set mjerenja je obavljen na način da je Arduino koristio posebni vanjski A/D pretvornik za mjerenje (MCP3304). Rezultati i analiza prikazani su tablicom 5-3. Rasipanje mjerenja s MCP3304 je podjednako onom mjerenja s ATmega328P u prvom setu mjerenja, s vrijednostima do **9 mV** (Slika 5-7).

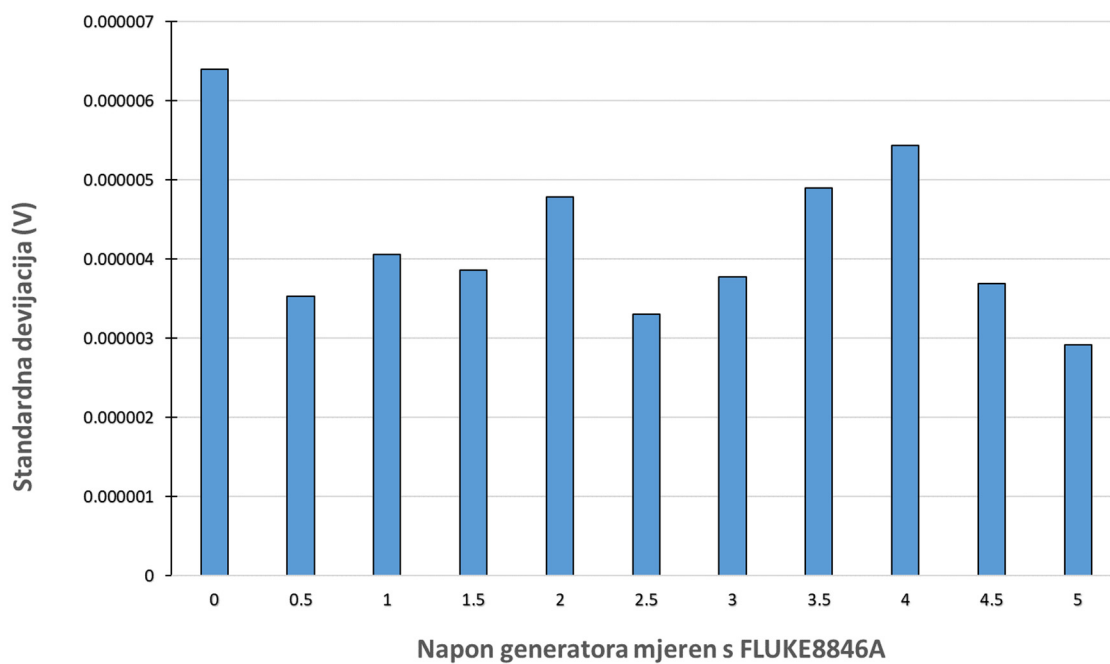
Tablica 5-3 Rezultati i analiza podataka mjerenih MCP3304 (USB napajanje)

Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	0		0.5		1			
	M	F	M	F	M	F		
M- MCP3304 (V) F- FLUKE8446A (V)								
	0	0.000122	0.489678	0.499956	0.988190	1.000063		
	0	0.000113	/	0.499962	0.991976	1.000060		
	0	0.000116	0.488416	0.499956	0.985665	1.000063		
	0	0.000125	0.485891	0.499962	0.989452	1.000060		
	0	0.000122	0.485891	0.499959	0.985665	1.000063		
	0	0.000116	/	0.499959	/	1.000072		
	0	0.000119	0.487153	0.499968	/	1.000063		
	0	0.000131	0.485891	0.499959	0.988190	1.000069		
	0	0.000131	/	0.499962	0.988190	1.000063		
	0	0.000128	0.484629	0.499962	0.989452	1.000069		
Srednja Vrijednost (V)	0	0.000122	0.486793	0.499961	0.988347	1.000065		
Odstupanje (V)	-0.000122		-0.013168		-0.011717			
Standardna devijacija (V)	0	6.4E-06	0.001742	3.54E-06	0.002072	4.06E-06		
Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	1.5		2		2.5		3	
	M	F	M	F	M	F	M	F
M- MCP3304 (V) F- FLUKE8446A (V)								
	/	1.500224	1.987738	2.000307	2.482463	2.500133	2.987286	3.000270
	1.491750	1.500218	/	2.000310	2.482463	2.500127	2.998644	3.000279
	/	1.500215	1.996572	2.000319	/	2.500127	/	3.000282
	1.485439	1.500215	1.996572	2.000310	2.492560	2.500136	2.988548	3.000279
	1.487964	1.500215	1.983951	2.000316	/	2.500133	2.987286	3.000279
	1.487964	1.500212	1.985213	2.000316	/	2.500127	2.987286	3.000276
	1.487964	1.500215	1.996572	2.000322	/	2.500127	2.987286	3.000276
	1.493012	1.500209	1.997834	2.000310	2.482463	2.500130	/	3.000284
	1.484177	1.500215	1.982689	2.000313	2.502656	2.500130	2.987286	3.000279
	1.484177	1.500215	1.989000	2.000310	/	2.500127	2.988548	3.000279
Srednja Vrijednost (V)	1.487806	1.500215	1.990682	2.000313	2.488521	2.500130	2.989021	3.000278
Odstupanje (V)	-0.012410		-0.009631		-0.011609		-0.011257	
Standardna devijacija (V)	0.003266	3.86E-06	0.006183	4.79E-06	0.009031	3.3E-06	0.003930	3.77E-06
Namješteni Napon Signal Generatora (Napon Mjerne Kartice NI PCI-6281) (V)	3.5		4		4.5		5	
	M	F	M	F	M	F	M	F
M- MCP3304 (V) F- FLUKE8446A (V)								
	3.503466	3.500374	3.979261	4.000220	/	4.500330	4.987644	5.000440
	3.492108	3.500368	3.986834	4.000223	/	4.500339	4.987644	5.000446
	3.478225	3.500368	/	4.000211	4.482821	4.500333	4.987644	5.000438
	/	3.500362	3.977999	4.000217	4.482821	4.500333	4.987644	5.000443
	/	3.500362	/	4.000217	/	4.500336	4.987644	5.000443
	3.492108	3.500368	3.996930	4.000229	4.481559	4.500339	5.007836	5.000440
	3.482011	3.500362	3.995668	4.000220	4.482821	4.500336	4.997740	5.000440
	3.492108	3.500368	3.977999	4.000226	/	4.500339	4.977547	5.000446
	/	3.500374	3.981785	4.000226	/	4.500342	4.997740	5.000446
	3.482011	3.500374	3.998192	4.000217	4.481559	4.500339	5.002788	5.000443
Srednja Vrijednost (V)	3.488862	3.500368	3.986834	4.000221	4.482317	4.500337	4.992187	5.000443
Odstupanje (V)	-0.011506		-0.013387		-0.018020		-0.008256	
Standardna devijacija (V)	0.008678	4.9E-06	0.008847	5.44E-06	0.000691	3.69E-06	0.009046	2.92E-06



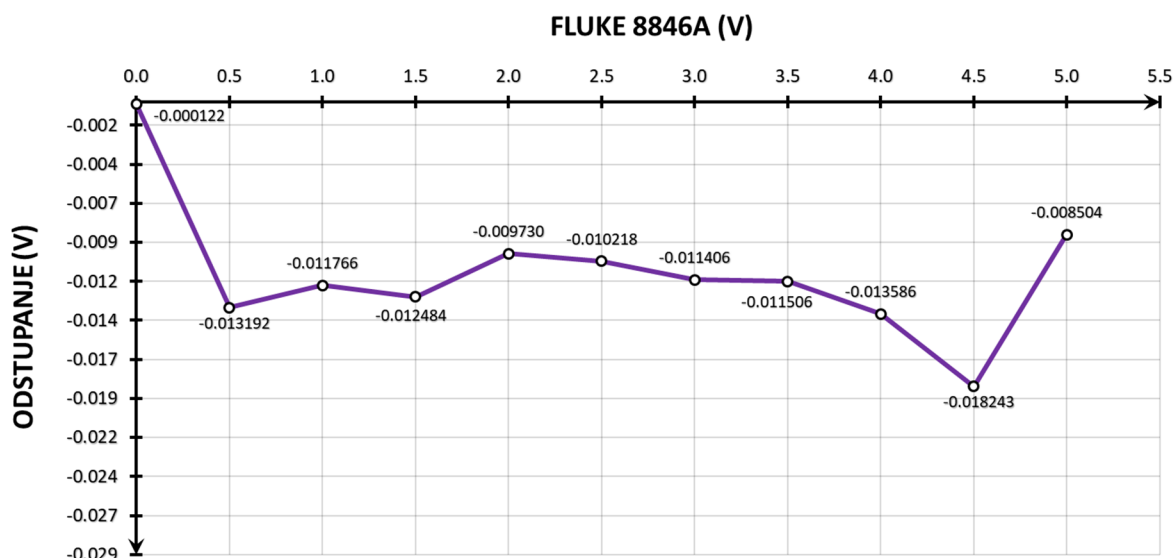
Slika 5-7 Rasipanje mjerenja Arduinom (MCP3304) za napajanje USB-priključkom

Rasipanje referentnim voltmetrom pokazuje konzistenciju u mjerenju sa sličnim rezultatima kao u prva dva slučaja, a opet je iznosa do **6,5 μV** (Slika 5-8).



Slika 5-8 Rasipanje mjerenja voltmetrom FLUKE za napajanje USB-priključkom za MCP

Na zadnjem setu mjerenja napona, ovog puta A/D pretvornikom MCP3304 i USB-priključkom kao izvorom napajanja, očitano je najveće odstupanje od **-18,24 mV** kod mjerenja napona od 4,5 V. U mjernom rasponu do 5 V ta vrijednost čini **0,4748 %**.



Slika 5-9 Odstupanje mjerenja MCP3304 u odnosu na FLUKE za napajanje USB-portom

Na kraju su svi rezultati određenih točnosti mjerenja i stabilnosti prikazani tablicom (Tablica 5-4). Mjerenje Arduina je najstabilnije kada se platforma napaja baterijom zbog toga što su tada šumovi u uređaju dovoljno mali, odnosno vrijednosti ispod razlučive vrijednosti ADC-a. Stabilnost FLUKE8846A je neupitna s devijacijama do 6,5 μV u sva tri slučaja, dok je za ATmega i MCP podjednaka 9 mV za USB napajanje. Također, ATmega ima bolju točnost od MCP-a kod USB napajanja, a s baterijom kao napajanjem točnost raste.

Tablica 5-4 Usporedba odstupanja i rasipa za sva tri mjerenja

		FLUKE8846A	ATmega328P	MCP3304
Stabilnost mjerenja (rasipanje) (mV)	USB Napajanje	0.0065	9	9
	Napajanje Baterijom	0.0060	0	/
Odstupanje (mV) / (Točnost u % mjernog opsega)	USB Napajanje	/	-11.22 (0.2244 %)	-18.24 (0.3648 %)
	Napajanje Baterijom	/	-8.55 (0.2138 %)	/

6. ZAKLJUČAK

Automatizacija je u rudarstvo donijela niz prednosti: uštedu energenata, bolju preciznost, učinkovitost i produktivnost opreme, povećanje sigurnosti, sustavne povezanosti, bolji pristup podacima i komunikacija samo su neki od njih. Iz tih razloga automatizacija iz godine u godinu samo raste, sve je više novih tehnologija i tvrtki koje ih nude na tržištu, a integracija u tehnološke procese rudarstva sve opsežnija. To su često skupe tehnologije i isplative isključivo na velikim kopovima ili u rudnicima s izrazito opasnim uvjetima i vrijednom sirovinom. Rudnici i kopovi manjeg obima moraju se osloniti na stare konvencionalne metode ili pronaći rješenje u pristupačnijim tehnologijama poput Arduina.

Arduino platforma je robustan, jednostavan za korištenje, jeftin i pristupačan svakome, a opet razvijen i nadogradiv programibilni sustav idealan za male projekte koji uključuju bilokakav oblik elektroničke obrade podataka, daljinskog upravljanja ili automatizacije. Ima razvijenu zajednicu s otvorenim izvorom (*open source community*) koji raste svakim danom, prepun ideja i kodova za programiranje, a omogućuje lako učenje korištenja istog u odnosu na druge komercijalne proizvode sličnog tipa.

Arduino platforma već je našla primjenu u projektima u svrhu mjerenja i prikupljanja podataka, te automatizacije procesa. Mikrokontroler Arduino platforme - ATmega328P sadrži širok spektar mogućnosti kojima otvara razne potencijalne načine upotrebe u profesionalnoj opremi. Točnost i pouzdanost obrade podataka, primjenjivost, otpornost na razne uvijete i slično, ovisit će o komponentama i modulima koji su svrhovito dodani Arduino platformi, odnosno povezani s ATmega328P kao i vještini i dovitljivosti programera. Veliku raznolikost područja primjene omogućuje bogati izbor nadogradnje platforme modulima kao što su: SD (*secure digital*), RTC (*Real time clock*), GPRS (*General Packet Radio Service*), A/D konverteri, WiFi, digitalni i analogni senzori itd.

Dakle, Arduinom se može stvoriti od krajnje jednostavnih do visoko sofisticiranih uređaja. Bez obzira, njihova daljnja primjena u potpunosti je prilagodljiva potrebama korisnika.

Laboratorijskim ispitivanjem određena je točnost, brzina uzorkovanja (*sample rate*) i stabilnost mjerenja ATmega328P i dodanog mu A/D pretvornika MCP3304. Također iz njihovih specifikacija određena je rezolucija, a mjerenjem napona određen je napon koraka rezolucije oba ADC-a. Mjerenjem napona vanjskog izvora određena je **točnost** od 0,2244 % (ATmega) i 0,3648 % (MCP) za raspon mjerenja od 5 V. Ispitivanjem **brzine uzorkovanja** utvrđeno je kako ATmega može prikupiti gotovo 9000 uzoraka u sekundi, dok MCP može

čak pet puta više. Također, **stabilnost mjerenja** Arduino platformom, kada je napajanje izvedeno istosmjernim naponom litij-ionske baterije, neusporediva je u odnosu na napajanje preko USB-priključka. Ako je napajanje izvedeno baterijom, rasipanja vrijednosti mjerenih podataka gotovo da i nema jer su šumovi u sklopu tada dovoljno mali, odnosno ispod granice osjetljivosti ADC-a integriranog u ATmega328P, te pritom ne utječe na **točnost** mjerenja. **Rezolucija** sklopa najviše ovisi o rezoluciji A/D pretvornika. Najjednostavniji oblik Arduino platforme sadrži integrirani **10-bitni** pretvornik u mikrokontroleru ATmega koji omogućuje **1024** razine mjerenog raspona. Dodani eksterni A/D pretvornik MCP3304 je **12-bitni** stoga može dati četiri puta više (**4096**) razina mjernog područja. Napon koraka rezolucije u rasponu mjerenja do 5 V za ATmega328p iznosi 4,8886 mV, a za MCP3304 1,221 mV

Prema tome, ATmega328p osnovne Arduino platforme ima zadovoljavajuće parametre za primjenu u svrhu automatiziranog mjerenja, prikupljanja i slanja podataka (*logger*). Svojstvo koje najviše krase ATmega328pP nisu navedeni parametri već njegova funkcionalnost, odnosno primjenjivost i fleksibilnost kao mikrokontrolera koji se upravlja kodom Arduino *software*-a. Ako se želi primjenjivati u sustavima čiji su prohtjevi van njegovih osnovnih mogućnosti, dodavanjem modula zaobilaze se njegovi nedostaci, odnosno modul na sebe preuzima određenu zadaću ili funkciju, dok ATmega328P kontrolira njegovo djelovanje i upravlja procesima prikupljanja, obrade, spremanja i eventualnog slanja podataka. Tako je npr. A/D pretvornik MCP3304 dodan kao modul osnovnoj Arduino platformi povećao sustavnu rezoluciju mjerenja za četiri puta i upeterostručio brzinu prikupljanja podataka uz minimalni utjecaj na točnost.

Ovakav sustav idealan je za osnovna sistematska mjerenja i prikupljanje velikih broja podataka u stvarnom vremenu (*logger*). Mjerena veličina prilagodljiva je upotrebom modula, odnosno senzora osjetljivih na zadanu veličinu koji, u odnosu na njen iznos, daju određeni analogni ili digitalni signal.

Daljnijim razvojem Arduino sustava, modula i prilagodljivosti drugim tehnologijama, te širenju Arduino zajednice, Arduino bi mogao vrlo brzo naći primjenu u rudarstvu kao industriji koja ujedinjuje nevjerojatan broj tehnoloških procesa, time i potrebnih tehnologija to jest uređaja. Uređaji za mjerenje, daljinsko upravljanje, uređaji za detekciju, senzori, uređaji za upravljanje i kontrolu samo su neki od njih.

7. POPIS LITERATURE

ABB, 2013. Mining and mineral processing industry: The Future is Automation.

URL: <https://new.abb.com/mining> (04.01.2020.)

URL (vid): <https://www.youtube.com/watch?v=POqw0rIJe78&list=WL&index=52&t=0s>

ALPHA TECHNOLOGY, 2019. Daljinsko upravljanje strojem u opasnim uvjetima.

URL: <http://www.alpha-technology.com.au/underground-mining-equipment-remotecontrol>
(10.01.2020.)

ARDUINO, 2020a. Arduino UNO REV3 s glavnim funkcionalnim komponentama.

URL: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> (10.01.2020.)

ARDUINO, 2020b. Arduino Tutorials. Modulacija širine pulsa (PWM).

URL: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM> (10.01.2020.)

ARDUINO, 2020c. What is Arduino? Why Arduino?

URL: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> (10.01.2020.)

ARDUINO, 2020d. Arduino products.

URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products> (10.01.2020.)

ARDUINO, 2020e. Libraries.

URL: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries> (10.01.2020.)

ARDUINO, 2020f. Arduino Software (IDE).

URL: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment> (10.01.2020.)

ASI ROBOTS, 2015. The Role of Mining Vehicle Automation in the Mine of the Future.

URL: <https://www.asirobots.com/the-role-of-mining-vehicle-automation-in-the-mine-of-the-future/> (04.01.2020.)

BELOŠEVIĆ, J., 2017. Usporedba instrumenata za mjerenje mikroklimatskih parametara. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

ČUNKO, M., 2017. Usporedba instrumenata za mjerenje brzine strujanja zraka. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

DARLING, P., 2011. SME mining engineering handbook. 3rd ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. SAD, str. 805-824.

DEJAN, 2016. How to Mechatronics: Primjena Arduina u mehatronici za upravljanje motorom preko aplikacije na pametnom telefonu.

URL: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/how-to-build-custom-android-app-for-your-arduino-project-using-mit-app-inventor/> (10.01.2020.)

GRAYSON, W., 2016. Equipment World: Komatsu unveils Autonomous Haulage Vehicle a mining truck that doesn't even have a cab.

URL: <https://www.equipmentworld.com/komatsu-autonomous-haul-truck-no-cab/> (04.01.2020.)

ISHN (*Industrial Safety & Hygiene News*), 2017. Opasnost od urušavanja u rudniku, SAD.

URL: <https://www.ishn.com/articles/105586-us-mining-deaths-at-an-all-time-low> (10.01.2020.)

JURANKO, M., 2018. Mjerenje plinopropusnosti metodom padajućeg tlaka. Završni rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KALINIĆ, T., S., 2018. Usporedba instrumenata za mjerenje diferencijalnog tlaka zraka. Završni rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

KLANFAR, M., HERCEG, V., KUHINEK, D., SEKULIĆ, K., 2019. Construction and testing of the measurement system for excavator productivity. Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 34 (2).

MICROCHIP, 2020. MCP3304: Device overview.

URL: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP3304#additional-features>

(05.01.2020.)

MINING MAGAZINE, 2019. Principijelni prikaz *pametnog rudnika*.

URL: <https://www.miningmagazine.com/editor-s-comment/news/1355144/new-force-in-gold-mining> (10.01.2020.)

MINING.COM, Orica Limited, 04.06.2019. New Orica digital fragmentation measurement technology the key to unlocking downstream benefits.

URL: <https://www.mining.com/web/new-orca-digital-fragmentation-measurement-technology-key-unlocking-downstream-benefits/> (04.01.2020.)

MODRIĆ, M., 2016. Izrada mjernog sustava za mjerenje potrošnje snage trošila u pogonu. Završni rad. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

ORICA, News & Media, 01.10.2018. Optimising drill and blast operations with the next generation BlastIQ™ digital platform.

URL: <https://www.orica.com/news---media/optimising-drill-and-blast-operations-with-the-next-generation-blastiq-digital-platform#.XjK95iMo-70> (04.01.2020.)

THE ATLANTIC, 2011. Eksplozija plina 19. studenog 2010. u rudniku Pike River u Greymouth-u, Novi Zeland (29 poginulih rudara).

URL: <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2011/03/25-other-energy-disasters-from-the-last-year/72814/> (10.01.2020.)

WORLD FINANCE, 2015. Bušenje u rudniku Khomanani, Južna Afrika.

URL: <https://www.worldfinance.com/markets/a-new-age-of-sustainability-for-south-africas-mining-industry> (10.01.2020.)