



UNIVERZITET U NOVOM SADU

FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



ANALIZA PONAŠANJA PROIZVODNIH SISTEMA NA  
OSNOVU TEORIJE ENERGETSKIH TOKOVA  
NELINEARNIH DINAMIČKIH SISTEMA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:

Prof. dr Miroslav Kljajić

Kandidat:

Milovan Medojević

Novi Sad, 2022. godine

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA<sup>1</sup>

Vrsta rada:	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora:	Milovan Medojević
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje, institucija)	dr Miroslav Kljajić, vanredni profesor, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad
Naslov rada:	ANALIZA PONAŠANJA PROIZVODNIH SISTEMA NA OSNOVU TEORIJE ENERGETSKIH TOKOVA NELINEARNIH DINAMIČKIH SISTEMA
Jezik publikacije (pismo):	Srpski (latinica)
Fizički opis rada:	Uneti broj: Stranica: 232 Poglavlja: 4 Referenci: 267 Tabela: 10 Slika: 97 Grafikona: 0 Priloga: 0
Naučna oblast:	Industrijsko inženjerstvo/inženjerski menadžment
Uža naučna oblast (naučna disciplina):	Proizvodni sistemi, organizacija i menadžment (Energetski menadžment)
Ključne reči / predmetna odrednica:	Proizvodni sistemi, tokovi energije, ponašanje, klasterizacija, duboko učenje
Rezime na jeziku rada:	Mnoge proizvodne organizacije nedovoljno razumeju odnos između načina korišćenja energije i procesa proizvodnje, pri čemu, one koje su započele tranziciju ka konceptima industrije 4.0 shvatile su da im ovaj vid digitalizacije proizvodnih procesa omogućava da bolje razumeju stvarnu potražnju za energijom svojih sistema, procesa ili čak mašina. U ovom radu, predloženo je, razvijeno i implementirano tehničko rešenje koje predstavlja hardverski uređaj za efikasno praćenje korišćenja energije brzoreaktivnih energetskih sistema u industrijskim okruženjima, odnosno za akviziciju podataka o intenzitetu struje, koje pripada kategoriji industrijskih IoT uređaja. Generisani podaci korišćeni su za izradu modela za automatizovano profilisanje ponašanja sistema na osnovu praćenja tokova energije, kao i za izradu dinamičkog modela za predviđanje budućih stanja sistema koji se zasniva na implementaciji dubokog učenja.
Datum prihvatanja teme od strane nadležnog veća:	27.01.2022.

<sup>1</sup> Autor doktorske disertacije potpisao je i priložio sledeće Obrasce:

Sb – Izjava o autorstvu;

Sv – Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije i o ličnim podacima;

Sg – Izjava o korišćenju.

Ove Izjave se čuvaju na fakultetu u štampanom i elektronskom obliku i ne koriste se sa tezom.

Datum odbrane: (Popunjava odgovarajuća služba)	
Članovi komisije: (titula, ime, prezime, zvanje, institucija)	Predsednik: dr Ilija Čosić, profesor emeritus, FTN Novi Sad Član: dr Rado Maksimović, redovni profesor, FTN Novi Sad Član: dr Dubravko Čulibrk, redovni profesor, FTN Novi Sad Član: dr Mirko Stojiljković, vanredni profesor, MF Niš Član: dr Maša Bukurov, redovni profesor, FTN Novi Sad Član: dr Miroslav Kljajić, vanredni profesor, FTN Novi Sad
Napomena:	

KEY WORD DOCUMENTATION<sup>2</sup>

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Milovan Medojević
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	PhD, Miroslav Kljajić, Associate Professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad
Thesis title:	BEHAVIOR ANALYSIS OF PRODUCTION SYSTEMS BASED ON THE ENERGY FLOW THEORY OF NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS
Language of text (script):	Serbian language (latin script)
Physical description:	Number of: Pages: 232 Chapters: 4 References: 267 Tables: 10 Illustrations: 97 Graphs: 0 Appendices: 0
Scientific field:	Industrial Engineering / Engineering Management
Scientific subfield (scientific discipline):	Production systems, organization and management (Energy management)
Subject, Key words:	Production systems, energy flows, behavior, clustering, deep learning
Abstract in English language:	Many manufacturing organizations lack an understanding of the relationship between energy use and production processes, and those who have begun the transition to Industry 4.0 concepts have realized that this type of digitization of production processes allows them to better understand the actual energy demand of their systems, processes or even machines. In this dissertation, a technical solution is proposed, developed and implemented, which is a hardware device for efficient monitoring of energy use of fast reactive energy systems in industrial environments, ie for the acquisition of data on current intensity, which belongs to the category of industrial IoT devices. The generated data were used to develop a model for automated profiling of system behavior based on monitoring energy flows, as well as to develop a dynamic model for predicting future states of the system based on the implementation of deep learning.
Accepted on Scientific Board on:	01/27/2022

<sup>2</sup>The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

5B – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5r – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	President: PhD, Ilija Cosic, Professor Emeritus, FTS Novi Sad Member: PhD, Rado Maksimović, Full professor, FTS Novi Sad Member: PhD, Dubravko Čulibrk, Full professor, FTS Novi Sad Member: PhD, Mirko Stojiljković, Associate Professor, MF Niš Member: PhD, Masha Bukurov, Full professor, FTS Novi Sad Member: PhD, Miroslav Kljajić, Associate Professor, FTS Novi Sad
Note:	

# Sadržaj

I LISTA SLIKA.....	8
II LISTA TABELA.....	11
ZAHVALNICA.....	12
<b>1. UVODNA RAZMATRANJA.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBRAZLOŽENJE O POTREBAMA ISTRAŽIVANJA.....	14
1.2 PREGLED LITERATURE I NAUČNIH STAVOVA U OBLASTI.....	15
1.3 PREDMET ISTRAŽIVANJA.....	20
1.4 ISTRAŽIVAČKI PROBLEM.....	20
1.4.1 IoT: Primarni tehnološki koncept za rešavanje istraživačkog problema.....	23
1.5 PRIMENJENE METODE I STRUKTURA PROCESA ISTRAŽIVANJA.....	24
1.6 CILJEVI ISTRAŽIVANJA.....	25
1.7 DEFINISANE HIPOTEZE.....	25
1.8 LOKACIJE UZORKOVANJA PODATAKA I IZVOĐENJA EKSPERIMENTA.....	26
<b>2. TEPROJSKE PODLOGE ISTRAŽIVANJU.....</b>	<b>27</b>
2.1 UVOD U ANALIZU SISTEMA.....	27
2.1.1 Pojam sistema i njegovog okruženja.....	27
2.1.2 Svojstva sistema.....	28
2.1.3 Klasifikacija sistema i njihove karakteristike.....	29
2.1.4 Izvod iz opšte teorije sistema.....	32
2.1.5 Struktura sistema.....	35
2.2 KONCEPT PROIZVODNOG SISTEMA.....	38
2.2.1 Kratak osvrt na evoluciju i razvoj proizvodnih sistema kroz industrijske revolucije.....	40
2.2.2 Složenost proizvodnih sistema.....	42
2.2.2.1 Teorija haosa i nelinearne dinamike.....	43
2.2.2.2 Teorija informacija.....	44
2.2.2.3 Hibridni pristup.....	45
2.2.2.4 Teorija aksiomatskog dizajna.....	46
2.2.2.5 Ostale neklasifikovane teorije.....	46
2.2.2.6 Kratak osvrt na identifikovane teorije i rezultate u praksi.....	46
2.3 KONVENCIONALNI PRILAZI KVANTIFIKACIJI KORIŠĆENJA ENERGIJE U PROIZVODNIM SISTEMIMA.....	48
2.3.1 Procenjivanje putem eksergijskog okvira.....	48
2.3.2 Procena preko nominalne snage.....	49
2.3.3 Procena putem simulacije.....	49
2.3.4 Procena putem empirijskih modela.....	49
2.3.5 Kratak osvrt na identifikovane teorije i rezultate u praksi.....	50
2.3.5.1 Analiza tipa 1: Jednostavne mašine.....	52
2.3.5.2 Analiza tipa 2: Prilagodljive jednostavne mašine.....	53
2.3.5.3 Analiza tipa 3: Složene mašine jedne namene.....	54
2.3.5.4 Analiza tipa 4: Višenamenske složene mašine.....	55
2.3.5.5 Korišćenje energije na nivou proizvodnog sistema.....	55
2.3.5.6 Primer primenjene metodologije.....	56
2.4 TRANZICIJA KA INTELIGENTNIM PROIZVODNIM SISTEMIMA SA FOKUSOM NA ZNAČAJ I ULOGU ENERGIJE.....	62
2.4.1 Osnovni tehnološki koncepti.....	62
2.4.1.1 Koncept inteligentne proizvodnje.....	63
2.4.1.2 Proizvodnja podržana IoT-jem.....	64
2.4.1.3 Proizvodnja zasnovana na oblaku.....	65
2.4.1.4 Sajber-fizički sistemi.....	66
2.4.1.5 Analitika velikih podataka.....	67

2.4.1.6 Informatično-komunikacione tehnologije.....	68
<b>3. RAZVOJ TEHNIČKOG REŠENJA I IZVOĐENJE EKSPERIMENATA.....</b>	<b>69</b>
3.1 RAZVOJ IIoT UREĐAJA ZA AKVIZICIJU PODATAKA.....	69
3.2 RAZVOJ HARDVERSKOG PROGRAMSKOG KODA - FIRMVERA.....	81
3.3 OSNOVNE FUNKCIONALNOSTI RAZVIJENOG REŠENJA.....	91
3.4 PRVI EKSPERIMENT (SHIZUOKA SV-4020 VERTIKALNI MAŠINSKI CNC CENTAR).....	93
3.4.1 <i>Diskusija rezultata generisanih prvim eksperimentom</i> .....	118
3.5 DRUGI EKSPERIMENT (MAŠINSKI PARK FABRIKE ABSOLUTE CNC).....	120
3.5.1 <i>Model za automatizovano profilisanje ponašanja sistema na osnovu praćenja tokova energije</i> .....	130
3.5.1.1 <i>Diskusija generisanih rezultata</i> .....	149
3.5.2 <i>Model za određivanje angažovane snage sistema tokom vremena</i> .....	149
3.5.2.1 <i>Evaluacija modela za određivanje angažovane snage sistema tokom vremena</i> .....	156
3.5.2.2 <i>Diskusija generisanih rezultata</i> .....	160
3.5.3 <i>Model predviđanja budućeg stanja sistema</i> .....	162
3.5.3.1 <i>Zadatak 1</i> .....	164
3.5.3.2 <i>Diskusija rezultata</i> .....	178
3.5.3.3 <i>Zadatak 2</i> .....	178
3.5.3.4 <i>Diskusija rezultata</i> .....	204
<b>4. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA.....</b>	<b>205</b>
<b>INSTITUCIJE KOJE SU PODRŽALE OVO ISTRAŽIVANJE.....</b>	<b>210</b>
<b>REFERENCE.....</b>	<b>211</b>
<b>PLAN TRETMANA PODATAKA.....</b>	<b>228</b>

## I Lista slika

Slika 2.1 Serijska struktura sistema.....	31
Slika 2.2 Paralelna struktura sistema.....	31
Slika 2.3 Primer povezivanja elemenata u sistemu [84].....	36
Slika 2.4 Proizvodnja kao transformacija iz ulaza u izlaze [92].....	39
Slika 2.5 Nivoi apstrakcija u proizvodnji/prerađivanju [94].....	40
Slika 2.6 Stablo odlučivanja za klasifikaciju mašina [138].....	51
Slika 2.7 Kriva snage jednostavne mašine [138].....	53
Slika 2.8 Šematska kriva snage procesa struganja [138].....	54
Slika 2.9 Šematske krive snage višestrukih obradnih operacija [138].....	55
Slika 2.10 Kriva snage kovačkog čekića [138].....	57
Slika 2.11 Mašina za lepljenje u prahu - 5 naspram 6 aktivnih grejača [138].....	58
Slika 2.12 Odgovarajuće progresije krive snage za CNC obradni centar [138].....	59
Slika 2.13 Merenje validacije sa obeleženim procesnim koracima [138].....	60
Slika 2.14 Procena uloženog napora i tačnosti [138].....	61
Slika 2.15 CPS konceptualna mapa (Adaptirano prema [209]).....	67
Slika 3.1 Šematski prikaz i izgled ESP8266 Wifi Serial Transceiver modula [226].....	74
Slika 3.2 Šematski prikaz matične ploče koja integriše sve neophodne module i prateće komponente.....	75
Slika 3.3 2D model matične ploče (gore) i izgled proizvedene verzije (dole).....	76
Slika 3.4 Finalni raspored komponenti sklopa elektronike.....	77
Slika 3.5 3D model sklopa elektronike.....	77
Slika 3.6 3D model plastičnog kućišta (gore) i prva verzija uređaja sa plastičnim kućištem (dole).....	78
Slika 3.7 Radionički crtež za novo kućište (prikaz bočnih i gornjeg elementa u mm).....	79
Slika 3.8 Radionički crtež za novo kućište (prikaz donjeg elementa i finalnog sklopa u mm).....	80
Slika 3.9 Prikaz novoizrađenog kućišta (gore) i finalni izgled uređaja (dole).....	80
Slika 3.10 Prikaz telemetrijskog servisa.....	86
Slika 3.11 Uređaj u serijskoj vezi sa računarom i omogućenim servisom za telemetriju.....	87
Slika 3.12 Opšti tehnološki koncept mrežne infrastrukture.....	92
Slika 3.13 Softverska arhitektura razvijenog rešenja.....	92
Slika 3.14 Grafički korisnički interfejs (GUI) zasnovan na Grafani za vizuelizaciju podataka sa Current Profiler-a....	93
Slika 3.15 Izgled posmatranog vertikalnog mašinskog CNC centra Shizuoka SV-4020.....	94
Slika 3.16 Intenzitet struje tokom vremena operacije za: Aluminijum (1), Čelik (2).....	95
Slika 3.17 Angažovana snaga tokom vremena operacije za: Aluminijum (1), Čelik (2) i poredbeni prikaz (3).....	97
Slika 3.18 Identifikovana stanja prilikom obrade predmeta: za čelik.....	100
Slika 3.19 Distribucija stanja prvog reda za posmatranu operaciju.....	101
Slika 3.20 Profil angažovane snage sa fokusom uklanjanje materijala.....	101
Slika 3.21 Distribucije stanja drugog reda – Stanje uklanjanja materijala.....	102
Slika 3.22 Vreme trajanja ciklusa proizvodnje $T_{cp}$ za uslov da je potrebno obezbediti minimalno vreme trajanja ciklusa proizvodnje.....	107



Slika 3.23 Prikaz svih serija na godišnjem nivou u odnosu na efektivni kapacitet sistema (Slučaj 1).....	108
Slika 3.24 Primeri čekanja (a) i nagomilavanja predeta rada tokom procesa proizvodnje.....	109
Slika 3.25 Vreme trajanja ciklusa proizvodnje $T_{cp}$ za uslov da je potrebno obezbediti maksimalno iskorišćenje tehnoloških sistema tokom ciklusa proizvodnje.....	111
Slika 3.26 Prikaz svih serija na godišnjem nivou u odnosu na efektivni kapacitet sistema (Slučaj 2).....	112
Slika 3.27 Određivanje broja učesnika u procesu rada i uravnoteženje njihovog opterećenja.....	114
Slika 3.28 Prikaz posmatranja prvog komada predmeta rada na 4-oj proizvodnoj operaciji iz determinističkog (gore) i stohastičkog (dole) aspekta.....	119
Slika 3.29 Profil ponašanja mašine HAAS SL 20 HE.....	122
Slika 3.30 Profil ponašanja mašine HAAS SL 20 THE (1).....	123
Slika 3.31 Profil ponašanja mašine HAAS SL 20 THE (2).....	124
Slika 3.32 Profil ponašanja mašine HAAS ST 20 Y.....	125
Slika 3.33 Profil ponašanja mašine SCHMID VMC-800P.....	126
Slika 3.34 Profil ponašanja mašine SCHMID VMC-500P.....	127
Slika 3.35 Profil ponašanja mašine Pinnacle VMC 1100S.....	128
Slika 3.36 Profil ponašanja mašine KASTO SBA-260AU.....	129
Slika 3.37 Vizuelni prikaz modela za automatizovanu detekciju stanja i profilisanje ponašanja sistema na osnovu tokova energije.....	131
Slika 3.38 Prikaz identifikovanih klastera u 2 dimenzije.....	139
Slika 3.39 Prikaz identifikovanih klastera iz aspekta PCA u 3D.....	140
Slika 3.40 Kvantifikacija identifikovanih stanja (C1 – C9) za posmatrano ponašanje sistema u zavisnosti od karakteristika (S1, S2 i S3).....	141
Slika 3.41 Linearne projekcije identifikovanih stanja sistema prema karakteristikama (S1 – S3).....	144
Slika 3.42 Angažovana snaga (P) tokom vremena (Samples) i identifikovana stanja sistema (C1 – C9).....	145
Slika 3.43 Distribucija identifikovanih stanja sistema u posmatranom profilu ponašanja.....	146
Slika 3.44 Linearne projekcije centara klusterskih grupa.....	148
Slika 3.45 Vizuelni prikaz modela za određivanje angažovane snage sistema tokom vremena u zavisnosti od intenziteta struje.....	150
Slika 3.46 Jedan skriveni sloj MLP algoritma [252].....	151
Slika 3.47 Ilustrativni prikaz generisane neuronske mreže.....	153
Slika 3.48 Vizuelni prikaz evaluacije modela za određivanje angažovane snage sistema.....	156
Slika 3.49 Grafički prikaz najvažnijih karakteristika implementiranog modela.....	160
Slika 3.50 Realne vrednost angažovane snage tokom vremena ( $y = P$ [kW]; $x = \text{Samples}$ [s]).....	161
Slika 3.51 Vrednosti angažovane snage tokom vremena generisane modelom ( $y = P$ [kW]; $x = \text{Samples}$ [s]).....	161
Slika 3.52 Distribucija realnih i modelom generisanih vrednosti tokom vremena ( $y = P$ , NN [kW]; $x = \text{Samples}$ [s]).....	162
Slika 3.53 Distribucija promenljive P u vremenu za Pinnacle VMC 1100S ( $y = P$ ; $x = \text{Samples}$ ).....	165
Slika 3.54 Grafički prikaz toka treneniga.....	168
Slika 3.55 Vizuelni prikaz modela sa karakteristikama slojeva.....	170
Slika 3.56 Profil stvarnog ponašanja iz validacionog seta podataka.....	171

Slika 3.57 Profil predviđenog ponašanja validacionog seta podataka.....	172
Slika 3.58 Profili stvarnog i predviđenog ponašanja validacionog seta podataka.....	173
Slika 3.59 Distribucija promenljive P u vremenu za HAAS SL 20 HE ( $y = P$ ; $x = \text{Samples}$ ).....	174
Slika 3.60 Profil stvarnog ponašanja iz validacionog seta podataka za HAAS SL 20 HE.....	175
Slika 3.61 Profil predviđenog ponašanja validacionog seta podataka za HAAS SL 20 HE.....	176
Slika 3.62 Profili stvarnog i predviđenog ponašanja validacionog seta podataka za HAAS SL 20 HE.....	177
Slika 3.63 Šematski prikaz pripreme strukture podataka za potrebe modela baziranog na LSTM mreži - trening par .....	182
Slika 3.64 padanje funkcije gubitaka za trening i test skup podataka (MSE).....	184
Slika 3.65 Vizuelni prikaz modela sa karakteristikama lejera.....	185
Slika 3.66 Pozicija 2.....	187
Slika 3.67 Pozicija 47.....	188
Slika 3.68 Pozicija 178.....	189
Slika 3.69 Pozicija 659.....	190
Slika 3.70 Pozicija 773.....	191
Slika 3.71 Pozicija 777.....	192
Slika 3.72 Pozicija 789.....	193
Slika 3.73 Pozicija 3444.....	194
Slika 3.74 Pozicija 3452.....	195
Slika 3.75 Pozicija 3455.....	196
Slika 3.76 Pozicija 4993.....	197
Slika 3.77 Pozicija 5000.....	198
Slika 3.78 Pozicija 5015.....	199
Slika 3.79 Pozicija 5020.....	200
Slika 3.80 Pozicija 5050.....	201
Slika 3.81 Pozicija 5567.....	202
Slika 3.82 Pozicija 5600.....	203

## II Lista tabela

Tabela 2.1 Klasifikacija mašina – primeri [138].....	52
Tabela 2.2 Poluempirijske jednačine za CNC obradni centar [138].....	59
Tabela 2.3 Poređenje predviđanja i merenja [138].....	60
Tabela 3.1 Osnovne karakteristike integrisanih modula na Current Profiler PCB-u (deo 1, na engleskom jeziku)....	71
Tabela 3.2 Osnovne karakteristike YHDC SCT-013-000 senzora (na engleskom jeziku).....	73
Tabela 3.3 Osnovne karakteristike ESP8266 ESP-07 Wifi Serial Transceiver modula (na engleskom jeziku).....	73
Tabela 3.4 Osnovni parametri izvođenja operacije.....	94
Tabela 3.5 Ključni indikatori procesa (KIP) za posmatrani slučaj.....	99
Tabela 3.6 Distribucija podataka po mašini/sistemu.....	121
Tabela 3.7 Osnovni parametri performanse modela za trening i evaluaciju.....	160

## ZAHVALNICA

*Ovom prilikom želim da se zahvalim svim kolegama i prijateljima koji su mi pružili podršku tokom izrade ove doktorske disertacije.*

*Posebnu zahvalnost posvećujem svom mentoru dr Miroslavu Kljajiću, kome sam veoma zahvalan na prijateljskim razgovorima, korisnim savetima i vremenu koje posvetio ovom istraživanju, kao i na potpunom razumevanju i maksimalnoj podršci u svim ključnim momentima izrade doktorske disertacije..*

*Veliku zahvalnost dugujem svim članovima komisije uz čiju je nesebičnu pomoć, savete i pažnju ova disertacija dobila svoj finalni oblik.*

*Veliku zahvalnost takođe dugujem i profesoru Jovanu Petroviću, koji nas je nažalost prerano napustio, a koji je dugi niz godina uticao na mene kako u privatnom tako i naučnom smislu.*

*U ovaj rukopis uloženo je mnogo rada i odricanja, odnosno vremena koje je bilo pozajmljeno od mojih najbližih. Stoga, najveću zahvalnost dugujem supruzi Milani, koja je na sebe preuzela sve porodične obaveze, a iskreno verujem da se u ključnom momentu nije pojavila u mom životu, ovaj rukopis ne bi ni postojao. Zatim svojim roditeljima, Milanu i Ankici, na bezuslovnoj podršci tokom svih svojih perioda odrastanja i sazrevanja.*

*Međutim, ovu disertaciju posvećujem Makariju i Kasiji, ali i jednoj maloj devojčici koja će nam se tek priključiti, u nadi da će biti istrajni u svojim potragama i da nikad neće prestati da maštaju.*

*Hvala Vam!*

## 1. UVODNA RAZMATRANJA

Iako je očigledno da je energija ključna za funkcionisanje svakog sistema, način na koji sistemi obezbeđuju, transformišu i koriste energiju predstavlja složen problem koji nauka još uvek nije sagledala i objasnila u potpunosti, što nedvosmisleno ukazuje na to da koncept energije nije lako suštinski razumeti. Najčešće korišćene definicije tipa „mera stvarne ili potencijalne aktivnosti“ [1], „sposobnost tela da vrši rad“, „sposobnost tela definisane mase da izvrši rad usled svoje pokrenutosti“, „sposobnost tela definisane mase da izvrši rad na osnovu svoga položaja“, itd., prilično su apstraktne, i zapravo, ne obezbeđuju fundamentalno objašnjenje o tome šta je energija u stvari [2]. Ono što dodatno komplikuje proces razumevanja koncepta energije je činjenica da energija postoji u nekoliko različitih oblika. Pa tako, možemo govoriti o potencijalnoj, kinetičkoj, toplotnoj, električnoj, hemijskoj energiji, energiji zračenja, nuklearnoj energiji, obnovljivim izvorima energije, itd. Određene činjenice ili zakoni posmatranja, zakoni termodinamike, omogućavaju nam da izvršimo niz kalkulacija u vezi sa energijom i njenim transformacijama, ali to nas ne dovodi bliže suštinskom poimanju apstraktnog pojma zvanom energija. Ipak, neprekidni tok energije neophodan je za život svakog sistema.

Međutim, postoji činjenica, koja je zbog svoje nepobijenosti tokom vremena postala jedan od osnovnih zakona fizike, a koja reguliše sve prirodne pojave do danas poznate. Ne postoji poznati izuzetak od ovog zakona – jer je tačan onoliko koliko znamo. Taj zakon naziva se zakon očuvanja energije. Prema ovom zakonu, postoji određena količina nečega, što nazivamo energijom, a što se ne menja usled mnogobrojnih promena koje priroda podvrgava. To je veoma apstraktna ideja, jer je sama po sebi matematički princip. Drugim rečima, postoji numerička količina, koja se ne menja bez obzira na to šta se događa. To nije opis mehanizma ili bilo čega konkretnog, već samo čudna činjenica da možemo izračunati neki broj i kad završimo sa posmatranjem prirode, kako izvodi svoje trikove, i ponovo izračunamo taj broj, njegova vrednost ostaje nepromenjena [3]. Takođe, prilikom izvođenja energetskih kalkulacija, neretko postoje slučajevi u kojima određeni deo energije napušta sistem i odlazi, odnosno, određeni deo energije može biti doveden sistemu. Da bismo verifikovali koncept očuvanje energije, moramo biti oprezni da je nismo doveli ili oduzeli posmatranom sistemu, ili ako je to slučaj, takve promene moraju biti uzete u obzir. Kao što je već rečeno, energija ima veliki broj različitih manifestnih oblika, i postoji matematička formula za svaki od njih, pri čemu, ako sumiramo vrednosti ovih formulacija, njena količina se neće promeniti osim energije koja ulazi i/ili odlazi iz tog sistema. Interesantno je da do danas u fizici nemamo saznanja o tome šta je to energija. Ne postoji jasna slika da energija dolazi u bilo kom “materijalnom” obliku ili formi određene količine. Međutim, postoje formule za izračunavanje neke numeričke količine, koje kad sumiramo uvek karakteriše ista vrednost. Ovo poimanje je apstraktno iz razloga što su mehanizmi ili razlozi postojanja različitih formula još uvek magloviti, odnosno sakriveni, nerazjašnjeni.

Uzimajući u obzir prethodno navedeno, koncept energije, kao jedan od najvažnijih pojmova u fizici, zasniva se na logičkom sistemu misli koji je u stanju evolucije i čija se osnova ne može dobiti destilacijom bilo kojim induktivnom metodom iz iskustava kroz koja je prošla, već se to može postići samo slobodnim otkrićem, fundamentalnim poimanjem. Opravdanost, odnosno sadržaj istine sistema zasniva se na dokazu korisnosti rezultirajućih teorema na osnovu čulnih iskustava, gde se uticaji kasnijeg na pređašnje mogu shvatiti isključivo intuitivno. Evolucija se odvija u pravcu simplifikacije logičke osnove. U cilju postizanja ovog cilja, moramo se potruditi da prihvatimo činjenicu da se logička osnova sve više i više udaljava od iskustvenih činjenica i da put našeg razmišljanja od fundamentalnih osnova do ovih rezultirajućih teorema, koje su u korelaciji sa čulnim iskustvima, postaje neprestano teže i duže [4].

U nastavku ovog poglavlja detaljnije su analizirane potrebe za ovim istraživanjem, na osnovu čega je detaljno koncipiran i prikazan istraživački problem. Ovo poglavlje ujedno predstavlja i uvod u dizajn eksperimenata u vezi sa istraživanjem razmatranog problema, dokazivanje definisanih hipoteza, diskusiju generisanih rezultata kao i pravce budućih istraživanja.

## 1.1 Obrazloženje o potrebama istraživanja

Energija predstavlja ključni faktor razvoja modernog društva kako u 21. veku tako i u budućnosti koju će odrediti sadašnje akcije i delovanja. Pitanje dostupnosti i upotrebe energije postaje sve važnije imajući u vidu visok stepen zabrinutosti prvenstveno zbog klimatskih promena, raspoloživosti energetske resursa, ali i sigurnosti snabdevanja eksponencijalno rastuće populacije širom sveta [5]. Među pet ključnih sektora (industrija, zgradarstvo, usluge, transport i poljoprivreda), industrija je na nivou Evropske unije (EU28), rangirana na trećem, dok u Republici Srbiji zauzima drugo mesto u pogledu intenziteta korišćenja finalno dostupne energije [6]. Sektor industrije na nivou EU28 koristi 24,62% ukupne finalne energije [6], pri čemu se očekuje da će se ovaj odnos u najboljem slučaju zadržati na istom kursu, u suprotnom može očekivati eksponencijalni rast u skorijoj budućnosti [7]. U Republici Srbiji stanje je slično, odnosno, sektor industrije koristi 27,8 % ukupne finalne energije, što je 12,92 % više u odnosu na prosek EU28 [6].

Promene u industrijskoj aktivnosti, praćene nizom poboljšanja u korišćenju energije primenom mera za povećanje energetske efikasnosti<sup>3</sup> smanjile su, ali ne i eliminisale, uticaj povećane ekonomske aktivnosti na potražnju ovog sektora za energijom. Zbog toga je sposobnost razumevanja i predviđanja promena u korišćenju energije u industrijskim sistemima sa visokom tačnošću veoma važan zadatak. Takođe, industrija, odnosno proizvodni sistemi predstavljaju veoma kompleksne korisnike energije usled nelinearne dinamike odvijanja niza procesa i podprocesu koji u njoj egzistiraju što značajno otežava analizu, modeliranje i predviđanje njihovog ponašanja [8].

Pored toga, efektivno suočavanje i rešavanje energetske pitanja dodatno se komplikuje zbog činjenice da je većina energetske oblika uglavnom nematerijalne ili neosetljive, nevidljive prirode. Imajući to u vidu, određivanje energetske efikasnosti sistema ili procesa, kao bitan korak ka kontrolisanom upravljanju korišćenja energije i pratećih troškova nastalih kao posledica tog korišćenja, prilično je kompleksno [9].

---

<sup>3</sup>U sektoru industrije u cilju racionalnog korišćenja energije i povećanja energetske efikasnosti, najčešće preduzimane mere podrazumevaju povećanje stepena korisnosti kotla, povrat kondenzata i korišćenje otparka, toplotnu izolaciju rezervoara, posuda i instalacija, podešavanje procesnih parametara sagorevanja parnih kotlova i industrijskih peći, primenu toplotnih pumpi, rešenja kogeneracije i trigeneracije, akumulaciju leda i toplote, noćne ventilacije, rekuperaciju toplote kondenzacije rashladnih uređaja, primenu suvih hladnjaka i frekventnih regulatora, integraciju obnovljivih izvora energije, upotrebu motora s većim stepenom korisnosti, korišćenje deponijskog gasa za proizvodnju električne energije, korišćenje otpada za proizvodnju energije, i dr. [267].

## 1.2 Pregled literature i naučnih stavova u oblasti

Istraživanje korišćenja energije i potencijala energetske efikasnosti u različitim proizvodnim sistemima, kao i analize u vezi sa definisanjem i utvrđivanjem tih potencijala koji se odnose na proces, dovelo je do generisanja niza pokazatelja energetske efikasnosti, kao što su toplotna efikasnost, specifična potrošnja energije, indeks energetskog intenziteta, itd [10]. I pored velikog broja verifikovanih istraživanja danas je u industriji najčešće korišćeni pokazatelj specifična potrošnja energije (SPE) datog izlaza ili ulaza, pri čemu je uprkos njegovoj jednostavnoj definiciji, moguće uočiti nekoliko faktora koji primenu čine komplikovanom ali i neadekvatnom za većinu realnih sistema kao što su na primer kompleksni proizvodni sistemi sa višelinijском proizvodnjom ili sistemi čiji asortiman proizvoda karakteriše različit indeks energetskog intenziteta. Takođe, SPE ne pruža adekvatne informacije u vezi sa relevantnim promenljivama koje utiču na način i intenzitet korišćenja energije (kao npr. pokazatelj toplotne efikasnosti), a samim tim i energetske efikasnost, što ukazuje da je njegoa pogodnost za primenu limitirana. Pored toga, SPE karakteriše nepostojanje prikladno definisanih sistemskih granica, što je ključno da bi se osiguralo da se svi korisnici energije razmatraju uniformno i dovoljno precizno. Na osnovu navedenog, osnovni problem primene SPE pokazatelja nalazi se u činjenici da nije poznato zbog čega se sistem nalazi u stanju prikaznom na ovaj način, te nije moguće izvršiti evaluaciju primene mera za povećanje energetske efikasnosti i utvrditi egzaktno rezultate [11]. Kao posledica uspostavljanja i primene SPE pokazatelja, u većini proizvodnih sistema još uvek nedostaju odgovarajuće metode prvenstveno za detaljno sticanje uvida u stanje sistema iz aspekta korišćenje energije, odnosno ponašanje sistema iz aspekta korišćenja energije, a zatim i za efikasno upravljanje korišćenjem energije i preciznim praćenjem primene mera za povećanje energetske efikasnosti sistema na sveobuhvatan i praktičan način, što značajno otežava proces donošenja odluka u ovoj oblasti [12].

U poslednjih nekoliko godina došlo je do značajnog rasta istraživačke aktivnosti usmerene na ekološki svesnu proizvodnju [13][14] sa zajedničkim ciljem stvaranja dobara i usluga koristeći procese i sisteme sa minimalnim negativnim uticajem na okolinu, dok simultano racionalno koriste energiju i prirodne resurse. Korišćenje energije predstavlja jedno od glavnih razmatranja u studijama na osnovu analize životnog ciklusa (*LCA – Life Cycle Analysis*) [15], međutim zbog prirode intenzivnih LCA informacija i nedostatka tačnih podataka u vezi sa potražnjom energije tokom životnog ciklusa proizvoda (posebno tokom faze proizvodnje), ove analize često rezultiraju generisanjem pretpostavki i pojednostavljenja, te su stoga „grube“ i ne obezbeđuju željeni nivo preciznosti.

U globalu, postojeća istraživanja u ovoj oblasti moguće je sagledati iz dve različite perspektive na nivou „postrojenja“ i „procesa“. Perspektiva nivoa postrojenja, fokusirana je na energiju koju koristi infrastruktura, kao i ostali periferni elementi višeg nivoa, a koji su odgovorni za održavanje neophodnih proizvodnih uslova u zavisnosti od okruženja [5]. Primeri takvih korisnika energije su sistemi grejanja, hlađenja i ventilacije unutar objekta, kao i sistem osvetljenja [16], gde se sistemi menadžmenta upravljanja energijom (*EnMS – Energy Management Systems*) obično koriste za nadgledanje ovih aktivnosti [17]. Na primer, studija [18] za ocenjivanje performansi proizvodnih sistema, integrisana u američki sistem racionalnog korišćenja energije „Energy Star“, koristi pristup statističke analize kako bi se odredili pokazatelji energetske performanse proizvodnog sistema na osnovu promenljivih 'nivoa postrojenja'.

S druge strane, istraživanje usmereno na korišćenje energije na nivou procesa koncentrisano je na pojedinačnu opremu, mašine i radne stanice u okviru proizvodnog sistema. Na primer, kao deo međunarodne inicijative „Kooperativni naponi za modeliranje procesnih emisija u proizvodnji“ (*CO<sub>2</sub>PE*) [19], predstavlja značajno

istraživanje sa ciljem da se dokumentuju, analiziraju i smanje procesne emisije za širok spektar kako postojećih tako i novih, modernijih ali i tehnološki naprednijih proizvodnih procesa [20].

Takođe, analize izvedene na osnovu pravila inženjerske prakse u oblasti pojedinačnih procesnih entiteta, gde se informacije prikupljaju u obliku inventara kroz metodologiju životnog ciklusa na nivou tih entiteta, pokazale su se značajnim u proceni proizvedenih proizvoda i kvantifikacije različitih parametara uključujući: ulazne materijale, energetske potrebe, kao i prateće gubitke materijala i energije [21].

U proizvodnom sektoru troškovi materijala obično imaju najveći udeo u ukupnoj troškovnoj strukturi i kreću se u intervalu od 30-55% ukupnih troškova u zavisnosti od delatnosti industrijskog sektora, dok troškovi energije u proseku učestvuju u rasponu od 0,5-30%, osim u ekstremnim slučajevima, kao što je na primer proizvodnja stakla, gde mogu zauzimati udeo i do 80 % od ukupnih troškova [22]. Ono što je posebno interesantno, preko 90% uticaja proizvodnih aktivnosti na životnu sredinu povezano je sa korišćenjem energije i raznim vidovima tretiranja materijala [23]. Zbog toga, istraživači i praktičari u industriji razvili su niz metoda i alata za određivanje relevantnih pokazatelja promene energije i materijala tokom vremena u proizvodnji, kao što su analiza tokova energije i materijala (*MEFA – Material and Energy Flow Analysis*), mapiranje toka vrednosti (*VSM – Value Stream Mapping*), kao i mapiranje toka vrednosti iz aspekta energije (*EVSM – Energy Value Stream Mapping*).

Koncept MEFA predstavlja sistematsku procenu toka energije i materijala unutar sistema definisanog u prostoru i vremenu [24], sa fokusom na ulazno/izlazne odnose procesa i/ili sistema i zasniva se na zakonu očuvanja materije (ulazi i izlazi nekog procesa ili sistema moraju biti u ravnoteži). Takođe, koncept MEFA egzistira u različitim terminima kao što su mreža toka materijala (*MFN – Material Flow Network*) [25], analiza toka materijala (*MFA – Material Flow Analysis*) [26] i računovodstvo energetske tokova (*EFA – Energy Flow Accounting*) [27], a koji su fokusirani samo na materijalne ili energetske tokove respektivno. Glavni nedostatak gore navedenih metoda je nedostatak vremenske dimenzije, odnosno, ove metode su razvijene za periodičnu, a ne kontinualnu upotrebu, pri čemu se unos informacija vrši sukcesivno i uglavnom zavisi od načina, organizacije i neretko manuelnog prikupljanja podataka, a ne od automatskog povlačenja podataka sa npr. senzorskih uređaja, njihove obrade, rekalkulacije i prikaza u adekvatnim jedinicama mere u realnom vremenu.

Sa druge strane, VSM predstavlja metodološki alat za pojednostavljeno izučavanje proizvodnog procesa od njegovog početka do kraja, podelom na pojedinačne segmente aktivnosti u kojima se dodaje i one u kojima se ne dodaje vrednost. Opšti cilj VSM-a je poboljšanje performanse procesa uklanjanjem aktivnosti u kojima nema dodavanja vrednosti, i naj taj način povećati efikasnost toka vrednosti [28]. Funkcija VSM-a započinje sa vrednošću, fokusira se samo na delove toka gde se stvara vrednost, i optimizuje transfer prema takvom toku, sa ciljem postizanja najbolje performanse. Pored tokova materijala i informacija sa njihovim karakteristikama performansi, mape sadrže i vremensku dimenziju, koja ukazuje na ukupno vreme izvođenja, odnosno ukupno vreme dodavanja vrednosti. Kao glavni nedostatak, VSM pruža samo statičku sliku ograničenog asortimana proizvoda, odnosno nije u mogućnosti da prikaže način ponašanja višelinijjskih proizvodnih tokova, što sprečava kontinuiranu primenu. Pošto se VSM u svom izvornom obliku fokusira na vreme i zalihe kao primarne pokazatelje performansi proizvodnih sistema, brojni istraživači su se bavili nadgradnjom i dopunom ovog metoda uključujući energetske aspekt.

Kao rezultat takvih istraživanja, razvijen je novi prilaz baziran na analizi mapiranja energetske i materijalne tokove (*EMSM*) proizvodnih sistema [29]. Potrebne informacije obezbeđuju se planskim obilaskom proizvodnog



pogona u formi energetskeg pregleda u postupku sličnom VSM pristupu. Rezultati su često predstavljani u formi Senki dijagrama koji zasebno prikazuju materijalne i energetske tokove. Iako je vizualizacija korišćenjem Senki dijagrama efikasan način za prikazivanja rezultata i isticanje neefikasnosti, ključni pokazatelji performanse (KPI) prikazani u funkciji vremena još uvek ostaju zanemareni [30][31][32].

Uvrštanjem energetskeg aspekta u analizu mapiranja onih tokova koji učestvuju u kreiranju vrednosti (EVSM), donekle omogućava identifikovanje mogućnosti redukcije intenziteta korišćenja energije zajedno sa drugim mogućnostima poboljšanja procesa, sa ciljem da se maksimiziraju operativni dobici i energetska efikasnost. Međutim, i pored navedenih unapređenja, postojeće metode i alati nisu osmišljeni za kontinualnu upotrebu ili automatizovano ažuriranje.

Zbog toga, veliki broj istraživanja usmerio se na razvijanje matematičkih modela za integrisano razmatranje proizvodnih sistema, njihovih procesa, kao i preduslova za njihovo funkcionisanje iz aspekta korišćenja energije [33]–[35]. Pristup na bazi modela zahteva prethodno definisan okvir, a zatim i set metodoloških analiza za posmatranje sistema za koji se generiše model, dok rezultati njegovog funkcionisanja, odnosno njegova reprezentacija realnog sistema, zavise od kompleksnosti perspektive posmatranja (proizvodne aktivnosti mogu se smatrati sastavljenim iz više nivoa [23]), kao i izbora nivoa apstrakcije u funkciji zavisnoj od cilja istraživanja, odnosno pitanja zbog kojeg je generisan [36].

Imajući u vidu prethodno navedeno, nekoliko osnovnih tipova modela različitih nivoa apstrakcije je identifikovano i navedeno u nastavku. Reper model energetske performanse (*EPBM - Energy Performance and Benchmark Model*) definiše korelaciju korišćenja energije sistema po jedinici proizvoda uz pomoć pokazatelja energetske performanse (EPI) kako bi se stekao uvid u stanje energetske performanse i obezbedila mogućnost poređenja sa sličnim postrojenjima u industriji. EPBM se bazira na stohastičkim modelima definisanih graničnih vrednosti i metoda korigovane regresije najmanjih kvadrata (*COLS - Corrected ordinary least squares regression*) sa ciljem da povežu korišćenje energije sa produktivnošću (broj proizvedenih proizvoda), informacijama o karakteristikama proizvoda, podacima o načinu korišćenja postrojenja (stopa korišćenja postrojenja) i vremenskim uslovima (grejni (HDD) i rashladni (CDD) stepen dani) [37], [38].

U okviru poredbenih (eng. *Benchmark*) modela, koji su namenjeni uspostavljanju referentnih parametara u grupi sličnih proizvodnih sistema, razvijena je energetska „Lean“ analiza (*LEA - Lean Energy Analysis*) na osnovu koje se generiše model korišćenja finalnih oblika energije (električne energije, lož ulja, prirodnog gasa, itd.) u posmatranom sistemu [39]. Ključni doprinos ove analize je definisanje energetskeg tragova/potpisa, koji predstavljaju osnovne faktore statističke regresije. LEA se koristi za predstavljanje energetske poredbene vrednosti proizvodnog sistema na polaznom nivou (eng. *Baseline*). Pri tome, energetskeg potpis formulisan specifičnim energetskeg relacijama posmatranih sistema koje su izvedene iz njihovih nezavisnih promenljivih, predstavlja jedinstveno obeležje posmatranog sistema. Međutim, upitno je da se model može koristiti za među-sistemske poređenje zbog njegove jednostavne strukture koja podrazumeva multivarijabilnu regresiju čije su jedine ključne promenljive samo ambijentalna temperatura vazduha i obim proizvodnje [38], [40].

Sa druge strane, sistematski modeli podrazumevaju modeliranje različitih nivoa i pružaju detaljan uvid u korišćenje energije proizvodnog sistema za posmatrani nivo. Međutim, kada je u pitanju holistička perspektiva korišćenja energije posmatranog sistema, oni su nekompetentni zbog različite prirode i strukture informacija

sistemskih nivoa, zbog čega se prilikom interakcije među nivoima ili gubi sveobuhvatna slika ili nedostaju detalji koji definišu željenu preciznost. Stoga bi jednostavna kompilacija modela različitih nivoa mogla stvoriti probleme u donošenju odluka i informisanosti [38]. Ipak, sistemskom analizom moguće je izvršiti dekompoziciju posmatranog sistema pristupom „odozdo ka gore“ (eng. *Bottom up approach*), pristupom „odozgo ka dole“ (eng. *Top down approach*) ili njihovom kombinacijom (u slučajevima gde je neophodan visok nivo verifikacije) [41], što je neophodno za fundamentalno poimanje funkcionalnosti posmatranog sistema.

U literaturi se mogu naći različite interpretacije gde su istraživanja usredsređena samo na nivoe procesa i profilisanje energetskog opterećenja pojedinih mašina [42], [43]. Takođe postoji nekoliko primera modeliranja nivoa procesnog lanca u odnosu na kumulativni profil opterećenja svih mašina [44], [45].

Model energije ugrađene u proizvod (*EPE - Embodied product energy model*) zasniva se na analizi scenarija lanca snabdevanja proizvodnog sistema sa ostalim funkcijama na nivou fabrike [46]. Scenariji lanca snabdevanja razmatraju se za sve procese svih funkcija proizvodnog sistema a koji su u vezi sa proizvodom koji se izrađuje, pri čemu energija ugrađena u predmet rada u nekoj od faza izrade, uključuje količinu energije iskorišćene u prethodnim procesima svih funkcija povezanih sa tim proizvodom. EPE model pogodan je za primenu u slučajevima gde je moguće posmatrati centralizovane fabričke klastere (grupa multiprocesnih fabrika, različitih a komplementarnih delatnosti na jednom mestu). Mana primene EPE modela je pojava širokog asortimana karakteristika proizvoda, koje se u zavisnosti od procesa kojima je podvrgnut, manifestuju u različitim vremenskim intervalima, pri čemu se kvantifikacija ugrađene energije vrši kroz iskorišćenu energiju od prve tačke procesa i kumulativno uvećava za količinu iskorišćene energije na narednoj tački procesa, sve do poslednje tačke procesa, što zahteva veoma detaljno poznavanje proizvodnih postupaka kako na makro, tako i na mikro nivou proizvodnog sistema.

Diskretni modeli događaja (*DEM - Discrete event models*), posmatraju korišćenje energije grupe proizvoda uz pretpostavku da korišćenje energije jednog proizvoda nema bitnu razliku u odnosu na drugi, odnosno n-ti proizvod. DEM modeli razvijeni su iz tradicionalnih EPE modela, pri čemu je za model diskretnog događaja moguće izvršiti simulaciju što ovaj koncept odvodi korak dalje od opisivanja proizvodnih procedura. Primer implementacije DEM modela razmatra korišćenje energije iz dva aspekta, odnosno kao direktnu (*DE*) i indirektnu (*IE*) energiju. DE je definisana kao energija koja se direktno iskoristi u procesu proizvodnje (npr. zavarivanje i obrada), dok je IE definisana kao energija koja se koristi za održavanje uslova u radnom okruženju (npr. osvetljenje, grejanje i ventilacija). Odnosno, DE model predstavlja reprezentaciju fizičkog sistema do nivoa mašina, dok se IE izračunava kao prosečna iskorišćena energija tokom vremena i broja proizvoda koji su boravili u različitim proizvodnim zonama [5], [47].

I pored toga što ovaj model omogućava bolje razumevanje proizvodnih linija i uključuje fabričke, multi-mašinske kao i nivoe pojedinačnih mašina, on zapravo sumira svu energiju u nivoima bez prikaza dubinske analize uticajnih faktora kao ni korelacije interakcija među nivoima modela. Pored svih prednosti u nivoima modeliranja, ova metoda čini modele glomaznim u primeni. Takođe, iako obrada predmeta rada, predstavlja niz diskretnih događaja (zbog više postupaka na nivou operacije) načini korišćenja energije u sistemu su istovremeno i diskretni i kontinualni. Imajući to u vidu, pristup modeliranju diskretnih događaja zanemaruje kontinuiranu prirodu DE i IE, pri čemu zanemaruje i njihove interakcije.

Prethodni problem stimulisao je razvoj hibridnih modela (*HM - Hybrid models*). Potreba za generisanjem hibridnog modela najbolje se ogleda u slučajevima analize značaja i uloge građevinskog omotača proizvodnog sistema

i interakcija između proizvodnog procesa i njegovog okruženja. Hibridni modeli pogodni su za korišćenje prilikom analize korišćenja energije na nivou fizičkog/građevinskog objekta jer ilustruju logiku korišćenja energije za obezbeđivanje uslova proizvodnje u pogledu temperature, relativne vlažnosti, čistoće vazduha usled grejanja, hlađenja i kondicioniranja, itd., kao i to kako na te prirodne procese utiče lokalna klima mesta proizvodnje i toplotni dobici usled disipacije prilikom rada mašina [34], [48].

Za razliku od EPE i DEM modela, HM modele karakteriše hibridni pristup koji kombinuje klasične DEM modele i kontinuiranu simulaciju uzimajući u obzir kontinualnost promena prirodnih procesa u okruženju i njihov uticaja na građevinski omotač sistema i diskretnost procesa izrade proizvoda. Ovi modeli su uglavnom teoretske prirode i uglavnom ne pružaju pristup modeliranju niti kvantifikaciji korišćenja energije za grejanje, ventilaciju i klimatizaciju objekata (*HVAC*) u relaciji sa diskretnim događajima procesa proizvodnje. Pored toga HM modeli koncentrišu se na specifične modele simulacije za određene procese što direktno isključuje pristup sistemskom modeliranju, čineći ih nefleksibilnim i neizvodljivim u velikom broju industrijskih primena.

U postojećoj literaturi, takođe egzistiraju i stohastički, kao i deterministički modeli referentnih granica (*SDFBM - Stochastic and Deterministic Frontier Benchmarking Models*) koji se temelje na analizi stohastičkih granica (*SFA - Stochastic Frontier Analysis*) i analizi obavljanja podataka (*DEA - Data Envelopment Analysis*) za merenje efikasnosti inicijativa za racionalizaciju korišćenja energije u smislu tehničkog poboljšanja energetske efikasnosti u industriji, posebno u postrojenjima za montažu proizvoda [12]. DEA metoda predlaže neparаметarski pristup za izračunavanje efikasnosti, tako što se višestruki ulazi svode na jedan "virtuelni" ulaz i višestruki izlazi svode na jedan "virtuelni" izlaz koristeći težinske koeficijente. Pri tome, problem dodeljivanja težina rešen je tako što se svakoj jedinici dopušta da odredi sopstvene težine sa ciljem da joj se maksimizira efikasnost, uz ograničenje da te težine moraju biti nenegativne vrednosti i da količnik virtuelnog izlaza i virtuelnog ulaza svake jedinice ne može biti veći od 1. DEA metod za merenje efikasnosti, kompatibilan je ali i komplementaran sa SFA analitičkim metodom, koji predstavlja alternativni pristup određivanja granice efikasnosti korišćenjem ekonometrijskih modela.

Proizvodne sisteme moguće je posmatrati i kao niz otvorenih termodinamičkih procesa [49], [50]. Svaku fazu procesa karakteriše interakcija rada i količine toplote duž toka materijala. Korisni izlaz, pre svega u obliku materijalnih tokova proizvoda i nusproizvoda, iz određene faze može se preneti na drugi, pri čemu svaki korak neizbežno uključuje gubitke usled inherentnog odstupanja od reverzibilnih procesa povećavajući entropiju, tok otpadnih materijala, kao i gubitke u radu (Eksergetski gubici, koji su često pogrešno tumačeni kao gubici energije). Stoga je eksergijska analiza pogodna za primenu prilikom identifikacije gubitka resursa na nivou operacija proizvodnog procesa, što je veoma važno u slučajevima gde je grupa operacija integrisana u jedan komad opreme. Savremena globalica, na primer, može da obuhvata širok izbor funkcija, uključujući rukovanje predmetom rada, podmazivanje, uklanjanje strugotine, promenu alata i otkrivanje puknuća alata, a sve uz osnovnu funkciju alatne mašine koja podrazumeva uklanjanje materijala sečenjem. Primenom eksergijske analize, moguće je kvantifikovati kako ove dodatne funkcije (koje često dominiraju u energetskim potrebama mašine) utiču na korišćenje energije.

Na osnovu prethodno navedenog, evidentna je ograničenost identifikovanih analiza, alata, metoda, kao i modela, da na sveobuhvatan način kvantifikuju uticajne faktore, intenzitet njihovog delovanja, kao i međusobne relacije na način korišćenja energije posmatranog sistema u realnom vremenu. Ovo nedvosmisleno ukazuje na

isključenost dinamičke komponente u većini slučajeva prilikom posmatranja sistema što je ključno da bi se stekao uvid u stanje i ponašanje nekog sistema na osnovu intenziteta i načina na koji koristi energiju.

### **1.3 Predmet istraživanja**

Predmet istraživanja ove disertacije su prerađivački proizvodni sistemi. Grupa procesa od interesa su kompleksne električne mašine koje se koriste za obradu metala rezanjem, odnosno klasteri CNC mašinskih centara gde se na putu od priprema (sirovine) do finalnog izgleda proizvoda, predmet rada podvrgava raznim operacijama obrade uklanjanja materijala rezanjem, kao što su struganje, glodanje, bušenje, urezivanje navoja, brušenje, itd.

### **1.4 Istraživački problem**

Činjenica da digitalna era pruža više podataka nego ikada ranije, pružajući korisne i sveobuhvatne podatke u realnom vremenu, omogućava i stimuliše razvoj okruženja u kojem je moguće donositi relevantne odluke u realnom vremenu. Shodno tome, dosadašnja praksa, u kojoj su sistemi menadžmenta energijom (EnMS) okarakterisani kao statični sa periodičnim revizijama sistema koje se dešavaju otprilike svakih 3-6 meseci, gde su podaci dobijeni kroz ove revizije podvrgnuti ljudskoj analizi, jednostavno više nije efikasna. Činjenica je da ljudski um ne može da se takmiči sa mikrokontrolerima, na primer, jer nije dizajniran da bude tako brz u rešavanju beskonačno velikih skupova proračuna u realnom vremenu. Ovo ukazuje da je neophodno mnogo vremena što predstavlja značajno ograničenje, posebno ako se posmatra iz energetskeg aspekta, u kojem sistemi mogu da promene svoje stanje za nekoliko nanosekundi (ns), čak i manje. Ovo ukazuje da su rezultati dobijeni tradicionalnim energetskeg pregledima neefikasni. S obzirom na navedeno, upravljanje energijom je kontinuiran, dinamičan proces pri čemu primenom periodičnog prikupljanja podataka i statičkih metoda za obradu tih nepotpunih podataka nije moguće u potpunosti sagledati, a ponekad čak ni razumeti stanja i ponašanje posmatranog sistema jer ono ostaje skriveno. Dakle, rezultati generisani na ovaj način mogu biti pogrešni, veoma rizični u smislu pouzdanosti, dok je neophodno uložiti značajne napore i vreme da bi se eventualno došlo do korisnih informacija.

U cilju pronalaženja rešenja za navedeni problem definisano je pet ključnih postulata na osnovu kojih ja baziran dalji tok istraživanja:

- A. Proizvodni sistem definisan je kao konačan deo beskonačnog prostora koji karakteriše skup elemenata i njihovih međusobnih relacija sa ciljem generisanja definisanog izlaza za dati ulaz. Odnosno, sistem predstavlja kompleks međusobno povezanih funkcija i njihovih komponenti, pri čemu sve što nije uključeno u sistem predstavlja njegovu okolinu koja takođe ima uticaj na taj sistem i obrnuto. Komponente sistema određuju njihove karakteristike kao i njihove interakcije (spajanja, sporazumevanja, rasporeda i mnoštva drugih odnosa između njih) što predstavlja strukturu sistema, dok kontinuirana modifikacija tih komponenti i njihovih međusobnih odnosa predstavlja funkcionisanje sistema. Zatim, način uzajamnog delovanja između komponenti sistema, sistema i okruženja, u toku vremena, predstavlja ponašanje sistema. Promena ponašanja sistema može biti izazvana izvesnim delovanjem okoline, međutim, za definisanje karaktera ponašanja sistema odlučujuća su unutrašnja struktura sistema, broj i vrsta njegovih elemenata i međusobne relacije tih elemenata. Ovo uzajamno delovanje se odvija preko ulaznih i izlaznih informacija, karakterisanih vektorima čiji sastavni delovi izražavaju stanja pojedinih sastavnih delova ulaza odnosno izlaza. U zavisnosti od broja sastavnih delova razlikujemo dvodimenzionalne, trodimenzionalne, odnosno višedimenzionalne vektore, pri čemu se skup vektora ulaza, odnosno izlaza, naziva prostor ulaza odnosno prostor izlaza. Redosled vektora u vremenu generiše trajektoriju, pri čemu trajektorije na ulazu i izlazu karakteriše izvesna zavisnost. Ako pored

ulaznih i izlaznih stanja razmatramo i unutrašnja stanja, onda je reakcije sistema moguće pratiti po trajektorijama unutrašnjih stanja. Konkretna trajektorija izlaza kao posledica trajektorije ulaza naziva se aktivnost ili proces sistema. Drugačije rečeno, u svrhu funkcionisanja sistema, u njemu se odvija skup međusobno uslovljenih aktivnosti i događaja. Ova zbivanja u sistemu predstavljaju proces, gde presek ponašanja sistema i procesa u njemu, u određenom momentu, oslikava stanje sistema.

- B. Ako pojedine komponente u sastavu sistema dejstvuju na tačno određen način, tako da se njegove buduće promene mogu pouzdano predvideti, sistem je deterministički i njegovo funkcionisanje se odvija po strogo određenom (determinističkom) planu. Ukoliko skup komponenata nema striktno određene veze, a samim tim ni fiksiranu strukturu, pa su međusobni odnosi, kako sastavnih elemenata tako i podskupova (podsistema), podložni uticaju slučajnih kombinacija brojnih faktora, njihovo ponašanje biće slučajne (stohastičke) prirode, koje se ne odvija po strogo određenom zakonu, već je zavisno od slučajnih faktora. Proučavanje karakteristika proizvodnih sistema kao stohastičkih sistema, omogućuje potpunije i preciznije sagledavanje velikog broja pojava u vezi sa funkcionisanjem sistema, te doprinosi mogućnosti upravljanja sistemima i njihovom usmeravanju ka osnovnom cilju upravljanja - optimizaciji sistema.
- C. Način ponašanja sistema, prelaz iz jednog stanja u drugo, može se matematički obuhvatiti i prikazati na taj način što se posmatrani odnosi i procesi prikazuju kao stanja koja dolaze jedno za drugim u vremenu i kao operacije koje određeno stanje transformišu u sledeće. Ovaj postupak matematičkog izučavanja ponašanja sistema i procesa u njemu se naziva modeliranje, odnosno postupak zasnovan na konstrukciji modela koji služi kao sredstvo za dobijanje saznanja o poznavanju određenog objekta ili sistema i analizu strukture sistema i njegovog ponašanja. Stoga, model u naučnoistraživačkom smislu predstavlja oblik reprezentacije izvesnih objekata, pojava, događaja, sistema ili problema koji su predmet istraživanja, s ciljem da se predvidi njihovo buduće stanje, ponašanje i razvoj, pri čemu upotreba matematičkih modela i kvantitativnih (matematičko-statističkih) metoda u procesu odlučivanja omogućava da se korišćenjem relevantnih informacija i uvažavanjem postojanja i stalnog menjanja faktora koji deluju na posmatrani sistem (učestvuju u posmatranom procesu), smanji rizik u odlučivanju do te mere da se, odabirom najpovoljnije alternative, mogu očekivati željeni rezultati sa velikim stepenom izvesnosti.
- D. Apsolutna linearnost ne postoji ni u jednom realnom sistemu. Odnosno, postoji mnogo različitih tipova nelinearnosti koje egzistiraju u različitim nivoima realnih sistema, pa se za neki sistem kaže da je nelinearan ako njegov izlaz sadrži elemente koji nisu bili prisutni na ulazu (Primer: Ako vibracija mašine u stvari predstavlja njenu reakciju na sile koje su izazvane pomeranjem delova mašine, i ako su vibracije merene na različitim lokacijama na mašini kako bi se na osnovu njih odredile veličine sile, na osnovu izmerene frekvencije, moguće je pretpostaviti da su sile koje su se javljale imale istu frekvenciju kao i reakcija, i da su izmerene veličine proporcionalne veličinama sila. Ova pretpostavka da je ponašanje mašine linearno kada je u pitanju reakcija na sile je racionalna za većinu mašina. Međutim, kako se mašine habaju i zabori povećavaju, ili se stvaraju pukotine ili gube elemeti, reakcija mašine ne ostaje dugo linearna i rezultanta izmerenih vibracija je različita od sila koje deluju.). Nelinearni dinamički sistemi (NDS), koji opisuju promene tokom vremena, mogu se pojaviti kao haotični, nepredvidljivi ili kontraintuktivni, u kontrastu sa mnogo jednostavnijim linearnim sistemima. NDS karakteriše niz slučajeva koji se tokom vremena dešavaju po nekom zakonu usled funkcionisanja sistema, pri čemu u nekom momentu duž vremenske linije, bez promena u funkcionisanju sistema, dolazi do određenog stepena deformacije kod narednih slučajeva u tom

nizu, pri čemu se pod slučajem podrazumeva događaj koji se pod datim uslovima u datom času, ne mora nužno dogoditi (realizovati).

- E. Ako izvod količine energije u određenom vremenskom trenutku analogno prikazuje stanje posmatranog sistema, onda integralna količina energije za određeni vremenski period može prikazati ponašanje posmatranog sistema u tom periodu. Navedena pretpostavka je u skladu sa termodinamičkim postulatom da se sistem zapravo opisuje na osnovu svojih stanja, pri čemu je osnovno stanje stanje ravnoteže (Primer: Termodinamičke veličine (temperatura ( $T$ ), pritisak ( $p$ ), zapremina ( $V$ ) i količina supstance ( $n$ )) koje opisuju sistem ne menjaju se u toku vremena), odnosno stanje pri kojem nema promene energije jer je funkcionalna veza između ovih veličina jednaka nuli. Svako stanje sistema koje nije u ravnoteži, analogno je kretanju, odnosno varijacijama u korišćenju energije posmatranog sistema.

Pristup baziran na identifikaciji energetske tokova pruža temeljnu osnovu za istraživanje, odnosno određivanje stanja i ponašanja sistema koje karakteriše nelinearna dinamička aktivnost. Princip istraživanja dinamičkih sistema koji se koristi u ovoj metodi zasniva se na univerzalnom zakonu o očuvanju i transformaciji energije, stoga, on pruža zajednički pristup analizi različitih tipova sistema uključujući mehaničke, toplotne i električne/magnetne, kontrolne sisteme, kao i neke složene sisteme koji uključuju njihova spajanja ili interakcije. Pri tome, promenljiva koja se određuje ovim pristupom kombinuje efekte i od sila i od brzina, a njihov proizvod, snagu, odnosno intenzitet promene energije, karakteriše dinamičko ponašanje, koje uključuje i odražava potpunu informaciju o njegovoj ravnoteži i kretanju, te stoga prevazilazi ograničenja za proučavanje promena sile i kretanja odvojeno [51]. Pristupi usvojeni u analizi tokova energije fokusiraju se na globalne statističke energetske procene distribucije, prenosa, dizajna i kontrole dinamičkih sistema ili podsistema, a ne na detaljni prostorni šablon strukturnih odziva (Odziv sistema predstavlja izlaznu funkciju sistema i javlja se kao odgovor na ulaznu funkciju sistema – pobudu). Imajući to u vidu, ova metoda prevazilazi poteškoće koje su neminovne pri korišćenju metoda konačnih elemenata ili eksperimentalne modalne analize vibrirajućih odziva u srednjim i visokofrekventnim područjima, što zahteva ekstremno male veličine elemenata da bi se postigla potrebna računarska preciznost. U poslednje vreme, porast interesovanja naučnika i inženjera za proučavanje nelinearnih dinamičkih sistema (NDS) ogleda se kao posledica nekoliko ključnih razloga:

- Praktični inženjerski sistemi su inherentno nelinearni, tako da u većini slučajeva linearne pretpostavke i analize ne prikazuju važne pojave pa se kao posledica javlja kontinualna sumnja u tačnost generisanih rezultata. Ova konstatacija jasno ukazuje na neophodnost primene nelinearnih sistemskih analiza.
- Sa ekstremno brzim razvojem savremenih računara sa fokusom na računarske metode i odgovarajuća softverska rešenja, moguće je rešavati veliki broj složenih nelinearnih problema što nije bilo moguće pre razvoja računskih kapaciteta visoke performanse.
- Pokazalo se da za mnoge dinamičke sisteme uvođenje nelinearnih članova može značajno poboljšati performanse sistema pružajući jasan uvid u ponašanje sistema usled niza aktivnosti koje mu nelinearno menjaju stanje [51] (primeri: nelinearni sistemi vešanja/izolacije mogu da pruže izuzetno nisku ili ekstremno visoku dinamičku podržavajuću krutost i mnogo bolje performanse koje se ne mogu realizovati linearnim sistemima; moguća periodična rešenja i štetne pojave lepršanja<sup>4</sup> koje se javljaju u nelinearnim oscilatorima nude više mogućnosti za dizajniranje efektivnih uređaja za generisanje energije).

---

<sup>4</sup> Pod lepršanjem se podrazumevaju torzijske oscilacije uzrokovane aeroelastičnim podrhtavanjem

Sve je veće interesovanje za korišćenje pristupa baziranog na identifikaciji energetske tokova izvedenog iz univerzalnog zakona o očuvanju i transformaciji energije za istraživanje nelinearnih dinamičkih sistema sa ciljem određivanja stanja i ponašanja sistema usled dinamičke aktivnosti koja ih karakteriše a koje je moguće sagledati praćenjem intenziteta promena u njihovim energetske tokovima.

#### 1.4.1 IoT: Primarni tehnološki koncept za rešavanje istraživačkog problema

Moderno društvo dostiglo je još jednu razvojnu fazu u kojoj je vremenom, kako je energetske sektor postajao sve digitalniji zahvaljujući senzorima, dok je istovremeno postajao sve više decentralizovan iz aspekta energije koja dolazi iz lokalnih obnovljivih izvora ili mikromrežnih sistema, korisnici mogu imati izuzetnu sposobnost da nadgledaju i upravljaju svojim korišćenjem energije [52]. Dostupnost i pouzdanost energije nisu važni samo za kritične energetske komunalne objekte, proizvodne procese i sve druge kritične operacije u okviru Industrije 4.0. Oni su suštinski deo toga. Ili drugim rečima, bez sveobuhvatnog upravljanja energijom u središtu, jednostavno nije moguće realizovati koncept Industrije 4.0 na duže staze. Dok se tradicionalno industrijsko upravljanje energijom fokusira na efikasno obezbeđivanje i korišćenje energije za potrebe procesa, kao što su grejanje, hlađenje, komprimovani vazduh i električna energija, IoT (*eng. Internet of Things*) ima mnoštvo novih tokova podataka koji podržavaju energetske efikasnost i upravljačke aktivnosti. Tačnije, tehnologije zasnovane na IoT-u omogućavaju potpuno novu perspektivu bilo da se radi o sticanju operativnih prednosti, kao što su smanjeno održavanje i poboljšana bezbednost, kao i povećanje pouzdanosti i efikasnosti, pri čemu praćenje stanja pumpi, akustično praćenje stanja automatskih ventila u sistemu vodene pare, performansi izmenjivača toplote, itd., bežično povezanih sa sistemima za nadzor, prikupljanje podataka i analitiku, obezbeđuju isplativu instalaciju i povrat investicije za manje od godinu dana u većini slučajeva. Imajući ovo u vidu, implementacija inteligentnog upravljanja energijom u okruženju industrije 4.0 počinje od razumevanja energetske tokova, dok integracija IoT rešenja, pažljivo dizajniranih i implementiranih može kvantifikovati nedostajuće stohastičke promenljive, koje kada postanu deo jednačine pružaju moćan uvid, i što je još važnije, otvaraju potpuno novu dimenziju za procese donošenja odluka u oblasti [52].

Primena IoT-a u različitim sektorima i industrijama je naširoko razmatrana u literaturi (npr. [53]–[55]), dok su senzori [56] i 5G mreža [57] dobili visok nivo tehničke ocene u pogledu izazova i mogućnosti iz aspekta praktične primene. Međutim, kada je reč o potencijalu određene IoT tehnologije u energetske analizi, većina studija se fokusirala na jedan specifičan podsektor [58]. Na primer, postoje studije i istraživanja u vezi sa primenama IoT-a u pametnim kućama [59], metodama, nedavnim napretkom i implementacijom 5G sa fokusom na potražnju za energijom [60], ulogom IoT-a u poboljšanju energetske efikasnosti u zgradama, javnom sektoru i transportu [61]–[65], a razmatrani su i ključni izazovi u prikladnosti IoT tehnologija za prenos podataka i komunikacionih protokola za pametne mreže [66]. U nekim studijama [67] IoT omogućava rešenja zasnovana na termalnoj viziji za otkrivanje problema izolacije u omotaču zgrade [68]. Takođe, izdržljivost materijala koji se koristi u zidovima zgrade, kao što je beton, može se pratiti preko IoT senzora u realnom vremenu [69]. Postoje istraživanja koja se odnose na kvalitet vazduha u zatvorenom prostoru zasnovana na jeftinim i energetske efikasnim senzorima [70], kao i istraživanja u vezi sa uticajem zauzetosti i ponašanja stanara na energetske efikasnost, odnosno kao posledica korišćenja sistema za grejanje, hlađenje i kondicioniranje vazduha (KGH), rasvete i drugih električnih uređaja po stanarima [71]–[73]. Potom, primenjeno je istraživanje inteligentnog sistema za praćenje temperature vode vrelog izvorišta zasnovano na

IoT-u [74], dok je za sistem prikupljanja toplotne energije projektovana i predložena IoT platforma zasnovana na generičkom algoritmu [75].

Navedeni logički koncepti prilično su fleksibilni i mogu se implementirati u industrijskim okruženjima uz određene modifikacije, jer se koliko god bili slični, ovi procesi razlikuju od slučaja do slučaja. Takođe, sveobuhvatni pregledi literature u oblasti korišćenja najsavremenijih informacionih i komunikacionih tehnologija za poboljšanje energetske efikasnosti u proizvodnoj industriji u pogledu izgubljene toplote, unapređenje procesa upravljanja energijom, materijalima i produktivnošću procesa, kao i procesi restrukturiranja usvajanjem novih proizvodnih koncepata su takođe dostupni [76]–[79]. Do nedavno je većina proizvodnih sistema pratila svoje korišćenje energije kroz mesečne račune za energijom [80], dok je ideja da se podaci o korišćenju energije za sve sisteme/procese/podprocese, pa čak i mašine za svako od više odeljenja, delovala kao futuristička priča [81]. Međutim, vremena su se promenila i ono što je juče bilo nezamislivo, danas postaje moguće, jer se ovaj problem može uspešno rešiti pristupom podacima o korišćenju energije u realnom vremenu na fleksibilan i prilagođen način. Ovo je pokrenulo novu razvojnu eru u kojoj je predložena integracija nadzornih kontrolera i EnMS-a da bi se optimizovao rad sistema [82]. Ipak, treba napomenuti da se i IoT, kao i sve druge tehnologije suočava sa raznim problemima pri čemu su neke studije sumirale glavne izazove u aplikacijama IoT-a i predložile različita rešenja kako bi se oni prevazišli [83].

IoT je veoma brzo raširio svoja krila nad različitim operacijama u okviru proizvodnih sistema, dok je energetski problem jedan od najistaknutijih domena na koji može imati značajan uticaj. Stoga se IoT može posmatrati kao suplementarni sistem koji omogućava donosiocima odluka da u realnom vremenu prate korišćenje energije zajedno sa ključnim informacijama od interesa bez obzira na nivo posmatranja (nivo sistema/procesa/mašine), pri čemu varijacije u korišćenju energije oslikavaju stanja sistema i generišu određeni profil ponašanja istog, na osnovu čega se u realnom vremenu mogu detektovati anomalije u tom ponašanju i simultano primeniti pravovremene preventivne akcije umanjenja rizika ili eliminacije stanja koja dovode do otkaza sistema.

## **1.5 Primenjene metode i struktura procesa istraživanja**

Kako su istraživanja u okviru doktorske disertacije koncipirana na teorijskom i primenjenom nivou, u prvoj iteraciji izvršeno je sistematsko prikupljanje i procena adekvatnosti literaturnih izvora, zatim sagledavanje svetskih dostignuća, iskustava, i istraživačko-razvojnih trendova kroz naučno-analitički pristup, kao i praćenje aktuelnih događanja na polju primene mekog računarstva (*eng. Soft Computing*) u modelovanju i upravljanju korišćenjem energije proizvodnih sistema.

Simultano, na praktičnom nivou su razvijeni uređaji za akviziciju podataka u vidu tehničkog rešenja, dok sama obrada prikupljenih podataka podrazumeva primenu metoda mekog računarstva kroz koncepte neuralnog računarstva i mašinskog učenja, probablističko rezonovanje, procesuiranje signala, evolutivno računarstvo, kao i metoda za vizualizaciju.

Razvijeno tehničko rešenje predstavlja hardverski uređaj za efikasno praćenje korišćenja energije brzoreaktivnih energetskih sistema u industrijskim okruženjima, odnosno za akviziciju podataka o intenzitetu struje i pripada kategoriji industrijskih IoT uređaja (*IIoT, eng. Industrial Internet of Things*).



Prvi deo eksperimentalnih testiranja i istraživanja pouzdanosti modela izvršen je u virtuelnom ambijentu programskog paketa Orange Data Mining uz periodično korišćenje MS Excel, Notepad++, Plotly, Datawrapper, i drugih alata.

Drugi deo eksperimentalne analize podrazumeva izradu računarskog programa (baziranog na programskom jeziku Python) za predviđanje budućeg stanja i ponašanja sistema primenom tehnika dubokog učenja (*eng. Deep Learning*).

Eksperimentalni rad bazira se na metodologiji dizajna eksperimenta (DOE – Design of Experiment) i koncipiran je na primeni induktivnih i deduktivnih metoda zaključivanja, metoda prikupljanja i analize podataka (deskriptivne mere, mere odstojanja, analiza ekstremnih vrednosti), metoda i tehnika eksploratorne analize, metoda statističkih analiza (korelaciona analiza, parametarski i neparametarski testovi, analiza varijanse), metoda multivarijacione analize (faktorska analiza, analiza glavnih komponenta, analiza grupisanja), metoda efikasnosti (DEA, SFA, ...), itd. Takođe, postavka i izvođenje eksperimentalnih istraživanja praćeni su izradom algoritama i numeričkom analizom.

## **1.6 Ciljevi istraživanja**

Osnovni cilj istraživanja je da se holističkim prilazom razvije model praćenja ponašanja proizvodnih sistema koje karakteriše nelinearno dinamičko svojstvo, zasnovan na principima teorije energetske tokova u realnom vremenu i da se utvrdi da li primena modela praćenja ponašanja proizvodnih sistema pospešuje efikasnije donošenje odluka za povećanje energetske efikasnosti proizvodnih sistema, njihove optimizacije i održavanja, kao i integraciju novih tehnoloških koncepata.

## **1.7 Definisane hipoteze**

Analizom do sada teorijski postavljenih i testiranih hipoteza u naučnoj literaturi, osnovne hipoteze ovog istraživanja izvedene su i prikazane u nastavku:

- H1: Identifikacija i uvođenje nelinearnih članova (promenljivih) može imati značajan uticaj na poboljšanje performanse sistema pružajući jasan uvid i realnu reprezentaciju ponašanja sistema usled niza aktivnosti koje mu nelinearno menjaju stanje.
- H2: Primena modela praćenja ponašanja proizvodnih sistema koje karakteriše nelinearno dinamičko svojstvo a koji se zasniva na principima teorije energetske tokova u realnom vremenu, pospešuje efikasnije donošenje odluka za povećanje energetske efikasnosti proizvodnih sistema, njihove optimizacije te integraciju novih tehnoloških koncepata.
- H3: Sticanjem uvida u dinamiku toka energije proizvodnog sistema u realnom vremenu moguće je razvijati podsisteme za mašinsko učenje procesa i tranziciju ka inteligentnim sistemima koje karakteriše visok stepen fleksibilnosti i napredne kontrole.

## 1.8 Lokacije uzorkovanja podataka i izvođenja eksperimenata

Uzorkovanje podataka izvršeno je na dve lokacije pri čemu su obe okarakterisane kao proizvodni sistemi za formiranje i obradu metala. Na ovim lokacijama postavljeno je razvijeno hardversko rešenje i izvršena je akvizicija setova podataka.

Za potrebe dokazivanja prve dve hipoteze (H1 i H2), u prvom eksperimentu, ovaj uređaj implementiran je u proizvodnom pogonu kompanije CNC Duo ML, na Shizuoka SV-4020 vertikalnom mašinskom CNC centru. U ovom slučaju fokus istraživanja usmeren je na jednu kompleksnu mašinu, identifikaciju intenziteta korišćenja energije prilikom izvođenja operacije i identifikaciju tipova stanja u profilu ponašanja, tokom procesa rada iz aspekta korišćenja energije.

Drugi eksperiment izveden je u proizvodnom pogonu kompanije Absolute CNC, pri čemu su posmatrane sve radne mašine koje učestvuju u procesu rada. Posmatrani sistem predstavlja mašinski pogon specijalizovan u oblasti automobilske i avio industrije, sa fokusom na izradu delova za mašine, elemente, komponente, sklopove i podsklopove u količinama jednodelnih prototipova ali i mašinske obrade velikog obima, dok se procesi obrade izvode na CNC obradnim centrima, uglavnom glodalicama i strugovima. Generisani rezultati iskorišćeni su kasnije za dokazivanje treće hipoteze (H3).

## 2. TEPROJSKE PODLOGE ISTRAŽIVANJU

### 2.1 Uvod u analizu sistema

Imajući u vidu da analiza sistema predstavlja veoma široko naučno područje, u ovom istraživanju sistem je razmatran sa energetskeg aspekta.

Analiza sistema i analiza procesa dva su pristupa energetske-ekološke analize. Analiza procesa je mehanistički pristup koji je dominirao poslednjih vekova, iako je pojam sistema poznat još iz vremena Aristotela. Sistemsku analizu je formalno ponovo otkrio neposredno pre Drugog svetskog rata biolog Ludvig fon Bertalanfi (Ludvig von Bertalanffi), mada su metode systemske analize već bile poznate (npr. Leontifova „analiza ulaza i izlaza“).

Sistem je definisan kao skup elemenata međusobno povezanih, a takođe i sa okruženjem, u kojem se nalazi. Ključna karakteristika organizovanih sistema je njihova hijerarhijska struktura, koja se uglavnom predstavlja ili tehnološkim dijagramima ili strukturalnim matricama [84]. Takođe, svaki sistem karakteriše i određeni stepen koherentnosti i nezavisnosti. Sistemi su podeljeni na prirodne i veštačke, a razlikuju se po usklađenosti i optimizaciji. Opšta teorija sistema obuhvata, pre svega, matematičku teoriju sistema, a zatim i systemsko inženjerstvo. Postoje dve fundamentalne metode opisa sistema, a to su uzročno-posledični opis (ulazno-izlazna analiza) i opis namere (modeli optimizacije).

#### 2.1.1 Pojam sistema i njegovog okruženja

I koncept sistema i systemski pristup stari su koliko i evropska civilizacija. Opšte je prihvaćeno da Aristotelova formulacija „celina je više od zbira njenih delova“ predstavlja prvi pokušaj da se definiše systemski problem [85]. U istraživanjima u proteklim vekovima, međutim, prevladavao je mehanicistički pristup u kojem je svaki problem bio podeljen na delove i istraživao odvojeno. Zahvaljujući njegovoj primeni napravljeno je toliko izuma da se godinama nije činilo da su potrebne promene u ovom pristupu. U biološkim naukama, međutim, primećeno je da se u primeni ove metode zanemaruju međusobne veze između pojedinih delova organizma što je navelo Bertalanfija [86] da predstavi novi systemski pristup, koji je potvrdio ne samo da se istraživanja delova moraju dopuniti istraživanjem celine, već i da postoji posebna disciplina koju je nazvao teorijom sistema, koja se bavi istraživanjem celine. Po prvi put, opštu teoriju sistema predstavio je 1937–1938 u svojim predavanjima na Univerzitetu u Čikagu [86].

Reč „sistem“ potiče iz grčkog jezika i znači kompozicija ili veza. Prema Bertalanfiju [85], [86], sistem se može definisati kao skup elemenata povezanih međusobno, ali i sa okruženjem. Preciznije, može se reći da je sistem namerno određen skup elemenata i odnosa između ovih elemenata i njihovih svojstava [84], pri čemu ta svojstva predstavljaju karakteristike odgovarajućih objekata, a odnosi međusobne veze koje postoje između odgovarajućih delova i celine. Zbog ovih odnosa, celina prikazuje svojstva koja se ne pojavljuju u njenim delovima. Iz tog razloga se pojmovi „uređenost“ i „sistem“ često tretiraju kao sinonimi. Međutim, u suprotnosti sa uređenjima, sistemi mogu biti ne samo realni, već i apstraktni objekti (npr. nauka, obrazovanje). Realni sistem je uređen u skladu sa fizičkim elementima koji čine celinu, dok je apstraktni sistem definisan prema svojim funkcijama, odnosno svojstvima koja karakterišu celinu.

Svaki sistem se nalazi u nekom okruženju, odnosno svako odvajanje konkretnog sistema ekvivalentno je definisanju da ostatak pripada okolini. Okruženje sistema obuhvata sve objekte koji ne pripadaju sistemu, čija svojstva utiču na sistem, a istovremeno se podvrgavaju promenama usled uticaja sistema. Sistem saraduje sa okruženjem u

smislu da njegovi elementi mogu uticati na elemente okruženja i obrnuto. Međuzavisnost između odgovarajućih elemenata sistema obično je mnogo jača nego ona između sistema i okruženja.

Svaki sistem se može podeliti na podsisteme. Podsystem u kome ne postoje dalji podsistemi nižeg reda naziva se element. Takođe, svaki sistem može biti i podsystem koji pripada sistemu višeg nivoa (supersistemu). Osnovna operacija sistema obuhvata analizu i sintezu, pri čemu analiza podrazumeva istraživanje ponašanja sistema na osnovu njegove strukture, dok se pod sintezom misli na potragu za strukturom sistema zasnovanom na poznavanju njenog ponašanja.

### 2.1.2 Svojstva sistema

Izraz „sistem“ označava „red“. Mera uredenosti unutar sistema posmatra se kao stepen odstupanja od stanja termodinamičke ravnoteže, koju je Šenon definisao kao redundantnost [87], [88]:

$$R(\tau) = \frac{S_{max} - S(\tau)}{S_{max}}, \quad (2.1)$$

gde su:

$R(\tau)$  – redundantnost u momentu  $\tau$ ,

$S(\tau)$  - entropija sistema u momentu  $\tau$ ,

$S_{max}$  - entropija sistema u stanju ravnoteže.

U slučaju idealno uredenog (savršeno organizovanog) sistema,  $R = 1$ . Potpuno neorganizovan (haotičan) sistem odgovara  $R = 0$ . Faktor koji pogoduje uredjenju sistema je kontrola. Sistemi raspoređeni prema definisanim funkcijama odgovarajućih elemenata nazivaju se organizovani sistemi [88].

Karakteristična odlika organizovanih sistema je njihova hijerarhijska struktura. Ovo svojstvo se sastoji u činjenici da su dotični elementi sistema sistemi nižeg reda (podsistemi), a dati sistem koji se razmatra čini podsystem višeg reda (supersistem). Ovo svojstvo dozvoljava podelu sistema na podsisteme. U svakom sistemu sa hijerarhijskom strukturom mogu se razlikovati elementi najvišeg (centralnog) nivoa, koji u datom sistemu nemaju superiorne elemente, kao i elementi najnižeg nivoa (nulti nivo) bez ikakvih podređenih elemenata. Između centralnog i nultog nivoa, mogu postojati srednji nivoi čiji su elementi istovremeno podređeni elementima višeg nivoa i nadređeni elementima nižeg nivoa. Složenost hijerarhijskih struktura posebna je karakteristika energetske sistema [87].

Svojstvo koje se naziva centralizacija povezano je sa sistemima koji imaju hijerarhijsku strukturu. Ovaj proces se sastoji u povećanju koeficijenata međuzavisnosti u jednom od podsistema. Dakle, male promene u podsystemu uključuju značajne promene u celom sistemu. Podsystem koji ima odlučujuću ulogu u radu čitavog sistema naziva se kontrolni deo sistema. Centralizacija je svojstvo koje varira u vremenu i rezultira povećanjem (progresivna centralizacija) ili smanjenjem (progresivna decentralizacija) kontrolne funkcije.

Svaki sistem karakteriše dati stepen koherentnosti koji se sastoji u povezivanju odgovarajućih elemenata tako da promena bilo kog od njih uključuje promene u drugim elementima i obrnuto, drugim rečima, promena bilo kog proizvoljnog elementa zavisi od svih ostalih elemenata sistema.

Nezavisnost je suprotnost koherentnosti. U tom slučaju ne postoji veza između elemenata sistema, tako da promena bilo kog od elemenata ne dovodi do promena u bilo kojim drugim elementima sistema. U ovom slučaju, promene u sistemu su zbir pojedinačnih promena elemenata. Interakcije su tada jednake nuli. U slučaju apsolutne nezavisnosti elemenata, ne postoji sistem. To je pre skup funkcionalno međusobno nezavisnih elemenata.

Koherentnost i nezavisnost su ekstremni slučajevi istog svojstva sistema. Obe količine se mogu pojaviti u različitim stepenima koji se vremenom menja. Prelazak koherentnog sistema u nezavisni naziva se progresivna divizija, dok progresivnu integraciju karakteriše intenziviranje već postojećih veza između elemenata sistema i sve veći broj veza ili uključivanje novih elemenata i veza u sistem, usled čega se povećava koherentnost. Za razliku od progresivne divizije, progresivna integracija uključuje povećanje organizacije sistema.

Ostala bitna svojstva sistema su prilagodljivost, stabilnost i jednakost. Prilagodljivost je svojstvo sistema koje dozvoljava da reaguje na promene u stanju sistema i u stanju okruženja koje pogoduju njegovom daljem postojanju. Stabilnost sistema je mogućnost automatskog smanjenja efekata smetnji do njihovog potpunog uklanjanja, dok jednakost predstavlja svojstvo koje dozvoljava sistemu da postigne neki zadati cilj polazeći od različitih preliminarnih stanja.

Inteligentnost sistema je svojstvo koje dozvoljava sistemu da shvati zašto je nastalo neko dato stanje, koje su posledice promena u sprezi, i korišćenje tih percepcija u cilju obrazovanja sistema. Ovo obrazovanje je proces promene strukture, organizacije ili svojstava adaptivnog sistema izazvanog iterativnim stimulansima, kako bi se postiglo efikasnije ponašanje sistema.

### 2.1.3 Klasifikacija sistema i njihove karakteristike

Postoje realni i apstraktni sistemi. Realni sistemi se mogu podeliti na male i velike sisteme shodno broju svojih elemenata, dok broj unutrašnjih veza između elemenata sistema definiše njegovu složenost, odnosno [84]:

- a) jednostavan sistem sa najmanjim mogućim brojem veza  $l = n - 1$ , gde  $n$  označava broj elemenata,
- b) složen sistem sa brojnim vezama unutar opsega  $n - 1 < l < n(n - 1)$ ,
- c) posebno složeni sistemi sa brojnim vezama  $l > n(n - 1)$ .

Sa stanovišta povezanosti sa okolinom mogu se razlikovati:

- a) otvoreni sistemi koji razmenjuju supstance, energiju i informacije,
- b) zatvoreni sistemi koje karakteriše nedostatak razmene supstance; u ovom slučaju, energija se razmenjuje pomoću oblika transporta koji ne zahtevaju supstancu (toplota, mehanički ili električni rad); takođe se informacije razmenjuju sa okruženjem,
- c) izolovani sistemi koji ne razmenjuju ni supstancu ni energiju ni informacije.

Što se tiče promenljivosti stanja sistema u vremenu, možemo razlikovati statičke i dinamičke sisteme. Dinamički sistemi pokazuju strukturne ili funkcionalne promene u vremenu. Dinamički sistemi se takođe mogu podeliti na determinističke i probabilističke. Kada poznavanje vrednosti odgovarajućih promenljivih u bilo kom trenutku

dozvoljava da se stanje sistema eksplicitno odredi u bilo kom kasnijem trenutku, sistem je deterministički. U slučaju probabilističkog sistema, njegovo novo stanje se može samo predvideti sa određenom verovatnoćom.

Sa stanovišta ljudskih aktivnosti u izgradnji sistema, oni se mogu podeliti na prirodne i veštačke. Prirodni sistemi se sreću u prirodi i njihovo postojanje posebno zavisi od njihove sposobnosti prilagođavanja, što se sastoji u činjenici da se sistem prilagođava promenama u okruženju na način koji je najpovoljniji za njegovo dalje funkcionisanje.

Prirodne (npr. biološke) sisteme karakteriše takozvana homeostaza, odnosno sposobnost sistema da zadrži određene količine u granicama uslovljenim mogućnošću njegove adaptacije čak i pri značajnim promenama spoljnih uslova [84], [87]. Fenomen homeostaze javlja se zahvaljujući mehanizmima samoregulacije, povezanim sa primenom povratne sprege, gde je broj povratnih informacija veoma visok, zbog čega se oni smatraju ultrastabilnim sistemima. Odnosno, sistem je ultrastabilan ako se nakon prelaska jedne povratne petlje uključi sledeća petlja sa drugim opsegom operacija.

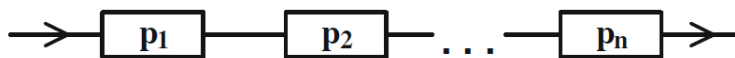
Veštački sistemi, koji su predmet istraživanja u ovoj studiji, su sistemi koje su konstruisali ljudi. Neke karakteristike zajedničke su za obe grupe sistema, ali postoje razlike u suštinskom značenju. Koherentnost i nezavisnost zajedničke su karakteristike i prirodnih i veštačkih sistema. Centralizacija i prilagodljivost karakterističnija su svojstva za prirodne sisteme. Takođe, mehanizmi povratne sprege kod veštačkih sistemima ili nisu aktivni ili su preslabi. Imajući prethodno navedeno u vidu, veštački sistemi okarakterisani su kao nestabilni.

Ipak, veštački sistemi pokazuju druga svojstva, kao što su usklađenost i optimizacija, a koja se ne pojavljuju kod prirodnih sistema [88]. Zatim, konformabilnost koja se sastoji od sistema sa strukturom koja odgovara okruženju. Sa druge strane, optimizacija se sastoji u osiguravanju što boljeg prilagođavanja sistema okruženju. Iako postoji sličnost, pitanje optimizacije nije karakteristično za prirodne sisteme iz razloga što se oni zbog svog dugotrajnog razvojnog perioda mogu prilagoditi okruženju (životnoj sredini) na najbolji mogući način.

Suštinska razlika između prirodnih i veštačkih sistema je njihova pouzdanost, koja određuje verovatnoću sa kojom će sistem u nekom datom procesu prikazati potrebno i prethodno utvrđeno ponašanje. Pouzdanost uključuje slobodu od otkaza, izdržljivost i mogućnost popravke. Sloboda od otkaza je sposobnost sistema ili elementa da zadrži svoju efikasnost u datim uslovima funkcionisanja i u određenom vremenskom intervalu. Izdržljivost je sposobnost sistema ili elementa da se koristi pod datim uslovima i na odgovarajućem nivou usluge. Mogućnost popravka sastoji se u sprečavanju, otkrivanju i uklanjanju oštećenja koja mogu nastati slučajno (otkaz), ili mogu biti posledica starenja sistema ili njegovih elemenata.

Za razliku od veštačkih sistema, prirodne sisteme karakteriše velika pouzdanost zbog činjenice da su dotični podsistemi sastavljeni od velikog broja rezervnih elemenata. Sa druge strane, veštački sistemi su konstruisani ekonomično bez viška elemenata, pa je njihova struktura obično serijska. Iz tog razloga, otkaz bilo kog elementa uključuje otkaz čitavog sistema.

Pouzdanost sistema sastavljenog od nizova povezanih elemenata (slika 2.1) proizilazi iz pretpostavke međusobne nezavisnosti odgovarajućih elemenata:



Slika 2.1 Serijska struktura sistema

$$p = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (2.2)$$

gde su:

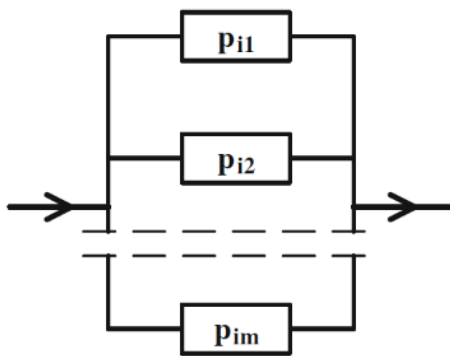
$p$  - verovatnoća nepostojanja otkaza u sistemu (pouzdanost sistema),

$p_i$  - verovatnoća nepostojanja otkaza  $i$ -tog elementa (pouzdanost  $i$ -tog elementa),

$n$  - broj elemenata u sistemu.

Kao što se može videti u jednačini 2.2, pouzdanost sistema opada sa povećanjem broja serijski povezanih elemenata. Takav zaključak je opravdan kada se pretpostavi da za bilo koji element  $i$ ,  $p_i = 0$  nije validan, kao i da se kod svih elemenata slučaj  $p_i = 1$  ne pojavljuje istovremeno. Ova činjenica ukazuje na to da povećanje pouzdanosti bilo kog elementa uključuje povećanje pouzdanosti čitavog sistema.

Pouzdanost veštačkog sistema može se efikasno poboljšati uvođenjem odgovarajućeg broja paralelno povezanih rezervnih elemenata (slika 2.2).



Slika 2.2 Paralelna struktura sistema

U slučaju  $(m - 1)$  rezervnih elemenata, pouzdanost  $i$ -tog elementa proizilazi iz jednačine 2.3 [88]:

$$p_i = 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - p_{ij}), \quad (2.3)$$

gde su:

$p_{ij}$  - pouzdanost  $j$ -og elementa, koji predstavlja rezervu  $i$ -tog elementa,

$m_i$  - broj svih elemenata sa istom funkcijom (osnovni element i rezervni elementi) u  $i$  - tom elementu sistema.

Pouzdanost celog sistema sastavljenog od  $n$  elemenata povezanih serijski, od kojih svaki ima  $(m_i - 1)$  rezervnih elemenata, može se izraziti jednačinom (2.4) [88]:

$$p = \prod_{i=1}^n \left[ 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - p_{ij}) \right] \quad (2.4)$$

Uzimajući u obzir prethodno navedeno, povećanje pouzdanosti svakog elementa, kao i broja paralelno povezanih elemenata, poboljšava pouzdanost sistema u celini.

#### 2.1.4 Izvod iz opšte teorije sistema

Opšta teorija sistema je logičko-matematičko područje čiji je cilj da formuliše i izvede principe primenjene u različitim vrstama sistema. Opšta teorija sistema, izvorno povezana sa biologijom, rezultat je pokušaja primene termodinamike u biologiji. Bertalanfi je naglasio činjenicu da je Onsagerova termodinamika nepovratnih procesa primer sistemskog pristupa. Suštinsko obeležje teorije sistema je njena opštost i apstraktnost, kao i činjenica da pomoću matematičkih metoda istražuje karakteristike sistema, a ne njihove fizičke pojave.

Osnovni metod opšte teorije sistema sastoji se u dodeljivanju izomorfizma zakona koji se tiču različitih domena nauke. U opštoj teoriji sistema, izomorfizam se izvodi iz analogije fizičkih pojava (na primer, toplotne provodljivosti i električne struje). Ove analogije se takođe mogu odnositi na apsolutno različite pojave, na primer, protok fluida i međugranski tok prema Leontifovoj „ulazno-izlaznoj analizi“ [89]. Izomorfizam koji se javlja između dva sistema treba shvatiti kao međusobno eksplicitnu korespondenciju između elemenata jednog sistema i nekog drugog sistema i postojanje istih odnosa između odgovarajućih elemenata oba sistema.

Dva konkretna sistema mogu se odrediti kao međusobno izomorfna ako se oba mogu prikazati istim matematičkim modelom. Izomorfizam između dva matematička modela omogućava izvođenje zaključaka o izomorfizmu između dva konkretna sistema predstavljena datim matematičkim sistemima. Sličnost algebarskih ili diferencijalnih jednačina je vrsta matematičkog izomorfizma. Primer dva izomorfna sistema je pre svega fenomen stacionarne provodljivosti toplote u čvrstim telima bez unutrašnjih izvora toplote a sa konstantnom toplotnom provodljivošću, odnosno, fenomen stacionarnog polja električnog potencijala u provodniku sa stalnom električnom provodljivošću. Odgovarajuće diferencijalne jednačine, kao matematički modeli razmatranih sistema, imaju oblik (2.5, 2.6):

$$\nabla^2 T = 0, \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 U = 0 \quad (2.6)$$

gde su:

$T$  - temperatura,



$U$  - električni potencijal,

$\nabla^2$  - Laplasov operator.

U ovom primeru matematički modeli su izomorfni. Dakle, konkretni sistemi predstavljeni ovim modelima su takođe izomorfni. Postoji analogija između temperature i električnog potencijala, toplotne i električne provodljivosti, toplotnog i električnog otpora, toplotnog kapaciteta i kapacitivnosti, kao i toplotnog fluksa i intenziteta struje. Električni analogni modeli ranije su se koristili za rešavanje diferencijalnih jednačina toplotne provodljivosti u slučaju tela složene geometrije [85].

Opšta teorija sistema razlikuje je sledeće istraživačke domene:

- a. matematička teorija sistema,
- b. sistemski inženjering,
- c. filozofija sistema.

Matematička teorija sistema obuhvata opštu teoriju sistema u užem smislu, odnosno kibernetiku, teoriju upravljanja, teoriju informacija, teoriju skupova, teoriju grafova, teoriju igara i teoriju simulacije. Na osnovu teorije skupova, sistem  $S$  se može definisati na sledeći način (2.7) [85]:

$$S \subset \times \{V_i; i \in I\} \quad (2.7)$$

gde su:

$V_i$  - element sistema,

$I$  - skup indeksa.

Odnos definisan jednačinom 2.7 označava da je sistem  $S$  podskup Dekartovog proizvoda  $V_i$  elemenata sistema. Ako je  $I$  konačan skup, može se dobiti (2.8) [85]:

$$S \subset V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n \quad (2.8)$$

Dekartov proizvod  $V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n$  je skup svih vektora  $[\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n]$ , tako da  $\vec{v}_i \in V_i$  za  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Svaki element  $\vec{v}_i$  predstavlja obeležje ili karakteristike sistema izražene kategorijama u kojima je dati sistem opisan, dok skup  $V_i$  obuhvata sve moguće načine posmatranja te osobine. Imajući to u vidu, sistem je skup svih kombinacija stanja u kojem se pojavljuju elementi sistema.

Definisanje sistema izraženo relacijama (2.7) - (2.8) karakteriše visok stepen opštosti. U slučaju realnih sistema ovu formulaciju treba shvatiti kao skup algebarskih ili diferencijalnih jednačina.

Postoje dva osnovna metoda opisa sistema:

1. metoda ulaza -izlaza, koja se naziva i uzročni opis,

2. metod koji koristi funkciju cilja, i naziva se opis namere.

U slučaju prve metode, grupa ulaznih elemenata i grupa izlaznih elemenata su razdvojene (2.9 i 2.10) [85]:

$$X = \{V_i: i \in I_x\} \quad (2.9)$$

$$Y = \{V_i: i \in I_y\} \quad (2.10)$$

Sistem je tada odnos utvrđen između ulaznih i izlaznih skupova.

$$S \subset X \times Y \quad (2.11)$$

U drugoj metodi, pored ulaznih i izlaznih skupova, treba razlikovati i skup promenljivih odluka  $M$  i skup vrednosti ciljne funkcije  $V$ . Odnosno, data je ciljna funkcija  $G$  i skup ograničenja  $P$  (2.12 i 2.13) [85]:

$$P : X \times M \rightarrow Y \quad (2.12)$$

$$G : M \times Y \rightarrow V \quad (2.13)$$

pri čemu je skup  $V$  određen na takav način da svaki podskup sadrži minimalni element, što znači da se smatra da neki određeni slučaj namerne aktivnosti ima za cilj minimizaciju neke funkcije.

Sistem  $S$ , određen jednačinom (2.11), definisan je na sledeći način. Par  $(k, i) \in S$  za  $x \in X$  i  $y \in Y$  samo kada vrednost  $m_x \in M$  postoji, tako da za svako  $m \in M$  imamo (2.14 i 2.15) [85]:

$$G(m_x, P(x, m_x)) \leq G(m, P(x, m)) \quad (2.14)$$

$$y = P(x, m_x) \quad (2.15)$$

To znači da se za svaki ulaz  $x \in X$  izlaz  $y \in Y$  podudara na takav način da ciljna funkcija dostiže svoju ekstremnu vrednost u prethodno pretpostavljenom pojedinačnom slučaju istovremeno zadovoljavajući ograničenja.

Sistemska inženjering se sastoji od softvera i hardvera. Softver je rezultat primene opšte teorije sistema na tehničke, ekonomske i društvene probleme, dok se hardver bavi tehničkom opremom i obuhvata kontrolu, automatizaciju i kompjuterizaciju.

Neposredni cilj softvera je optimizacija izlaznih vrednosti u skladu sa datim kriterijumima. Tako je sistemski inženjering strogo povezan sa istraživanjem operacija [88]. Dok se istraživanje operacija obično bavi operativnim sistemima, svrha sistemskog inženjeringa je planiranje i projektovanje novih sistema.

Filozofija sistema obuhvata probleme povezane sa promenama u orijentaciji naučnog mišljenja uzrokovanim uvođenjem notacije sistema kao nove naučne paradigme. Iako je od značajne važnosti, ovaj deo opšte teorije sistema nije detaljnije obrađivan u ovoj disertaciji.

### 2.1.5 Struktura sistema

Prema definiciji, sistem se sastoji od elemenata koji međusobno reaguju pomoću ulaza i izlaza. Pretpostavlja se da svaki element ima najmanje jedan ulaz i jedan izlaz, pri čemu svaki od njih ima najmanje dve vrednosti. Struktura sistema može se grafički prikazati blok dijagramima ili orijentisanim grafovima i strukturnim matricama.

Stanja ulaza i izlaza elemenata prikazana su vektorima  $X$ , odnosno  $Y$ . Spajanje elemenata zasniva se na činjenici da izlazne vrednosti jednog elementa mogu biti ulazne vrednosti u drugom elementu. Ako je  $k$ -ti element okarakterisan izlaznim vektorom  $Y_k$ , a  $l$ -ti element uključuje ulazni vektor  $X_l$ , onda između izlaznog vektora  $Y_k$   $k$ -tog elementa i ulaznog vektora  $X_l$   $l$ -tog elementa postoji jednakost (2.16) [85]:

$$Y_k = C_{kl} \times X_l \quad (2.16)$$

Veze između razmatranih elemenata izražene su matricom binarnog sprezanja  $C_{kl} = [c_{ij}]$  definisanom na sledeći način:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ako je } i - \text{ti izlaz elementa } k \text{ istovremeno } j - \text{ti ulaz elementa } l, \\ 0, & \text{suprotan slučaj.} \end{cases}$$

Da bi se ostvarila veza između elementa  $k$  i elementa  $l$ , matrica  $C_{kl}$  ili  $C_{lk}$  mora sadržavati najmanje jedan element različit od nule. Matrica binarnog sprezanja prikazuje svojstvo koje se u svakom redu i koloni nalazi najviše sa jednim elementom jednakim jedan [85]. U slučaju  $n$  elemenata, postoji  $n^2$  jednačina tipa (2.16) uzimajući u obzir interne veze među elementima. Binarna matrica  $C$  sastavljena od podmatrica binarnog sprezanja  $C_{kl}$  naziva se matrica strukture sistema (2.17):

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n1} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Raspodela podmatrica sa vrednostima različitim od nule dovodi do sledećeg zaključka u vezi sa karakteristikama strukture sistema [85]:

- ako red  $k$  i kolona  $k$  sadrže najmanje jednu matricu različitu od nule,  $k$ -ti element je unutrašnji element sistema,
- ako red  $k$  sadrži samo podmatrice nultih vrednosti,  $k$ -ti element je granični izlazni element, odnosno njegovi izlazi vode u okruženje,
- ako kolona  $l$  sadrži samo podmatrice nulte vrednosti,  $l$ -ti element je granični ulazni element, odnosno njegovi ulazi su preuzeti iz okruženja,
- ako red  $k$  i kolona  $k$  sadrže samo nulte vrednosti podmatrice,  $k$ -ti element ne pripada sistemu,
- pojava više od jedne nulte podmatrice ukazuje na razdvajanje unutrašnjih izlaza, što znači disperziju uticaja,
- pojava više od jedne nulte podmatrice u koloni ukazuje na fokusiranje unutrašnjih ulaza, odnosno koncentraciju njihovog uticaja,

- pojava ne nultih matrica binarnog sprezanja iznad glavne dijagonale označava pojavu serijskih sprega,
- pojava pod-matrica koje se razlikuju od nule duž glavne dijagonale označava pojavu samo-sprega (unutrašnje veze u elementu),
- pojavljivanje pod-matrica koje ne nultih vrednosti ispod glavne dijagonale označava pojavu povratnih informacija.

Granični ulazni element je element sa kojim drugi elementi koji pripadaju sistemu nisu povezani (tj. komponente ulaznog vektora nisu komponente izlaznog vektora bilo kog drugog elementa sistema). Granični izlazni element je element koji nije povezan sa ostalim elementima sistema (tj. komponente izlaznog vektora graničnog elementa nisu komponente ulaznog vektora bilo kog elementa koji pripada sistemu). Skup graničnih elemenata čini površinu sistema kojoj odgovara skup svih nultih kolona i redova matrice  $C$ .

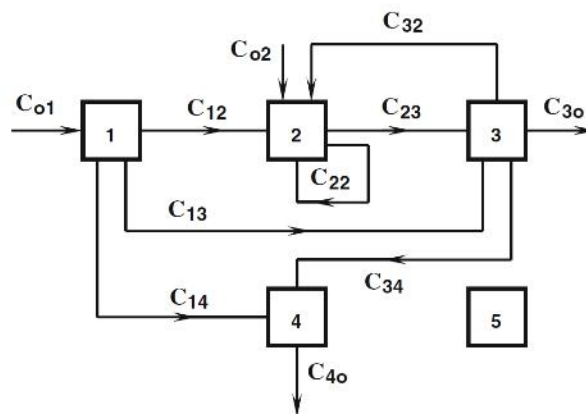
Element koji nije granični element je unutrašnji element sistema. Skup svih kolona i redova matrice  $C$ , uključujući najmanje jednu pod-matricu ne nulte vrednosti, je unutrašnjost sistema. Dakle, zatvoreni sistem nema graničnih elemenata, dok je otvoreni sistem, sistem koji sadrži granične elemente.

Matrica strukture sistema  $C$  može se dopuniti vektorom reda  $C'_0$  i vektorom kolone  $C''_0$  koji čine veze sistema sa okruženjem [5]. Vektori  $C'_0 = [c_{ol}]$  i  $C''_0 = [c_{ko}]$  su definisani na sledeći način:

$$c_{ol} = \begin{cases} 1, & \text{ako je ulaz } l - \text{ tog elementa iz okruženja,} \\ 0, & \text{suprotan slučaj.} \end{cases}$$

$$c_{ko} = \begin{cases} 1, & \text{ako izlaz } k - \text{ tog elementa vodi u okruženje,} \\ 0, & \text{suprotan slučaj.} \end{cases}$$

Nenula podmatrice vektora  $C'_0$  i  $C''_0$  dokazuju postojanje veza između sistema i okoline. Na slici 2.3 prikazan je primer [84] sistema koji se sastoji od pet elemenata, čije su veze između izlaza i ulaza izražene matricom sprezanja.



Slika 2.3 Primer povezivanja elemenata u sistemu [84]

Matrica strukture sistema  $C$  i vektori  $C'_0$  i  $C''_0$  koji sadrže veze sistema sa okruženjem izgledaju ovako:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 \\ 0 & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 \\ 0 & C_{32} & 0 & C_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C'_0 = [C_{o1} \quad C_{o2} \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$C''_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_{3o} \\ C_{4o} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Na osnovu matrice  $\mathbf{C}$  mogu se razlikovati sledeće strukturne karakteristike sistema:

- element 1 je granični ulazni element, a element 4 granični izlazni element,
- element 5 ne pripada sistemu,
- u elementu 2 dolazi do samospajanja,
- između elemenata 3 i 2 postoji povratna informacija.

## 2.2 Koncept proizvodnog sistema

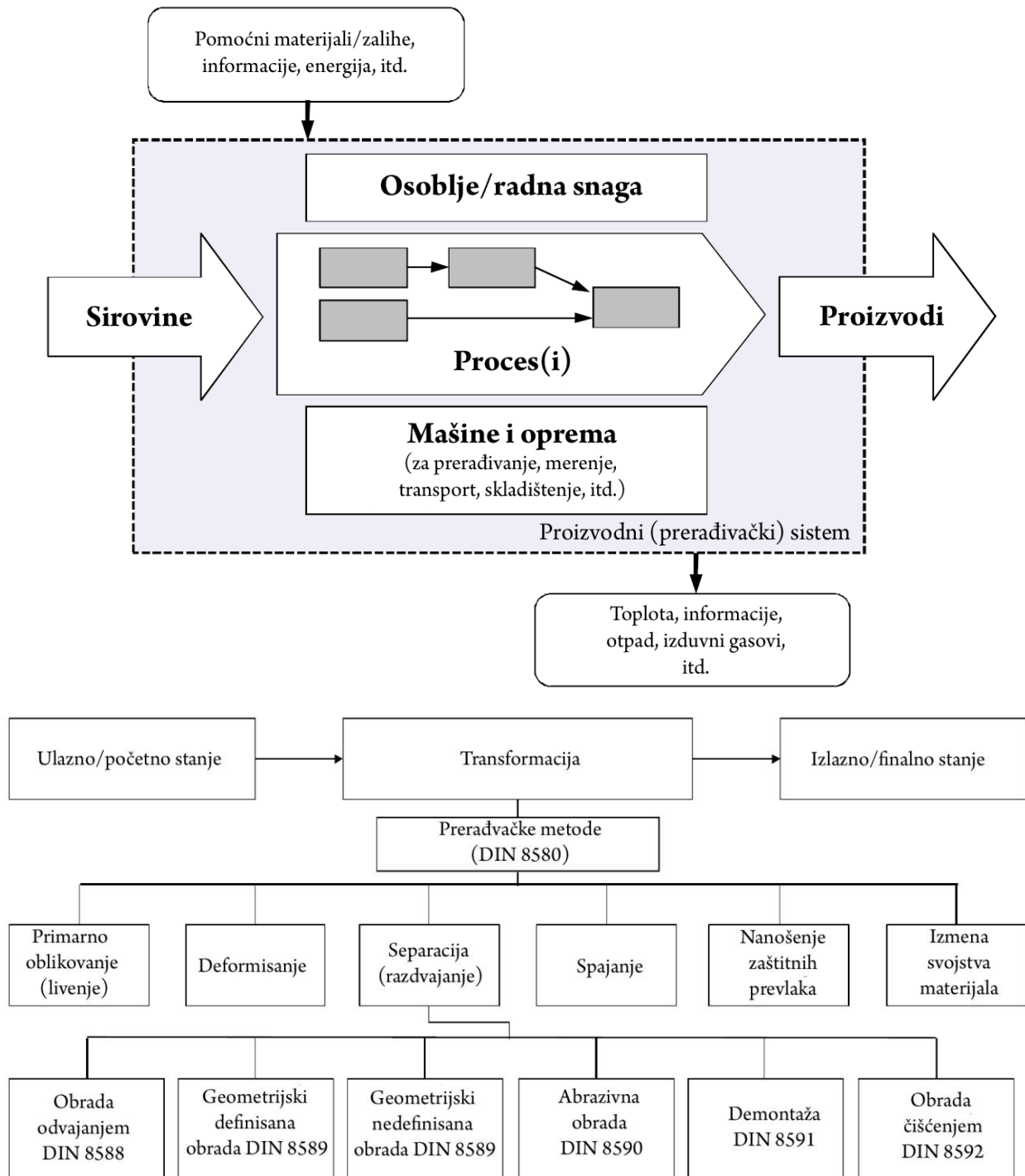
U polju proizvodnog inženjerstva i menadžmenta, širok spektar različitih pojmova i sinonima koristi se (ne uvek dosledno) u različitim disciplinama kako u istraživačkoj tako i u industrijskoj praksi. Da bi se osiguralo neophodno i međusobno razumevanje, osnovne definicije propraćene odgovarajućom teorijskom podlogom predstavljaju polaznu osnovu ovog istraživanja, pri čemu korišćena terminologija odražava pojmovnik/rečnik CIRP-a, odnosno Međunarodne akademije za proizvodno mašinstvo [90], [91] u najvećoj mogućoj meri.

Kao vrlo opšti termin Operacioni menadžment bavi se dizajnom i upravljanjem proizvodima, procesima, uslugama i lancima snabdevanja, pri čemu razmatra akviziciju, razvoj i korišćenje resursa koje kompanije transformišu u robu i usluge koje njihovi klijenti potražuju [92]. Iako je ova definicija relativno široka i uključuje sve vrste transformacije i stvaranja vrednosti u preduzeću, proizvodnja, kao jedan njegov deo usredsređena je na fizičku transformaciju u opipljive rezultate. Proizvodnja se može definisati kao kombinacija proizvodnih faktora kao što su rad, materijal i tehnička oprema u svrhu stvaranja vrednosti u obliku proizvoda [92]. Ipak, pojam proizvodnja je takođe relativno široke prirode, a može se primeniti i na druga područja poput poljoprivrednog sektora ili uslužne industrije (nematerijalni proizvodi), koji nisu fokus ovog istraživanja. Stoga se koristi i izraz prerađivačka industrija (*eng. manufacturing industry*), odnosno „poslovna delatnost ili industrija proizvodnje robe u velikim količinama u fabrikama [93]“. Kako u postojećoj literaturi postoji određena nedoslednost u pogledu upotrebe ovih izraza, u ovom istraživanju se koriste oba, dok je „proizvodnja“ pojam višeg nivoa i uključuje „prerađivanje“, ali ne i obrnuto.

Na slici 2.4 ilustrativno je prikazan koncept proizvodnje u kontekstu prerađivanja u vidu transformacije određenih ulaznih veličina poput:

- sirovina (npr. čelik),
- pomoćni i radni materijali (npr. rashladne tečnosti, boje, vijci),
- energija (npr. električna energija),
- radna snaga/osoblje (npr. za rukovanje i održavanje mašina),
- tehnička oprema za osnovni proizvodni proces kao i prateće procese (npr. transport, skladištenje, merenje),
- informacije,

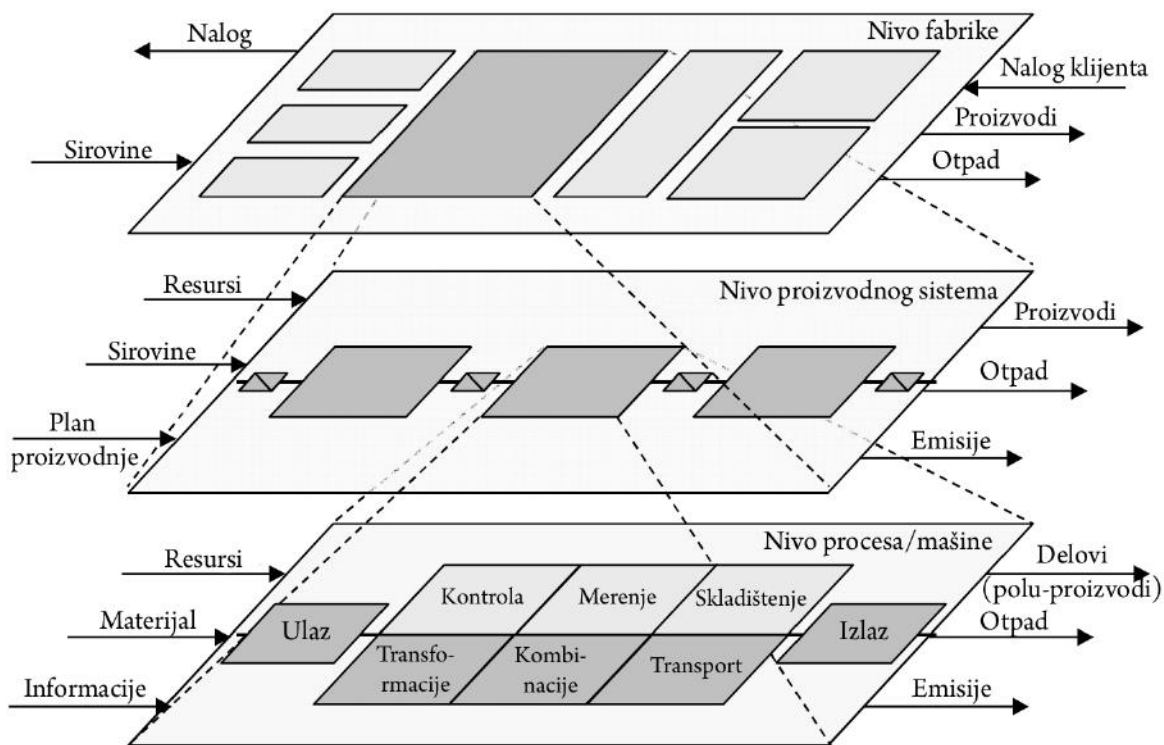
u željene (proizvode) i neželjene (otpad, toplota, izduvni gasovi, itd.) izlazne veličine. Na slici 2.5 prikazana je postojeća klasifikacija proizvodnih procesa transformacije prema standardu DIN 8580 [92].



Slika 2.4 Proizvodnja kao transformacija iz ulaza u izlaze [92]

Kao i svaki drugi proces, proizvodni proces je skup međusobno povezanih aktivnosti (aktivnosti koje stvaraju i podržavaju vrednosti poput transformacije, kombinacije, transporta, kontrole, merenja ili skladištenja) koje pretvaraju ulaze u izlaze, dok se pod ulazima u proces uglavnom misli na ishode drugih procesa [94]. Kompleksni tehnički proizvodi obično se izrađuju u lancima proizvodnih procesa u više koraka kao logično povezani redosled uzastopnih ili paralelnih pojedinačnih procesa (i sa njima povezanih aktivnosti) tokom vremena sa jednim zajedničkim ciljem,

naime da se na samom kraju iznese definisani izlaz (jedan ili nekoliko finalnih proizvoda). Ovi procesi i procesni lanci uključuju tehničku opremu i osoblje, koji formiraju prerađivačke sisteme kao specifično određena područja za proizvodnju, odnosno na višem nivou agregacije, fabrike (slika 2.5).



Slika 2.5 Nivoi apstrakcija u proizvodnji/prerađivanju [94]

Na osnovu definisane različitosti termina Proizvodni sistem (*eng. production system*) i Prerađivački sistem (*eng. manufacturing system*), u daljem tekstu koristiće se termin proizvodni sistem pod kojim se misli na proizvodne prerađivačke sisteme. Takođe, proizvodni sistemi koje danas poznajemo rezultat su viševjekovnog razvoja, odnosno tehnoloških revolucija koje su ukratko prikazane u nastavku.

### 2.2.1 Kratak osvrt na evoluciju i razvoj proizvodnih sistema kroz industrijske revolucije

Savremeni proizvodni sistemi doživeli su veliki napredak od svoje najranije iteracije na početku industrijske revolucije u 18. veku. Vekovima se većina proizvoda, uključujući oružje, oruđe, hranu, odeću itd., proizvodila ručno ili pomoću radnih životinja. To se promenilo krajem 18. veka uvođenjem proizvodnih procesa, čiji je napredak od takozvane Industrije 1.0 okarakterisan kao brzi uspon koji je vodio do nadolazeće industrijske ere u kojoj se trenutno nalazimo - Industrije 4.0. U nastavku je dat kratak pregled ove evolucije.

Krajem 18. veka u svetu su uvedeni mehanički proizvodni pogoni. Mašine pogonjene na vodu i paru razvijene su da pomognu radnicima u masovnoj proizvodnji robe, pri čemu je prvi tkački razboj uveden davne 1784. Sa povećanjem efikasnosti i obima proizvodnje, mala preduzeća su porasla od opsluživanja ograničenog broja kupaca do velikih organizacija sa vlasnicima, menadžerima i zaposlenima u većem broju. Ova tehnološka tranzicija nazvana je



Industrija 1.0 i može se smatrati početkom industrijske kulture koja se jednako fokusirala na kvalitet, efikasnost i obim proizvodnje.

Početak 20. veka označio je početak druge industrijske revolucije - Industrija 2.0. Primarni doprinos ovoj revoluciji bio je razvoj mašina koje za svoj rad koriste električnu energiju. Iako se električna energija već koristila kao primarni izvor energije, razvoj električnih mašina koje su bile znatno efikasnije od mašina na bazi energije vode i pare kako u pogledu rukovanja i održavanja, tako i u pogledu troškova i racionalnijeg korišćenja resursa stimulisala je brži razvoj i mnoštvo novih mogućnosti. Prva montažna proizvodna linija je izgrađena tokom ove ere, što je dodatno pojednostavilo proces masovne proizvodnje. Nakon toga, koncept masovne proizvodnje proizvoda pomoću montažnih linija postala je standardna praksa. Takođe, ovo doba je doživelo evoluciju industrijske kulture uvedene u Industriji 1.0 u smislu programa upravljanja kako bi se povećala efikasnost proizvodnih pogona. Različite tehnike upravljanja proizvodnjom, kao što su podela rada, pravovremena proizvodnja i osnovni principi proizvodnje, usavršili su inicijalne procese koji su doveli do poboljšanja kvaliteta procesa proizvodnje. Američki mašinski inženjer, Fredrik Tejlor, uveo je proučavanje pristupa za optimizaciju rada radnika, radnog mesta i tehnika za optimalnu raspodelu resursa.

Naredna industrijska revolucija koja je rezultirala industrijom 3.0 izazvana je i podstaknuta napretkom elektronske industrije u poslednjih nekoliko decenija 20. veka. Pronalazak i proizvodnja raznih elektronskih uređaja, uključujući tranzistore i integrisana kola, automatizovali su mašine što je rezultiralo smanjenim naporom, povećanom brzinom, većom preciznošću, pa čak i potpunom zamenom ljudskog agenta u nekim slučajevima. Programabilni logički kontroler (PLC), koji je prvi put izgrađen 1960 -ih, bio je jedan od značajnih izuma koji je označavao automatizaciju pomoću elektronike. Integracija elektronskog hardvera u proizvodne sisteme stvorila je zahteve za razvojem softverskih sistema kako bi se omogućilo efikasnije korišćenje novih hardverskih elementa, što je pospešilo i tržište razvoja softvera. Osim kontrole hardvera, softverski sistemi su takođe omogućili mnoge procese upravljanja, kao što su planiranje resursa preduzeća, upravljanje zalihama, logistika otpreme, zakazivanje toka proizvoda i praćenje u svim nivoima neke fabrike. Od tog perioda, celokupna industrija je dalje automatizovana korišćenjem elektronike i IT –a, dok su se procesi automatizacije i prateći softverski sistemi neprestano razvijali u skladu sa trendom. Pritisak da se dodatno smanje troškovi primorao je mnoge proizvođače da se presele u zemlje sa niskim cenama iz aspekta proizvodnih resursa, radne snage, itd., zbog čega je disperzija geografskog položaja proizvodnje dovela do formiranja koncepta upravljanja lancem snabdevanja.

Sledeća revolucija započeta je devedesetih godina prošlog veka naletom industrije interneta i telekomunikacija i ogleda se u načinu na koji se povezujemo i razmenjujemo informacije. Ova promena podstakla je razmišljanja da se zapravo nalazimo u novom tehnološkom dobu, dobu Industrije 4.0. Veliki pomeraj može se primetiti promenama paradigme u proizvodnim sistemima i tradicionalnim proizvodnim operacijama spajajući granice fizičkog i virtuelnog sveta. Trenutno se nalazimo u procesu tranzicije tradicionalnih proizvodnih sistema u takozvane Sajber Fizičke Proizvodne Sisteme SFPS (eng. Cyber Physical Production Systems), što dovodi do brojnih ali i brzih poremećaja u industriji, jer SFPS omogućavaju mašinama da inteligentnije međusobno komuniciraju gotovo bez ikakvih fizičkih ili geografskih prepreka. Pored toga, SFPS omogućavaju deljenje, analizu i vođenje inteligentnih radnji za različite procese u industriji kako bi mašine bile pametnije. Ove pametne mašine mogu kontinuirano nadzirati, otkrivati i predviđati otkaze kako bi predložile preventivne i korektivne mere, što omogućava bolju pripremljenost i manje zastoje u industriji. Isti dinamički pristup može se preneti na druge aspekte, kao što su

logistika, organizacija proizvodnje, optimizacija protoka, kontrola kvaliteta, iskorištenost kapaciteta i povećanje efikasnosti. SFPS omogućava potpunu virtuelnu vizualizaciju procesa, praćenje i upravljanje sa udaljene lokacije i na taj način dodaje novu dimenziju proizvodnom procesu, pri čemu mašine, ljude, procese i infrastrukturu posmatra kao elemente smeštene u jednu umreženu petlju što čini celokupno upravljanje visoko efikasnim.

Kako kriva razvoja tehnologija u odnosu na trošak tog razvoja postaje strmija svakim danom, pojavljuju se sve brži tehnološki poremećaji koji dovode do još nižih troškova, koji neprestano inoviraju i revolucioniraju industrijski ekosistem. Ovo ukazuje na to da je industrija 4.0 još uvek u povelju i da su pogođene industrije još uvek u tranzicionom stanju usvajanja novih koncepata sistema. Međutim, industrije se moraju prilagoditi ovim novim konceptima što je brže moguće kako bi ostale relevantne i profitabilne, jer je Industrija 4.0 tu i zadržaće se barem narednu deceniju [95].

Prethodno navedeno ukazuje i na činjenicu da su proizvodni sistemi tokom svog razvoja postali izuzetno kompleksni sistemi sistema koje u velikoj većini slučajeva karakteriše visok nivo složenosti, koja je logično, u manjoj ili većoj meri evoluirala zajedno sa njima usled frekventnih promena zahteva, a usled mogućnosti koje su omogućile tehnološke promene.

## *2.2.2 Složenost proizvodnih sistema*

Tokom poslednjih decenija, proizvodni sistemi u težnji redukcije troškova, raznih proizvodno-orijentisanih koncepata vremena, ali i povećanja efikasnosti bez smanjenja kvaliteta i fleksibilnosti postaju sve složeniji. Imajući to vidu, osnovni razlog ispitivanja složenosti proizvodnih sistema jeste potreba za razumevanjem i kontrolom sistema koje karakteriše nelinearno ponašanje sa ciljem da se oni učine produktivnijim i predvidljivijim [96].

Sa druge strane, zamršeni međusobni odnosi i relacije među elementima sistema, zajedno sa stohastičkom prirodom sistema, koju karakteriše nepredvidljivost, ukazuju na činjenicu da je matematičko modeliranje proizvodnog sistema prilično izazovan zadatak. Konkretno, još uvek se čini nemogućim uspostaviti odnose u skupu zatvorenih analitičkih jednačina koje bi mogle opisati dinamičko ponašanje proizvodnog sistema. Razne metode i tehnike, kao što su Teorija redova čekanja, matematičko programiranje i tehnike optimizacije, uveliko su se koristile poslednjih godina u svrhu modeliranja i analize proizvodnih sistema [97], međutim, razumevanje i kontrola složenosti konvencionalnim metodama postaje sve teža. Kako je ključni preduslov za razumevanje složenosti nekog proizvodnog sistema i njegovog upravljanja određivanje kvantitativnih metrika složenosti proizvodnje (bilo statičkih ili dinamičkih) [98], sve više postaje čigledno da se proučavanje složenosti proizvodnih sistema, koja će pružiti adekvatnu metriku i metode analize, jednostavno ne može osloniti samo na postojeće tradicionalne pristupe. Ipak, tokom poslednjih godina, teorija složenosti, uključujući pristupe kao što su teorija informacija, teorija haosa i nelinearna teorija, predstavljaju metode koje se čine korisnim za analizu složenosti proizvodnih sistema i predstavljaju solidnu osnovu za dalji razvoj.

U suštini koncept složenosti se može podeliti na dva tipa zavisno od domena, naime fizički i funkcionalni domen. U funkcionalnom domenu, složenost se definiše kao mera neizvesnosti u postizanju funkcionalnih zahteva. Ova vrsta složenosti bliska je dizajnu proizvodnih sistema i dalje se deli na vremenski nezavisne i vremenski zavisne [99]. Vremenski nezavisna složenost rezultat je nezadovoljavanja funkcionalnih zahteva sistema u svakom trenutku, uključujući neizvesnost koja nastaje zbog nedostatka projektanta u razumijevanju sistema i njegovih komponenti [98] [99]. S druge strane, složenost zavisna od vremena može biti ili kombinatorna, povećavajući se u zavisnosti od

vremena, usled kontinuiranog širenja mogućih kombinacija stanja sa vremenom, ili periodične složenosti, koja postoji u ograničenom vremenskom periodu, sa ograničenim brojem mogućih kombinacija stanja [98]. U fizičkom domenu, složenost proizvodnje se takođe dalje klasifikuje u dve vrste, naime, statičku i dinamičku [100]. Statička složenost, koja se naziva i strukturna složenost, tiče se strukture i konfiguracije sistema, broja i raznolikosti proizvoda, raznovrsnosti komponenti sistema, poput rada, mašina, zaliha, transportnih mehanizama, njihovih međusobnih veza i međuzavisnosti. Dinamička ili operativna složenost povezana je sa neizvesnošću ponašanja sistema za određeni vremenski period i bavi se verovatnoćom da sistem ima kontrolu [99], [101].

Najveće interesovanje istraživača i inženjera zapravo je usmereno na domen fizičke složenosti proizvodnih sistema kao diskretnih sa fokusom na proizvodne operacije. U nastavku su prikazani neki od pristupa koji pružaju teorijski okvir za razumevanje i kontrolu složenosti, a odabrani su iz razloga što mogu pružiti analitičku, kvantitativnu, ali i sistematsku osnovu za razumevanje složenosti proizvodnih sistema.

Predložena taksonomija podrazumeva pet kategorija u zavisnosti od teorijskog porekla:

- Prva kategorija se zasniva na metodama i konceptima koji dolaze iz teorije haosa i teorije nelinearne dinamike.
- Druga kategorija oslanja se na metode zasnovane na pristupima teorije informacija, koji za fundamentalnu meru uzimaju Šenonovu entropiju.
- Treća kategorija uključuje hibridne metode koje pokušavaju da se pozabave složenošću kombinujući pristupe teorije informacija zajedno sa sistemom kodiranja mašina i proizvoda.
- U četvrtoj kategoriji, predstavljeni pristupi slede teoriju složenosti koja se zasniva na aksiomatskom dizajnu i povezana je sa složenošću funkcionalnog domena.
- U poslednjoj kategoriji, predstavljene su metode koje se ne mogu direktno klasifikovati u jednu od gore navedenih kategorija koje se bave složenošću fizičkog domena i polaze od analogija koje se primenjuju u oblastima računarske mehanike sve do dinamike fluida.

### 2.2.2.1 Teorija haosa i nelinearne dinamike

Teorija haosa i nelinearnih dinamičkih sistema nudi čvrste teorijske i metodološke osnove za tumačenje široke klase nelinearnosti, nestabilnosti i neizvesnosti koje karakterišu sve veću složenost sistema [102]. Prema definiciji datoj u [103], „*Teorija haosa je kvalitativno proučavanje nestabilnog aperiodičnog ponašanja u determinističkim nelinearnim dinamičkim sistemima*“. Prvo, izraz dinamički, ukazuje na evoluciju sistema tokom vremena. Drugo, nestabilno i aperiodično ponašanje povezano je s odsustvom ponavljajućih obrazaca. Treće, nelinearnost implicira da sistem nije u skladu sa principom aditivnosti, što znači da izlaz nije nužno proporcionalan ulazu u sistem. Četvrto, termin deterministički znači da sistem ne uključuje stohastičke elemente, iako predstavlja nestabilno i aperiodično ponašanje. Konačno, ključna karakteristika haotičnog sistema je njegova osetljivost na početne uslove.

Haotični sistemi mogu pokazivati obrasce koji su dobro skriveni i koje treba otkriti. Ovi obrasci se posmatraju u obliku atraktora. Fazni portreti i grafikon ponavljanja dva su alata koji se koriste za otkrivanje atraktora haotičnih sistema. Pored toga, Ljapunovljevi eksponenti i dijagrami bifurkacije takođe se koriste za otkrivanje haotičnog sistema i merenje njegove stabilnosti, pri čemu se maksimalni Ljapunov eksponent često koristi za dobijanje mere osetljive zavisnosti od početnih uslova. Ljapunovljevi eksponenti su prosečne eksponencijalne stope divergencije ili konvergencije obližnjih orbita u faznom prostoru. Sistem koji sadrži najmanje jedan pozitivan Ljapunovljev eksponent

definisan je kao haotičan, a veličina eksponenta odražava vremensku skalu na kojoj dinamika sistema postaje nepredvidiva [104]. Kao što je već navedeno, ključna karakteristika haotičnih sistema je njihova osetljivost na male razlike u početnim uslovima. Na primer, kašnjenje u narudžbi je promena promenljive, dok je odabir drugog dispečerskog pravila sistema promena parametra [105].

Jedna od prvih studija o složenosti proizvodnih sistema koja uvodi koncepte haosa je [106]. Modeli bazirani na simulacijama se koriste kako bi se procenio uticaj nekoliko faktora na izlaz objekata za proizvodnju pločica. Performanse sistema ocenjuvane su pomoću distribucije protočnih vremena i obrazaca među-dolaznih vremena predmeta rada na radnim stanicama. Zaključeno je da svaki od ispitivanih faktora doprinosi složenosti i pospešuje nastanak haotičnog ponašanja. Ponašanje složenih sistema vrednovano je korišćenjem metoda teorije haosa u [107]. Haotično ponašanje jednostavnog sistema zatvorene petlje istražuje se kroz putanje fazne ravni, Poincare-ove karte, analizu spektra, analizu faznog grafa, Sugihara Mai testa i Ljapunovljevih eksponenata. Navodi se da iako se analiza spektra pokazala korisnom za njenu analizu, dokaz o postojanju haosa trebalo bi da se zasniva na testiranju Ljapunovljevih eksponenata. Slično, u [108] ispituje se haotično ponašanje jednostavnog modela proizvodnog sistema u cilju optimizacije troškova. Dinamičko ponašanje proizvodnih sistema sa ograničenim veličinama bafera analizira se pomoću Poincare-ovih mapa i bifurkacionih dijagrama [109]. U [110] je razvijen metod haotične potražnje za određivanje veličine serije proizvoda. Haotična potražnja je identifikovana korišćenjem maksimalnog Ljapunovljevog eksponenta i modifikovane Vagnerove metode. U [111] proučavaju se logističke mreže proizvođača koji saraduju putem diskretnih modela i metoda simulacije iz oblasti nelinearne dinamike. U [112] je procenjen uticaj složenosti na performanse Fleksibilnih proizvodnih sistema (*eng. Flexible Manufacturing Systems - FMS*) koji je povezan sa brojem numerički upravljanih alatnih mašina i robota prisutnih u svakom FMS -u. U [113] izvršena je procena dužine reda vremenskih serija primenom Ljapunovljevih eksponenata i fraktalne dimenzije, kao i analiza spektra i analiza autokorelacije. Raspravlja se o nelinearnoj dinamici jednostavnog proizvodnog sistema i prikazuju se mogućnosti procene i regulisanja nivoa nedovršene proizvodnje WiP (*eng. Work-in-Progress WiP*) [114]. U [105] dovodi se u pitanje haotično ponašanje nekoliko diskretnih proizvodnih sistema koji se pojavljuju u literaturi. U [115], [116] prvo je simulirano zakazivanje jednostavnog proizvodnog sistema, uz pomoć uobičajenih pravila dodjeljivanja. Rezultati su proučavani uz pomoć faznih portreta. Novo pravilo otpreme, zasnovano na faznim portretima, predloženo je i testirano u skladu sa gore pomenutim pravilima. Tvrdi se da će, pošto ne postoji pravilo otpreme za koje je utvrđeno da ima najbolje rezultate u svim situacijama [97], morati biti ispitane različite postavke. Fazni portreti se takođe koriste za analizu proizvodnih sistema, posebno montažnih sistema, kako bi se istražio uticaj slučajnog vremena obrade na obrasce među-dolaznih vremena [117]. U [118] je predložen model za procenu prilagodljivosti proizvodnog sistema zahtevima pri čemu su demonstrirani potencijalni načini istraživanja različitih politika prilagodljivosti, korišćenjem alata za analizu nelinearnih vremenskih serija, kao što su dijagrami bifurkacije i maksimalni Ljapunovljevi eksponenti. U [101] uveden je pristup u vidu simulacije za procenu složenosti proizvodnih sistema u fazi izvođenja, a bazira se na idejama koje se odnose na nelinearnu dinamiku sistema, zasnovanim na maksimalnim Ljapunovljevim eksponentima, osetljivosti i strukturnoj analizi.

### 2.2.2.2 Teorija informacija

Mera za kvantifikaciju informacija, izbor i neizvesnost, u kontekstu komunikacione teorije, uvedena je u [87]. Mera entropije koristi se za kvantifikaciju nesigurnosti koja karakteriše proizvodnju ili informacije potrebne za opis

komponenti sistema. Stanja mašine, kao što su zauzetost, prazan hod, otkaz, raznolikost proizvoda i veličina serije koriste se kao ulaz za procenu entropije sistema. Osim mere entropije, stope entropije koriste se i za procenu složenosti proizvodnje prvenstveno za dinamičku složenost. Stopa entropije je Kolmogorovljeva mera složenosti koja procenjuje prosečan rast Kolmogorovljeve složenosti slučajnog niza [119]. Stope entropije uopšte se mogu posmatrati kao analiza vremenskih serija stanja komponenti proizvodnog sistema.

Procena složenosti proizvodnog sistema, zasnovana na stopama entropije dužine čekanja u redu, predložena je u [119]. Ovaj rad se fokusira na dinamičke karakteristike sistema; stoga je uvedena mera više povezana sa dinamičkom nego sa statičkom složenošću. U skladu sa [100] procenjena složenost posmatra se kao evolucija definisanog reda tokom vremena i stanja resursa. Stope entropije izračunavaju se prema Kolmogorovljevoj složenosti slučajnog niza. Entropijska mera složenosti odlučivanja za alternativne rasporede i radne karakteristike uvedena je u [120]. Predloženu meru podržava stručni sistem koji funkcioniše kao posrednik između programa i organizacije. U [121] predložena je mera operativne složenosti sistema dobavljač-kupac. Operativna složenost posmatra se kao neizvesnost, povezana sa upravljanjem dinamičkim varijacijama u vremenu ili količini kroz tokove informacija i materijala. Uvedene entropijske mere [120], imaju za cilj da uhvate promenljivost reda u pogledu dužine i sastava. Rad [122] fokusira se na modeliranje statičkih složenosti proizvodnih sistema. U [119], statička složenost proizvodnih sistema shvaćena je kao funkcija strukture sistema, raznolikosti komponenti i međusobnih veza. Podaci potrebni za opis sistema, odnosno struktura, komponente i međusobne veze mogu se smatrati statičkom složenošću sistema i procenjuju se entropijskim merenjima. Mera složenosti proizvodnje montažnih sistema uvedena je u [123]. Predložene mere složenosti odnose se na mešavinu proizvoda, složenost montažnog sistema na radnoj stanici, nivou sistema i složenosti lanca snabdevanja [124]. Osnova za njihovu matematičku formulaciju je Šenonova teorema. Složenost proizvodnje u montažnim sistemima zasnovanim na ljudima takođe je ispitana u [125], sa posebnim naglaskom na uticaj složenosti na propusnost. Konačno, ova studija [126] povezuje složenost sistema sa protočnim vremenom montaže na primeru jednostavnih serijskih, paralelnih i hibridnih montažnih linija koji potvrđuju pozitivnu korelaciju između složenosti i propusnosti.

### *2.2.2.3 Hibridni pristup*

Hibridni pristup predstavlja kombinaciju prethodno navedenih teorija i pristupa kako bi se kvantifikovala složenost posmatranih sistema i njegovih delova. Pa tako u studijama [127] i [128], predložena je metoda koja se zasniva na heurističkom indeksu generisanom kroz kombinaciju mere entropije, koja se bazira na teoriji informacija. U [129] složenost proizvoda modelirana je kao funkcija entropije informacija o proizvodu i indeksa složenosti proizvodnje proizvoda, a predstavlja složenost proizvoda, povezanu sa materijalom, dizajnom, specifikacijama i komponentama. U [47], pristup uveden u [129] takođe se primenjuje na slučaj operativne složenosti pri razmatranju ljudskih karakteristika. Složenost proizvodnih sistema istražuje se u [127] uvođenjem mere strukturne složenosti, zasnovane na kodiranju proizvodnih sistema, kao i na meri entropije informacija koja uzima u obzir dostupnost sistema. Dva pristupa, koja slede u [127] integrisana su u jednu meru složenosti u [130] za potrebe vrednovanja alternativne konfiguracije koje predstavljaju različite rezultate mere složenosti, pokazujući da je predložena mera osetljiva na promene u komponentama konfiguracije proizvodnog sistema i njihovim odnosima.

#### 2.2.2.4 Teorija aksiomatskog dizajna

U [99], složenost se smatra „merom neizvesnosti u zadovoljavanju ciljeva (funkcionalnih zahteva) sistema“. Što se tiče proizvodnje, cilj je da se produktivnost može maksimizirati smanjenjem složenosti proizvodnog sistema, prateći proces koji se naziva „Teorija kompleksnosti usmerene na projektovanje (eng. *Design-Centric Complexity (DCC) theory*)“.

#### 2.2.2.5 Ostale neklasifikovane teorije

U [131], koncept baziran na Reynoldsovom broju uveden je kao pokazatelj složenosti proizvodnih sistema sa ciljem identifikacije tranzicionog režima između ponašanja stabilnih i turbulentnih proizvodnih operacija analogno laminarnim i turbulentnim tokovima. Slični koncepti izvedeni iz iste analogije takođe su predloženi za analizu lanca snabdevanja [132] i za posmatrani proizvodni sistem [133]. U [134] je predložena druga klasifikacija složenosti: vremenski povezana, organizaciona i sistemska. Svaki tip je predstavljen vektorom koji procenjuje složenost proizvodnog sistema. Tri vrste se mogu posmatrati kao tri ose, stvarajući tako kocku složenosti (trodimenzionalna složenost).

U [135] postoji metoda predložena za procenu dinamičke složenosti, koja sledi pojmove statističke složenosti. Dinamička ili operativna složenost, kako se naziva u ovoj studiji, određena je kao poteškoća u predviđanju niza. Ova definicija vrlo je bliska [136] da se dinamička složenost proizvodnih sistema može shvatiti kao nepredvidljivost pokazatelja učinka proizvodnog sistema. U [135] statistička složenost se procenjuje analizom konačnih dužina simboličkog niza međupolaznih vremena korišćenjem algoritma rekonstrukcije uzročno-posledičnog razdvajanja. U [136], procena nepredvidljivosti zasniva se na analizi vremenskih serija pokazatelja performansi, uz upotrebu algoritma za merenje složenosti, Kolmogorov-Lempel-Ziv [137]. Pristup je potvrđen kroz primer dva jednostavna proizvodna sistema koji pokazuju nepredvidivo ponašanje usled stohastičkih otkaza. Efikasnost pristupa predstavljena je studijom slučaja iz automobilske industrije. Uočena je slaba, ali pozitivna korelacija, između mešavine proizvoda i složenosti. Što je manji odnos mešavine proizvoda, manja je nepredvidljivost.

#### 2.2.2.6 Kratak osvrt na identifikovane teorije i rezultate u praksi

U prethodnom delu predstavljani su ključni pristupi i metode koje mogu biti od koristi u pružanju analitičke procene složenosti proizvodnih sistema u fizičkom domenu. Relevantne kategorije pristupa identifikovane su na osnovu svojih teorijskih osnova, odnosno teoriji haosa i nelinearnoj dinamici, teoriji informacija, hibridnom pristupu, itd. Teorija složenosti, zasnovana na aksiomatskoj teoriji dizajna, takođe je uključena u predloženu taksonomiju zbog svog velikog značaja, iako se uglavnom primenjuje na funkcionalno područje.

Pristupi zasnovani na haosu i teorijama nelinearne dinamike potiču iz 1994. godine [106]. Od tada je predstavljeno mnogo studija koje pokušavaju da identifikuju i izmere kaos u proizvodnim sistemima. Kao što je primećeno u [105], prisustvo haosa u diskretnim proizvodnim sistemima, u strogom teorijskom smislu, nije čvrsto dokazano. Radovi [107], [118] identifikuju kaos u proizvodnim sistemima koristeći maksimalne eksponente Ljapunova, ali su proizvoljno modelovali proizvodne sisteme koji koriste logističku funkciju za niz parametara koji zaista pokazuju haotično ponašanje. Osim toga, metode zasnovane na haosu i teorijama nelinearne dinamike, kao što

su maksimalni Ljapunovljevi eksponenti, dijagrami bifurkacije i fazni portreti sposobni su da identifikuju i mere samo haos. Međutim, ključni problem u razumevanju ponašanja proizvodnih sistema zapravo predstavlja njegova nepredvidivost, zbog stohastičke prirode sistema, npr. mašinskih otkaza, pri čemu se takvo stohastičko ponašanje ne može identifikovati teorijom haosa. Čak i ako je proizvodni sistem haotičan, može se meriti maksimalnim Ljapunovim eksponentima, ali ne i bifurkacionim dijagramima faznih portreta. Metoda maksimalnih Ljapunovljevih eksponenata pruža kvantitativno merenje, specifičnu vrednost koja se lako može uporediti sa vrednostima drugih sistema i može se smatrati metrikom složenosti, za dinamičku složenost. Za razliku od metode maksimalnih Ljapunovljevih eksponenata, druga dva pristupa su ograničena na prikazivanje nepravilnosti sistema samo na šematski način. Međutim, svaki budući rad može biti zasnovan ne samo na strogim pristupima, već i na pojmovima teorije haosa koji pružaju niz metrika koje mogu meriti bilo dinamičku ili statičku složenost [101].

Pristupi teorije informacija uveliko su primijenjeni na procenu statičke i dinamičke složenosti proizvodnih sistema. Merenja zasnovana na entropiji koriste se za procenu statičke složenosti, ali zahtevaju definisanje različitih stanja komponenti sistema, uz niz pretpostavki koje se odnose na nezavisnost stanja sistema. Vrednost složenosti sama po sebi ne daje nikakav doprinos razumevanju ponašanja proizvodnog sistema. Dinamička složenost, koja se naziva i operativna složenost, procenjuje se uz pomoć stopa entropije. Za razliku od Šenonove entropije, stope entropije se nasumično primenjuju i ne oslanjaju se na posebne pretpostavke o osnovnim raspodelama verovatnoće [119]. Zbog toga, dinamička složenost procenjena stopama entropije pruža gotovo direktan uvid u performanse proizvodnih sistema, olakšavajući identifikaciju uskih grla [119]. Iako ne postoji direktna veza između statičke složenosti i performansi proizvodnih sistema, postoji niz studija koje pokušavaju da obezbede odnos među njima. Složenost je povezana sa propusnošću u [125] u kontekstu istraživanja mešovitih montažnih sistema. Iako su takve veze, između proizvodnih performansi i složenosti, ad hoc i generalno nedostaju, mogu se smatrati prvim korakom.

Hibridni pristupi dele iste poteškoće sa pristupima teorije informacija, jer se uglavnom temelje na Šenonovoj entropiji za procenu složenosti. Osim toga, uvedeni kodovi koji se koriste u hibridnim metodama ne pokrivaju celo područje proizvodnih sistema. Stoga su takvi pristupi ograničeni na područje koje je do sada pokriveno. Međutim, uzimajući u obzir povećanje standardizacije proizvodnih sistema, hibridni pristupi mogu se smatrati obećavajućim. Konačno, predložene metrike, zasnovane na hibridnim pristupima, mogu biti poželjnije za procenu „komplikovanog“ više nego „složenog“ sistema [127].

Ostali identifikovani pristupi baziraju se na analogijama iz oblasti dinamike fluida, trodimenzionalne složenosti, računске mehanike, itd. Pristupi inspirisani dinamikom fluida još su u ranoj fazi razvoja i ne pružaju kvantitativno merenje statičke ili dinamičke složenosti. Oni ostaju samo na nivou konceptualne analogije između proizvodnih sistema i dinamike fluida koju je potrebno dodatno istražiti. Kocka složenosti (trodimenzionalna složenost) je zanimljiv pristup čija je metrika ograničena na brojanje mašina u proizvodnom sistemu. Računarska dinamika i pristupi složenosti Lempel-Ziv<sup>5</sup> izgleda da dele isto razumevanje dinamičke složenosti. U oba pristupa, dinamička složenost se shvata kao nepredvidljivost sistema, a u [136] naglasak je stavljen na način ocenjivanja složenosti izračunavanjem nepredvidljivosti vremenskih serija pokazatelja učinka.

Konkretno, potreba za pronalaženjem veze između performansi proizvodnih sistema, njihovog ponašanja, kao i metrika složenosti identifikovana je i istaknuta kao jedan od budućih izazova. Međutim, utvrđivanje stepena

---

<sup>5</sup> Kada i kako koristiti Lempel-Ziv složenost: <https://information-dynamics.github.io/complexity/information/2019/06/26/lempel-ziv.html>

složenosti ne obezbeđuje fundamentalno poimanje ponašanja proizvodnih sistema kao ni evolucije tog ponašanja u budućnosti, bilo bližoj ili daljoj.

### **2.3 Konvencionalni prilazi kvantifikaciji korišćenja energije u proizvodnim sistemima**

Kako troškovi energije pokazuju značajan rast tokom poslednjih decenija, proizvodni sistemi počinju da tretiraju energiju kao vredan resurs umesto kao stavku režijskih troškova. Uzimajući u obzir činjenicu da svi oblici snabdevanja i korišćenja energije izazivaju emisije (npr. Kg CO<sub>2e</sub>) koje doprinose ekološkim problemima [138], obavezujući ciljevi smanjenja emisija, kao što je Kjoto protokol, takođe stvaraju pritisak na proizvodni sektor [139]. Pored toga, može se primetiti rastuća potražnja potrošača za eko-proizvodima [140], zbog čega sve više kompanija preduzima akcije za povećanje energetske efikasnosti kako bi ostale konkurentne.

Međutim, sprovođenje kontinualnog procesa poboljšanja često se suočava sa ograničenjima jer nedostaju resursi poput osoblja, vremena i znanja. Štaviše, nedostatak transparentnosti u vezi sa korišćenjem energije i energetske žarištima dodatno ometa sprovođenje mera poboljšanja sa adekvatnim efektom [141]. Potreba za korišćenjem energije uzrokovana je proizvodnim mašinama, tehničkom opremom, uslovima rada u proizvodnim prostorima itd., u obliku različitih nosilaca energije kao što su električna i toplotna energija, gas, goriva, itd.

U značajnom broju slučajeva, u korisničkom podsistemu dominira korišćenje električne energije koja je neophodna za funkcionisanje tehnoloških sistema, dok se za obezbeđivanje adekvatnih uslova rada, odnosno okruženja u kojem funkcionišu tehnološki sistemi, najčešće koriste oni nosioci energije čija finalna transformacija rezultuje obezbeđenjem određene količine toplote.

Da bi se identifikovale mere poboljšanja, neophodno je pre svega steći uvid u karakteristike mašina u pogledu korišćenja električne energije, gde se uglavnom oslanja na empirijska merenja. Naročito u složenom proizvodnom sistemu sa širokim asortimanom proizvoda, prilično je komplikovano meriti svaki proizvodni proces za svaki proizvod.

U ovom delu disertacije prikazani su neki od postojećih pristupa u vezi sa određivanjem i predviđanjem korišćenja energije u proizvodnim sistemima. Razmatrani su rezultati njihove primene, na osnovu čega su izvedeni zahtevi za uspešnu primenu u industriji kako bi se dalje procenila njihova primenljivost. Pregled energetske potreba za različite proizvodne procese dat je u [142] pri čemu se predmet istraživanja fokusira na konvencionalne procese masovnog formiranja i oduzimanja materijala (tj. brizganje, livenje metala i konvencionalni procesi mašinske obrade), odnosno tradicionalne koncepte u trodimenzionalnoj proizvodnji.

#### *2.3.1 Procenjivanje putem eksergijskog okvira*

Proizvodni procesi konvertuju materijalne ulaze u proizvode i otpad, dok sa druge strane koriste energiju da bi proizveli koristan rad neophodan za odvijanje procesa proizvodnje, pri čemu konverzija ulazne energije u rad rezultuje i generisanjem energije u vidu toplote (tzv. disipacija) [143]. Ovaj proces može se generalizovati termodinamičkim konceptom eksergije, koji odražava maksimalno koristan rad koji je moguće generisati tokom procesa. U [144] primenjen je ovaj koncept na širok spektar proizvodnih procesa i otkriven je obrnuti trend između specifične potrošnje energije (SPE) i stope procesa nakon čega je predložena teorijska jednačina za prikazivanje SPE. Međutim, nedostaju koeficijenti, pa se pristup ne može direktno koristiti za predviđanje korišćenja energije za određenu mašinu alatku, niti se može steći realna reprezentacija stanja i ponašanja same mašine. U [145] dalje je



istraživanja primena eksergijske analize u diskretnim proizvodnim procesima pri čemu su otkrivene različite prepreke, odnosno istraživanje se bazira na identifikaciji izvora neefikasnosti i jedinstvenoj metrici za opisivanje kvaliteta kako energije tako i materijala.

### 2.3.2 Procena preko nominalne snage

U [141] uvedena je brza metoda za procenu korišćenja energije mašina koja je laka za primenu i odgovara potrebama malih i srednjih proizvodnih sistema. Procena se zasniva na nazivnoj snazi sa tipskih pločica ili specifikacija mašina. Ove vrednosti su generalno previsoke jer odražavaju maksimalno angažovanu snagu. U [146] uveden je metod za procenu korišćenja energije NC obrade koji koristi korelaciju između NC kodova i komponenti koje koriste energiju. Na osnovu specifičnih NC oznaka (M, S, G, F, T), komponente mašine pokazuju karakteristično ponašanje koje se može povezati sa njihovim korišćenjem energije. Iako se koncept segmentacije komponenti pokazao kao interesantan, rezultira precenjivanjem ukupnog korišćenja energije mašine.

### 2.3.3 Procena putem simulacije

Najčešća implementacija ovog pristupa podrazumeva određivanje i predviđanje korišćenja energije proizvodnih mašina simulacijama diskretnih događaja (SDD), gde se predviđanje zasniva prema različitim radnim stanjima mašine koja su definisana time što su određene komponente ili aktivne ili ne. Ova stanja su dalje povezana prelazima koji pokazuju moguće promene i temporalna ponašanja između stanja (npr. ubrzanje vretena). Udeo svakog stanja u ukupnom vremenu izvršavanja može se odrediti empirijski ili kroz scenarije korišćenja mašina [147]. U [148] korišćen je sličan pristup za modeliranje složenih mašina. U ovom pristupu, mašina je podeljena na funkcionalne module koji se modeluju u terminima stanja i događaja sa teorijom automata i njihovi odnosi se definišu korišćenjem specifične logike. Sličan pristup zasnovan na komponentama razvijen je u [149]. Zatim, u [150] uvedena je metodologija zasnovana na simulaciji za generički opis proizvodnih mašina, koja se može koristiti za podršku odlučivanju u ranim fazama planiranja proizvodnje jer omogućava izbor energetski najefikasnijih procesa. Mašina je dekomponovana na više komponenti, dok su one u ovom pristupu razvrstane u standardne kategorije. Takvi simulacioni modeli se takođe mogu povezati sa hardverskim sistemom upravljanja mašinama da bi se koristile informacije o NC kodu kako bi se predvidelo korišćenje energije za određeni proizvodni postupak [151]. Međutim, razvoj simulacionih modela ovog tipa zahteva ogromne napore i detaljno poznavanje svih nivoa komponenti mašina alatki. Pored toga, ova metodologija razmatra samo određene CNC mašine. Shodno tome, industrijske primene u većem obimu retko se nalaze u publikacijama ili izveštajima.

### 2.3.4 Procena putem empirijskih modela

U [143] i [152] razvijena je metodologija za pouzdano predviđanje jediničnog korišćenja energije za procese uklanjanja materijala. Empirijski model se koristi za karakterizaciju odnosa između parametara procesa i potražnje za energijom. SPE ( $\text{Wh}/\text{cm}^3$  uklonjenog materijala) se modeluje u zavisnosti od brzine uklanjanja materijala (*eng. Material Removal Rate MRR*) kao odlučujućeg parametra. Izmereni podaci analiziraju se pomoću SPSS softvera, pri čemu je naknadno potrebno odrediti koeficijente specifične za mašinu. Nakon toga, ovaj model je u stanju da opiše SPE u različitim uslovima rezanja sa ukupnom tačnošću od preko 90%. Međutim, kako su koeficijenti specifični za

mašinu, metodologija se mora ponoviti za svaku mašinu alatku i proces. Isti empirijski pristup primenjen je i na druge procese, kao što su brizganje [153] i ekstruzija [154].

### 2.3.5 Kratak osvrt na identifikovane teorije i rezultate u praksi

U [145] su u svom radu ukazali na prepreke za primenu eksergijske okvirne metode u industriji, jer je ta metoda prvenstveno dizajnirana za procenu termičkih procesa, pa se drugi procesi (npr. glodanje, struganje, brušenje, itd.) suočavaju sa poteškoćama u kvantifikaciji eksergije tokom procesa pri čemu nedostaju i specifične vrednosti za koeficijente modela. Sa druge strane, pokazalo se da je pristup nominalne snage veoma praktičan. Međutim, rezultati nemaju potrebnu tačnost, pa su stoga neadekvatni za pouzdanu identifikaciju energetske žarišta. Štaviše, ne stiče se uvid u karakteristike korišćenja energije niti se može formulisati SPE pokazatelj posmatranog proizvoda [155]. Pristupi zasnovani na simulaciji zahtevaju detaljno poznavanje strukture mašine i stručnost u izvođenju simulacije, što zahteva posebno obučeno osoblje i ogroman napor da se formuliše SPE za određene proizvode [151]. Takođe, neophodan je značajan napor i prilikom postavljanja empirijskih modela procesa u industriji, jer je uglavnom potrebno osmisliti veliki broj eksperimenata koje je potrebno sprovesti da bi se izveli statistički verifikovani rezultati za različite operative parametre [154]. Imajući u vidu prethodno navedeno, za uspešnu primenu u industriji neophodno je uzeti u obzir i sledeće zahteve:

- **Proizvodna okruženja sa više proizvoda:** Pošto se jedna proizvodna mašina generalno koristi za obradu različitih proizvoda, pristup mora da obezbedi da se potražnja za energijom za sve ove proizvode može izvesti bez merenja svakog proizvoda pojedinačno.
- **Tačnost i uvid:** Pristup treba da obezbedi numeričke vrednosti o korišćenju koje obezbeđuju pravu veličinu i omogućavaju alokaciju energije na pojedinačne proizvode. Štaviše, metoda treba da osigura određeni nivo uvida u karakteristike korišćenja energije mašine kako bi se omogućili osnovni uslovi za izvođenje optimizacije.
- **Malo truda:** Resursi kao što su vreme i osoblje su obično ograničeni pa pristup mora obezbediti rezultate uz malo truda pri čemu je poželjno eskivirati opsežne eksperimente i analize.
- **Bez stručnog znanja:** Mnogi proizvodni sistemi nemaju stručnost u energetske efikasnosti proizvodnih mašina jer im to jednostavno nije primarna delatnost. Dakle, pristup mora, s jedne strane, da pruži jasne smernice za tok delovanja, a sa druge, ne sme da zahteva nikakvo prethodno znanje o modelovanju ili metodama, već samo opšte razumevanje procesa.
- **Prilagođeni napor:** Neki procesi su složeniji od drugih i sadrže više promenljivih koje se moraju uzeti u obzir u modelima korišćenja energije. Stoga, napori za analizu treba da budu usmereni na složenost procesa.
- **Transferabilnost i skalabilnost:** Metoda mora biti primenljiva na širok spektar proizvodnih mašina, pošto postoji veliki izbor mašina u industriji.

Kako nijedan od analiziranih pristupa ne ispunjava sve zahteve za uspešnu primenu u industriji, neophodno je razviti transferabilan pristup koji omogućava efektivnije analize korišćenja energije u industriji.

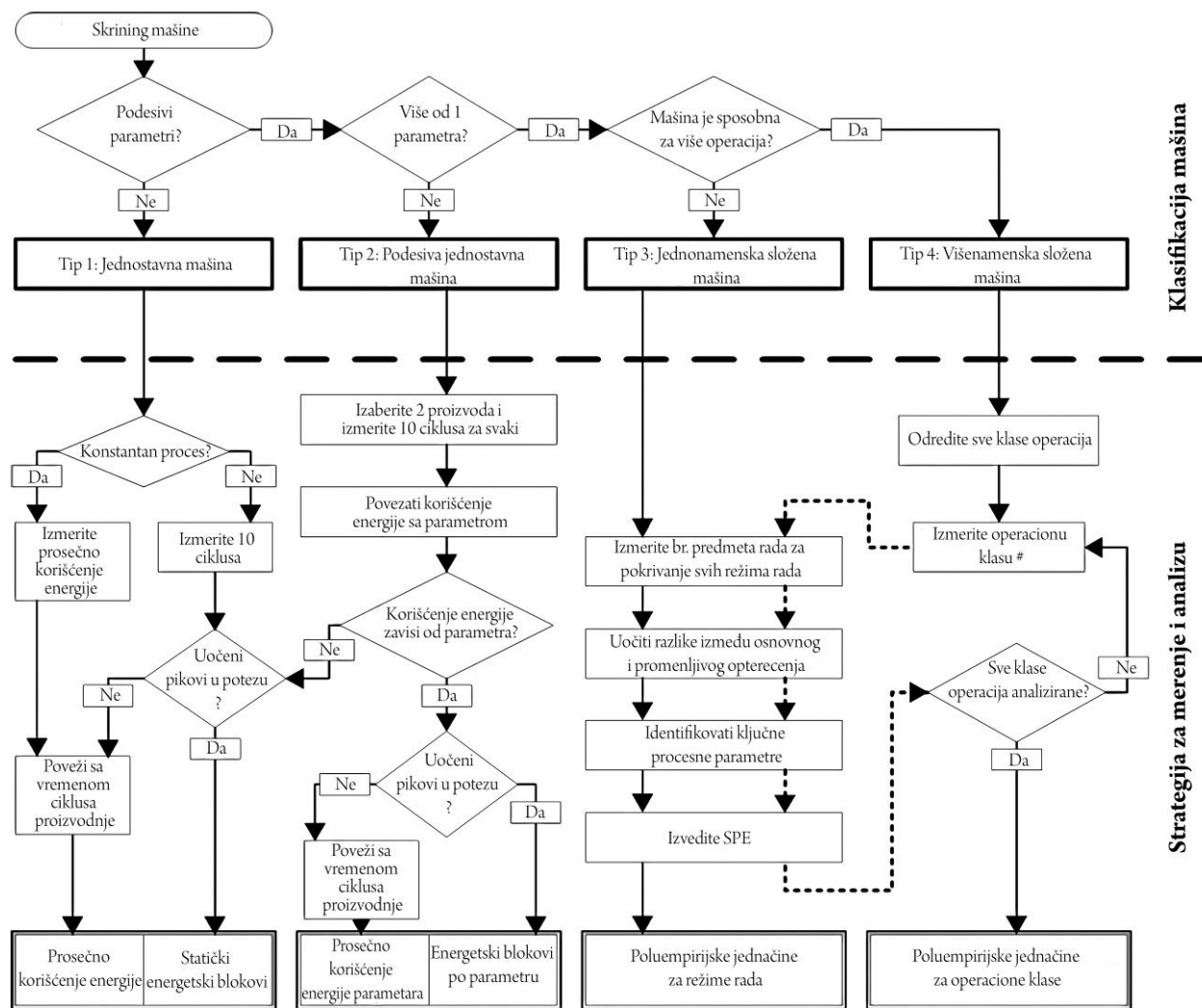
Imajući to u vidu, u [138] predložen je pristup koji ima za cilj da predvidi korišćenje električne energije za proizvodni proizvod na određenoj mašini (SPE po proizvodu). U cilju efikasnog bavljenja raznovrsnim spektrom mašina koje se koriste u procesu proizvodnje, primarni fokus je takav da se količina merenja održi što je moguće nižom uz obezbeđivanje ciljanog nivoa tačnosti od preko 80%. Na početku je definisano stablo odlučivanja kako bi se

definisale jasne smernice za klasifikaciju mašina, na osnovu čega su proizvodne mašine kategorisane u četiri grupe prema karakteristikama korišćenja energije.

Prema karakteristikama korišćenja električne energije, identifikovane su četiri grupe mašina po rastućoj složenosti [138]:

- Tip 1: Jednostavne mašine,
- Tip 2: Podesive jednostavne mašine,
- Tip 3: Jednonamenske složene mašine, i
- Tip 4: Višenamenske složene mašine.

U nastavku su detaljno opisane analize mašina u zavisnosti od njihovog tipa. Pošto modeli određivanja potrebne količine energije u velikoj meri zavise od klasifikacije, stablo odlučivanja prikazano na slici 2.6 je ključno da bi se obezbedila visoka efikasnost uz minimalni napor za izvođenje analize.



Slika 2.6 Stablo odlučivanja za klasifikaciju mašina [138]

Mašine su klasifikovane brzim postupkom skrininga koji koristi niz podesivih parametara kao tačke odlučivanja. Ako su parametri mašine fiksni, onda je ova mašina klasifikovana kao jednostavna mašina. Ako se tokom proizvodnje podesi samo jedan parametar, ova mašina se kategoriše kao podesiva jednostavna mašina, u suprotnom se mašina smatra složenom mašinom. Da bi se razlikovale složene mašine, koristi se broj operacija za njihovo razdvajanje na složene mašine za jednu namenu i složene višenamenske mašine. Primetno je da je klasifikacija mašina uvek specifična za slučaj i zavisi od mašine koja se koristi. Tabela 2.1 prikazuje primere mašina u svakoj grupi za testirani fabrički slučaj.

Tabela 2.1 Klasifikacija mašina – primeri [138]

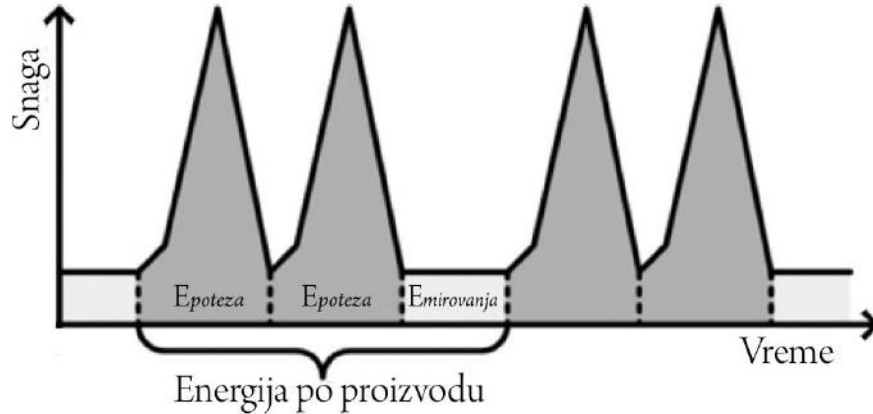
Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
Peć za žarenje (Prosečno korišćenje energije)	Mašina za lepljenje u prahu (Parametarsko korišćenje energije)	Mašinski strug (Polu-empirijske jednačine za operacione modele)	CNC obradni centar (Skup poluempirijskih jednačina)
Linija za premazivanje prahom (Prosečno korišćenje energije)	[Broj aktivnih grejača]	[Struganje sa različitim procesnim parametrima]	[Jednačine za svaku radnu klasu, npr. čeonoglođanje, bočno glođanje, bušenje i odgovarajući režimi rada, npr. gruba obrada, završna obrada]
Čekić za kovanje (Statički energetske blokovi)	Indukcioni grejač (Parametarski energetske blokovi)	Mašinska brusilica (Polu-empirijske jednačine za operacione modele)	
Štanc presa (Statički energetske blokovi)	[Zapremina predmeta rada]	[Struganje sa različitim procesnim parametrima]	

### 2.3.5.1 Analiza tipa 1: Jednostavne mašine

Postoje dve varijacije mašina tipa 1. Merenje energije prvog oblika pokazuje konstantno ponašanje i ne fluktuiraju značajno na ponavljajući način tokom režima obrade (npr. kontinualna peć). Za ove mašine meri se konstantni nivo snage  $P_{avg}$ , a zatim se množi sa vremenom ciklusa proizvoda  $t_{cycle}$  da bi se dobilo korišćenje energije po proizvodu  $E_{part}$ . Ako se određeni broj proizvoda obrađuje kao serija ili partija (npr. u peći), korišćenje energije za ceo ciklus deli se sa brojem proizvoda u seriji/partiji. U ovom slučaju, model SPE zahteva ulazne informacije standardne veličine serije ili tabelu koja navodi broj proizvoda po ciklusu  $n_{per\_cycle}$  u odnosu na tip i veličinu proizvoda. Pored toga, vreme ciklusa takođe se može okarakterisati geometrijskim karakteristikama dela (npr. linearni odnos između vremena ciklusa i dužine predmeta rada), što olakšava predviđanje korišćenja energije za širok spektar proizvoda. Korišćenje energije po proizvodu za ovaj oblik jednostavnih mašina može se proceniti prema jednačini (2.18):

$$E_{part} = \frac{t_{cycle} P_{avg}}{n_{per\_cycle}} \quad (2.18)$$

Poređenja radi, drugi oblik mašina tipa 1 pokazuje značajne fluktuacije u energetskom profilu kao što je šematski prikazano na slici 2.7.



Slika 2.7 Kriva snage jednostavne mašine [138]

Ovo ponašanje često se nalazi među mašinama za formiranje metala, kao što su čekići za kovanje. U industrijama, procesni parametri ovih mašina (npr. sila, pritisak, itd.) obično se održavaju konstantnim, pri čemu različiti proizvodi mogu zahtevati samo različit broj operacija jedinice, na primer, broj poteza po proizvodu tokom procesa kovanja. Iz perspektive korišćenja energije, svaka operacija jedinice rezultira prepoznatljivim pikom u energetskom profilu. Površina ispod ovog pika, odnosno količina energije po potezu  $E_{stroke}$  (na slici 2.7 označeno kao  $E_{poteza}$ ), ostaje približno konstantna bez obzira na tip proizvoda. Da bi se procenilo korišćenje energije po proizvodu za ovaj oblik jednostavnih mašina, empirijska merenja moraju da obuhvate određeni broj pikova da bi se prosečni  $E_{stroke}$  prikazao u formi statičkog energetskog bloka.

Osim korišćenja energije za aktivnosti dodavanja vrednosti, određeni deo energije u stanju mirovanja mora da se dodeli svakom proizvodu zbog rukovanja materijalom, pozicioniranja, promene alata, itd. Nivo snage u praznom hodu  $P_{idle}$  obično ostaje konstantan, što se lako može odrediti merenjem snage [156], [157]. Nažalost, vreme mirovanja po proizvodu  $t_{idle}$  nije direktno dokumentovano u industrijama i varira od proizvoda do proizvoda. Alternativno, vreme ciklusa  $t_{cycle}$  se može koristiti za procenu vremena mirovanja oduzimanjem perioda aktivnosti dodavanja vrednosti zabeleženih u merenjima. Kao što je ranije pomenuto, mašine tipa 1 imaju ponovljiv  $E_{stroke}$ , tako da je period aktivnosti dodavanja vrednosti jednak trajanju svakog poteza  $t_{stroke}$  pomnoženom sa brojem poteza  $n_{stroke}$ . Prema tome,  $E_{part}$  može se predvideti sastavljanjem ovih energetskih blokova kao što je prikazano izrazima u (2.19). Osim merenja, jedine potrebne ulazne informacije su  $n_{stroke}$  i  $t_{cycle}$ .

$$\begin{aligned}
 E_{part} &= n_{stroke}E_{stroke} + E_{idle} \\
 E_{part} &= n_{stroke}E_{stroke} + t_{idle}P_{idle} \\
 \text{pri čemu: } t_{idle} &= t_{cycle} - n_{stroke}t_{stroke}
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

### 2.3.5.2 Analiza tipa 2: Prilagodljive jednostavne mašine

Mašine tipa 2 veoma su slične onima iz grupe tipa 1. Prema klasifikaciji mašina, jedina razlika je u tome što se jedan parametar procesa modifikuje tokom proizvodnje različitih proizvoda. Potencijalno, nivo snage  $P_{avg}$  i količina energije po potezu  $E_{stroke}$  mogu da variraju u zavisnosti od modifikovanog parametra procesa. Iz tog razloga, potrebno je izmeriti dva različita proizvoda sa različitim podešavanjima parametara procesa. Numeričke vrednosti

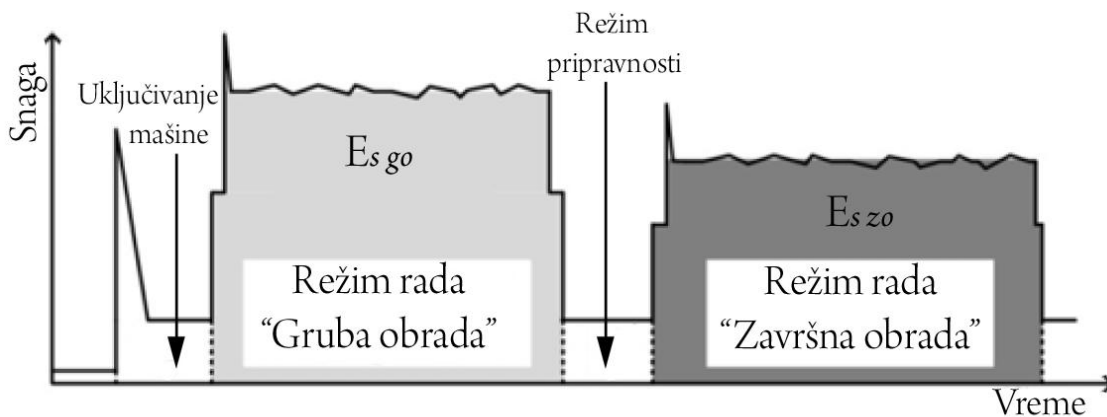
korišćenja energije zatim se mogu povezati sa ključnim parametrom procesa  $x$  za koji se pretpostavlja linearna veza radi jednostavnosti, kao što je prikazano jednačinom (2.20). Koeficijenti  $a$  i  $b$  mogu se lako izvesti iz merenja dva različita podešavanja parametara procesa, dok ostatak procene sledi isti postupak kao u pododeljku 2.3.5.1.

U slučaju da parametar procesa ima nedovoljno izražen uticaj na  $P_{avg}$  ili  $E_{stroke}$ , stablo odlučivanja preusmerava ovu mašinu u grupu mašina tipa 1. Iako se uticaji mogu proceniti tek nakon merenja, prikupljeni podaci više su nego dovoljni za izvođenje statičkih blokova energije kao što je prethodno prikazano.

$$\begin{aligned} E_{stroke} &= a_1 + b_1 x, \text{ ili} \\ P_{avg} &= a_2 + b_2 x \end{aligned} \quad (2.20)$$

### 2.3.5.3 Analiza tipa 3: Složene mašine jedne namene

Ovu grupu mašina odlikuje činjenica da se na njen proces može uticati podešavanjem različitih parametara procesa. Kao što je ranije pomenuto, na ovu grupu primenjuje se poluempirijski pristup kako bi se minimizirali napori modeliranja, kao i da bi se obezbedila pouzdana karakterizacija između parametara procesa i korišćenja energije. Eksergijski okvir i prethodni empirijski modeli sugerisu da je složeni parametar procesa, kao što je stopa uklanjanja materijala (*eng. Material Removal Rate - MRR*) ili propusnost, odlučujući faktor za SPE date mašine [152]. Ovaj nalaz čini osnovu za sledeću analizu. U cilju lakšeg razumevanja, izabrana je mašina za struganje kako bi se slikovito objasnio metod analize mašina tipa 3. U zavisnosti od MRR-a, moguće je klasifikovati različite režime rada, na primer, gruba i završna obrada kao što je prikazano na slici 2.8.



Slika 2.8 Šematska kriva snage procesa struganja [138]

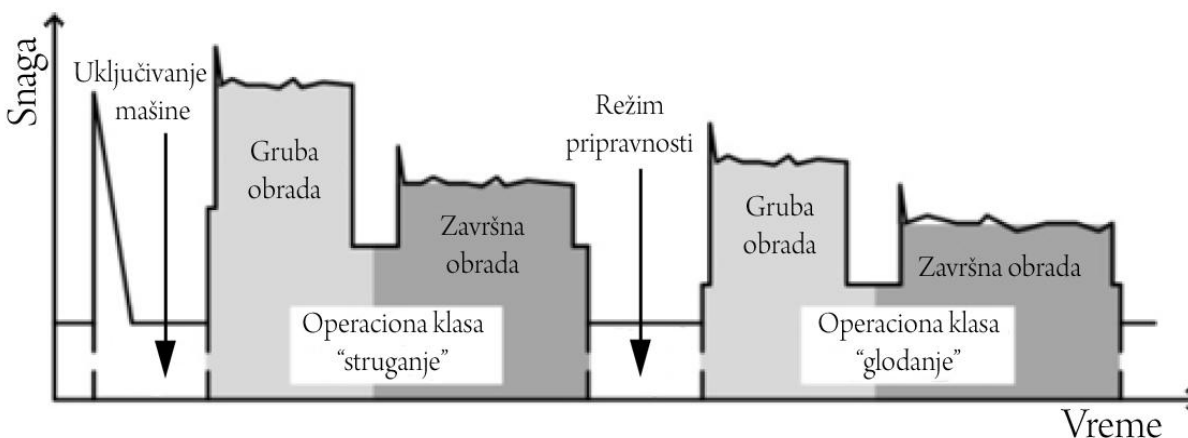
Za svaki režim rada, količina energije  $E_i$  može se direktno izvesti iz merenja kao osenčena površina ispod krive snage na slici 2.8. Zapremina obrađenog materijala  $V$  može se odrediti prema dizajnu proizvoda (npr. CAD model). Zatim, SPE za  $i$ -ti režim rada  $e_i$  [Wh/cm<sup>3</sup>] može se izvesti prema jednačini (2.21). Ako je moguće obezbediti veći broj uzoraka za isti režim rada, poželjna je prosečna vrednost SPE da bi se postigla veća tačnost predviđanja korišćenja energije.

$$e_i = \frac{E_i}{V} \quad (2.21)$$

Značajno je da se SPE mora izvesti za svaki režim rada jer se jako razlikuje, a različite geometrijske promenljive mogu biti pogodne za različite režime. Na primer, obrađena zapremina koristi se za grube operacije, dok se obrađena površina može koristiti za završne operacije zbog male dubine sečenja. Međutim, to uvek treba da bude geometrijska karakteristika predmeta rada. Ovo omogućava predviđanje SPE -a samo upoređivanjem sirovog dela sa gotovim radnim komadom. Materijal predmeta rada može potencijalno uticati na brzinu procesa kao i na specifičnu energiju rezanja, pa se preporučuje da se analiza ponovi za svaki materijal kako bi se poboljšala pouzdanost. Važno je napomenuti da ovaj pristup uključuje pojednostavljena koja dovode do odstupanja predviđenih vrednosti od stvarnih. Međutim, moguće je obezbediti pravu veličinu na način prikazan u nastavku.

#### 2.3.5.4 Analiza tipa 4: Višenamenske složene mašine

Mašine tipa 4 dozvoljavaju više parametarskih operacija poput onih kod mašina tipa 3. Šematska kriva snage za dve različite operacije obrade na CNC obradnom centru prikazana je na slici 2.9.



Slika 2.9 Šematske krive snage višestrukih obradnih operacija [138]

Nivoi snage značajno variraju za različite klase operacija (npr. struganje, glodanje) i njihove odgovarajuće režime rada. Iz tog razloga, pristup iz pododeljka 2.3.5.3 ponavlja se za svaku radnu klasu za koju je mašina sposobna. Pored toga, podaci o korišćenju statičke energije, npr. za razmenu alata, može se izvesti iz merenja. Rezultat je skup polu-empirijskih jednačina za predviđanje SPE-a proizvoljnih proizvoda na mašini, ako su poznati pojedinačni proizvodni procesi.

#### 2.3.5.5 Korišćenje energije na nivou proizvodnog sistema

Prethodni modeli predviđanja SPE razvijeni su iz perspektive jediničnog procesa kako bi se kvantifikovalo korišćenje energije za izradu jednog proizvoda. Ovo omogućava procenu emisija ugljen-dioksida i ostalih komponenti baziranih na ugljeniku (*eng. Carbon footprint*) proizvoda i identifikaciju relativno intenzivnih energetski procesa. Međutim, ako se proizvodi samo mali broj odgovarajućeg proizvoda, identifikovane žarišne tačke mogu imati samo mali značaj u odnosu na ukupno korišćenje energije u proizvodnom sistemu. Stoga se ulaganja u mere poboljšanja možda neće isplatiti.

Da bi se verifikovala relevantnost žarišnih tačaka, njihov nivo snage i njihovo godišnje vreme u radu moraju se istovremeno uzeti u obzir. Ovo prati ideju uspostavljanja energetskeg portfolia predloženu u [141]. Generalno, postoje dve opcije za određivanje relevantnosti pristupne tačke. Izbor između ove dve opcije zavisi od broja različitih proizvoda ili familija proizvoda koji se proizvode u sistemu. Ako je broj različitih proizvoda mali, relativno je mali i napor za izvođenje SPE za svaki proizvod. Rezultat je baza podataka koja sadrži SPE za svaki proizvod tokom svakog koraka procesa. Da bi se potvrdila relevantnost jednog od ovih koraka procesa, SPE za svaki od  $m$  proizvoda koji prolaze kroz ovaj proces mora da se pomnoži sa godišnjim brojem odgovarajućeg proizvoda  $n_i$ :

$$E_{annual} = \sum_{i=1}^m (n_i SPE_i) \quad (2.22)$$

U mnogim slučajevima postoji veliki broj različitih proizvoda. Izvođenje SPE za svaki od njih možda nije prikladno, stoga su analizirani ključni proizvodi. To je dovoljan podatak da se proceni relevantnost mašina, ako se njihovo godišnje vreme rada evidentira u ERP sistemu kompanije (*eng. Enterprise Resource Planning*). Pretpostavlja se da se karakteristike korišćenja energije dotične mašine neznatno razlikuju za različite proizvode. Prosečni nivo snage mašine u proizvodnom režimu tada se može izvesti deljenjem SPE ključnog proizvoda sa njegovim vremenom ciklusa  $t_{cycle}$ . Ova vrednost može se pomnožiti sa godišnjim vremenom rada mašine  $t_{annual\_run}$ . Ako su dostupni dodatni podaci kao što su godišnja vremena podešavanja  $t_{annual\_setup}$ , oni se mogu pomnožiti sa odgovarajućom vrednošću parametra korišćenja energije (u ovom primeru  $P_{idle}$ ). Sledeća jednačina pokazuje izvođenje godišnjeg korišćenja energije mašine:

$$E_{annual} = \frac{SPE}{t_{cycle}} t_{annual\_run} + P_{idle} t_{annual\_setup} \quad (2.23)$$

Primena jedne od ove dve metode omogućava identifikaciju energetskeg žarišta u proizvodnji jednostavnim proračunima na osnovu prethodnih merenja. Ako su potencijali za poboljšanje identifikovani, rezultujuća ušteda može se proceniti korišćenjem istih jednačina. Ovo obezbeđuje osnovu za procenu povrata investicija u mere za povećanje energetske efikasnosti.

### 2.3.5.6 Primer primenjene metodologije

Metodologija je korišćena u studiji slučaja u proizvodnom sistemu koja proizvodi elemente za električnu mrežu. Ovaj sistem organizovan je po principu radnih stanica i proizvodi veliki izbor različitih proizvoda, od kojih većinu u serijskoj proizvodnji. Analizirane su 33 proizvodne mašine primenom prikazane metodologije. Dobijeni modeli mašina korišćeni su za izvođenje SPE-a sedam ključnih proizvoda koji predstavljaju najvažnije grupe proizvoda. Primeri mašina tipa 1, tipa 2 i tipa 4 su identifikovani, pri čemu analiza mašine tipa 4 automatski pokriva analizu mašine tipa 3.

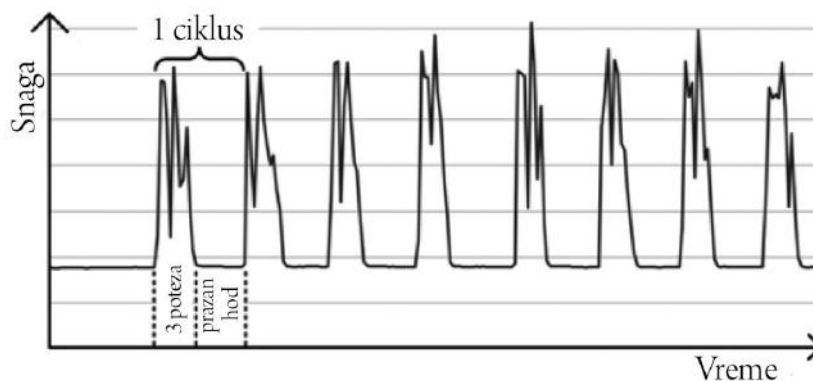
Kao reprezentivi mašina tipa 1, predstavljene su dve mašine koje pokrivaju i analizu prosečnog korišćenja energije sa vremenima ciklusa, kao i analizu statičkih energetskeg blokova. Predmet istraživanja predstavlja linija za premazivanje prahom koja se koristi za premazivanje serverskih rekova. Delovi su okačeni na transporter koji ih



neprestano transportuje kroz kabinu za pranje, zatim sušaru, kabinu za prskanje bojom i peć za sušenje. Transporter može da primi 55 delova i potrebno je 2,5 h da jedan deo prođe kroz sve korake procesa. Nakon uključivanja, mašina radi na konstantnom nivou snage koji se neznatno menja ako se za specijalne boje umesto automatske kabine za prskanje koristi ručna kabina za prskanje boje. Prosečna angažovana snaga  $P_{coat\_avg}$  odnosi se na vreme ciklusa jednog proizvoda (mesta na transporteru) da bi se odredila SPE:

$$E_{per\ part} = P_{coat\_avg} \frac{2.5 [h]}{55 [part]} \quad (2.24)$$

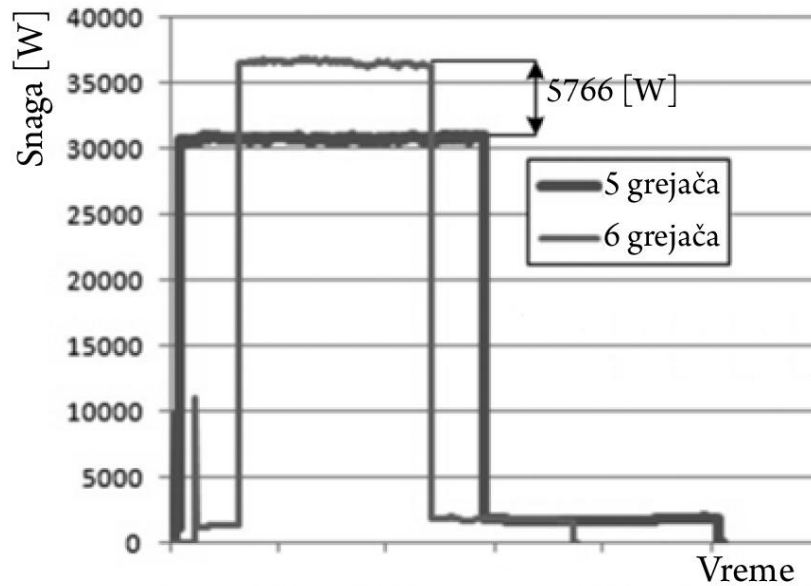
Kovački čekić kao druga mašina tipa 1 izvodi izbrojive poteze u vidu udaraca čekićem, koji se ni na koji način ne mogu podesiti. Slika 2.10 prikazuje krivu snage za proizvodnju 8 delova koji zahtevaju 3 udarca čekićem sa prosečnom količinom energije  $E_{stroke}$  po udarcu.



Slika 2.10 Kriva snage kovačkog čekića [138]

Svaki udarac traje 3 sekunde i nakon izvođenja 3 udarca, snaga pada na nivo praznog hoda  $P_{idle}$ . Na osnovu ovih energetske blokova, potražnja za energijom za proizvoljni proizvod na kovačkom čekiću može se predvideti korišćenjem jednačine (2.19), pri čemu jedine činjenice koje treba znati o proizvodu su broj potrebnih poteza i vreme njegovog ciklusa.

U nastavku su predstavljena dva predstavnika iz druge grupe mašina. Za prvu mašinu korišćen je metod prosečnog korišćenja energije parametra, dok je druga mašina modelovana parametarskim energetskim blokovima. Mašina za lepljenje u prahu koristi se za aglutiniranje setova žice koji se stavljaju na transporter i prolaze kroz mlaznice za prskanje praha, a zatim kroz zonu grejanja i hlađenja. U zavisnosti od dužine garnitura žica i zahtevane čvrstoće, aktivno je između četiri i šest jedinica grejnih mlaznica. Izmerena su dva ciklusa (pet naspram šest aktivnih jedinica) dok su rezultati prikazani na slici 2.11.



Slika 2.11 Mašina za lepljenje u prahu - 5 naspram 6 aktivnih grejača [138]

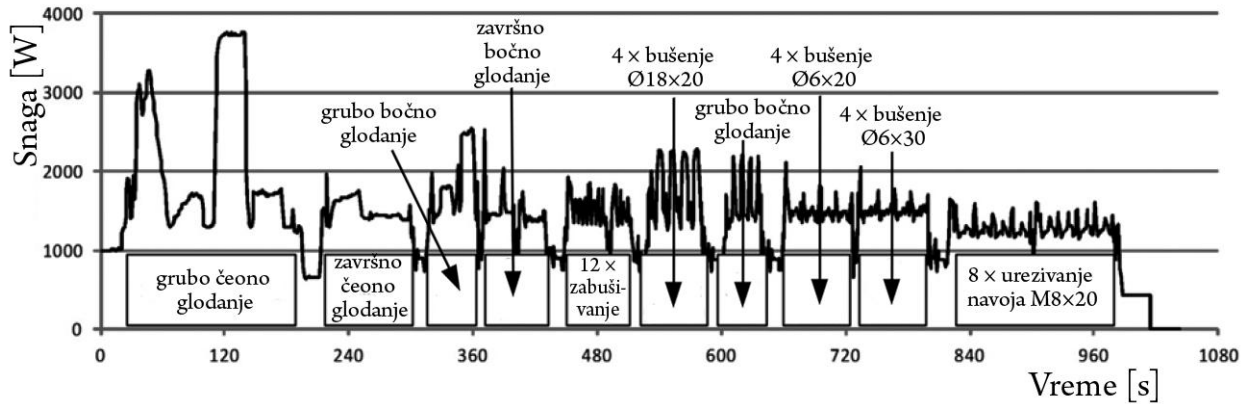
Izvedena jednačina za predviđanje nivoa snage formulisana je na sledeći način:

$$P = 1678 [W] + n_{heater} \cdot 5766 [W] \quad (2.25)$$

Vreme ciklusa proizvodnje može se izvesti iz veličine serije pošto transporter radi konstantnim tempom. Čim poslednja žica na transporteru napusti zonu grejanja, grejači se isključuju, ali mašina i dalje radi sa osnovnim opterećenjem sve dok poslednja žica ne dođe do kraja zone hlađenja. Ovo ponašanje razmatrano je pri izvođenju modela mašine. Međutim, radi jednostavnosti, pretpostavljena je standardna veličina partije. Indukcioni grejač modelovan je korišćenjem parametarskih energetskih blokova. Utvrđeno je da se nivo snage u procesu grejanja i trajanje za jedan proizvod mogu podesiti. Oba faktora zajedno određuju količinu energije koja karakteriše jedan proizvod, a zavise od zapremine materijala. Nije bilo potrebno istraživati ponašanje različitih materijala jer se samo čelični delovi zagrevaju. Stoga je zapremina radnog komada izabrana kao ključni parametar procesa i izmerena su dva različita predmeta rada kako bi se mogla izvesti potreba za energijom po  $\text{cm}^3$  ( $e_{heat} [\text{Wh}/\text{cm}^3]$ ) materijala. Između dva proizvoda, snaga opada do nivoa pripravnosti na jednu sekundu za bilo koji proizvod, tako da se ne mora uzeti u obzir vreme ciklusa. Umesto toga, koristi se fiksna količina energije  $E_{idle}$ , odnosno:

$$E_{part} = E_{idle} + V_{part} \cdot e_{heat} \quad (2.26)$$

Po predloženoj metodologiji analiziran je i CNC obradni centar. Merenja su obavljena sa radnim komadom koji zahteva sve različite radne klase za koje je mašina sposobna. Slika 2.12 prikazuje odgovarajuće progresije krive snage.



Slika 2.12 Odgovarajuće progresije krive snage za CNC obradni centar [138]

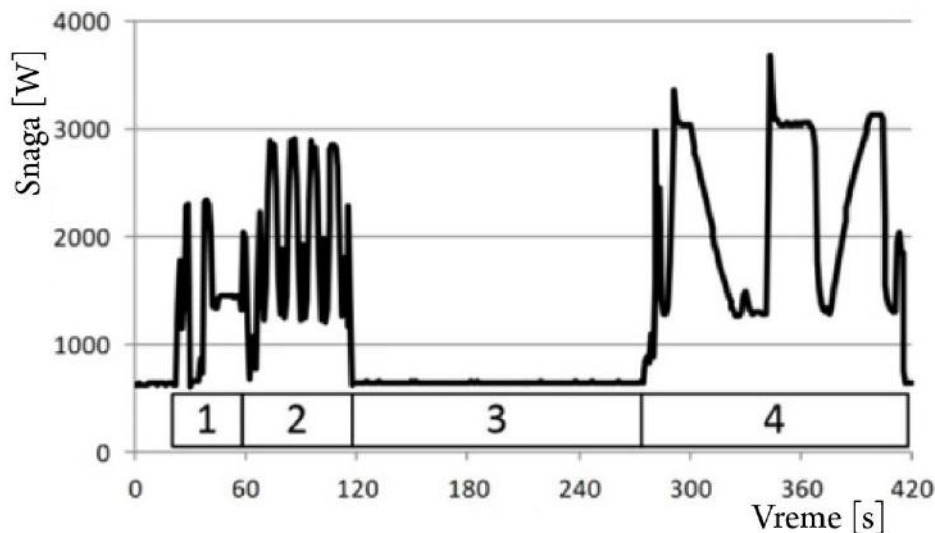
Sledeći skup jednačina (tabela 2.2) izveden je za različite klase operacija. Operacije se sortiraju prema njihovim ključnim procesnim parametrima (dubina bušotine, zapremina, površina). Bušenje i urezivanje navoja uzrokuju slično ponašanje korišćenja energije koje uglavnom zavisi od dubine provrta/navoja, dok prečnik nema nikakav uticaj. Za svaki otvor, količina energije za operaciju zabušivanja  $E_{pointing}$  mora se dodati. U slučaju da su istovremeno uključeni i čeonno i bočno glodanje (glodanje ramena ili kanala), potrebno je uzeti u obzir prosečnu SPE. Kad god je potrebna zamena alata, mora se dodati pripadajuća količina energije  $E_{tool\_exchange}$ .

Tabela 2.2 Poluempirijske jednačine za CNC obradni centar [138]

Jednačina	Ključni procesni parametar
$E_{bore/tread} = h_{depth}[cm] \cdot 2,76 \left[ \frac{Wh}{cm} \right]$	$h_{depth}$ - dubine provrta/navoja
$E_{pointing} = 1,34 [Wh]$	/
$E_{rough\_face\_mill} = V[cm^3] \cdot 0,525 \left[ \frac{Wh}{cm^3} \right]$	$V$ - mašinski obrađena zapremina
$E_{rough\_side\_mill} = V[cm^3] \cdot 1,383 \left[ \frac{Wh}{cm^3} \right]$	
$E_{rough\_face \& side\_mill} = V[cm^3] \cdot 0,954 \left[ \frac{Wh}{cm^3} \right]$	
$E_{finish\_face\_mill} = A[cm^2] \cdot 0,069 \left[ \frac{Wh}{cm^2} \right]$	$A$ - mašinski obrađena površina
$E_{finish\_side\_mill} = A[cm^2] \cdot 0,169 \left[ \frac{Wh}{cm^2} \right]$	
$E_{tool\_exchange} = 8,1 [Wh]$	/

Sa datim skupom jednačina može se predvideti potreba za energijom za proizvoljni predmeta rada (za isti tip materijala), ako su poznati njegovi sirovinski i finani oblik. Ovo je neophodno da bi se odredila količina materijala koji se obrađuje.

Za potrebe validacije, predviđanje je urađeno sa nasumično odabranim delom. Sve količine energije za različite operacije su predviđene korišćenjem datih jednačina. Ceo proces je izmeren i zahtevao je 160,31 Wh od početka do kraja (slika 2.13).



Slika 2.13 Merenje validacije sa obeleženim procesnim koracima [138]

Količine energije za pojedinačne operacije od 1 do 4 su izvučene iz merenja i uključuju odgovarajuće izmene alata. Tabela 2.3 upoređuje predviđanje i merenja. Može se videti da se čak i uz velika pojednostavljenja mogu predvideti veličine bliske merenju, što je veoma korisno jer je potreban prilično mali napor.

Tabela 2.3 Poređenje predviđanja i merenja [138]

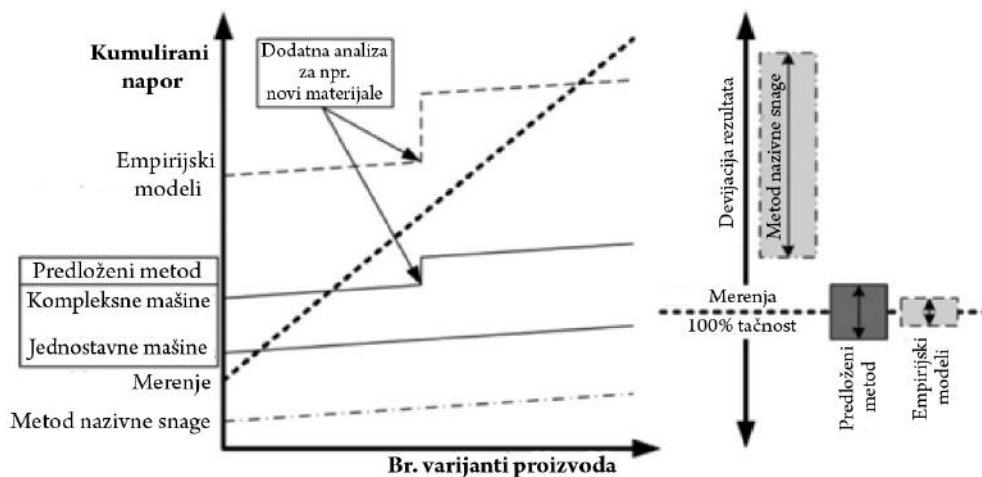
#	Operacija	Predviđeno [Wh]	Izmereno [Wh]	Razlika [%]
1	Zamena alata: bočno glodalo*	8,1	13,6	+ 4,6
	Završno bočno glodanje $A = 18,1 \times 2 \text{ cm}^2 = 36,2 \text{ cm}^2$	6,12		
2	Zamena alata: burgija $\varnothing 18^*$	8,1	30,18	+ 17,8
	4 × zabušivanje	5,36		
	4 × bušenje ( $h = 2 \text{ cm}$ )	22,08		
3	Mirovanje za ponovno stezanje (150 s)	27,42	28,20	- 2,7
4	Zamena alata: bočno glodalo*	8,1	85,72	+ 21,1
	Grubo bočno i čeonno glodanje:			
	2 × kanal ( $V = 2 \times 25,38 \text{ cm}^3$ ) + grubo bočno glodanje ( $V = 1,5 \times 11,4 \times 2 \text{ cm}^3 = 34,2 \text{ cm}^3$ )	95,73		
Ukupno za proces		181,01	160,31	+ 12,9

\*Zamena alata nije eksplicitno merena ali je uključena u operaciju

Korisnost ovog metoda najbolje se vidi upoređivanjem predviđene vrednosti od 181,01 Wh na osnovu ove metode, sa predviđanjem zasnovanim na nazivnoj snazi kao što je predloženo u [141]. Obradni centar ima nazivnu snagu od 20 kVA, a ceo proces traje 420 sekundi uključujući vreme mirovanja za ponovno stezanje. To bi rezultiralo predviđenom vrednošću od 2333 Wh, što je skoro 13 puta više od stvarnog korišćenja energije u ovom slučaju. Ovo poređenje pokazuje da predstavljeni model pruža mnogo bolju tačnost uz umereni napor.

Analiza energetskih žarišnih tačaka proizvodnog sistema sprovedena je u skladu sa pododeljkom 2.3.5.5. Tako su identifikovane sve mašine koje značajno doprinose ukupnoj potražnji za energijom u sistemu kako bi se mogle primeniti ciljno orijentisane mere poboljšanja.

Predložena metodologija predviđanja korišćenja energije, koja je laka za implementaciju i oduzima znatno manje vremena od empirijskih modela, superiornija je od procena zasnovanih na nazivnim snagama (slika 2.14).



Slika 2.14 Procena uloženog napora i tačnosti [138]

Međutim, i pored brojnih prednosti, brzine primene i lake implementacije, predloženi metod jednostavno nije zadovoljavajući posmatrano iz aspekta postavljenih hipoteza ovog istraživanja. Iako je potrebno inicijalno uložiti određeni napor, kontinualno merenje je neophodno kako bi se na osnovu uvida u dinamiku energetskih tokova mogla identifikovati karakteristična stanja u kojim se posmatrani sistem može naći, odnosno profili ponašanja elemenata sistema, kao i vremenski periodi pojave određenih nelinearnosti u tom ponašanju, koje ukazuju na pojavu anomalija u funkcionisanju sistema.

Naredno poglavlje pruža uvid u savremene tehnologije koje omogućavaju konvergenciju prethodno prikazanih konvencionalnih pristupa kako be se realizovali inteligentni proizvodni sistemi u kojima je moguće automatizovano profilisanje ponašanja sistema, uvid u forenziku događaja, pouzdano prediktivno održavanje, kao i donošenje odluka u realnom vremenu.

## 2.4 Tranzicija ka inteligentnim proizvodnim sistemima sa fokusom na značaj i ulogu energije

Proizvodni sistemi sve više prihvataju pojam konvergencije između sajber i fizičkog sveta. Razvijene su proizvodne strategije, kao što je Industrija 4.0, odnosno nemačka strateška inicijativa, koja ima za cilj stvaranje inteligentnih fabrika u kojima se tehnologije proizvodnje unapređuju i transformišu pomoću sajber-fizičkih sistema (*eng. Cyber Physical Systems, CPS*), IoT-a, računarstva u oblaku (*eng. Cloud Computing*) [158], [159], itd. U eri industrije 4.0, proizvodni sistemi su u stanju da nadgledaju fizičke procese, stvarajući takozvanog „digitalnog blizanca“ ili „sajber blizanca“ (*eng. Digital Twin*) fizičkog sveta i donose pametne odluke u realnom vremenu putem komunikacije i saradnje sa ljudima, mašinama, sensorima i tako dalje [160]. Industrija 4.0 kombinuje tehnologije ugrađenog proizvodnog sistema sa inteligentnim proizvodnim procesima kako bi utrla put novom tehnološkom dobu koje će fundamentalno transformisati industrijske, pa tako i proizvodne lance vrednosti, ali i poslovne modele.

U kontekstu Industrije 4.0, proizvodni sistemi su ažurirani na inteligentni nivo. Inteligentna proizvodnja koristi prednosti naprednih informacija i proizvodnih tehnologija za postizanje fleksibilnih, pametnih i rekonfigurabilnih proizvodnih procesa [161] i omogućava da svi fizički procesi i protok informacija budu dostupni kada i gde su potrebni u holističkim proizvodnim lancima snabdevanja, više industrija, malih i srednjih preduzeća (MSP) i velikih kompanija [162], [163]. Inteligentna proizvodnja zahteva određene tehnologije da bi se omogućilo da uređaji ili mašine menjaju svoja ponašanja kao odgovor na različite situacije i zahteve na osnovu prošlih iskustava i kapaciteta za učenje [164]. Ove tehnologije omogućavaju direktnu komunikaciju sa proizvodnim sistemima, omogućavajući na taj način rešavanje problema i donošenje adaptivnih odluka na vreme. Neke tehnologije karakterišu koncepti veštačke inteligencije (*eng. Artificial Intelligence, AI*), koja omogućava proizvodnim sistemima da uče iz iskustava kako bi na kraju ostvarili povezanu, inteligentnu i sveprisutnu industrijsku praksu.

Slični koncepti inteligentnoj proizvodnji uključuju proizvodnju zasnovanu na oblaku i proizvodnju omogućenu implementacijom IoT-a. Da bi se u potpunosti razumela inteligentna proizvodnja u kontekstu Industrije 4.0, pregledni rad [165] analizira 165 radova iz Scopus i Google Scholar baza podataka i jasno predstavlja ključne koncepte, razmatra ključne tehnologije i raspravlja o svetskim kretanjima u inteligentnoj proizvodnji, uključujući slučajeve vladinih tela i gigantskih kompanija u EU, SAD, Japanu i Kini.

### 2.4.1 Osnovni tehnološki koncepti

Osnovni koncepti i tehnologije koje omogućavaju proizvodnim sistemima dosezanje naprednog nivoa iz aspekta proizvodnih mogućnosti su:

- koncept inteligentne proizvodnje,
- proizvodnja podržana IoT-jem,
- proizvodnja zasnovana na oblaku,
- sajber-fizički sistemi,
- analitika velikih podataka, i
- informaciono-komunikacione tehnologije.

Pomenuti koncepti značajni su u kontekstu Industrije 4.0, jer će savremeni, napredni proizvodni sistemi imati ogromne efekte na naše buduće živote. Oni dele određene sličnosti, kao što su ciljevi inteligentnog/pametnog donošenja odluka u proizvodnim sistemima i optimizacija različitih proizvodnih resursa [166]. Nekoliko tehnologija, kao što su IoT, računarstvo u oblaku i analiza velikih podataka (eng. *Big Data Analysis, BDA*), koriste se u okviru ovih koncepata. Istraživanja fokusirana na ove koncepte su različita i zasnovana su na različitim idejama, međutim ne treba umanjiti značaj i potencijal tehnologija koje ovde nisu spomenute.

Na primer, inteligentna proizvodnja koncentriše se na interakcije mašina međusobno ali i sa čovekom, dok proizvodnja podržana IoT-jem obezbeđuje podatke u realnom vremenu za modele odlučivanja u proizvodnji i modeliranje SMO-a (eng. *Smart Manufacturing Objects, SMO*). Proizvodnja u oblaku fokusira se na konfiguraciju i modeliranje proizvodnih usluga. Iz perspektive primene, proizvodnja podržana IoT-jem je uspešno implementirana, sa velikim brojem industrijskih slučajeva koji su prijavljeni u literaturi, podržani profesionalnom obukom i naučnim konceptima. Međutim, inteligentna proizvodnja i proizvodnja u oblaku su još uvek u fazi istraživanja ili dokazivanja koncepta i imaju ograničen broj slučajeva u praksi. Prijavljeni slučajevi inteligentne proizvodnje i proizvodnje u oblaku podeljeni su u dve kategorije (ilustracije arhitekture sistema i demonstracije unapred određenih scenarija u virtuelnom proizvodnom sistemu). Oni su ipak još uvek daleko od implementacije u praksi.

#### 2.4.1.1 Koncept inteligentne proizvodnje

Inteligentna proizvodnja (poznata i kao pametna proizvodnja) širok je koncept proizvodnje sa ciljem optimizacije proizvodnje i transakcija proizvoda uz punu upotrebu naprednih informacija i proizvodnih tehnologija [167]. Smatra se novim proizvodnim modelom zasnovanim na inteligentnoj nauci i tehnologiji koji u velikoj meri unapređuje dizajn, proizvodnju, upravljanje i integraciju celog životnog ciklusa tipičnog proizvoda. Praćenje životnog ciklusa proizvoda može se olakšati korišćenjem različitih pametnih senzora, adaptivnih modela donošenja odluka, naprednih materijala, inteligentnih uređaja i analitike podataka [168]. Takođe, ovo pozitivno utiče i na efikasnost proizvodnje, kvalitet proizvoda i nivo usluga koji će na taj način biti poboljšani [169]. Slično, konkurentnost proizvodnog preduzeća može se poboljšati njegovom sposobnošću da se suoči sa dinamikom i fluktuacijama globalnog tržišta.

Jedan oblik realizacije ovog koncepta je sistem inteligentne proizvodnje (eng. *Intelligent Manufacturing System, IMS*), koji se smatra proizvodnim sistemom sledeće generacije, a koji se realizuje usvajanjem novih modela, novih formi i novih metodologija za transformaciju tradicionalnog proizvodnog sistema u pametan sistema. U eri industrije 4.0, IMS koristi arhitekturu orijentisanu na usluge (eng. *Service-Oriented Architecture, SOA*) putem interneta kako bi pružio kolaborativne, prilagodljive, fleksibilne i rekonfigurabilne usluge krajnjim korisnicima, omogućavajući tako visoko integrisani sistem proizvodnje ljudi-mašina [170]. Ova visoka integracija saradnje ljudi i mašina ima za cilj uspostavljanje ekosistema različitih proizvodnih elemenata uključenih u IMS tako da se organizacioni, menadžerski i tehnički nivoi mogu neprimetno kombinovati. Primer IMS-a je sajber-fizička fabrika Festo Didactic, koja nudi tehničku obuku i kvalifikacije velikim prodavcima, univerzitetima i školama kao deo strateške inicijative nemačke vlade Platform Industrie 4.0 [171].

AI igra suštinsku ulogu u IMS-u tako što pruža tipične karakteristike kao što su učenje, rasuđivanje i delovanje. Korišćenjem AI tehnologija, ljudsko učešće u IMS-u može se svesti na minimum. Na primer, materijali i proizvodne

kompozicije mogu se automatski rasporediti, a proizvodni procesi i proizvodne operacije mogu se pratiti i kontrolisati u realnom vremenu [172], [173]. Kako Industrija 4.0 nastavlja da dobija priznanja, autonomno otkrivanje, inteligentno međusobno povezivanje, inteligentna analiza učenja i inteligentno donošenje odluka će na kraju biti realizovani. Na primer, inteligentni sistem raspoređivanja može da omogući planiranje poslova na osnovu AI tehnika i rešavanja problema, i može se ponuditi drugim korisnicima kao usluga na internet platformi [174].

#### 2.4.1.2 Proizvodnja podržana IoT-jem

Proizvodnja podržana IoT- jem se odnosi na napredni princip u kome se tipični proizvodni resursi pretvaraju u pametne proizvodne objekte (SMO) koji su u stanju da oseće, međusobno se povežu i međusobno deluju kako bi automatski i prilagodljivo sproveli logiku proizvodnje [175]. U okviru proizvodnih okruženja podržanih IoT- jem, veze čovek-čovek (*eng. Human-to-Human, H2H*), čovek-mašina (*eng. Human-to-Machine, H2M*) i mašina-mašina (*eng. Machine-to-Machine, M2M*) se realizuju radi inteligentne percepcije [176]. Stoga, korišćenje na zahtev i efikasno deljenje resursa može biti omogućeno primenom IoT tehnologija u proizvodnji. IoT se smatra modernim proizvodnim konceptom u okviru industrije 4.0 gde infrastruktura najsavremenije informacione tehnologije (IT) za akviziciju i distribuciju podataka u velikoj meri utiče na performanse proizvodnog sistema.

Proizvodnju podržanu IoT- jem karakteriše akvizicija i distribucija podataka u realnom vremenu između različitih proizvodnih resursa kao što su mašine, radnici, materijali i radni nalozi [177]. Akvizicija i distribucija podataka u realnom vremenu zasnovani su na ključnim tehnologijama kao što su radiofrekventna identifikacija (RFID) i standardi bežične (WiFi) komunikacije.

Iz tehnološkog aspekta, IoT se odnosi na svet međusobnog umrežavanja u kome su različiti objekti ugrađeni sa elektronskim senzorima, aktuatorima ili drugim digitalnim uređajima tako da mogu biti umreženi i povezani u svrhu prikupljanja i razmene podataka [178]. Generalno, IoT je u stanju da ponudi naprednu povezanost fizičkih objekata, sistema i usluga, omogućavajući komunikaciju između objekata i deljenje podataka. U različitim industrijama, kontrola i automatizacija za osvetljenje, grejanje, mašinsku obradu, robotske manipulatore i daljinsko praćenje mogu se postići implementacijom IoT rešenja. Jedna ključna tehnologija u IoT-u je tehnologija automatske identifikacije (auto-ID), koja se može koristiti za kreiranje pametnih objekata. IoT je zamišljen kao veća konvergencija najsavremenijih tehnologija kao što su sveprisutni bežični standardi, analitika podataka i mašinsko učenje [55]. Ovo implicira da će veliki broj tradicionalnih oblasti biti pogođen IoT tehnologijom, jer je ugrađena u svaki aspekt svakodnevnog života. RFID tehnologija daje jedan takav primer gde je prijavljeno da će skoro 20,8 milijardi uređaja biti povezano i u potpunosti koristiti RFID do kraja 2020. godine [179]. Takav pomak utiče na većinu industrije, a posebno proizvodnih sektora. RFID tehnologija je korišćena za identifikaciju različitih objekata u skladištima, radnim stanicama, logističkim kompanijama, distributivnim centrima, fazama odlaganja/recikliranja, itd. [180]. Nakon identifikacije, takvi objekti poseduju pametne senzore koji im omogućavaju da se povežu i intereaguju jedni sa drugima kroz specifične oblike međusobne povezanosti, što može stvoriti ogromnu količinu podataka iz njihovog kretanja ili osećanja ponašanja. Međusobna povezanost između pametnih objekata je unapred definisana i takvim objektima se zadaju specifične aplikacije ili logički zadaci, kao što su proizvodni postupci, koje prate nakon opremanja RFID čitačima i tagovima [181]. Primene IoT rešenja za unapređenje performansi proizvodnih sistema su brojne i biće detaljnije sagledane iz aspekta korišćenja energije.



### 2.4.1.3 *Proizvodnja zasnovana na oblaku*

Proizvodnja u oblaku se odnosi na napredni proizvodni model uz podršku računarstva u oblaku, IoT-a, virtuelizacije i tehnologija orijentisanih na usluge, koji transformišu proizvodne resurse u usluge koje se mogu sveobuhvatno deliti i distribuirati [182]. Pokriva produženi celokupni životni ciklus proizvoda, od njegovog dizajna, simulacije, proizvodnje, testiranja i održavanja, i stoga se obično smatra paralelnim, umreženim i inteligentnim proizvodnim sistemom (tzv. „Proizvodni oblak“) gde se proizvodnim resursima i kapacitetima može inteligentno upravljati. Odnosno, korišćenje proizvodnih usluga na zahtev može se obezbediti iz proizvodnog oblaka za sve tipove krajnjih korisnika [183].

Računarstvo u oblaku je opšti termin koji se odnosi na isporuku računarskih usluga putem virtuelizovanih i skalabilnih resursa putem Interneta [182], [184]. Skalabilnost resursa čini računarstvo u oblaku interesantnim jer omogućava organizacijama da počnu sa malim i ulažu više resursa samo ako dođe do povećanja potražnje za dodatnim uslugama [185]. Na osnovu preporuka Nacionalnog instituta za standarde i tehnologiju (NIST), idealan oblak bi trebalo da ima pet karakteristika: samoposluživanje na zahtev, širok pristup mreži, objedinjavanje resursa, brzu elastičnost i merenu uslugu. Ovaj model oblaka sastoji se od četiri modela primene – javnog, privatnog, društvenog i hibridnog – i tri modela isporuke – „softver kao usluga“, „platforma kao usluga“ i „infrastruktura kao usluga“. Organizacije svih tipova i veličina usvajaju koncept računarstva u oblaku kako bi povećale svoj kapacitet sa minimalnim budžetom i bez ulaganja u licenciranje novog softvera, ugradnju nove infrastrukture ili obuku novog osoblja [186]. Uprkos značajnim prednostima računarstva u oblaku, kritični izazovi utiču na pouzdanost ovog koncepta koji je u povoju [187]. Istraživači i pružaoci usluga sprovedli su brojne studije kako bi identifikovali i klasifikovali probleme u vezi sa računarstvom u oblaku. Na osnovu literature, najznačajnija zabrinutost u vezi sa računarstvom u oblaku je vezana za privatnost i bezbednost [188], [189]. Ostali izazovi tiču se upravljanja podacima i alokacije resursa [190], [191], balansiranje opterećenja [192], [193], skalabilnost i dostupnost [194], migracije na oblake i kompatibilnosti [195], [196], kao i interoperabilnosti i komunikacije između oblaka [197], [198] sa fokusom na povećanje pouzdanosti i efikasnosti sistema zasnovanih na oblaku. Ovi izazovi i njihova najprikladnija rešenja obrađeni su u [199].

U proizvodnji zasnovanoj na oblaku, različiti proizvodni resursi i kapaciteti mogu se inteligentno meriti i povezati u oblak. IoT tehnologije mogu se koristiti za automatsko upravljanje i kontrolu ovih resursa tako da se mogu digitalizovati za distribuciju. Tehnologije orijentisane na usluge i računarstvo u oblaku osnovna su podrška za ovaj koncept. Kao rezultat, proizvodni resursi i kapaciteti mogu biti virtuelizovani, inkapsulirani i cirkulisani u različite servise kojima se može pristupiti, pozvati ih i implementirati [200]. Takve usluge mogu biti kategorisane i agregirane, prema unapred definisanim specifičnim pravilima. Postoji mnogo različitih vrsta proizvodnih oblaka koji upravljaju različitim proizvodnim uslugama [201]. Različiti korisnici mogu da pretražuju, pristupaju i pozivaju kvalifikovane usluge preko virtuelnog proizvodnog okruženja ili platforme.

Načini primene u oblaku, modeliranje proizvodnih resursa i usklađivanje zahteva i usluga su ključni problemi u proizvodnji zasnovanoj na oblaku. Pošto treba uspostaviti virtuelno proizvodno okruženje ili rešenje za deljenje usluga, potrebni su pristupi primeni u oblaku kao što su javni, privatni, društveni i hibridni oblaci kako bi se krajnjim korisnicima obezbedio jedinstven i sveprisutan pristup. Na primer, hibridni oblak mešavina je nekoliko oblaka koji nudi više načina primene zajedno sa prednostima kao što su fleksibilna primena i lak pristup aplikacijama za više

sistema [202]. Različite proizvodne resurse kao što su mašine i montažne linije takođe treba modelovati u usluge koje se mogu distribuirati i deliti. Nemačka udruženja, kao što je Nemačko udruženje proizvođača električne i elektronske opreme (ZVEI) već su razvila napredan pristup i kreirali referentnu arhitekturu na proizvodima i uslugama industrije 4.0 (Referentni arhitektonski model industrije (RAMI)) [203]. Takav razvoj je izazovan, jer veliki broj fizičkih proizvodnih objekata različitih tipova i heterogenih formata može doneti neočekivanu složenost modeliranja [204]. Zahtevi proizvodnje i usklađivanje usluga u okviru proizvodnje u oblaku su važni, međutim njihovo usklađivanje ne uključuje samo optimalno rešenje za pružaoce usluga i kupce, već se sastoji i od planiranja usluga, rasporeda i izvršenja [205].

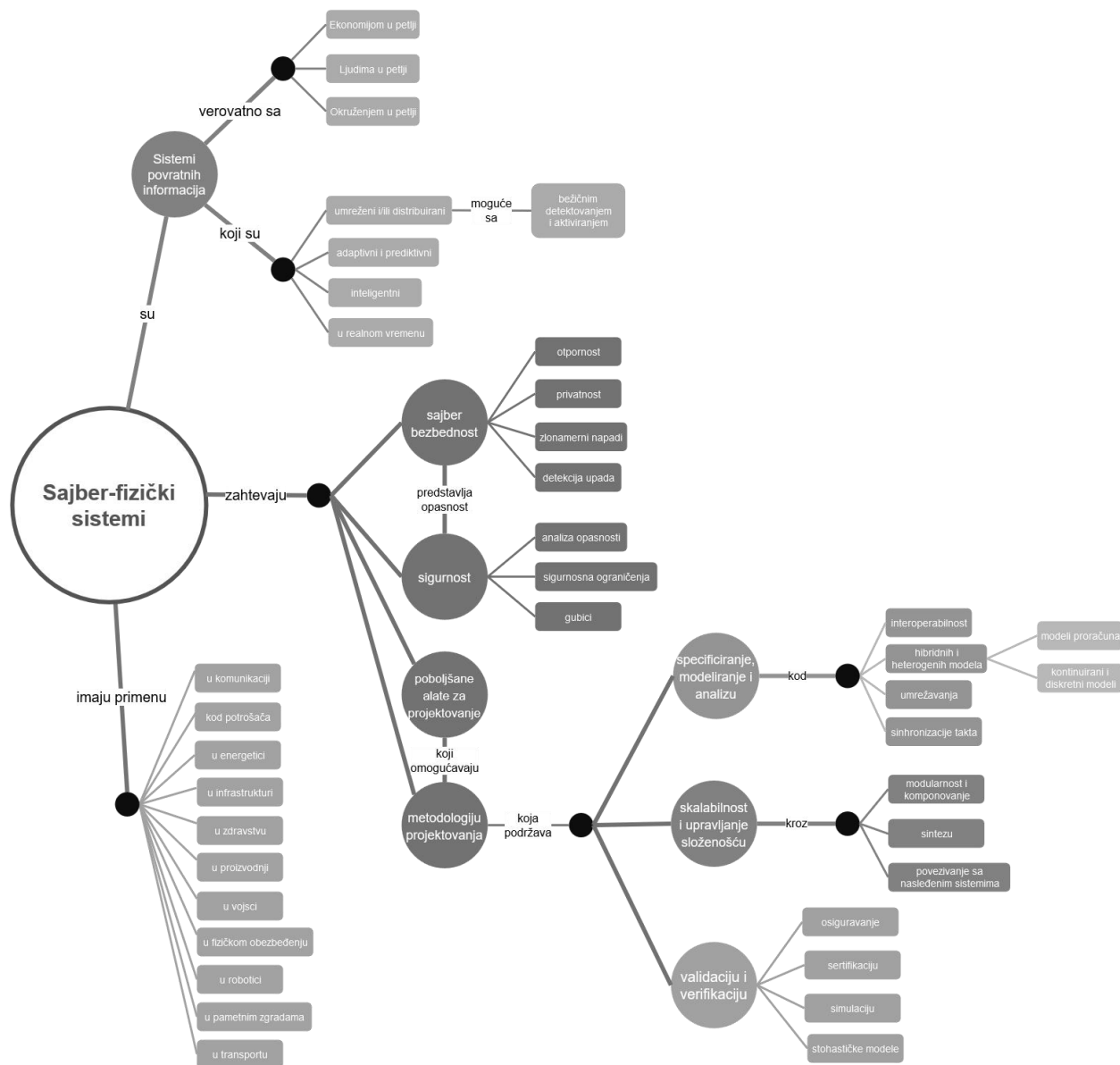
#### 2.4.1.4 Sajber-fizički sistemi

Sajber-fizički sistemi (CPS,) predstavljaju integracije računanja, umrežavanja i fizičkih procesa. Ugrađeni računari i mreže nadgledaju i kontrolišu fizičke procese, sa povratnim spregama gde fizički procesi utiču na proračune i obradu. Ekonomski i društveni potencijal takvih sistema je znatno veći od onoga što je ostvareno, a širom sveta se ulažu velika sredstva u razvoj tehnologije. Tehnologija se nadovezuje na stariju (ali još uvek veoma mladu) disciplinu ugrađenih sistema, računara i softvera ugrađenih u uređaje čija osnovna misija nije računanje, poput automobila, igraćaka, medicinskih uređaja i naučnih instrumenata, već integracija dinamike fizičkih procesa sa procesima softvera i umrežavanja, pružajući apstrakcije i tehnike modeliranja, dizajna i analize za integrisanu celinu.

Kao disciplina, CPS je inženjerska disciplina, fokusirana na tehnologiju, sa jakim temeljima u matematičkim apstrakcijama. Ključni tehnički izazov je povezivanje apstrakcija koje su evoluirale vekovima za modeliranje fizičkih procesa (diferencijalne jednačine, stohastički procesi itd.) sa apstrakcijama koje su evoluirale decenijama u računarstvu (algoritmi i programi, koji pružaju „proceduralnu epistemologiju“). Prve apstrakcije se fokusiraju na dinamiku (evoluciju stanja sistema tokom vremena), dok se druge fokusiraju na procese transformacije podataka. Računarska nauka, ukorenjena u Turing-Church pojmu računanja, apstrahuje osnovna fizička svojstva, posebno protok vremena, koja su potrebna da bi se dinamika fizičkog sveta uključila u domen diskursa [206], [207].

CPS je mehanizam kroz koji su fizički objekti i softver blisko isprepleteni, omogućavajući različitim komponentama da međusobno komuniciraju na mnoštvo načina za razmenu informacija [208], [209]. CPS uključuje veliki broj transdisciplinarnih metodologija kao što su teorija kibernetike, mašinstvo i mehatronika, nauka o dizajnu proizvodnih sistema i pripadajućih procesa, kao i kompjuterska nauka. Jedna od ključnih tehničkih metoda su ugrađeni sistemi, koji omogućavaju visoko koordinisan i kombinovan odnos između fizičkih objekata i njihovih računarskih elemenata ili usluga [210]. Sistem sa omogućenim CPS-om, za razliku od tradicionalnog ugrađenog sistema, sadrži umrežene interakcije koje su dizajnirane i razvijene sa fizičkim ulazom i izlazom, zajedno sa njihovim sajber-upletenim uslugama kao što su kontrolni algoritmi i računarski kapaciteti. Dakle, veliki broj senzora igra važnu ulogu u CPS-u. Na primer, višestruki senzorski uređaji široko se koriste u CPS-u za postizanje različitih namena (npr. ekrani osetljivi na dodir, svetlosni senzori, senzori sile, itd.). Bez obzira na to, integracija nekoliko različitih podsistema je dugotrajna i skupa, a ceo sistem mora da bude operativan i funkcionalan. Heterogenost i složenost CPS aplikacija ukazuje na nekoliko izazova u razvoju i projektovanju sistema i metodologija kontrole visoke pouzdanosti, bezbednosti i privatnosti [211]. Mnoge industrije su pokrenule projekte u domenu CPS. Na primer, Festo Motion Terminal je standardizovana platforma koja u potpunosti koristi inteligentnu fuziju mehanike, elektronike, ugrađenih senzora i kontrole, kao i softvera/aplikacija. Digitalna pneumatika omogućava samoprilagođavanje i

samopodešavanje podsistema. Tipične CPS aplikacije su prijavljene u obliku korišćenja autonomnih sistema zasnovanih na komunikaciji senzorima. Ogroman broj bežičnih senzorskih mreža može da nadgleda aspekte životne sredine tako da se informacije iz okruženja mogu centralno kontrolisati i upravljati iz aspekta optimizovanog donošenja odluka [212]. Na slici 2.15 CPS koncept prikazan je u formi mape, nalik stablu odlučivanja.



Slika 2.15 CPS konceptualna mapa (Adaptirano prema [209])

### 2.4.1.5 Analitika velikih podataka

Sa povećanjem implementacije IoT rešenja, podaci postaju sve dostupniji i sveprisutniji u mnogim industrijama, što rezultira pitanjem velikih podataka (*eng. Big Data, BD*) [213]. BD obično potiču iz različitih kanala, uključujući senzore, uređaje, video/audio opremu, mreže, evidencije, transakcijske, veb i fidove društvenih medija [214]. Pod ovim okolnostima, „okruženje velikih podataka“ postepeno se oblikovalo u proizvodnom sektoru. Iako je

napredak IoT-a (npr. pametni senzori) pojednostavio prikupljanje podataka, ostaje pitanje da li se ovi podaci mogu pravilno obraditi kako bi se pružile prave informacije za pravu svrhu u pravo vreme [215]. U BD okruženju, skupovi podataka mnogo su veći i mogu biti previše složeni za konvencionalni softver za analizu podataka [216]. Stoga, za organizacije i proizvođače sa obiljem operativnih podataka, napredne tehnike analitike (BDA) ključne su za otkrivanje skrivenih obrazaca, nepoznatih korelacija, trendova, preferencija i drugih korisnih informacija. Dublja analiza različitih podataka sa mašina i procesa može ostvariti povećanu produktivnost i konkurentnost proizvodnog sistema [217]. Na primer, u toku biofarmaceutске proizvodnje, potrebno je pratiti stotine promenljivih kako bi se garantovala tačnost, kvalitet i prinos, pri čemu se obradom velikih podataka mogu otkriti kritični parametri koji imaju najveći uticaj na varijaciju kvaliteta, odnosno prinosa [218].

#### 2.4.1.6 Informaciono-komunikacione tehnologije

Informaciono-komunikacione tehnologije (*eng. Information and communications technologies, ICT*) predstavljaju proširene IT koje naglašavaju objedinjene komunikacije, odnosno integraciju telekomunikacija, kao i druge tehnologije koje su u stanju da skladište, prenose i manipulišu podacima ili informacijama [219]. ICT pokriva širok spektar računarskih nauka i tehnika za obradu signala kao što su bežični sistemi, međuverški softver, audio-vizuelni i ostali sistemi. Fokusiraju se na prenos informacija putem različitih elektronskih medija kao što su standardi žične ili bežične komunikacije, i od ključnog su značaja je u inteligentnoj proizvodnji, gde se proizvodne operacije i donošenje odluka u velikoj meri oslanjaju na podatke. Utvrđeno je da ICT ima značajan uticaj na organizaciju proizvodnje, tako da je bolja ICT za menadžere i radnike povezana sa većom autonomijom i širim rasponom kontrole [220]. Na primer, ICT smatra se jednim od faktora uspešnosti u evropskoj proizvodnoj kompetenciji, jer pomaže kompanijama da unaprede svoju poslovnu agilnost, fleksibilnost i produktivnost. Za MSP se pokazalo da su ICT od suštinskog značaja za konkurentnost, jer omogućavaju brze odgovore na dinamično tržište. Upotreba ICT olakšava rukovanje informacionim resursima i rezultira smanjenjem troškova i povećanjem usklađenosti klijenata [221]. U modernoj proizvodnoj eri, milijarde digitalnih uređaja imaju pristup mrežama zasnovanim na internetu. Ovaj brzi rast doveo je do toga da ICT postane kamen temeljac proizvodnih sistema, gde su brz i prilagodljiv dizajn, proizvodnja i isporuka visoko prilagođenih proizvoda omogućeni podrškom digitalne i virtuelne proizvodnje, modeliranja, simulacije i alata za vizuelizaciju [222]. ICT aplikacije u različitim industrijama imaju znatno dužu istoriju od drugih tehnologija kao što je na primer BDA. Razlog za to je u suštini da ICT predstavljaju proširenje računarskih tehnologija koje su u upotrebi već nekoliko decenija. Trenutne primene ICT se uglavnom fokusiraju na integraciju sa drugim tehnologijama kao što su računarstvo u oblaku i IoT, tako da se postojeći informacioni sistemi u industriji mogu kombinovati sa najsavremenijim tehnologijama. Upotreba ICT rezultovala je značajnim poboljšanjima u velikom broju slučajeva iz stvarnog života. Stoga, kompanije u industriji traže različita rešenja zasnovana na ICT-ma kako bi rešila svoje trenutne probleme. U okviru Industrije 4.0, može se predvideti da će se ICT dalje oslanjati na integraciju novih tehnologija u cilju rešavanja budućih izazova u različitim tipovima industrija.

### 3. RAZVOJ TEHNIČKOG REŠENJA I IZVOĐENJE EKSPERIMENATA

U ovom istraživanju proizvodni sistemi okarakterisani su kao nelinearni dinamički sistemi, uz osnovnu hipotezu da identifikacija i uvođenje nelinearnih članova (promenljivih) može imati značajan uticaj na poboljšanje performansi modela sistema. Pružanjem boljeg prikaza ponašanja sistema (usled niza nelinearnih aktivnosti koje stimulišu promene stanja sistema), koje se može pratiti kroz način i intenzitet korišćenja energije u posmatranom sistemu. Istraživanje je orijentisano na postizanje povoljnih uslova za implementaciju sistema dinamičkog upravljanja energijom implementacijom IoT-a i BD-a, kao veoma istaknutih tehnoloških koncepata Industrije 4.0. Nakon toga je moguće primeniti neke od ML/AI tehnika.

Za potrebe istraživanja i dokazivanja hipoteza, predloženo je nekoliko eksperimenata različitog tipa u zavisnosti od svrhe. Na samom početku, projektovano je i razvijeno hardversko rešenje za efikasno praćenje korišćenja energije brzoreaktivnih energetske sistema u industrijskim okruženjima. Ovo tehničko rešenje predstavlja uređaj za akviziciju podataka o intenzitetu struje i pripada kategoriji industrijskih IoT uređaja (IIoT, eng. Industrial Internet of Things).

Za potrebe dokazivanja prve dve hipoteze (H1 i H2) ovaj uređaj implementiran je u proizvodnom pogonu kompanije CNC Duo ML na Shizuoka SV-4020 vertikalnom mašinskom CNC centru. U ovom slučaju fokus istraživanja usmeren je na jednu kompleksnu mašinu, identifikaciju intenziteta korišćenja energije prilikom izvođenja operacije za potrebe eksperimenta i identifikaciju tipova ponašanja sa aspekta korišćenja energije.

Drugi eksperiment izveden je u proizvodnom pogonu kompanije Absolute CNC, pri čemu su posmatrane sve radne mašine koje učestvuju u procesu rada. Generisani rezultati iskorišćeni su kasnije za dokazivanje treće hipoteze (H3). U nastavku su detaljnije opisani izvođeni eksperimenti i prikazani su dobijeni rezultati uz diskusiju.

#### 3.1 Razvoj IIoT uređaja za akviziciju podataka

Usled brzog razvoja računarskih i mrežnih tehnologija, sposobnost da se prikupljaju, čuvaju, analiziraju i obrađuju podaci u informacije značajno je poboljšana. Tokom ove evolucije, IoT je zauzeo centralno mesto kao most između stvarnog (fizičkog) i virtuelnog (informacionog) sveta [223]. Generalno, IoT sistem se sastoji od 5 ključnih slojeva (perceptivni, mrežni, posredno-servisni, aplikacijski i poslovni sloj) koji se nalaze na 2 različita nivoa [224]. Perceptivni i mrežni slojevi integrisani su u ISL nivo (eng. *Information Sense Level, ISL*), čiji je zadatak da prikuplja i opciono konvertuje podatke, agregira i prenosi korisne informacije ili obrađene podatke. Drugi nivo, AOL (eng. *Application operation level, AOL*) konsoliduje posredne slojeve usluga, aplikacija i poslovanja sa namerom da evaluiira i obrađuje informacije kako bi se realizovalo upravljanje klasifikacijom neophodno za donošenje odluka i praktične akcije.

U ovom konkretnom slučaju, perceptivni sloj zapravo je senzorski čvor (eng. *Sensing node*) pod nazivom Current Profiler. Current Profiler je hardverski uređaj za neinvazivno, kontinualno praćenje i prikupljanje podataka o intenzitetu struje za potrebe profilisanja ponašanja sistema/procesa/mašine/itd. [225].

Osnovne karakteristike integrisanih modula na štampanoj ploči (eng. *Printed Circuit Board, PCB*) Current Profiler-a date su u tabeli 3.1, dok se detaljnije informacije mogu pronaći u njihovoj pratećoj tehničkoj dokumentaciji navedenoj u referencama.

Takođe, osnovne karakteristike YHDC SCT-013-000 senzora date su u tabeli 3.2. Ovaj model CT (*eng. Current transformer*) senzora nema unutrašnji otpornik opterećenja, tako da supresor prelaznog napona ograničava izlazni napon u slučaju eventualnog odvajanja od opterećenja. Ovaj senzor karakteriše sposobnost da razvije dovoljan napon i u potpunosti pokrene ulaz od 5 V. Takođe, primenjeni tip CT senzora karakteriše podeljeno jezgro, što omogućava neinvazivnu primenu tako što se povezuje direktno na vodove koje ulaze u posmatrani sistem.

U mrežnom sloju ISL nivoa, za potrebe komunikacije, implementiran je ESP8266 WiFi modul, čije su osnovne karakteristike navedene u tabeli 7.3, dok je šematski prikaz njegovog ESP-07 čipa dat na slici 3.1. Jezgro procesora modula je ESP8266 koji omogućava kompaktne veličine modula, inkapsulira, u industriji vodeći, Tensilica L106 32-bitni mikro MCU (*eng. Microcontroller Unit*) koji karakteriše ultra nisko korišćenje energije, sa 16-bitnim kratkim režimom, brzinom takta od 80 do 160 MHz, podržanim RTOS-om, integrisanim Wi-Fi MAC/BB/RF/PA/LNA i ugrađenom antenom koja može biti ekstenzibilna. Modul podržava standardni IEEE802.11 b/g/n sporazum i kompletan stek TCP/IP protokola [226]. Sve ovo čina ga pogodnom platformom na koju se mogu dodati drugi moduli kako bi im se omogućila sposobnost za umrežavanje i komunikaciju. Takođe, kao što je slučaj u ovom istraživanju, može se integrisati u druge razvojne sisteme kao poseban mrežni kontroler.

Na osnovu analize tehničke dokumentacije prethodno opisanih komponenti kao i šeme date na slici 3.1 generisan je PCB model koji integriše sve komponente na jednoj (matičnoj) ploči čiji je šematski prikaz dat na slici 3.2. Matična ploča je proizvedena nakon inicijalne provere u razvojnom okruženju (slika 3.3).

Tabela 3.1 Osnovne karakteristike integriranih modula na Current Profiler PCB-u (deo 1, na engleskom jeziku)



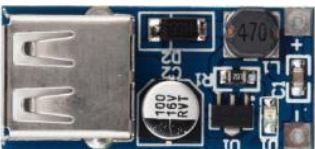
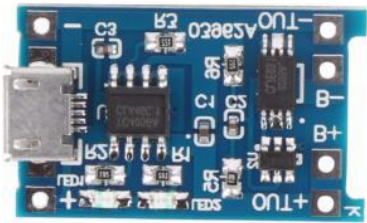
Microcontroller module (Arduino Nano V.3) [227]				
Outlook	Pin No.	Name	Type	Description
	1-2, 5-16	D0-D13	I/O	Digital input/output port 0 to 13
	3, 28	RESET	Input	Reset (active low)
	4, 29	GND	PWR	Supply ground
	17	3V3	Output	+3.3V output (from FTDI)
	18	AREF	Input	ADC reference
	19-26	A0-A7	Input	Analog input channel 0 to 7
			Output	+5V output (from on-board regulator)
	27	+5V	or	or
	30	VIN	Input	+5V (from external power supply)
		PWR	Supply voltage	
MP1584 Buck / Stepdown 3A Adjustable Regulator Module [228]				
Outlook	Name	Value		
	Input Voltage:	4.5V-28 VDC		
	Output Voltage:	0.8V-18 VDC		
	Continuous Output Current:	Max. 3 A		
	Peak Output Current:	4 A		
	Max. Efficiency:	92%		
	Output Ripple:	<30 mV		
	Switching Frequency:	100 kHz to 1.5 MHz		
	Operating Temperature:	-40 to +85 °C		
Dimensions (l*w*h):	22x17x4 mm			
DC-DC USB Step-up Boost Power Supply Module 0.9V-5V to 5V [229]				
Outlook	Name	Value		
	Input Voltage:	0.9-5 VDC		
	Output Voltage:	5 VDC		
	Maximum Output Current:	600 mA		
	Operating Temperature:	-40 to +85 °C		
	Max. Efficiency:	96%		
Dimensions (LxWxH):	34x16.2x7 mm			
TP4056 1A Li-ion Lithium Battery Charging Module With Current Protection [230]				
Outlook	Name	Value		
	Charging accuracy:	1.5%		
	Charging method:	Linear		
	Full Charge Voltage:	4.2 V		
	Input Voltage:	4.5-5.2 V		
	Operating Temperature:	-10 to +85 °C		
	Rated Power:	4.2 W		
	Over-Current Protection:	3 A		
	Under-Voltage Protection:	2.5 V		
Dimensions (LxWxH):	30x17x6 mm			

Tabla 3.1 Osnovne karakteristike integriranih modula na Current Profiler PCB-u (deo 2, na engleskom jeziku)




DS3231 I2C Precision Clock with AT24C32 Memory [231]		
Outlook	Name	Value
	Operating voltage:	3.3 to 5.5 V
	Real-time clock chip:	DS3231
	Clock accuracy:	2 ppm
	Memory chip:	AT24C32 (32 Kb storage capacity)
	Operating Temperature:	-20 to +85 °C
	On-chip temp. sensor accuracy:	±3 °C
	I2C bus interface speed:	400 kHz max
	Time and Date Format:	Time: HH: MM: SS (12/24 hr) Date Format: YY-MM-DD-dd
	Dimensions (L×W×H):	38×22×14 mm
SD card reader module [232]		
Outlook	Name	Value
	Supply voltage:	3.3 to 5.5 V
	Communication interface:	SPI
	Built-in voltage regulator:	3.3 V (LM1117)
	Installed card slot with ejector:	Yes
	Operating Temperature:	-20 to +85 °C
	The diameter of mounting holes:	2.5 mm
	Chipset:	AMS1117
	Dimensions (L×W×H):	48×29.1×6 mm
I2C 0.96" OLED 128x64 Display [233]		
Outlook	Name	Value
	Diagonal Screen Size:	0.96"
	Number of Pixels:	128 x 64
	Color Depth:	Monochrome
	Working Voltage:	3.3 to 5.5 V
	Power:	0.06W Max
	Viewing Angle:	>160 °
	Duty:	1/32
	Dimensions (L×W×H):	27.8 x27.3x 4.3mm
	Brightness (at 5V):	150 cd/m <sup>2</sup>
	Interface:	I2C



Tabela 3.2 Osnovne karakteristike YHDC SCT-013-000 senzora (na engleskom jeziku)



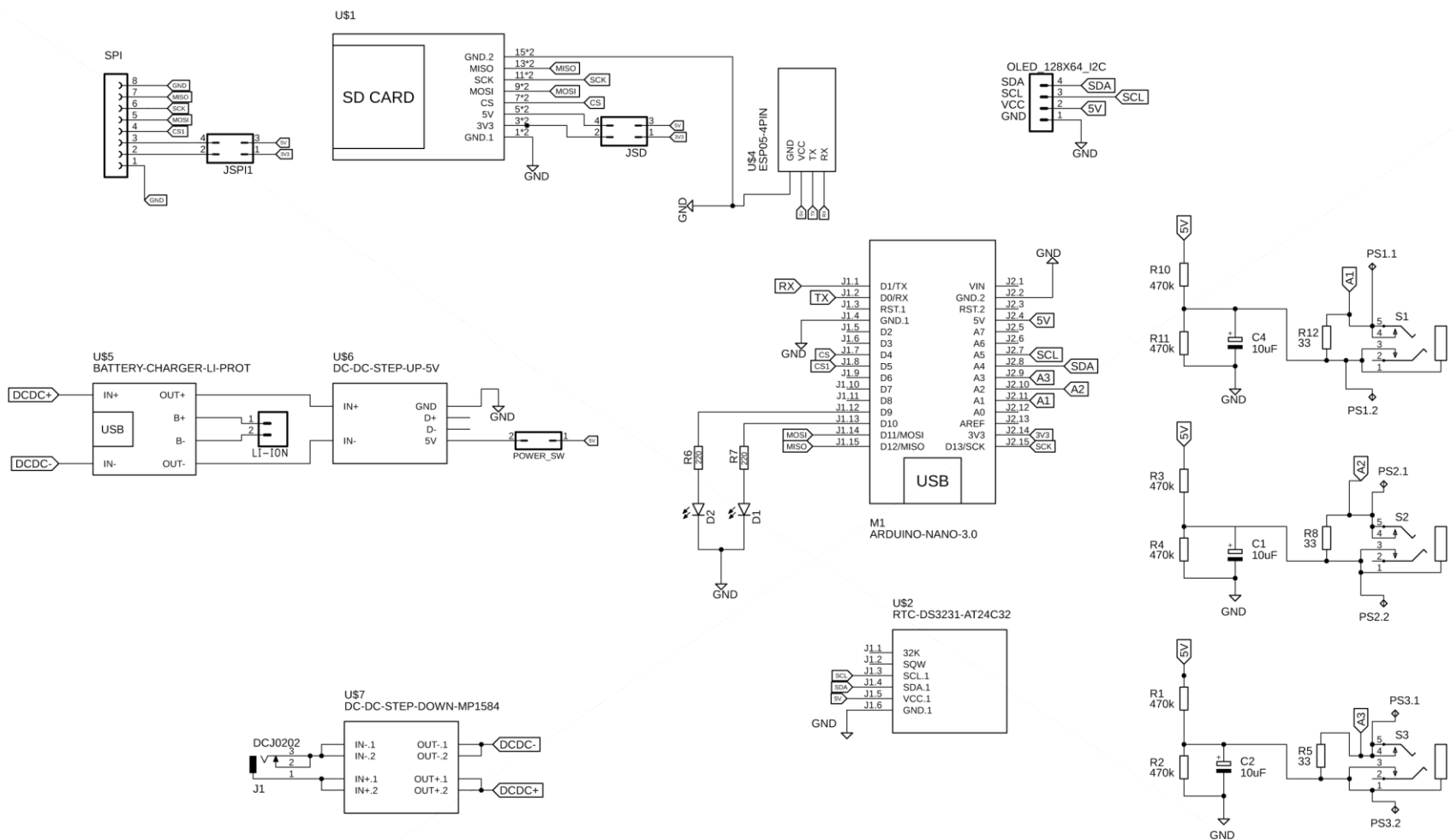
YHDC Split core current transformer SCT-013-000 [234]		
Outlook	Name	Value
	Input Current:	0~100A AC
	Output Mode:	0~50mA
	Non-linearity:	±3%
	Turn Ratio:	100A:0.05A
	Resistance Grade:	Grade B
	Work Temperature:	-25 ~ 70°C
	Dielectric Strength (between shell and output):	1000V AC/1min 5mA
	Dimensions (L×W×H):	56.8 x32.3x 21 mm
	Leading Wire in Length:	1m
	Cable Connector Type:	3.5 mm Stereo Jack (PJ307)

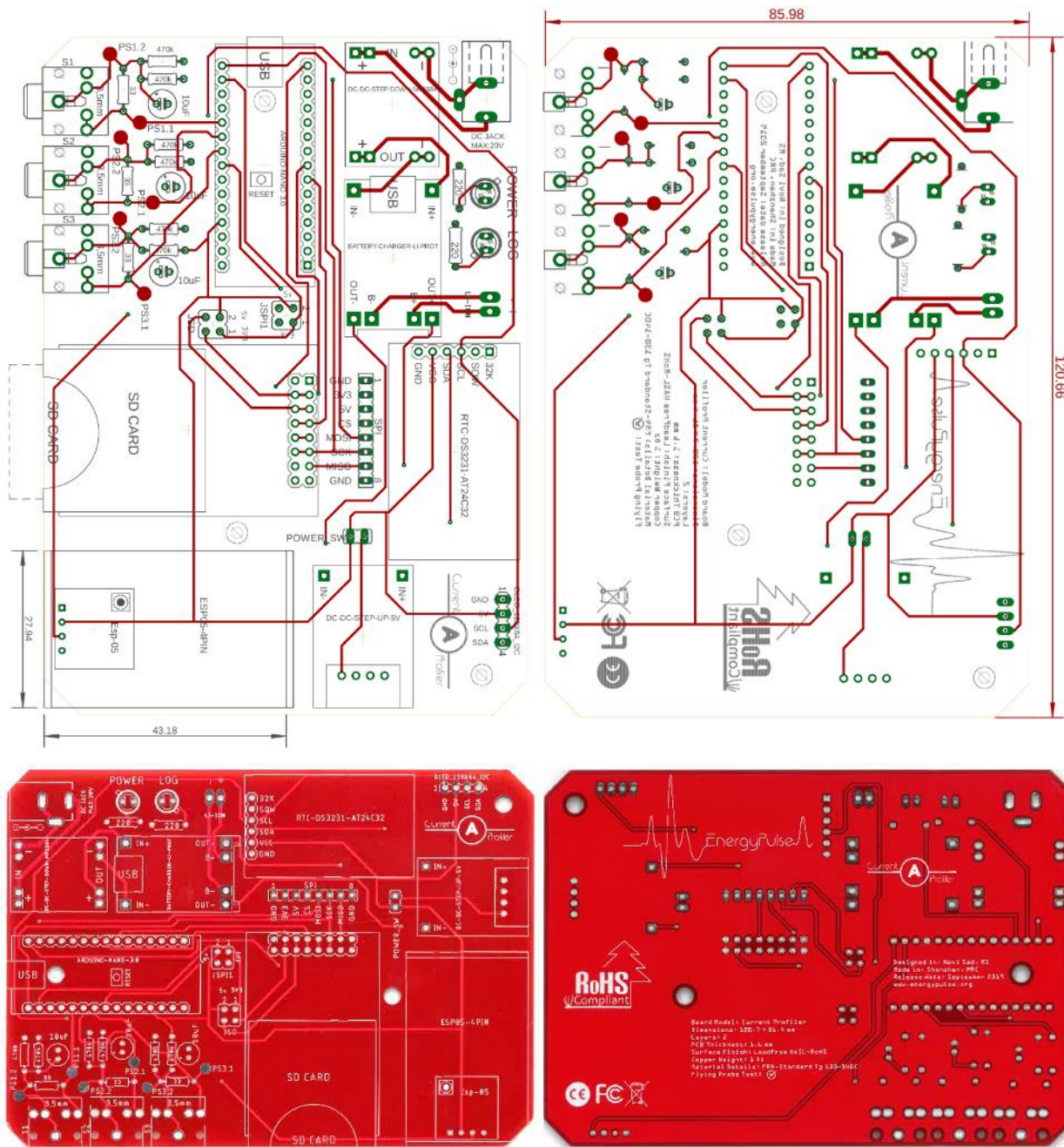
Tabela 3.3 Osnovne karakteristike ESP8266 ESP-07 Wifi Serial Transceiver modula (na engleskom jeziku)

ESP8266 ESP-07 Wi-Fi Serial Transceiver Wireless Board Module [226]		
Outlook	Name	Value
	Interface logic voltage:	3.3 to 5.5 V
	Working voltage:	4.5 - 5.5V (On-board 3.3v LDO Regulator)
	Working current:	240 mA (MAX)
	Serial port baud rate:	115200 (default)
	Serial communication format:	8N1
	Antenna Type:	Ceramic (supports external antenna)
	Wireless Network Mode:	station / softAP / SoftAP + station
	Dimensions (L×W×H):	48×29.1×6 mm
	Wireless criteria:	802.11 b / g / n
	WIFI support at 2.4 GHz:	WPA / WPA2 security mode



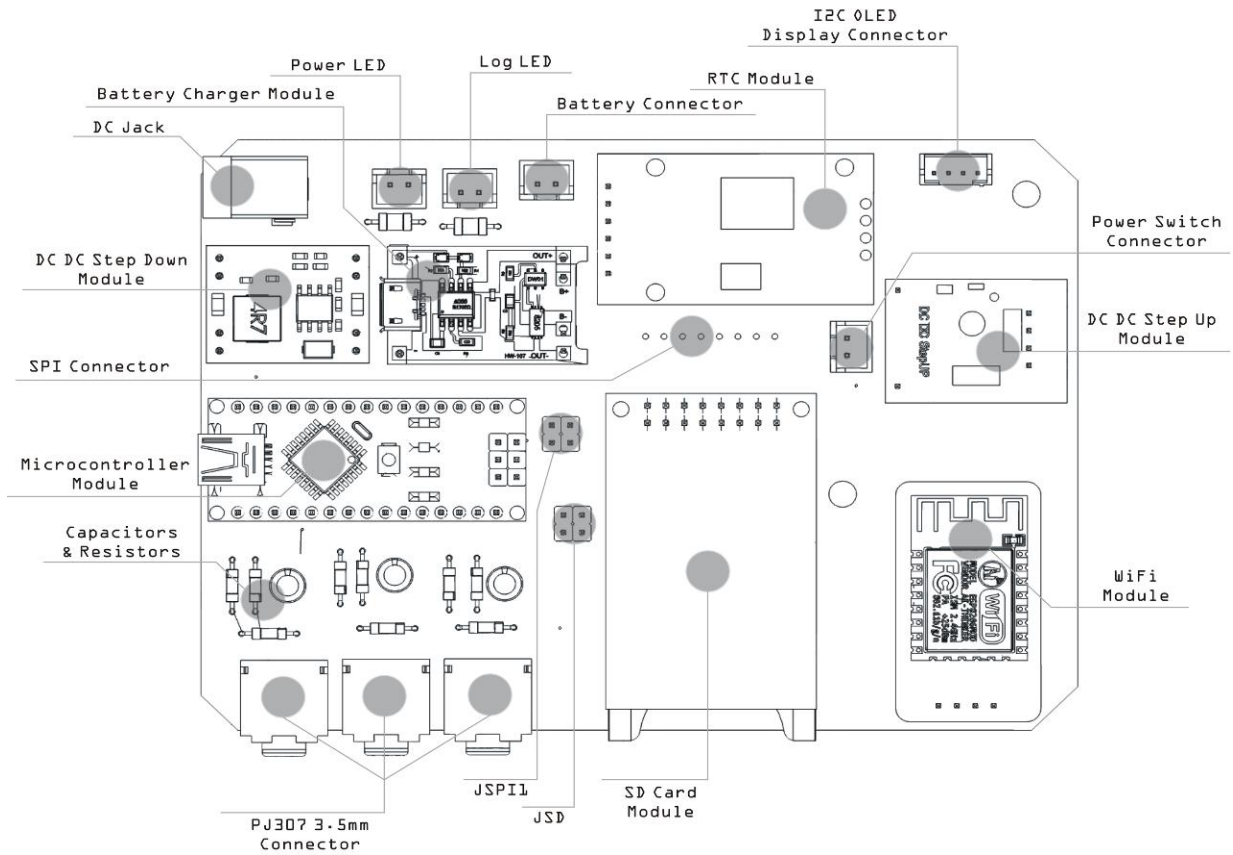


Slika 3.2 Šematski prikaz matične ploče koja integriše sve neophodne module i prateće komponente

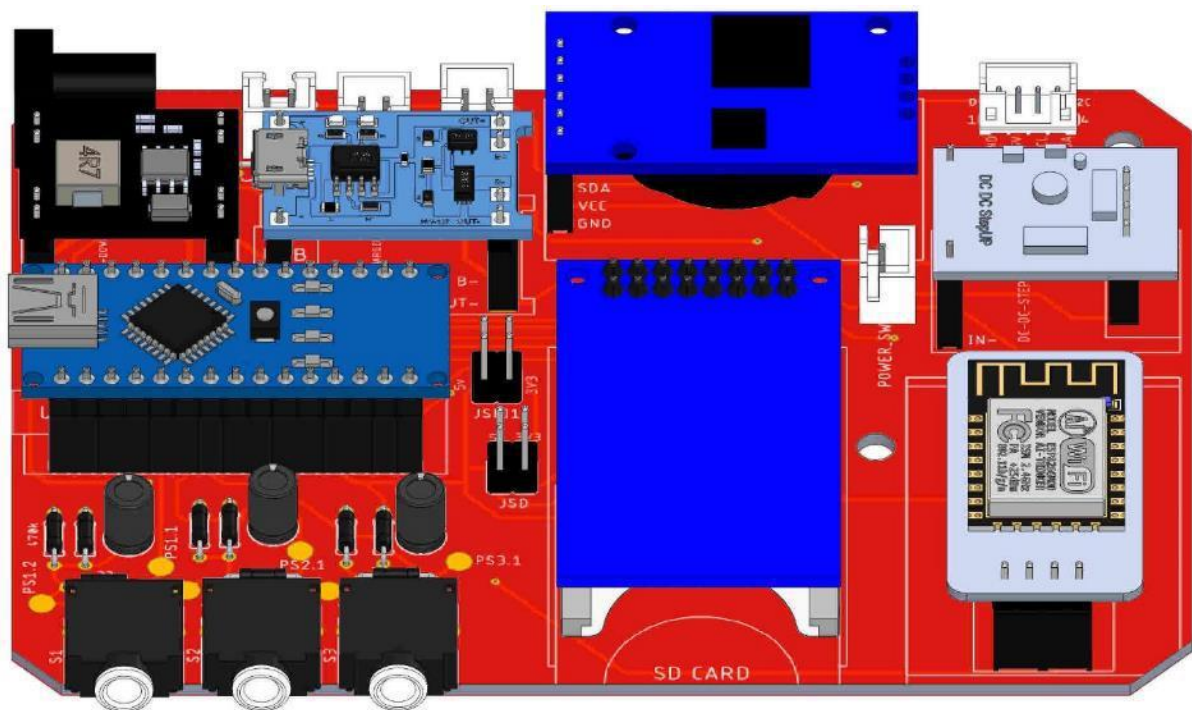


Slika 3.3 2D model matične ploče (gore) i izgled proizvedene verzije (dole)

Finalni raspored komponenti sklopa elektronike prikazan je na slici 3.4. Pre izrade 3D modela kućišta u kojem će se predložena elektronika koristiti, generisan je 3D model proizvedene matične ploče sa svim ključnim komponentama. Ovaj korak neophodan je kako bi se sagledale finalne dimenzije sklopa elektronike i predvidele dimenzije kućišta kao i neophodni otvori na istom za konektore senzora, USB-a, napajanja, otvor za prihvat SD kartice, displej i signalne elemente (LED diode). 3D model sklopa elektronike prikazan je na slici 3.5. Za potrebe dizajna sklopa elektronike i kućišta za istu korišćen je SolidWorks 16 softverski paket.

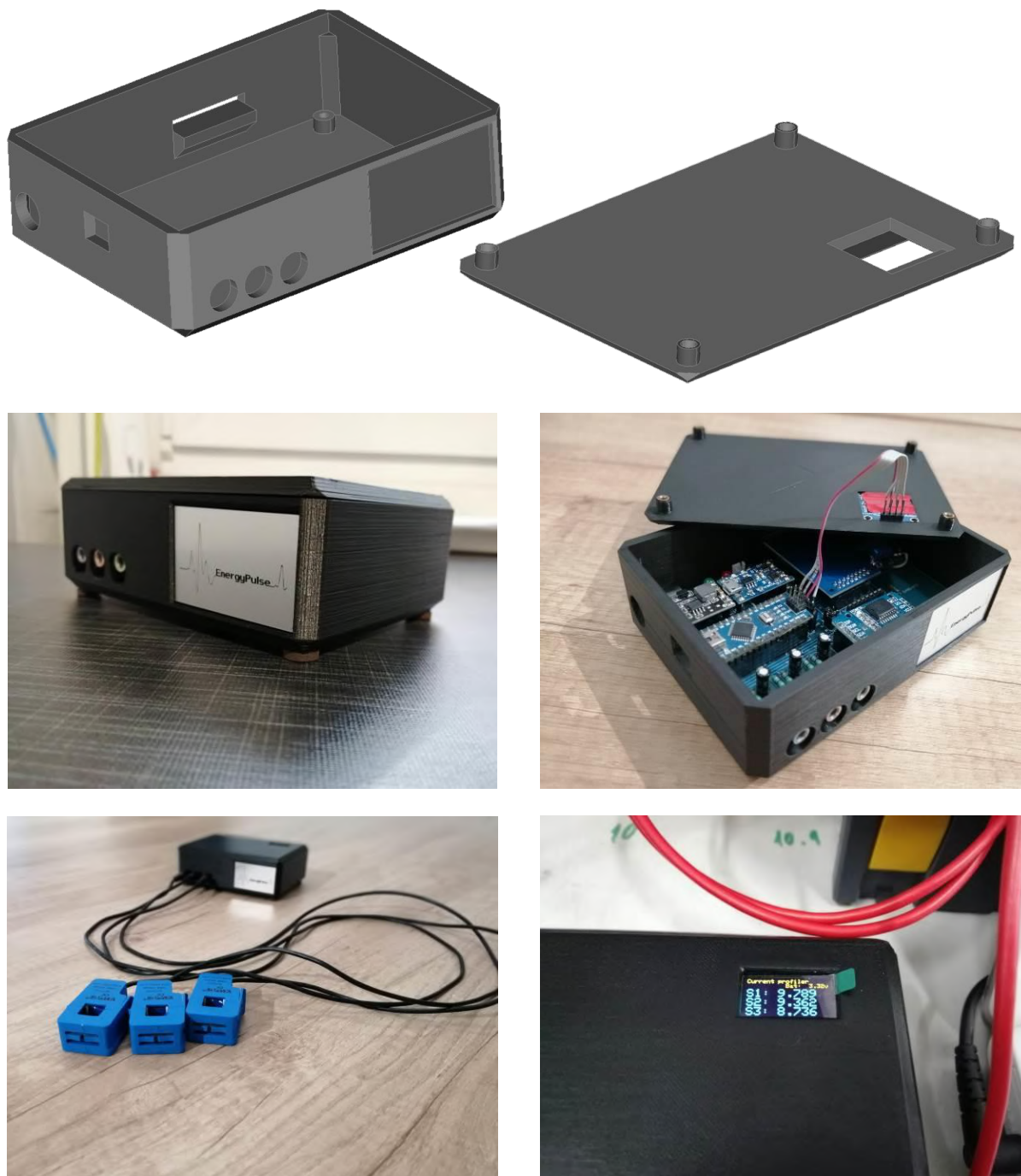


Slika 3.4 Finalni raspored komponenti sklopa elektrone



Slika 3.5 3D model sklopa elektrone

Prva verzija kućišta uređaja izrađena je od PLA plastike metodom 3D štampe prema modelu prikazanom na slici 3.6 (gore), a finalni izgled prve verzije gotovog uređaja dat je na slici 3.6 (dole).

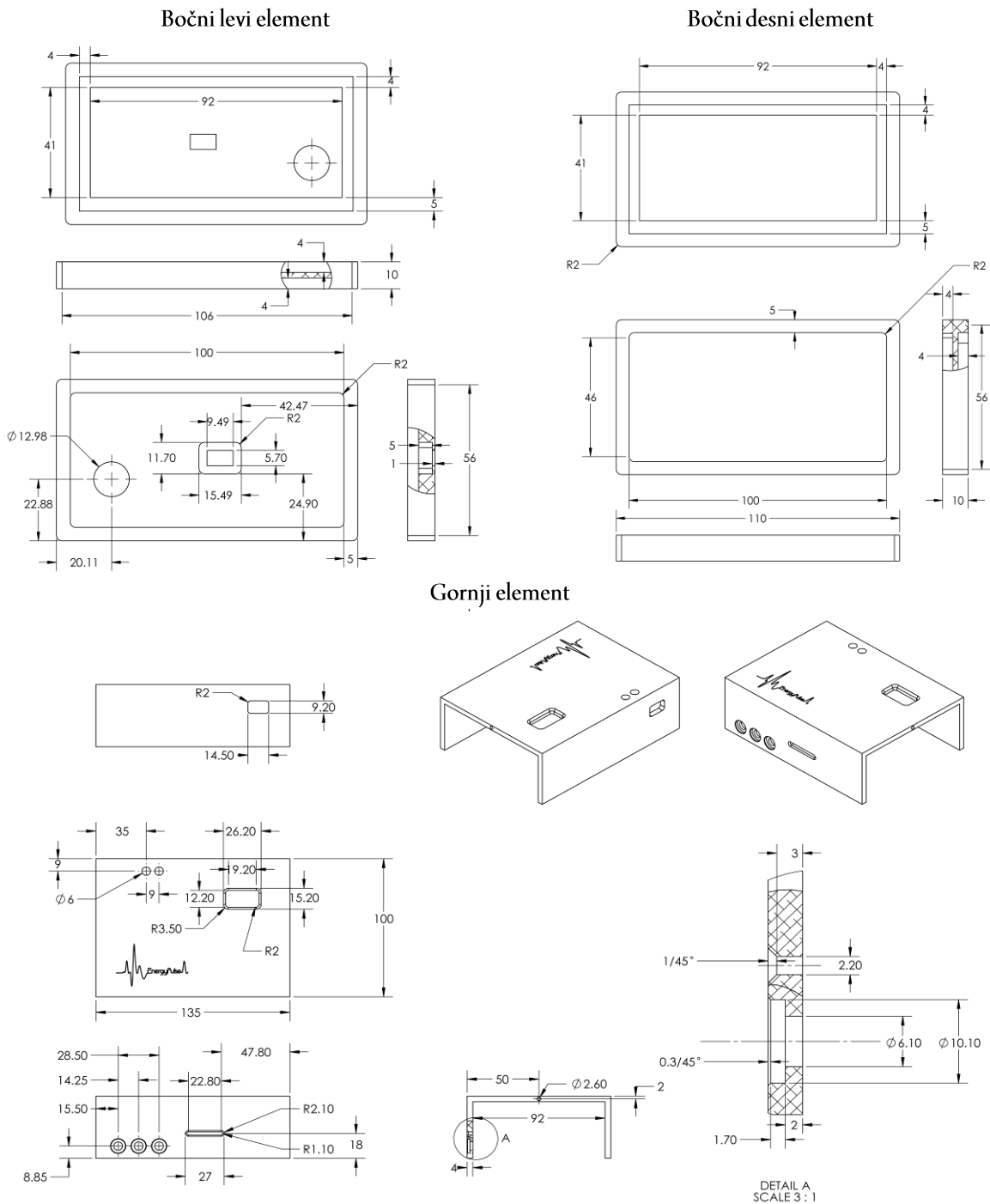


Slika 3.6 3D model plastičnog kućišta (gore) i prva verzija uređaja sa plastičnim kućištem (dole)

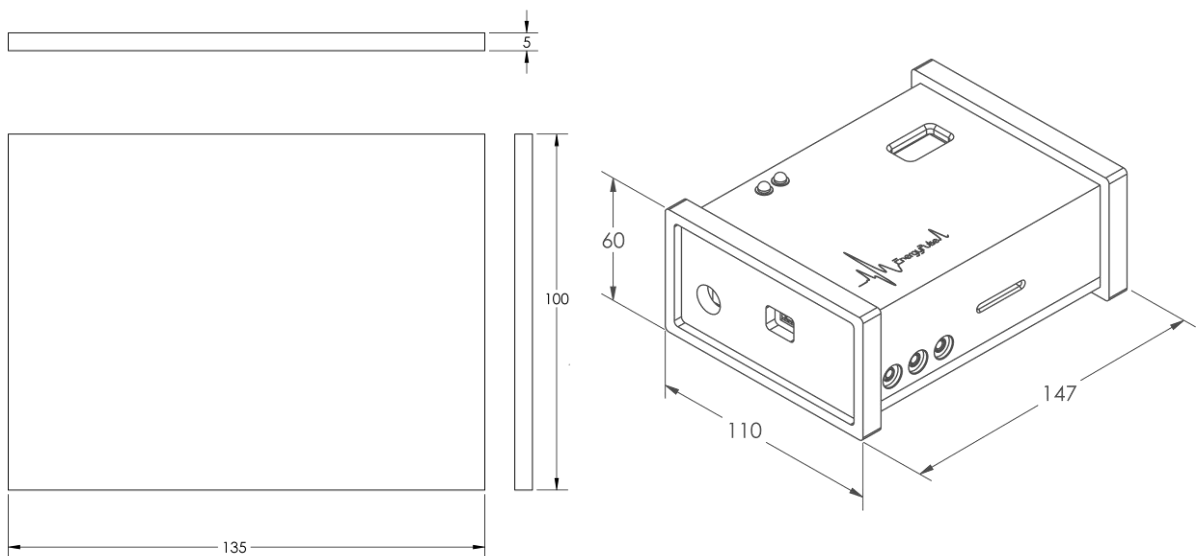
Nakon inicijalnih testova pokazalo se da izbor plastičnog kućišta nije dobro rešenje za industrijsku primenu jer ne pruža adekvatnu zaštitu od elektromagnetnog zračenja koje se indukuje unutar proizvodnih sistema (na samim mašinama), pri čemu se pokazalo da je magnituda ovog zračenja najintenzivnija kada su mašine pod naponom,

spremne za izvršenje operacija, ali sam proces obrade još uvek nije inicijalizovan. Prilikom obrade materijala intenzitet zračenja je značajno manji ali i dalje iznad propisanog standarda. Imajući to u vidu, dizajnirano je i izrađeno novo kućište od aluminijuma.

Na slici 3.7 i 3.8 prikazane su osnovne karakteristike novog kućišta radioničkim crtežom, dok je na slici 3.9. dat prikaz izgleda finalno izrađenog kućišta (gore) kao i finalni izgled uređaja u novom kućištu (dole).



Slika 3.7 Radionički crtež za novo kućište (prikaz bočnih i gornjeg elementa u mm)



Slika 3.8 Radionički crtež za novo kućište (prikaz donjeg elementa i finalnog sklopa u mm)



Slika 3.9 Prikaz novoizrađenog kućišta (gore) i finalni izgled uređaja (dole)



### 3.2 Razvoj hardverskog programskog koda - firmvera

Kako bi uređaj mogao da obezbedi željene funkcionalnosti neophodno je strukturirati setove instrukcija i definisati međusobne interakcije između svih modula i pratećih komponenti. Tako da se kao sledeći logičan korak u razvoju nameće razvoj hardverskog programskog koda - firmvera. U nastavku parcijalno je prikazan firmware uređaja uz prpratna objašnjenja.

Na samo početku, potrebno je učitati biblioteke za RTC i Senzorske module, zatim su definisane promenljive trenutnih vrednost struja i ispisivanje tih vrednosti na displeju.

```
//-----EmonLib-----
// EmonLibrary examples openenergymonitor.org, Licence GNU GPL V3
#include <RTClib.h>
#include "EmonLib.h"

EnergyMonitor emon1;
EnergyMonitor emon2;
EnergyMonitor emon3;

float irms1;
float irms2;
float irms3;
float temp = 0;

float I1=0;
float I2=0;
float I3=0;

char I1_text[7];
char I2_text[7];
char I3_text[7];
char temp_text[7];

char txArray[40]; // TX array with all measurments for storage on SD and
send via ESP8266 modules

#define sampleNo 1480 // masurment cycle approx 50Hz
#define DEBUG 0
//-----
```

Zatim je izvršeno učitavanje biblioteke za displej i definisanje adrese displeja na I2C portu.

```
//----- OLED -----
#include "SSD1306Ascii.h"
#include "SSD1306AsciiAvrI2c.h"

#define I2C_ADDRESS 0x3C
#define RST_PIN -1 // Define proper RST_PIN if required.

SSD1306AsciiAvrI2c oled;
//-----
```

Slično, u narednom koraku izvršeno je učitavanje neophodnih biblioteka za funkcionisanje modula SD kartice kao i definisanje datoteke gde će biti upisane vrednosti na SD kartici.

```
//----- SD Module -----
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

File myFile;
//RTC_DS1307 RTC;
#define pinCS 4
#define pinCS2 5

//-----
```

Ovde je izvršeno učitavanje biblioteke za RTC modul kao i definisanje promenljivih za vreme i datum.

```
//----- RTC -----
#include <DS3231.h>
DS3231 rtc(SDA, SCL);

String sampleTimeStamp, sampleDate;

//-----
```

Nakon toga učitana je biblioteka za serijsku komunikaciju i definisana je inicijalizacija komunikacije na pinovima 2 i 3.

```
//----- Soft Serial for ESP -----
#include <SoftwareSerial.h>
// software serial #1: (RX, TX)
SoftwareSerial ESPSerial(3, 2);

//-----
```

U nastavku, pinMode inicijalizuje pin kao ulazni ili izlazni, digitalWrite postavlja logičku jedinicu ili nulu na pin, Serialbegin inicijalizuje serijske komunikacije, ESPSerialbegin inicijalizuje serijske komunikacije za WiFi, Rtc.begin uključuje rtc modul, dok Oled.begin inicijalizuje oled displej. Nakon toga, emon (1-3) vrši kalibraciju strujnih senzora, a u datoteku data.txt koja se nalazi na SD kartici upisuju se Timestamp, S1, S2, S3 i temp, nakon čega će se ispisivati vrednosti sa RTC-a i senzora.

```

void setup()
{
  pinMode(10, OUTPUT);      // Power LED
  pinMode(9, OUTPUT);      // Red LED
  //pinMode(4, OUTPUT);    // chipSelect for SD card
  digitalWrite(10, HIGH);

  Serial.begin(115200);
  ESPSerial.begin(115200);

  rtc.begin();

  #if RST_PIN >= 0
    oled.begin(&Adafruit128x64, I2C_ADDRESS, RST_PIN);
  #else // RST_PIN >= 0
    oled.begin(&Adafruit128x64, I2C_ADDRESS);
  #endif // RST_PIN >= 0

  // calibration (100A / 0.05A) / 33.4 Ohms = 59.88
  // https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ctac/calibration

  #define calibrationScale 59.88

  emon1.current(1, calibrationScale); // Current: input pin, calibration.
  emon2.current(2, calibrationScale); // Current: input pin, calibration.
  emon3.current(3, calibrationScale); // Current: input pin, calibration.

  if (!SD.begin(4))
  {
    if (DEBUG)
    {
      Serial.print("Failed to init SD card.");
    }
  }
  else
  {
    myFile = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);
    if (myFile)
    {
      myFile.println("Timestamp;S1;S2;S3;Temp");
      myFile.close();

      if (DEBUG)
      {
        Serial.print("Passed to init SD card and wrote header.");
      }
    }
  }

  irms1 = 0;
  irms2 = 0;
  irms3 = 0;

  I1 = 0;
  I2 = 0;
  I3 = 0;

  //rtc.setTime(22, 56, 0); // Set the time to 12:00:00 (24hr format)
  //rtc.setDate(28, 8, 2018); // Set the date to January 1st, 2014
}

```

Nakon ispisivanja vrednosti, iste se upisuju na SD karticu i prosleđuju na ESP modul.

```
void PersistAndReplicateData()
{
  String dataRow=" ";
  dataRow = sampleDate + '-' + sampleTimeStamp + ',' + txArray;

  myFile = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);

  if (myFile)
  {
    digitalWrite(9,HIGH); // Green LED
    delay(120);
    digitalWrite(9,LOW);

    myFile.println(dataRow);
    myFile.close();

    if (DEBUG)
    {
      Serial.print("Data updated on SD card.");
    }
  }
  else
  {
    if (DEBUG)
    {
      Serial.print("Can't open file on SD card.");
    }
  }

  Serial.print(dataRow + '\n'); // Sending data to ESP8266
}
```

Dalje, Temp dobija vrednosti sa senzora temperature, sledi kalkulacija struja na osnovu parametara kalema i vazdušnog procepa, upisivanje datuma i vremena u promenjive date i time, I1; I2 i I3 dobijaju vrednosti – offset napona koji se javlja na početku merenja. U ovom delu sadržane su i OLED funkcije za podešavanje reda i kolone gde će se ispisati vrednosti struja na displeju.

```

void loop()
{
    temp = rtc.getTemp();

    irms1 = emon1.calcIrms(1480); // Calculate Irms only
    irms2 = emon2.calcIrms(1480); // Calculate Irms only
    irms3 = emon3.calcIrms(1480); // Calculate Irms only

    sampleTimeStamp = rtc.getTimeStr();
    sampleDate = rtc.getDateStr();

    I1 = irms1-0.117;
    I2 = irms2-0.117;
    I3 = irms3-0.117;

    if(I1<1.7) I1=0;
    if(I2<0.6) I2=0;
    if(I3<0.6) I3=0;

    dtostrf(I1, 6, 2, I1_text);
    dtostrf(I2, 6, 2, I2_text);
    dtostrf(I3, 6, 2, I3_text);
    dtostrf(temp, 6, 2, temp_text);

    sprintf(txArray, 40, "%s,%s,%s,%s", I1_text, I2_text, I3_text, temp_text);

    //Serial.println(txArray); // only for Telemetry

    oled.setFont(Adafruit5x7);
    oled.set1X();
    oled.setCursor(0, 0);
    oled.println("Current profiler");
    oled.setCursor(60, 8);
    oled.print(" ");
    oled.println(" ");

    oled.set2X();
    oled.setCursor(0, 16);
    oled.print("S1: ");
    oled.println(I1);
    oled.print("S2: ");
    oled.println(I2);
    oled.print("S3: ");
    oled.println(I3);
}

```

U nastavku je prikazan odeljak koda koji omogućava korišćenje servisa telemetrije ako je uređaj u serijskoj vezi sa računarom (ako se napaja preko USB konekcije). Prikaz telemetrijskog servisa dat je na slici 3.10 dok slika 3.11 prikazuje uređaj u radu prilikom korišćenja ovog servisa.

```

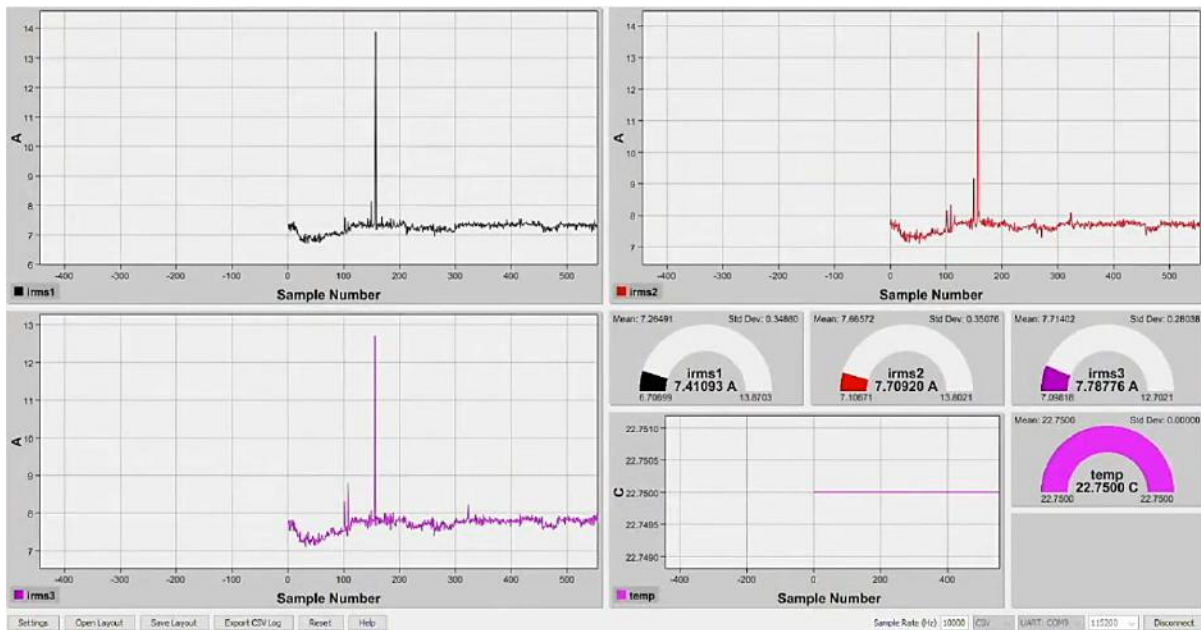
//----- Telemetry Viewer -----
char I1_text[30];
char I2_text[30];
char I3_text[30];
char temp_text[30];

dtostrf(I1, 10, 10, I1_text);
dtostrf(I2, 10, 10, I2_text);
dtostrf(I3, 10, 10, I3_text);
dtostrf(temp, 10, 10, temp_text);

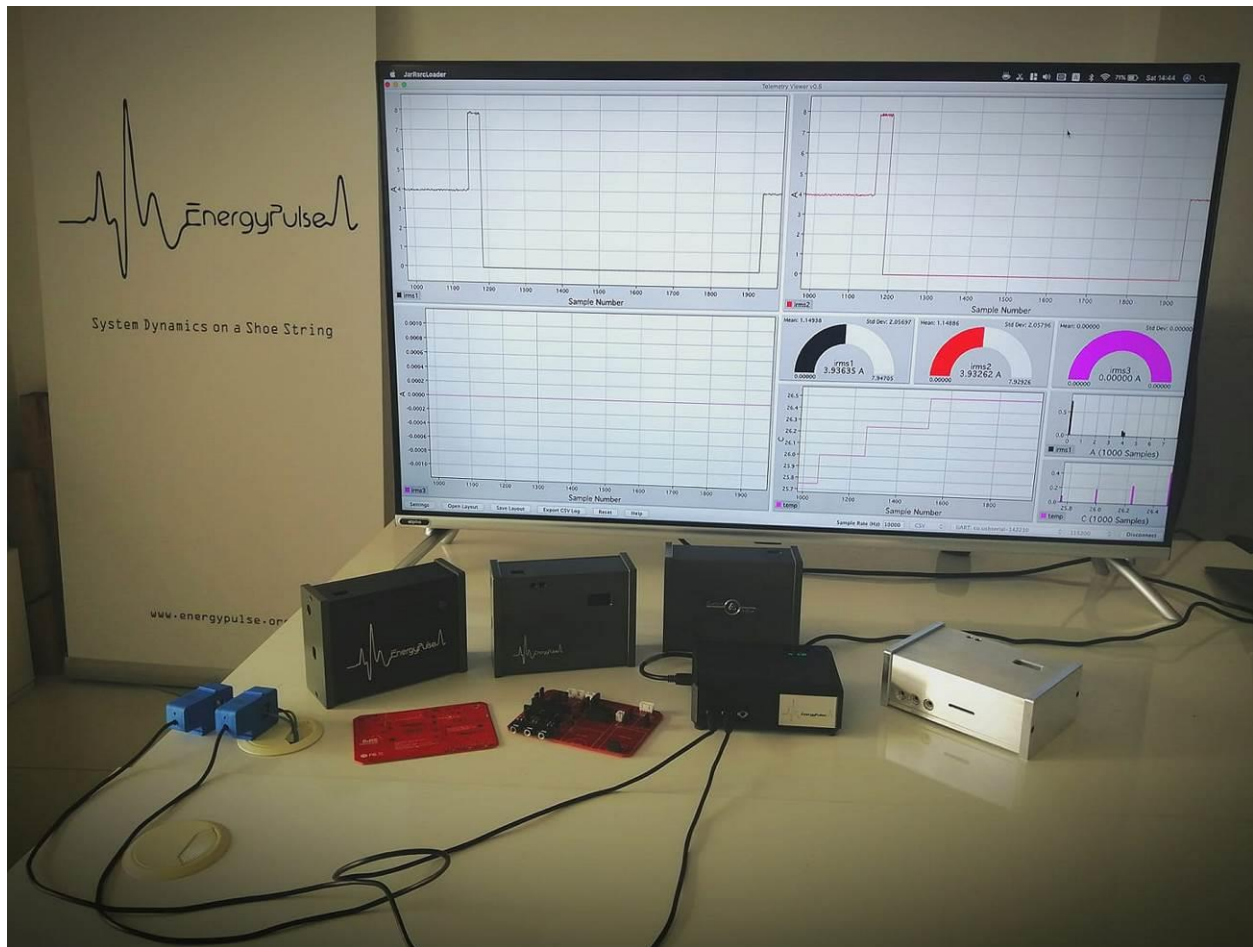
//char text[125];
sprintf(text, 125, "%s,%s,%s,%s", I1_text, I2_text, I3_text, temp_text);

//Serial.println(text);
//-----

```



Slika 3.10 Prikaz telemetrijskog servisa



Slika 3.11 Uredaj u serijskoj vezi sa računarem i omogućenim servisom za telemetriju

U nastavku je prikazan deo koda koji se odnosi na ESP8266 komunikacioni modul pri čemu je potrebno izvršiti podešavanje mqtt protokola za komunikaciju, definisati ssid kao access point za Internet, lozinku (*eng. password*) kao autentikaciju, kao i parametre mqtt brokera koji ima svoju IP adresu a koja je predefinisana mqtt serverom. Takođe, u ovom delu definišu se promenljive za poslednju poruku kao i maksimalna veličina poruke.

```

//----- ESP8266 MQTT -----

/*
  This sketch demonstrates the capabilities of the pubsub library in combina-
  tion with the ESP8266 board/library.
*/

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>

// Update these with values suitable for your network.

const char* ssid = "EnergyPulse";
const char* password = "energypulse";
const char* mqtt_server = "51.104.33.180";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
unsigned long lastMsg = 0;
#define MSG_BUFFER_SIZE  (50)
char msg[MSG_BUFFER_SIZE];
int value = 0;

String inputString = "";      // a String to hold incoming data
bool stringComplete = false; // whether the string is complete

```

Sledeći odeljak predstavlja funkcija za inicijalizaciju wi-fi modula, gde je ssid ime wi-fi access point-a na koji se konektuje, a password je lozinka. Prilikom uspostavljanja konekcije uređaj ispisuje “Connecting to ...” na serijskom portu. Nakon uspostavljanja konekcije ispisuje ime ssid i IP adresu.

```

void setup_wifi() {

  delay(10);
  // We start by connecting to a WiFi network
  Serial.println();
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid);

  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(ssid, password);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }

  randomSeed(micros());

  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected");
  Serial.println("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

```



Sledeća funkcija definiše signalizaciju led diodama ukoliko je poruka primljena.

```
void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
  Serial.print("Message arrived [");
  Serial.print(topic);
  Serial.print("] ");
  for (int i = 0; i < length; i++) {
    Serial.print((char)payload[i]);
  }
  Serial.println();

  // Switch on the LED if an 1 was received as first character
  if ((char)payload[0] == '1') {
    digitalWrite(BUILTIN_LED, LOW); // Turn the LED on (Note that LOW is
the voltage level
    // but actually the LED is on; this is because
    // it is active low on the ESP-01)
  } else {
    digitalWrite(BUILTIN_LED, HIGH); // Turn the LED off by making the volt-
age HIGH
  }
}
```

Naredna funkcija definiše ponovno konektovanje uređaja na mqtt server. Ukoliko uređaj ne uspe da se konektuje ispisuje se „timeout error“ i nakon 5 sekundi proces ponovnog konektovanja se pokušava opet.

```
void reconnect() {
  // Loop until we're reconnected
  while (!client.connected()) {
    Serial.print("Attempting MQTT connection...");
    // Create a random client ID
    String clientId = "ESP8266Client-";
    clientId += String(random(0xffff), HEX);
    // Attempt to connect
    if (client.connect(clientId.c_str(), "*****", "*****"))
    {
      Serial.println("connected");
      // Once connected, publish an announcement...
      client.publish("outTopic", "hello world");
      // ... and resubscribe
      client.subscribe("inTopic");
    }
    else
    {
      Serial.print("failed, rc=");
      Serial.print(client.state());
      Serial.println(" try again in 5 seconds");
      // Wait 5 seconds before retrying
      delay(5000);
    }
  }
}
```

Slično kao i kod signalizacije za prijem poruke, u narednom odeljku definisano je podešavanje za LED na pinu BUILTIN-LED, inicijalizaciju serijske komunikacije, inicijalizaciju wi-fi modula, podešavanje mqtt servera i porta na kome se nalazi broker.

```
void setup() {
  pinMode(BUILTIN_LED, OUTPUT); // Initialize the BUILTIN_LED pin as an
  output
  Serial.begin(115200);
  setup_wifi();
  client.setServer(mqtt_server, 1883);
  client.setCallback(callback);
}
```

Sledeća funkcija služi za obradu informacija koje se šalju na mqtt broker, ako uređaj nije ostvario konekciju - pokušava ponovo povezivanje, u suprotnom ako je string koji se šalje kompletan, šalje se na mqtt server.

```
void loop()
{
  if (!client.connected())
  {
    reconnect();
  }
  //client.loop();
  serialEvent();
  if (stringComplete)
  {
    Serial.println(inputString);

    snprintf (msg, MSG_BUFFER_SIZE, inputString.c_str());
    Serial.print("Publish message: ");
    Serial.println(msg);

    client.publish("Device_ESP8266", msg);

    // clear the string:
    inputString = "";
    stringComplete = false;
  }
}
```

Na kraju, poslednja funkcija obezbeđuje prijem podataka sa serijskog porta.

```

void serialEvent()
{
  while (Serial.available())
  {
    char inChar = (char)Serial.read();
    if (inChar == '\n')
    {
      stringComplete = true;
    }
    else
    {
      inputString += inChar;
    }
  }
}

```

### 3.3 Osnovne funkcionalnosti razvijenog rešenja

Osim što funkcioniše kao klasični senzorski čvor, ovaj uređaj može da radi samostalno jer se sastoji od matične ploče sa pratećim komponentama i konektorima, mikrokontrolera, SD modula, vremenskog modula (*eng. Real-Time Clock, RTC*), OLED displeja  $128 \times 64$ , DC-DC pretvarača (*eng. Step Down*), kontrolera punjenja baterije, DC-DC konvertera (*eng. Step Up*), Wi-Fi modula, i pratećih elementa u smislu adaptera za napajanje, baterije i pratećih senzora.

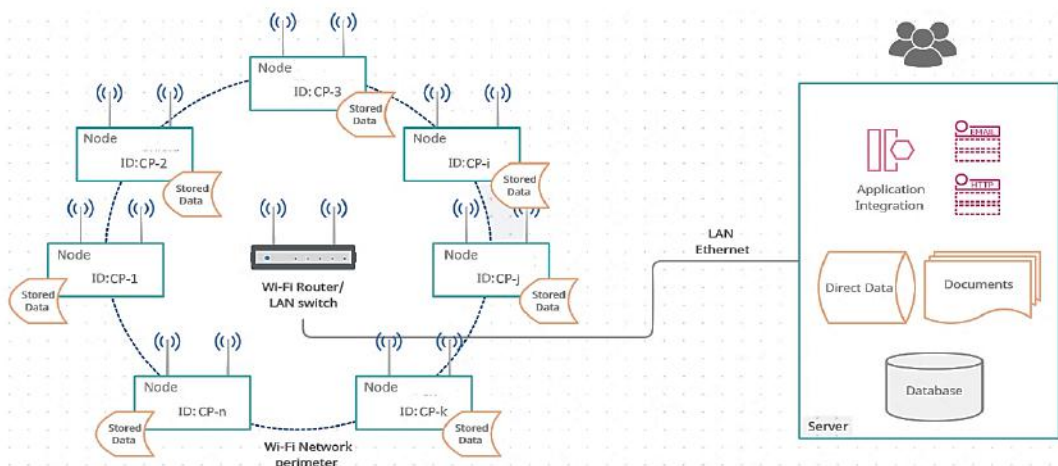
U ovoj disertaciji primarni cilj je prikupljanje pouzdanih podataka o intenzitetu struje, jer ako je napon stabilan, bez značajnijih varijacija (što je jedan od osnovnih uslova za rad električnih mašina u industrijskim okruženjima), promene u intenzitetu struje odražavaju ponašanje posmatranog sistema kroz niz snimljenih stanja, uz istovremeno pružanje tačnih podataka o načinu na koji se energija koristi, a koju je finalno moguće lako kvantifikovati.

Glavne funkcionalnosti Current Profiler-a na osnovu prethodno navedenog su:

- Uređaj meri, skladišti i prikazuje podatke na 3 kanala u realnom vremenu (0-100A);
- Uređaj povezuje izmerenu vrednost sa vremenskom oznakom;
- Uređaj meri i prikazuje radnu temperaturu (-40 - 85 °C);
- Uređaj snima podatke na SD karticu;
- Uređaj se može napajati preko USB ili DC konektora;
- Brzina prikupljanja podataka je 1s;
- Vizuelizacija u realnom vremenu;
- Softverski definisana promenljiva brzina uzorkovanja;
- Prikaz podataka na mreži;
- Prikaz podataka na uređaju;
- Vremenska detekcija prekida i ponovnog uspostavljanja napajanja sistema;
- Mogućnost proširenja u vidu SPI i I2C protokola;
- Mogućnost izbora napona napajanja SPI konektora (3,3 ili 5 V).

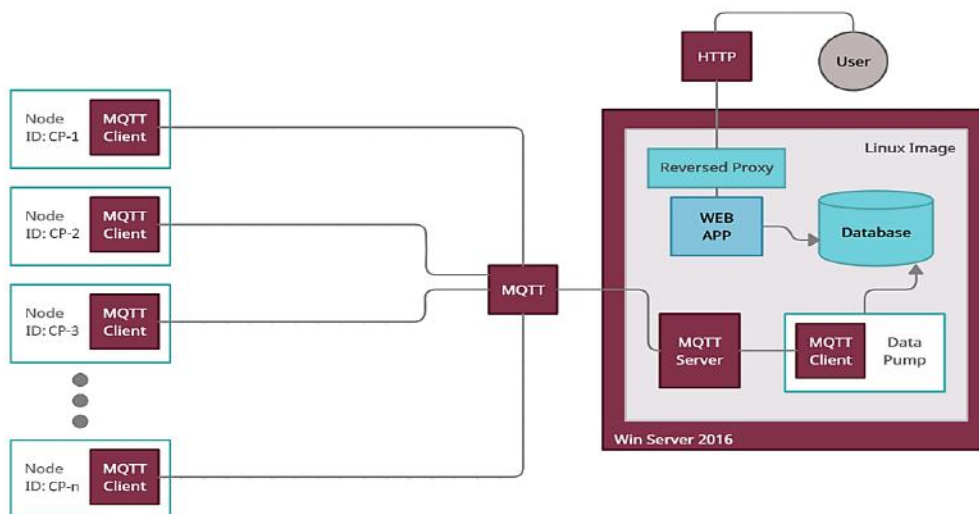
Iz perspektive AOL nivoa, kako Current Profiler uređaji (označeni kao CP-1 do CP-n na slici 3.12) komuniciraju preko skrivene Wi-Fi mreže sa mrežnim ruterom/prekidačem koji je povezan sa klijent-serverom preko Ethernet-a, u posredno-servisnom sloju IoT sistema uspostavljanje komunikacije omogućeno je korišćenjem MQTT

protokola za objavljivanje/prijavljivanje (*eng. Publish/Subscribe*), namenjenog za jednostavno i lako slanje poruka, u uslovima gde postoje određena ograničenja niske propusnosti, nepouzdana mreže, itd. Laka komunikacija između servera i mnogih IoT čvorova [235]–[238] čini ga povoljnim za primenu u ovoj disertaciji. Centralni server je takozvani broker koji definiše temu, dok se senzorski čvorovi zatim prijavljuju na tu temu. Klijentski server hostuje<sup>6</sup> sve potrebne programe i kodove za obezbeđivanje pristupa podacima preko WEB aplikacije/servisa.



Slika 3.12 Opšti tehnološki koncept mrežne infrastrukture

Pošto je tip podataka senzora konstruisan u vidu MQTT poruke koje treba da se objavljuju sa strane MQTT brokera koji ih samostalno hostuje, neophodno je uspostaviti uslugu automatizovanog toka podataka koji se dalje uvoze u bazu podataka. Ovaj proces nazvan je pumpanjem podataka (*eng. DataPump*) a obezbeđen je preko Eclipse Mosquitto servisa. Softverska arhitektura razvijenog rešenja je data na slici 3.13.



Slika 3.13 Softverska arhitektura razvijenog rešenja

<sup>6</sup> Hosting - usluga nuđenja prostora na server računaru gde korisnik može da postavi svoj sadržaj.

Na taj način, sve poruke kao podaci vremenske serije, čuvaju se u bazi podataka. Tip baze podataka, u ovom slučaju je InfluxDB, optimizovana je za brze upite u vezi sa uskladištenim podacima senzora u vremenskom domenu [239]. Međutim, osnovni razlog implementacije ove baze podataka je taj što lako omogućava upotrebu Grafane [240] za naprednu analizu, vizuelizaciju i predstavljanje podataka (slika 3.14).



Slika 3.14 Grafički korisnički interfejs (GUI) zasnovan na Grafani za vizuelizaciju podataka sa Current Profiler-a

Grafana je softverski alat za vizuelizaciju podataka zasnovan na brzom odzivu koji omogućava lako podešavanje prilagođenih kontrolnih tabli, upozorenja i obaveštenja iz skupova podataka uskladištenih u InfluxDB-u. U ovom konkretnom slučaju, Grafana je implementirana na serveru u okviru Linux slike (eng. *Linux image*) koja je postavljena na Windows server u vidu virtuelne mašine. Implementacija je izvršena preko Docker-a, koji predstavlja otvorenu platformu za razvoj, isporuku i pokretanje aplikacija, na način koji omogućava odvajanje aplikacija od infrastrukture kako bi se softver isporučivao brzo, što značajno smanjuje kašnjenja između pisanja koda i implementacije u realnom sistemu [241].

Konačno, sa aspekta poslovnog sloja AOL nivoa, u cilju da se eliminišu granice između proizvodnje i upravljanja, obezbeđujući da su ERP, MES i drugi kritični sistemi dobro povezani kako bi mogli da dele i strukturiraju informacije u skladu sa svojim potrebama, razvijen je i omogućen API servis (eng. *Application Programming Interface*), odnosno softverski posrednik koji omogućava dvema aplikacijama da komuniciraju jedna sa drugom, kako bi se obezbedili mehanizmi proširenja postojećih funkcionalnosti u različitim stepenima na različite načine.

### 3.4 Prvi eksperiment (Shizuoka SV-4020 Vertikalni mašinski CNC centar)


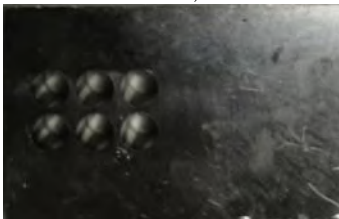
U ovom eksperimentu prethodno opisani IIoT uređaj implementiran je sa ciljem kvantifikacije korišćenja energije tokom izvođenja proizvodne operacije na vertikalnom mašinskom CNC centru Shizuoka SV-4020 prikazanom na slici 3.15.



Slika 3.15 Izgled posmatranog vertikalnog mašinskog CNC centra Shizuoka SV-4020

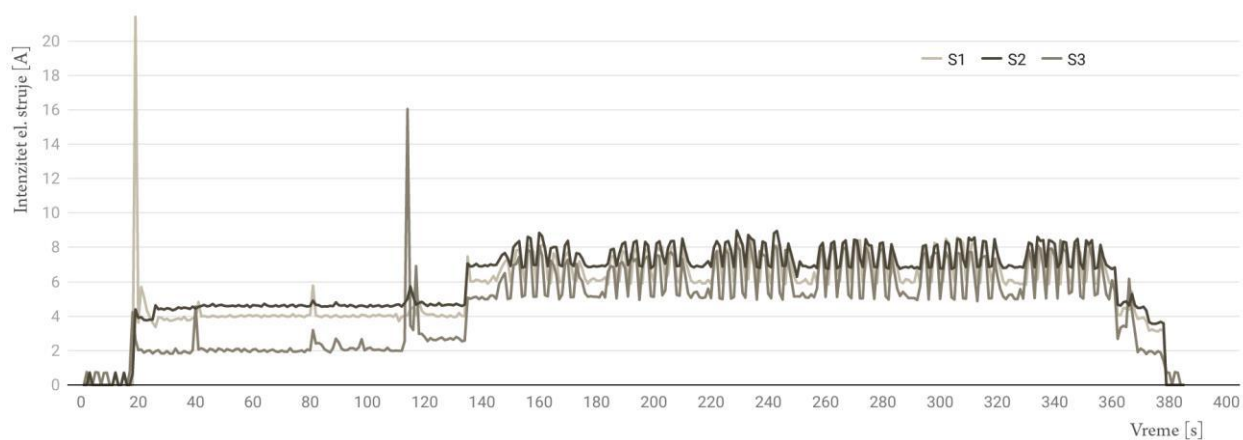
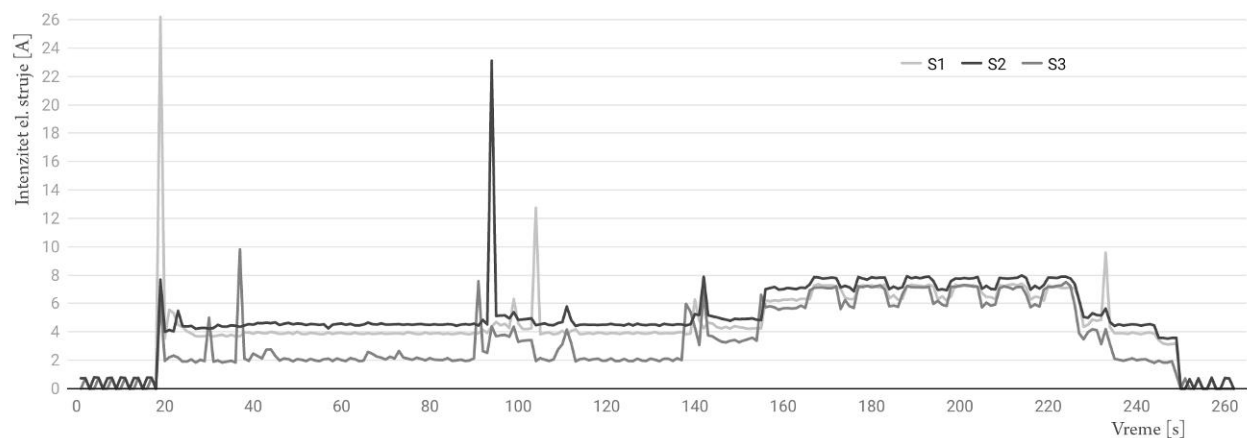
Current Profiler postavljen je na svaku fazu nakon glavnog prekidača za napajanje posmatrane mašine. Zadana operacija podrazumeva stvaranje 6 perforiranih otvora prečnika 8,5 mm na predmetu rada tehnikom bušenja (burgija 8,5 mm), pri čemu visina predmeta rada iznosi 20 mm. Za potrebe istraživanja posmatrane su dve vrste materijala, aluminijum i čelik. U tabeli 3.4 dati su osnovni parametri izvođenja operacije, dok su izmerene vrednosti prikazane na slici 3.16. Generisani podaci za obradu [aluminijuma](#)<sup>7</sup> i [čelika](#)<sup>8</sup> su takođe dostupni.

Tabela 3.4 Osnovni parametri izvođenja operacije

Finalni izgled predmeta rada nakon izvršene operacije			
Čelik		Aluminijum	
			
Debljina predmeta rada (mm):	20	Debljina predmeta rada (mm):	20
Broj obrtaja vretena (rpm):	1000	Broj obrtaja vretena (rpm):	2000
Stopa uklanjanja materijala (mm <sup>3</sup> /min):	80	Stopa uklanjanja materijala (mm <sup>3</sup> /min):	180

<sup>7</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji za aluminijum: <https://app.datawrapper.de/preview/BKm1L#embed>

<sup>8</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji za čelik: <https://app.datawrapper.de/preview/9NhY2#embed>



Slika 3.16 Intenzitet struje tokom vremena operacije za: Aluminijum (1), Čelik (2)

U ovom istraživanju primarni cilj je prikupljanje podataka o intenzitetu struje, jer ako je napon stabilan, bez značajnijih varijacija (što je jedan od osnovnih uslova za rad električnih mašina u industrijskim okruženjima), promene u intenzitetu struje odražavaju ponašanje posmatranog sistema kroz niz snimljenih stanja, uz istovremeno pružanje tačnih podataka o načinu na koji se energija koristi, a koju je finalno moguće lako kvantifikovati [225]. U cilju kvantifikacije korišćenja energije posmatrane mašine potrebno je prethodno odrediti vrednosti snage koja se angažuje tokom izvođenja posmatrane operacije.

Imajući u vidu da naizmjenična snaga u velikoj meri zavisi od parametara isporučenog opterećenja, formula za njeno izračunavanje u naizmjeničnim mrežama glasi:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (3.1)$$

gde  $\cos \varphi$  određuje prirodu opterećenja.

U strujnim kolima aktivna snaga pretvara se tokom rada u druge vrste energije kao što su elektromagnetna i toplotna, pri čemu struja prilikom svog toka u velikom broju slučajeva treba da savlada određeni otpor. Pa je tako, za aktivni otpor, odnosno obične otpornike, uzima se  $\cos \varphi = 1$ . Što je veća reaktivna komponenta u kolu, odnosno više elemenata imaju kapacitivni ili induktivni otpor,  $\cos \varphi$  će biti manji. Koeficijent  $\cos \varphi$  za većinu električnih

uređaja iznosi 0,95. Izuzetak od ovog slučaja predstavljaju aparati za zavarivanje i određeni tipovi elektromotora sa visokim induktivnim opterećenjem.

Pored aktivne, postoji i reaktivna snaga koja određuje energiju koja se iz izvora napajanja dovodi do reaktivnih elemenata i vraća te elemente nazad. Formula trenutne snage za reaktivna kola je:

$$P = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ [VAr]} \quad (3.2)$$

gde  $\sin \varphi$  karakteriše doprinos ukupnoj snazi induktivnih i kondenzatorskih elemenata, a izražava se u jedinicama kao što je VAr (volt amper reaktivni).

U industrijskim energetske mrežama najčešće figurišu trofazni sistemi gde je napon povećan na 380 V, a opterećenje raspoređeno na tri grane (faze) što dovodi do smanjenja radne struje u poređenju sa jednofaznim sistemom u kome je za radni napon određeno 220 V. Formula za izračunavanje snage u trofaznom kolu ima sledeći oblik:

$$P = U \cdot (I_1 + I_2 + I_3) \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (3.3)$$

Iako se snaga trofaznog sistema može izračunavati na različite načine u zavisnosti od izvedene mreže (simetričan sistem, veza u zvezdu, veza u trougao, itd.), snaga trofaznog sistema ne zavisi od načina vezivanja. Za izračunavanje količine energije, odnosno promene u angažovanoj snazi tokom rada mašine u vremenu, formula 3.3 je modifikovana sa aspekta dimenzione analize:

$$P = \frac{U \cdot (I_1 + I_2 + I_3) \cdot \cos \varphi \text{ [W]}}{1000} \text{ [kW]} \quad (3.4)$$

Na osnovu formulacije 3.4, izvršen je proračun snage u zavisnosti od merenja intenziteta struje prikazanih na slici 3.16., pri čemu su generisani profili prikazani na slici 3.17.

Slično kao i za intenzitet električne struje, dostupni su i generisani podaci u vidu snage za obradu aluminijuma<sup>9</sup> i čelika<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji za aluminijum: <https://app.datawrapper.de/preview/ytdY3#embed>

<sup>10</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji za čelik: <https://app.datawrapper.de/preview/sD0AR#embed>





Slika 3.17 Angažovana snaga tokom vremena operacije za: Aluminijum (1), Čelik (2) i poredbeni prikaz<sup>11</sup> (3)

U suštini sposobnost izvođenja posmatrane operacije je posledica mehaničkog rada  $W$ , izvršenog na predmetu rada usled delovanja sile  $F$ :

$$W = F \cdot \Delta t \quad (3.5)$$

<sup>11</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji za poredbeni prikaz: <https://app.datawrapper.de/preview/DpSXI#embed>

gde je  $\Delta t$  vektor pomeranja predmeta rada.

Odnosno, rad je proporcionalan proizvodu sile koja deluje na predmet rada prilikom kretanja predmeta rada (putanji koju je predmet rada prešao).

Diferenciranjem po vremenu dobijamo:

$$P(t) = \vec{F}(t) \cdot \vec{v}(t) \quad (3.6)$$

gde je  $\vec{v}(t)$  brzina kretanja predmeta rada.

Relacija 3.6 ukazuje na činjenicu da je neophodno odrediti dinamiku promene sile i kretanja predmeta rada. Na žalost primena metoda konačnih elemenata ili eksperimentalne modalne analize zahteva ekstremno male veličine elemenata da bi se postigla potrebna računaska preciznost.

Sa druge strane, promenljiva koja se određuje ovim pristupom kombinuje efekte i od sila i od brzina. Njihov proizvod, snagu, odnosno intenzitet promene energije, karakteriše dinamičko ponašanje, koje uključuje i odražava potpunu informaciju o njegovoj ravnoteži i kretanju, te stoga prevazilazi ograničenja za proučavanje promena sile i kretanja odvojeno [51].

Ukupna angažovana snaga za posmatrano vreme trajanja operacije predstavlja količinu rada izvršenog u tom vremenu, odnosno količinu energije  $E(t)$  koju je potrebno obezbediti za potrebe izvršenja operacije, a koju je moguće kvantifikovati sledećom formulom:

$$E(t) = \int_{t_p}^{t_k} P(t) dt \quad (3.7)$$

gde  $t_p$  označava vreme početka, a  $t_k$  vreme završetka izvođenja operacije.

Formulacija data u 3.7 pored toga što kvantifikuje količinu energije za izvođenje posmatrane operacije, predstavlja i funkciju ponašanja posmatranog sistema prilikom izvršavanja procesa rada, kroz niz stanja definisanih relacijom 3.8:

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt} \quad (3.8)$$

U ovom konkretnom slučaju relacija 3.7 može se zapisati i kao:

$$E = \sum_{t_p}^{t_k} P \cdot 0,0002777778 \text{ [kWh]} \quad (3.9)$$

Na osnovu slika 7.16 i 7.17, moguće je, ne samo prilično tačno kvantifikovati korišćenje energije, intenzitet promena u angažovanju snage, uočiti relevantne pikove, itd., već i generisati profil ponašanja operacije prilikom rada (kao neprekidan niz evidentiranih stanja) koji obezbeđuje uvid u proces u kojem je moguća transparentnost forenzike

dogadaja, identifikacija šablona/obrazaca promena ponašanja, čija je vidljivost omogućena praćenjem energetskih tokova posmatranog procesa.

Proračun emisije CO<sub>2</sub>, koji je direktna posledica korišćenja energije u procesu rada, izvodi se na osnovu podataka specifične emisije CO<sub>2</sub> za pojedine izvore energije, tako što se potrebna primarna energija, prema određenom izvoru energije, pomnoži pripadajućom vrednošću specifične emisije CO<sub>2</sub> [242], odnosno:

$$E_M [\text{kg}] = E [\text{kWh}] \cdot 0,53 [\text{kg/kWh}] \quad (3.10)$$

Gde koeficijent 0,53 predstavlja faktor konverzije za kvantifikaciju emisije CO<sub>2</sub> za električnu energiju.

Ovaj pristup takođe omogućava lako generisanje ključnih indikatora procesa (KIP) koji su za posmatrani slučaj dati u tabeli 3.5.

Tabela 3.5 Ključni indikatori procesa (KIP) za posmatrani slučaj

KIP vrednosti			
Materijal	Iskorišćenja energija [kWh]	Vreme trajanja operacije [s]	Emisija CO <sub>2</sub> [kg]
Al	0,34	262	0,24
Č	0,62	385	0,438
KIP odnosi			
Odnos	Korišćenje energije [%]	Vreme trajanja operacije [%]	Emisija CO <sub>2</sub> [%]
(Al/Č)	54,68	68,05	54,79
(Č/Al)	183	146,95	182,5

Potrebno je napomenuti da iako su generisani rezultati u ovom slučaju prikazani kao statički, zapravo su dinamičke prirode jer se podaci prikupljaju, obrađuju i prikazuju u realnom vremenu, pri čemu je istorija svih promena takođe dostupna.

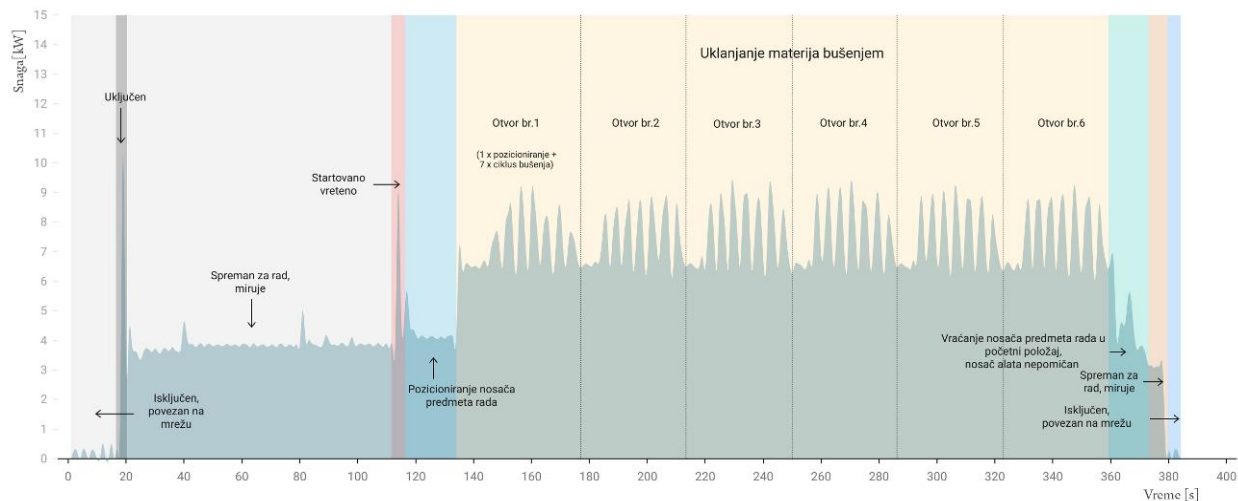
Pored toga, iz ove perspektive energija predstavlja inherentnu sposobnost posmatranog sistema da izvrši spoljašnji uticaj [243], ili drugim rečima da izvede bilo koju vrstu datog zadatka. Dakle, energija predstavlja promenljivu stanja koja je u direktnoj korelaciji sa promenama rada (koji predstavlja procesnu promenljivu), tokom vremena. Slike 3.16 i 3.17 ukazuju da promene u korišćenju energije mašina u proizvodnim sistemima nisu konstantne tokom vremena, već dinamične usled uticaja nelinearnosti proizvodnog procesa i promena stanja mašine tokom vremena. Kompleksne mašine sastoje se od velikog broja komponenti koje koriste energiju pri čemu generišu specifične profile energetskog opterećenja tokom rada [144]. Moderna mašina za glodanje, na primer, može da sadrži širok spektar funkcija, uključujući rukovanje predmetom rada, podmazivanje, uklanjanje strugotine, zamenu alata, otkrivanje anomalija na alatu, itd., a sve uz osnovnu funkciju mašine alatke koja je uklanjanje materijala sečenjem.

Iako se ovo obično odnosi na električnu energiju, isto važi i za druge oblike energije ili medije kao što su komprimovani vazduh, procesna toplota, gas, rashladni fluidi, itd.

S druge strane, ovom metodom moguće je razlikovati različite obrasce stanja i ponašanja mašina, pri čemu u naučnoj literaturi već postoje razne klasifikacije [244], [245]. Najčešći primeri identifikovanih stanja navedeni su u nastavku uz kratak opis:

- stanje isključeno (*eng. Powered Off*) – podrazumeva neaktivan primarni prekidač, odnosno nema aktivnog korišćenja energije zbog nepovezanosti sa električnom mrežom,
- stanje uključivanja/uključeno (*eng. Startup/Powered On*) - pikovi potražnje za energijom uzrokovani uključivanjem određenih komponenti, zagrevanjem, itd.,
- stanje mirovanja (*eng. Idle*) - relativno nisko i konstantno korišćenje energije jer su inicijalne aktivnosti završene i mašina je spremna za rad, i
- radno stanje (*eng. Operation*) - primarni proces stvaranja vrednosti se izvršava, npr. uklanjanje materijala.

Kako je cilj ovog eksperimenta identifikacija i kvantifikacija relevantnih stanja posmatranog procesa obrade, na slici 3.18 prikazana su identifikovana stanja pri čemu je posmatrana obrada predmeta rada od čelika.



Slika 3.18 Identifikovana stanja prilikom obrade predmeta: za čelik<sup>12</sup>

Na datoj slici moguće je uočiti nelinearnost u izvođenju repetitivnih operacija mašine alatke pri izradi perforiranih otvora procesom bušenja, gde mogućnost identifikacije nelinearnosti obezbeđuje tačnije i pouzdanije podatke za proces razumevanja stanja i ponašanja mašine tokom izvođenja procesa rada, a što je još važnije, za proces odlučivanja. U procesu odlučivanja, mogućnost kvantifikacije intenziteta promene nelinearnih članova ukazuje na pojavu anomalija unutar posmatranog procesa pri čemu je analizu, kao i trenutne akcije, moguće implementirati u realnom vremenu.

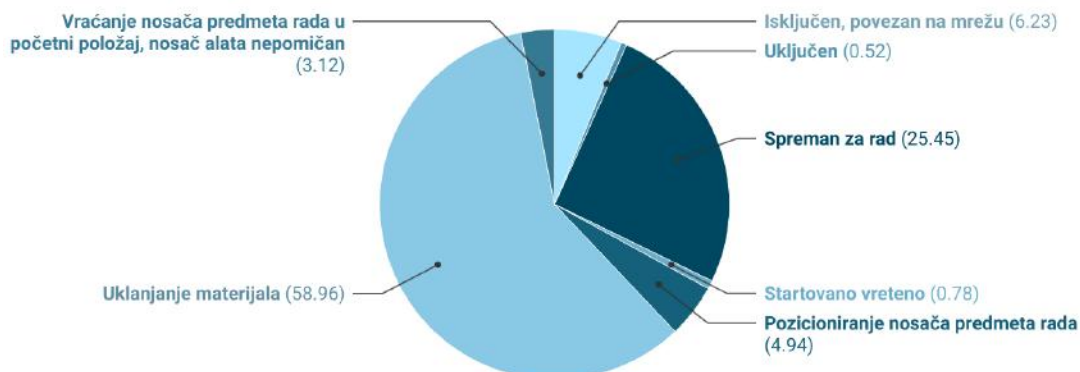
Što je najvažnije, ove promene ostavljaju trag koji se može uočiti stalnim praćenjem tokova energije. Daljom analizom utvrđena je distribucija stanja prvog reda za posmatranu operaciju i data na slici 3.19, dok su podaci takođe dostupni<sup>13</sup>.

Podaci dati na slici 3.19 posebno su zanimljivi posmatrajući sa aspekta metodologije mapiranja tokova vrednosti (VSM, *eng. Value Stream Mapping*). Ovde VSM predstavlja metodološko sredstvo za pojednostavljeno proučavanje proizvodnog procesa od njegovog početka do kraja, tako što ga deli na pojedinačne segmente u kojima se dodaje i na

<sup>12</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji: <https://app.datawrapper.de/preview/GCQJ5#embed>

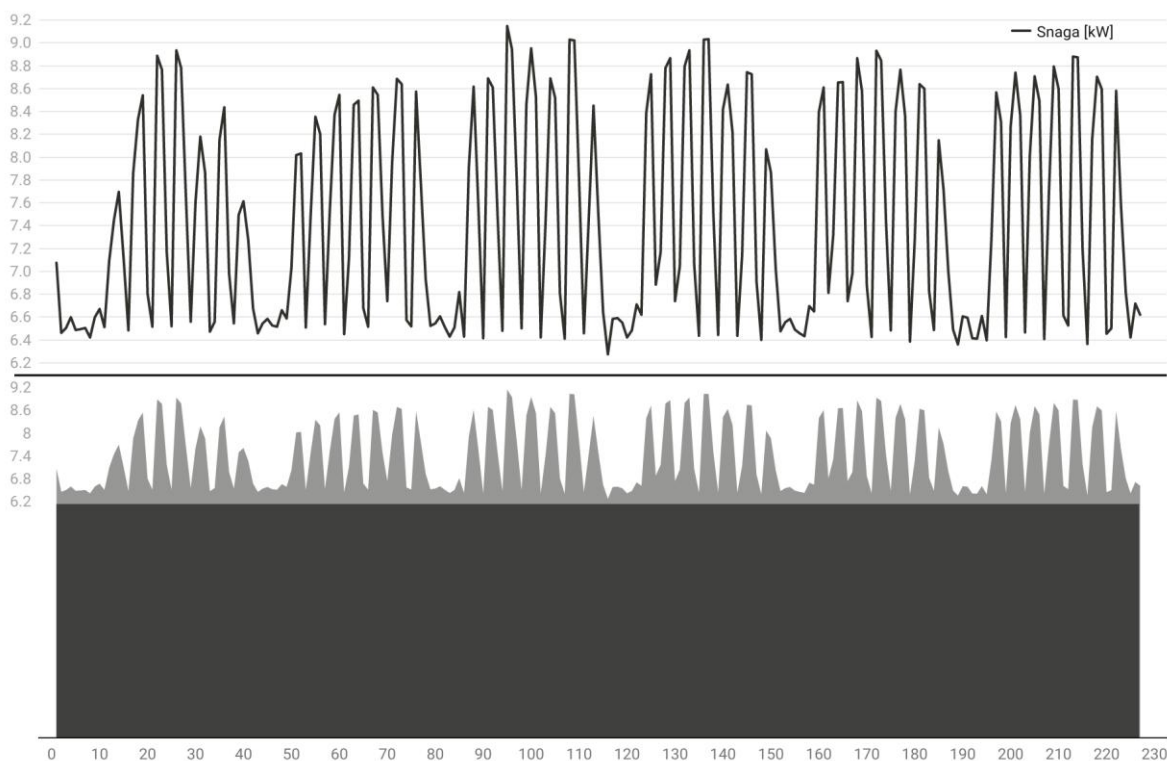
<sup>13</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji: <https://app.datawrapper.de/preview/T6RKf#embed>

one u kojima se ne dodaje vrednost. Opšti cilj VSM metode je poboljšanje performansi procesa optimizacijom aktivnosti u kojima ne dolazi do dodavanja vrednosti, pa se na taj način povećava efikasnost toka vrednosti [246].



Slika 3.19 Distribucija stanja prvog reda za posmatranu operaciju

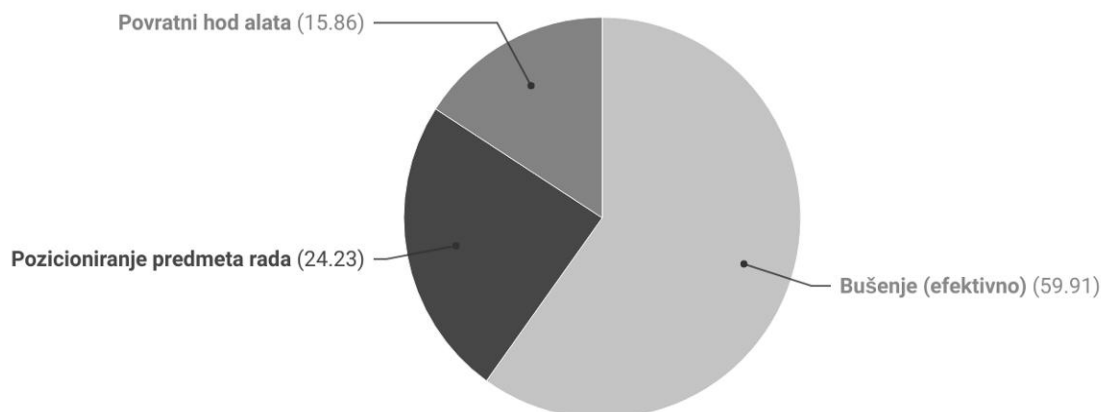
U ovom slučaju, proces dodavanja vrednosti iznosi 58,96% od ukupnog vremena ciklusa (zapravo iznosi manje, zbog činjenice da uklanjanje materijala bušenjem integriše vreme pozicioniranja, ali i povratni hod alata pri čemu se ne dodaje vrednost (slika 3.18)). Ovo se može utvrditi primenom distribucije stanja drugog reda, čiji je fokus samo stanje procesa u kojem se vrši uklanjanja materijala čiji je profil prikazan na slici 3.20<sup>14</sup>.



Slika 3.20 Profil angažovane snage sa fokusom uklanjanje materijala

<sup>14</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji: <https://app.datawrapper.de/preview/NxWnE#embed>

Analizom profila prikazanog na slici 3.20 identifikovana je distribucija stanja za ovaj procesni segment (slika 3.21).



Slika 3.21 Distribucije stanja drugog reda – Stanje uklanjanja materijala<sup>15</sup>

Aktivnosti dodavanja vrednosti iznose 35,32% od ukupnog vremena izvršavanja, odnosno 75,81% (0,47 kWh) od ukupno iskorišćene energije prilikom izvršavanja posmatrane operacije.

Imajući u vidu da se u samo jednoj radnoj smeni, na samo jednoj mašini odvija 70 ciklusa (Vreme ciklusa = 385 s = 6,4167 min; 1 smena = 7,5 h = 450 min → ciklusi po smeni = 70,13), optimizacijom aktivnosti koje ne dodaju vrednost, odnosno redukcijom vremena trajanja operacije simultano se poboljšava kako procesna, tako i energetska efikasnost, redukuju se troškovi i štetne emisije, a povećava produktivnosti na održiv način. Takođe, svi uloženi naponi mogu se podeliti u segmente i kvantifikovati sa dovoljnom preciznošću, na zavidnom nivou sa aspekta vremenskog domena.

Razne analize izučavanja proizvodnih procesa najčešće su bazirane na determinističkom prilazu jer se smatraju dovoljnim za postizanje željenih rezultata. U cilju pojašnjenja u nastavku je dat jedan takav primer.

Neka se proces izrade određenog predmeta rada odvija u uslovima neprekidnog toka sa ritmom toka procesa od 3,5 minuta po komadu i tehnološkim postupkom prema tabeli:

$i$	1	2	3	4	5	6	7
$t_{ii}$ [min/kom]	4	3	2	6	3,5	7	9

gde je  $i$  broj operacija koji je potrebno izvesti na predmetu rada da bi se dobio gotov proizvod, a  $t_{ii}$  vreme trajanja  $i$ -te operacije. Proizvodnja se odvija u 7 serija tokom godine, a međuoperaciona vremena međusobno su jednaka i iznose 10 minuta po komadu. Vreme trajanja ciklusa uravnoteženja procesa je jedna smena, a režim rada sistema je standardan. Potrebno je odrediti:

1. Godišnju količinu proizvoda;
2. Tip i varijantu toka proizvodnje;
3. Grafički prikaz izrade serije predmeta rada i vreme trajanja ciklusa proizvodnje jedne serije predmeta rada;
- 3.1. Način kretanja predmeta rada treba da je takav da se obezbedi minimalno vreme trajanja ciklusa proizvodnje:

<sup>15</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji: <https://app.datawrapper.de/preview/4cVEk#embed>

- 3.2. Način kretanja predmeta rada treba da je takav da se obezbedi maksimalno iskorišćenje tehnoloških sistema tokom ciklusa proizvodnje:
4. Prikazati sve serije na godišnjem nivou:
5. Vreme zastoja između dve susedne serije na 4-oj operaciji:
6. Vreme završetka 45948 komada u kalendarskim danima:
7. Broj jedinica tehnoloških sistema na radnim mestima i stepen iskorišćenja kapaciteta:
8. Broj učesnika u procesu rada u uslovima mogućeg kombinovanja rada radnika na više radnih mesta tokom ciklusa uravnoteženja:
9. Grafički prikaz stanja zaliha na međuskladištima i veličine zaliha uravnoteženja i maksimalnih zaliha.

U nastavku su prikazani i definisani poznati parametri procesa:

Ritam toka procesa,  $r_n = 3,5 \text{ min/kom}$

Međuoperaciono vreme,  $t_{moi} = 10 \text{ min/kom}$

Broj serija na godišnjem nivou,  $i_n = 7 \text{ ser/god}$

Režim rada sistema,  $K_e = 180000 \text{ min/god}$

Vreme trajanja ciklusa uravnoteženja,  $T_{CU} = 1 \cdot S_e = 1 \cdot 7,5 \cdot 60 = 450 \text{ min.}$

Ritam toka procesa -  $r_n$ , je veličina određena stabilnošću ponavljanja ciklusa rada, odnosno stabilnošću vremenskih intervala koji odvajaju ulaz odnosno izlaz dve uzastopne jedinice predmeta rada i najčešće se predstavlja u vidu:

$$r_n = \frac{K_e}{q_j} \text{ [min/kom]} \quad (3.11)$$

gde su  $q_j$ , godišnja količina proizvoda, a  $K_e$ , efektivni kapacitet sistema.

Efektivni kapacitet sistema -  $K_e$ , predstavlja vremenski izraženu efektivnu količinu rada koju sprega tehnološki sistem - učesnik daje u datim uslovima korišćenja i pri datom režimu rada. Uobičajan (standardan) režim rada u proizvodnim sistemima izražava se formulom:

$$K_e = m_e \cdot S_e \cdot n_e \cdot \eta_e \cdot 60 \text{ [min/god]} \quad (3.12)$$

gde su:

- $m_e = 244 \text{ [rd/god]}$ , broj radnih dana na godišnjem nivou,
- $S_e = 2 \text{ [sm/dan]}$ , broj radnih smena u radnom danu,
- $n_e = 7,5 \text{ [h/sm]}$ , broj radnih časova u radnoj smeni (pri čemu se 0,5 (h/sm) predviđa za ishranu i odmor u toku smene),
- $\eta_e = 0,78$ , prosečna vrednost stepen iskorišćenja tehnoloških sistema koja podrazumeva 15% standardnih, i 7% ostalih nepredviđenih gubitaka.

Proračunom na osnovu navedenih parametara dobija se  $K_e = 171288 \text{ min/god}$ , međutim u slučajevima standardnog režima rada usvojena je opšteprihvaćena vrednost od 180000 min/god.

Vreme trajanja ciklusa uravnoteženja -  $T_{CU}$ , je parameter koji se u opštem slučaju svodi na zahtev da se u određenom vremenskom periodu (ciklus uravnoteženja), na svim operacijama rada dobije određen, jednak broj jedinica predmeta rada, odnosno da se održi projektovani ritam toka u vremenu rada sistema.

Godišnju količinu proizvoda u ovom slučaju moguće je odrediti sledećom relacijom:

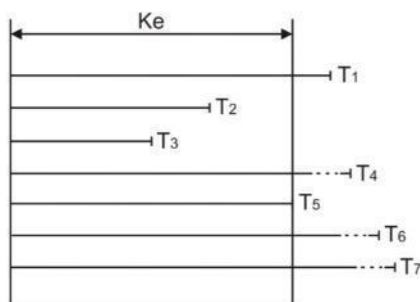
$$q_j = \frac{K_e}{r_n} = 51429 \text{ [kom/god]} \quad (3.13)$$

Kako bi odredili tip i varijantu toka procesa potrebno je utvrditi godišnje opterećenje svake od operacija ( $T_i$ ). Imajući u vidu da godišnje opterećenje posmatrane operacije predstavlja proizvod vremena trajanja posmatrane operacije ( $t_{ii}$ ) i godišnje količine proizvoda ( $q_j$ ),  $T_i$  proračunava se sledećom relacijom:

$$T_i = t_{ii} \cdot q_j \text{ [min/god]} \quad (3.14)$$

Odnosno:

$T_1 = 205716 \text{ min/god}$   
 $T_2 = 154287 \text{ min/god}$   
 $T_3 = 102858 \text{ min/god}$   
 $T_4 = 308574 \text{ min/god}$   
 $T_5 = 180001 \text{ min/god}$   
 $T_6 = 360003 \text{ min/god}$   
 $T_7 = 462281 \text{ min/god}$



U1:  $\sum T_i > K_e$   
 U2:  $k_{ser} > 1$   
 U3: Na većini operacija  $T_i > K_e$

Tip: produkcioni  
 Varijanta toka procesa: 2.1

gde su U1, U2 i U3 uslovi kategorizacije tipa i varijante toka procesa [247].

Osnovne karakteristike produkcionog tipa proizvodnje navedene su u nastavku:

- uglavnom neprekidni tok
- velikoserijska proizvodnja
- niska fleksibilnost
- visoka produktivnost
- sredstva rada produkcionog karaktera (visokoproduktivne mašine)
- srednji stepen stručnosti učesnika u procesima rada
- fleksibilna automatizacija (višepredmetni tok sa opremom produkcionog karaktera na predmetnom principu, odnosno u zavisnosti od tehnološkog postupka)
- predmetni razmeštaj opreme – po redosledu operacija iz tehnološkog procesa
- NC, CNC mašine, robotizovani sistemi



- povišen nivo efikasnosti
- jednostavnost organizacije i postupaka upravljanja
- kraća vremena trajanja ciklusa proizvodnje
- niži nivo nedovršene proizvodnje – redova čekanja
- višepredmetne protočne linije
- linijski raspored opreme
- transportne partije
- viši koeficijent obrtanja novčanih sredstava.

U cilju prikazivanja vremena trajanja ciklusa proizvodnje, neophodno je identifikovati i proračunati relevantne veličine koje nedostaju. U ovom slučaju nepoznate, relevantne veličine koje treba odrediti su:

- tehnoloških sistema (mašina) za svaku od operacija  $M_{ii}$ ,
- veličina serije predmeta rada  $n$  [kom/ser],
- prosečno vreme trajanja operacije u zavisnosti od broja tehnoloških sistema na kojima se izvodi  $t'_{ii}$  [min/kom].

Broj tehnoloških sistema moguće je utvrditi preko relacije:

$$M_{ii} = \frac{t_{ii} \cdot q_j}{K_e} \text{ ili } \Rightarrow M_{ii} = \frac{t_{ii}}{r_n} \quad (3.15)$$

Veličina serije  $n$ , srazmerna je odnosu godišnje količine proizvoda i broja serija u kojima se posmatrani proizvodni ciklus odvija, odnosno:

$$n = \frac{q_j}{i_n} \text{ [kom/ser]} \quad (3.16)$$

Prosečno vreme trajanja operacije u zavisnosti od broja tehnoloških sistema na kojima se izvodi  $t'_{ii}$  dobija se relacijom:

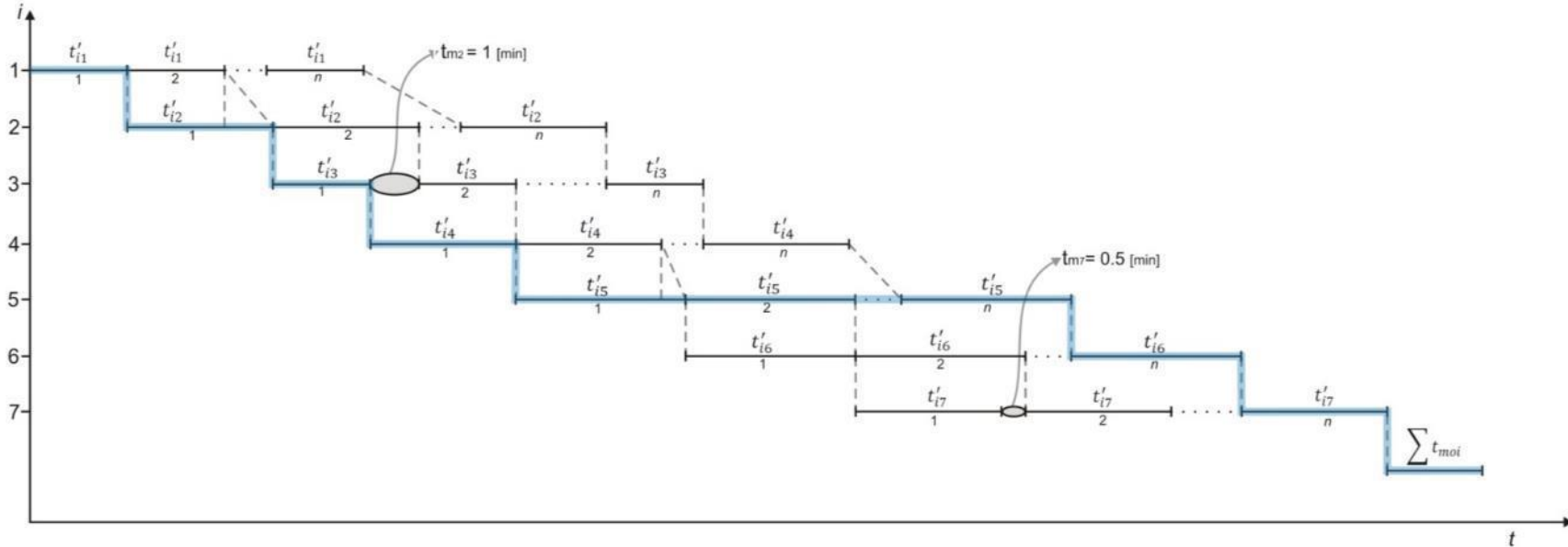
$$t'_{ii} = \frac{t_{ii}}{M_{ii}} \text{ [min/kom]} \quad (3.17)$$

Na osnovu datih formulacija sledi:

$$M_{ii} = \frac{t_{ii} \cdot q_j}{K_e} \text{ ili } \Rightarrow M_{ii} = \frac{t_{ii}}{r_n} \quad t'_{ii} = \frac{t_{ii}}{M_{ii}} \text{ [min/kom]} \quad n = \frac{q_j}{i_n} \text{ [kom/ser]}$$

$$\begin{array}{lll}
M_{i1}^p = \frac{t_{i1} \cdot q_j}{K_e} = 1,14 \Rightarrow M_{i1}^u = 2 & t'_{i1} = 2 & n = 7347 \\
M_{i2}^p = \frac{t_{i2} \cdot q_j}{K_e} = 0,86 \Rightarrow M_{i2}^u = 1 & t'_{i2} = 3 & \\
M_{i3}^p = \frac{t_{i3} \cdot q_j}{K_e} = 0,57 \Rightarrow M_{i3}^u = 1 & t'_{i3} = 2 & \\
M_{i4}^p = \frac{t_{i4} \cdot q_j}{K_e} = 1,71 \Rightarrow M_{i4}^u = 2 & t'_{i4} = 3 & \\
M_{i5}^p = \frac{t_{i5} \cdot q_j}{K_e} = 1 \Rightarrow M_{i5}^u = 1 & t'_{i5} = 3,5 & \\
M_{i6}^p = \frac{t_{i6} \cdot q_j}{K_e} = 2 \Rightarrow M_{i6}^u = 2 & t'_{i6} = 3,5 & \\
M_{i7}^p = \frac{t_{i7} \cdot q_j}{K_e} = 2,57 \Rightarrow M_{i7}^u = 3 & t'_{i7} = 3 & 
\end{array}$$

U prikazanom proračunu  $M_{ii}^p$  odnosi se na proračunati broj mašina koji je neophodan da bi se željena količina proizvoda proizvela za zadati režim rada. Kako proračunati broj mašina nije moguće realizovati u realnosti,  $M_{ii}^u$  predstavlja usvojeni broj mašina na osnovu proračunatih vrednosti. Nakon određivanja ovih veličina moguće je odrediti vreme trajanja ciklusa proizvodnje  $T_{cp}$  za uslov da način kretanja predmeta rada treba da je takav da se obezbedi minimalno vreme trajanja ciklusa proizvodnje, što je prikazano na slici 3.22.



Slika 3.22 Vreme trajanja ciklusa proizvodnje  $T_{cp}$  za uslov da je potrebno obezbediti minimalno vreme trajanja ciklusa proizvodnje

$$T_{ct} = t'_{i1} + t'_{i2} + t'_{i3} + t'_{i4} + t'_{i5} \cdot n + t'_{i6} + t'_{i7} = 2 + 3 + 2 + 3 + 25714.5 + 3.5 + 3 = 25731 \text{ min/ser}$$

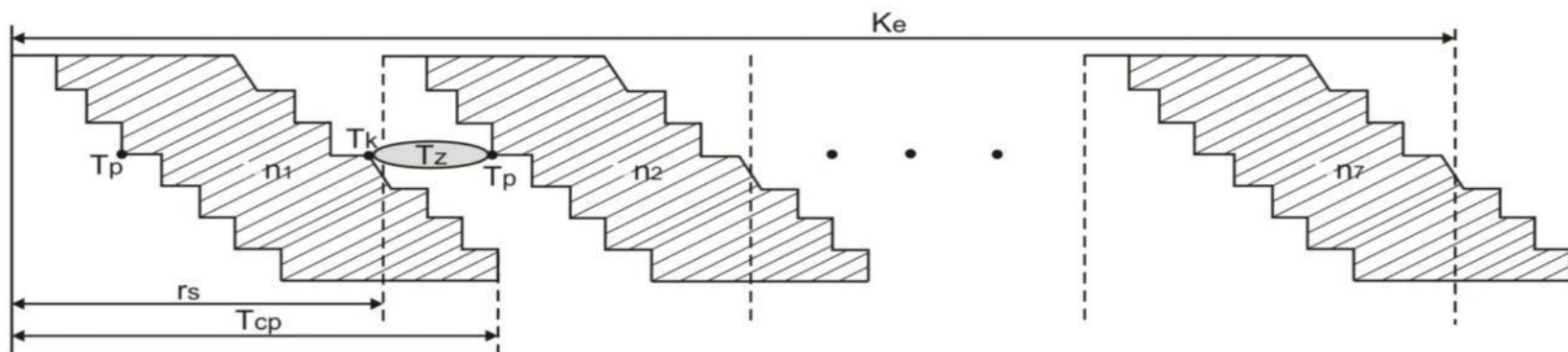
$$T_{cp} = T_{ct} + \sum t_{moi} = 25801 \text{ min/ser}$$

gde je  $T_{ct}$  vreme trajanja tehnološkog ciklusa proizvodnje.

Kako bi se prikazale sve serije na godišnjem nivou, potrebno je odrediti veličinu koja definiše u kom vremenskom momentu je najkasnije potrebno pustiti u rad narednu seriju kako bi se sve predviđene serije mogle proizvesti u definsanom režimu rada sistema. Ova veličina naziva se ritam serije  $r_s$ , i određuje se sledećom relacijom:

$$r_s = \frac{K_e}{i_n} = 25714 \text{ min/ser} \quad (3.18)$$

Imajući u vidu da je  $T_{cp} = 25801$  min/ser, a  $r_s = 25714$  min/ser, očigledno je da će u ovom slučaju efektivni kapacitet sistema biti prekoračen za  $T_{cp} - r_s = 87$  min, što je ilustrativno prikazano na slici 3.23.



Slika 3.23 Prikaz svih serija na godišnjem nivou u odnosu na efektivni kapacitet sistema (Slučaj 1)

Kako se radi o serijskoj proizvodnji, moguće je uočiti određene neefikasnosti procesa koje se posebno ističu kroz zastoje ( $T_z$ ) između puštanja u rad dve susedne serije. U realnim sistemima teži se ka iskorišćavanju mašina i tokom ovih perioda za potrebe dorade, ili izrade prototipa, itd. U takvim situacijama potrebno je odrediti vreme trajanja zastoja na operaciji od interesa, što je u ovom slučaju 4-ta operacija. Vreme zastoja na 4-oj operaciji  $T_z^{4op}$ , moguće je odrediti na sledeći način:

$$T_z^{4op} = r_s + T_p - T_k,$$

gde  $T_p$  označava vreme početka, dok  $T_k$  označava vreme završetka posmatrane (4) operacije. Zatim:

$$T_p = t'_{i1} + t'_{i2} + t'_{i3} + 3 \cdot t_{moi} = 37 \text{ min}$$

$$T_k = T_p + n \cdot t'_{i4} = 22078 \text{ min}$$

↓

$$T_z^{4op} = r_s + T_p - T_k = 25714 + 37 - 22078 = 3673 \text{ min}$$

Iako se radi o serijskoj proizvodnji, jedan od čestih zahteva klijenta odnosi se na specifičnu količinu proizvoda. U tom slučaju potrebno je odrediti tačno vreme završetka proizvodnje tražene količine proizvoda. U ovom slučaju količina od interesa iznosi 45948 komada. Vreme završetka posmatrane količine moguće je odrediti na sledeći način:

$$T_{cp}^{45948} = ?$$

Ako  $n = 7347$  kom/ser  $\rightarrow$  45948 kom se nalazi u 7 seriji

$$T_{cp}^{45948} = 6 \cdot r_s + T_{cp}^{1866}$$

$$T_{cp}^{1866} = t'_{i1} + t'_{i2} + t'_{i3} + t'_{i4} + t'_{i5} \cdot 1866 + t'_{i6} + t'_{i7} + \sum t_{moi} = \\ = 2 + 3 + 2 + 3 + 6531 + 3,5 + 3 + 70 = 6617,5 \text{ min}$$

↓

$$T_{cp}^{45948} = 6 \cdot 25714 + 6617,5 = 160901,5 \text{ min}$$

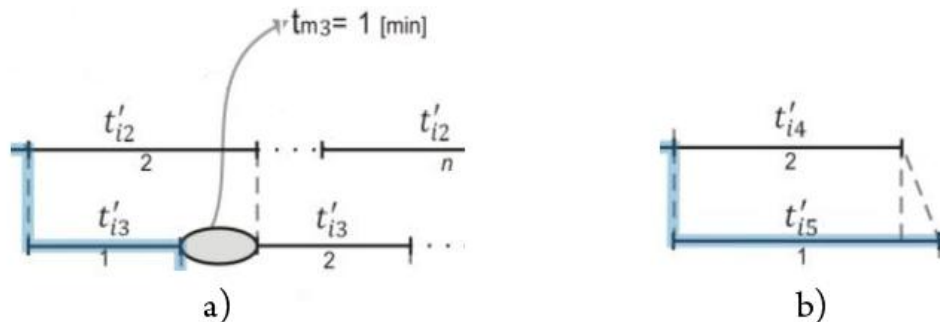
Za izradu posmatrane količine proizvoda potrebno je 160901,5 minuta. Ovo je moguće izraziti u radnim danima  $T_{RD}$ :

$$T_{RD} = \frac{T_{cp}^{45948}}{n_e \cdot S_e \cdot \eta_e \cdot 60} = 229,2 \approx 230 \text{ RD,}$$

Odnosno u kalanderaskim danima  $T_{KD}$ :

$$T_{KD} = \frac{T_{RD} \cdot 365}{m_e} = 341,46 \approx 342 \text{ KD}$$

Ako se na kratko vratimo na grafički prikaz prvog slučaja (minimalno vreme trajanja ciklusa proizvodnje), moguće je uočiti veličine  $t_{m3}$  i  $t_{m7}$ . Vremenski parametar  $t_m$  ukazuje na vreme čekanja u slučajevima gde je prethodna operacija duža od naredne (Slika 3.24 a), dok u suprotnom slučaju kada je naredna operacija duža od prethodne dolazi do nagomilavanja predmeta rada na toj procesnoj poziciji (Slika 3.24 b).



Slika 3.24 Primeri čekanja (a) i nagomilavanja predmeta rada tokom procesa proizvodnje

Uzimajući prethodno navedeno u obzir, proizvodni proces organizovan iz aspekta da se obezbedi minimalno vreme trajanja procesa proizvodnje može biti prilično neefikasan, a samim tim i skup. U ovom konkretnom slučaju procesa izrade, mašine na operacijama 3 i 7 će u praznom hodu provesti:

$$T_m = (t_{m3} + t_{m7}) \cdot (n - 1) = 1,5 \cdot 7346 = 11019 \text{ min/ser}$$

↓

$$T_M = T_m \cdot i_n = 11019 \cdot 7 = 77133 \text{ min/q}_j$$

↓

$$T_{RD} = \frac{T_M}{n_e \cdot S_e \cdot \eta_e \cdot 60} = 109,88 \approx 110 \text{ RD/q}_j,$$

↓

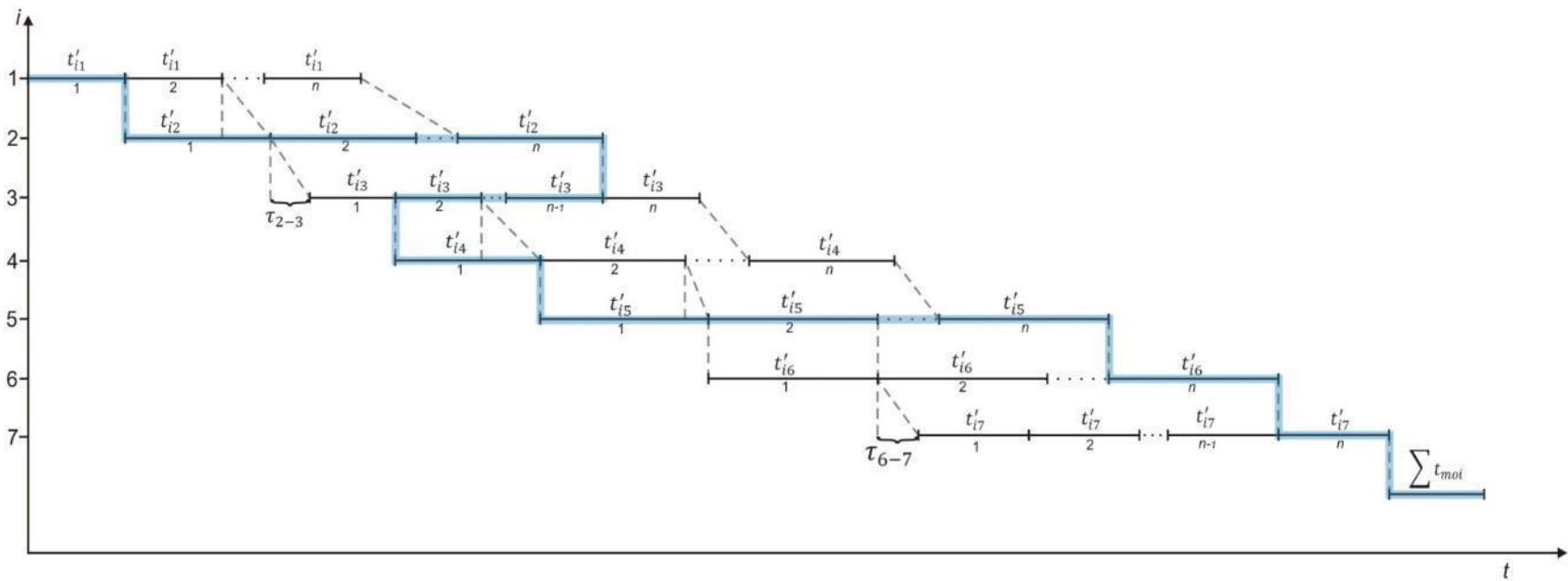
$$T_{KD} = \frac{T_{RD} \cdot 365}{m_e} = 164,36 \approx 165 \text{ KD/q}_j$$

U cilju eliminacije pojave prethodno prikazanog, na slici 3.25, grafički je prikazano vreme trajanja ciklusa proizvodnje u slučaju kada način kretanja predmeta rada treba da je takav da se obezbedi maksimalno iskorišćenje tehnoloških sistema tokom ciklusa proizvodnje.

U ovoj varijanti organizacije proizvodnje predmeta rada, kod kritičnih operacija (u ovom slučaju operacije 3 i 7), dolazi do tzv. pomeranja startovanja mašine tako da se praktično tempira da kada se završi poslednji komad na 2., odnosno 6. operaciji, bez ikakvih problema počinje da se radi poslednji komad na 3., odnosno 7. operaciji. Na taj način eliminisano je vreme čekanja (vreme koje mašina provodi u praznom hodu), mašinu je moguće koristiti za druge potrebe, a sam proces se odvija u kontinuitetu. Pomeranje starta mašina  $\tau$  na 3. i 7. operaciji prikazano je u nastavku:

$$\tau_{2-3} = (n - 1)t_{m3} = 7346 \text{ min}$$

$$\tau_{6-7} = (n - 1)t_{m7} = 3673 \text{ min}$$



Slika 3.25 Vreme trajanja ciklusa proizvodnje  $T_{cp}$  za uslov da je potrebno obezbediti maksimalno iskorišćenje tehnoloških sistema tokom ciklusa proizvodnje

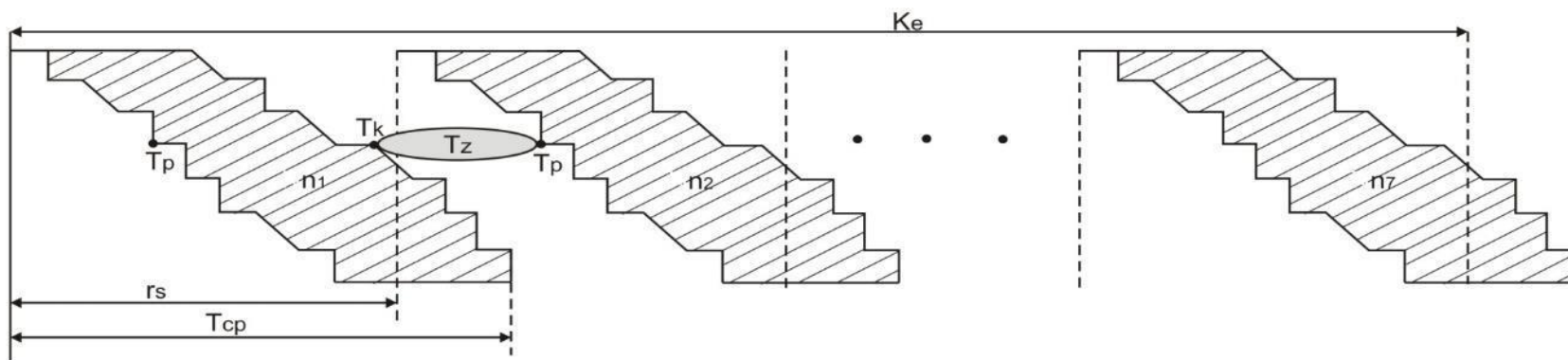
$$T_{ct} = t'_{i1} + n \cdot t'_{i2} - (n - 2) \cdot t'_{i3} + t'_{i4} + n \cdot t'_{i5} + t'_{i6} + t'_{i7} = 2 + 22041 - 14690 + 3 + 25714,5 + 3,5 + 3 = 33071 \text{ min/ser}$$

$$T_{cp} = T_{ct} + \sum t_{moi} = 33147 \text{ min/ser}$$

U prvom slučaju  $T_{cp} = 25801 \text{ min/ser}$ , dok je u drugom  $T_{cp} = 33071 \text{ min/ser}$ , odnosno drugi slučaj je rezultovao povećanjem dužine trajanja ciklusa proizvodnje za 22%. Međutim, povećanje od 7270 min/ser manje je za 34% od vremena koje mašine provedu u praznom hodu.

Kako je za potrebe prethodnog slučaja izračunat ritam serije  $r_s$ , na slici 7.26., dat je prikaz svih serija na godišnjem nivou u odnosu na efektivni kapacitet sistema u ovoj varijanti organizacije proizvodnje.

Imajući u vidu da je  $T_{cp} = 33071 \text{ min/ser}$ , a  $r_s = 25714 \text{ min/ser}$ , očigledno je da će i u ovom slučaju efektivni kapacitet sistema biti prekoračen za  $T_{cp} - r_s = 7357 \text{ min}$ , što je ilustrativno prikazano na slici 3.26.



Slika 3.26 Prikaz svih serija na godišnjem nivou u odnosu na efektivni kapacitet sistema (Slučaj 2)

Po sličnom principu moguće je odrediti vreme zastoja na 4 operaciji kao i u prvom slučaju:

$$T_z^{4op} = r_s + T_p - T_k$$

$$T_p = t'_{i1} + n \cdot t'_{i2} - (n - 2) \cdot t'_{i3} + 3 \cdot t_{moi} = 2 + 22041 - 14690 + 30 = 7383 \text{ min}$$

$$T_k = T_p + n \cdot t'_{i4} = 29424 \text{ min}$$

↓

$$T_z^{4op} = r_s + T_p - T_k = 25714 + 7383 - 29424 = 3673 \text{ min}$$

Takođe, vreme završetka traženog komada u ovom slučaju izgleda ovako:

$$T_{cp}^{45948} = ?; \text{ Ako } n = 7347[\text{kom/ser}] \rightarrow 45948 \text{ kom se nalazi u 7 seriji}; T_{cp}^{45948} = 6 \cdot r_s + T_{cp}^{1866}$$

$$T_{cp}^{1866} = t'_{i1} + t'_{i2} + t'_{i3} + t'_{i4} + t'_{i5} \cdot 1866 + t'_{i6} + t'_{i7} + \sum t_{moi} = 2 + 3 + 2 + 3 + 6531 + 3.5 + 3 + 70 = 6617,5 \text{ min}$$

↓

$$T_{cp}^{45948} = 6 \cdot 25714 + 6617,5 = 160901,5 \text{ min} \approx 230 \text{ RD} \approx 342 \text{ KD}$$



Nakon svega prethodno prikazanog moguće je izvršiti uravnoteženje procesa proizvodnje za željeni period uravnoteženja  $T_{cu}$ . Kako je prethodno određen broj jedinica tehnoloških sistema na radnim mestima, potrebno je odrediti njihov stepen iskorišćenja kapaciteta  $\eta_{ii}$ :

$$\eta_{ii} = \frac{M_{ii}^p}{M_{ii}^u} \quad (3.19)$$

Odnosno:

$$M_{ii} = \frac{t_{ii} \cdot q_j}{K_e} \text{ ili } \Rightarrow M_{ii} = \frac{t_{ii}}{r_n} \quad \eta_{ii} = \frac{M_{ii}^p}{M_{ii}^u}$$

$$M_{i1}^p = \frac{t_{i1} \cdot q_j}{K_e} = 1,14 \Rightarrow M_{i1}^u = 2 \quad \eta_{i1} = 0,57$$

$$M_{i2}^p = \frac{t_{i2} \cdot q_j}{K_e} = 0,86 \Rightarrow M_{i2}^u = 1 \quad \eta_{i2} = 0,86$$

$$M_{i3}^p = \frac{t_{i3} \cdot q_j}{K_e} = 0,57 \Rightarrow M_{i3}^u = 1 \quad \eta_{i3} = 0,57$$

$$M_{i4}^p = \frac{t_{i4} \cdot q_j}{K_e} = 1,71 \Rightarrow M_{i4}^u = 2 \quad \eta_{i4} = 0,86$$

$$M_{i5}^p = \frac{t_{i5} \cdot q_j}{K_e} = 1 \Rightarrow M_{i5}^u = 1 \quad \eta_{i5} = 1$$

$$M_{i6}^p = \frac{t_{i6} \cdot q_j}{K_e} = 2 \Rightarrow M_{i6}^u = 2 \quad \eta_{i6} = 1$$

$$M_{i7}^p = \frac{t_{i7} \cdot q_j}{K_e} = 2,57 \Rightarrow M_{i7}^u = 3 \quad \eta_{i7} = 0,86$$

Stepen iskorišćenja kapaciteta određen na ovaj način predstavlja idealnu raspodelu opterećenja mašina u procesu proizvodnje. Međutim u praksi raspodela opterećenja izgleda malo drugačije što će biti prokomentarisano u nastavku.

Pored  $\eta_{ii}$ , potrebno je odrediti i količinu proizvoda koju je moguće proizvesti tokom ciklusa uravnoteženja. Količina proizvoda koju je moguće proizvesti tokom ciklusa uravnoteženja  $Q_n$ , zavisi od vremena trajanja ciklusa uravnoteženja i ritma toka procesa, odnosno:

$$Q_n = \frac{T_{cu}}{r_n} = 129 \text{ [kom]} \quad (3.20)$$

U procesima obrade produkcionog tipa, veoma je čest slučaj mogućeg kombinovanja rada učesnika u procesu proizvodnje (operatera) na više radnih mesta jer poseduju veštine i znanja za rukovanje na raznim tipovima mašina. Imajući to u vidu u ovom slučaju, određivanje broja učesnika u procesu rada kao i uravnoteženje njihovog opterećenja moguće je realizovati u 2 varijante kao što je prikazano na slici 3.27.

V1

i	t <sub>ii</sub>	M <sub>ii</sub>	η <sub>ii</sub>	R <sub>ii</sub>	T <sub>cu</sub>
1	4	1	1	1	
		2	0.14	2	0.14
2	3	3	0.86	2	
3	2	4	0.57	3	0.57
4	6	5	1	4	
		6	0.71	5	0.71
5	3.5	7	1	6	
6	7	8	1	7	
		9	1	8	
7	9	10	1	9	
		11	1	10	
		12	0.57	11	0.57

$M_{ii} = 12; R_{ii} = 11$

V2

i	t <sub>ii</sub>	M <sub>ii</sub>	η <sub>ii</sub>	R <sub>ii</sub>	T <sub>cu</sub>
1	4	1	1	1	
		2	0.14	2	0.14
2	3	3	0.86	3	0.86
3	2	4	0.57	2	0.71
4	6	5	1	4	
		6	0.71	5	0.71
5	3.5	7	1	6	
6	7	8	1	7	
		9	1	8	
7	9	10	1	9	
		11	1	10	
		12	0.57	11	0.57

$M_{ii} = 12; R_{ii} = 11$

Slika 3.27 Određivanje broja učesnika u procesu rada i uravnoteženje njihovog opterećenja

Na slici 3.27., moguće je uočiti da stepen iskorišćenja kapaciteta tehnoloških sistema nije raspoređen idealno, odnosno bilo da posmatramo V1 ili V2, za potrebe proizvodnje na prvoj operaciji potrebne su 2 mašine, čiji je idealan stepen iskorišćenja po 57%. Međutim, u praksi se teži ka maksimalnom iskorišćenju kako kapaciteta mašine, tako i najbolje varijante iz aspekta učesnika u procesima rada a to je minimalno neophodan broj za izvođenje procesa rada. Pa tako, na prvoj operaciji, gde figurišu 2 mašine, prva će raditi sa 100% kapaciteta, dok će druga raditi sa 14% kapaciteta. Ovo ukazuje da su na prvoj operaciji potrebna 2 operatera. Međutim, kako na drugoj operaciji figuriše 1 mašina sa 86% kapaciteta, operater sa prve operacije angažovan za mašinom čiji je stepen iskorišćenja 14%, kako bi ispunio radnu normu preuzima i izvršenje na mašini u drugoj operaciji. Po ovoj analogiji dalje su raspoređeni svi kapaciteti kako mašina tako i operatera.

Procesi rada neprekidnih tokova su karakterisani ritmom ulaza/izlaza jedinica predmeta rada u/iz procesa rada. Vreme trajanja obrade predmeta rada na određenoj operaciji rada  $t_{ii}$ , nije, u opštem slučaju prilagođeno ritmu zbog razlika u obliku dela, postupku obrade na različitim operacijama rada i struktura tehnoloških sistema.

Procesi rada neprekidnog toka produkcionog tipa su procesi kod kojih je postupak uravnoteženja u najvećoj meri složen u prvom redu zbog različitosti, u određenoj meri, oblika delova, različitih vremena trajanja operacija rada i različitih struktura tehnoloških sistema. Pored toga, na radnim mestima je, u opštem slučaju,  $M_{ii} \geq 1$  tehnoloških sistema što proces uravnoteženja čini još složenijim.

U svom finalnom obliku proces uravnoteženja razmatra funkciju  $q_x$  koja u slučaju generisanja negativnih vrednosti ukazuje na postojanje čekanja ( $t_m$ ) na  $i + 1$ -oj operaciji za čiju eliminaciju je potrebno ispred  $i + 1$ -ve operacije postaviti, na početku perioda  $T_{cu}$ , proračunom određenu količinu predmeta rada  $q_{opt}$ . U suprotnom slučaju, odnosno generisanje pozitivnih vrednosti ukazuje na nagomilavanje nedovršene proizvodnje (predmeta rada) za koju je neophodno obezbediti smeštajni prostor  $q_x$ . Maksimalna količina predmeta rada tokom ciklusa uravnoteženja  $Q_{max}$ , predstavlja zbir apsolutnih vrednosti oba prethodno opisana slučaja ukoliko postoje. Iz prethodno navedenog, može se zaključiti da  $q_x$  predstavlja tekuću funkciju u vremenu ciklusa uravnoteženja koja se može odrediti na osnovu relacije:

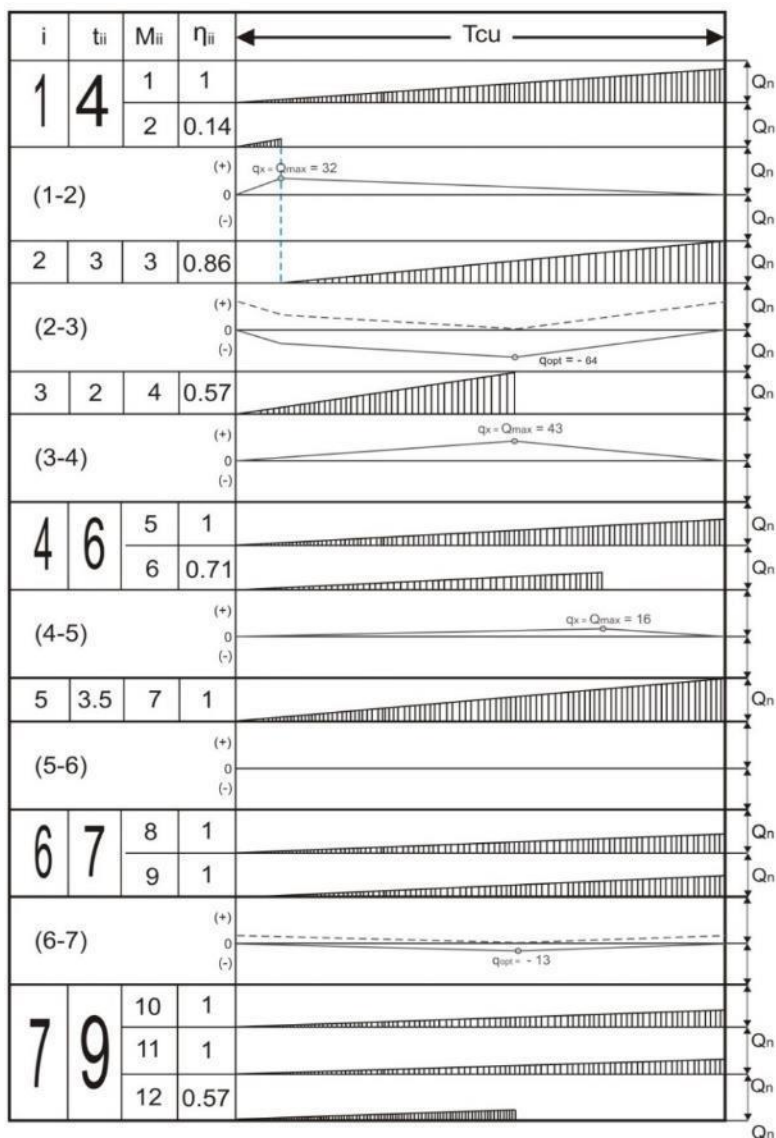
$$q_x = T_{cu} \cdot \left[ \frac{\sum k_{ii}}{t_{ii}} - \frac{\sum k_{ii+1}}{t_{ii+1}} \right] \quad (3.21)$$

Gde je:

$k_{ii}$ - stepen ostvarenog neprekidnog opterećenja radnih mesta sistema na određenoj operaciji rada  $i$  do vremenskog trenutka  $x$  za veličinu  $\eta_{ii}$  uz uslov da  $\eta_{ii} \leq k_{ii}$ .

V1

$$q_x = T_{cu} \cdot \left[ \frac{\sum k_{ii}}{t_{ii}} - \frac{\sum k_{ii+1}}{t_{ii+1}} \right]$$



(1-2)

$$q_{(1-2)}^{(0.14)} = 450 \cdot \left[ \frac{2 \cdot 0.14}{4} - \frac{0}{3} \right] = 450 \cdot (0.07 - 0) = 31.5 \approx 32 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(1-2)} = 0 \text{ [kom]}; q_x^{(1-2)} = q_{(1-2)}^{(0.14)} = 32 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(1-2)} = q_{opt}^{(1-2)} + q_x^{(1-2)} = 32 \text{ kom}$$

(2-3)

$$q_{(2-3)}^{(0.14)} = 450 \cdot \left[ \frac{0}{3} - \frac{0.14}{2} \right] = 450 \cdot (0 - 0.07) = -31.5 \approx -32 \text{ kom}$$

$$q_{(2-3)}^{(0.57)} = 450 \cdot \left[ \frac{0.43}{3} - \frac{0.57}{2} \right] = 450 \cdot (0.143 - 0.285) = -63.9 \approx -64 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(2-3)} = |q_{(2-3)}^{(0.57)}| = 64 \text{ [kom]}; q_x^{(2-3)} = 0 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(2-3)} = q_{opt}^{(2-3)} + q_x^{(2-3)} = 64 \text{ kom}$$

(3-4)

$$q_{(3-4)}^{(0.57)} = 450 \cdot \left[ \frac{0.57}{2} - \frac{2 \cdot 0.57}{6} \right] = 450 \cdot (0.285 - 0.19) = 42.75 \approx 43 \text{ kom}$$

$$q_{(3-4)}^{(0.71)} = 450 \cdot \left[ \frac{0.57}{2} - \frac{2 \cdot 0.71}{6} \right] = 450 \cdot (0.285 - 0.237) = 21.6 \approx 22 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(3-4)} = 0 \text{ [kom]}; q_x^{(3-4)} = q_{(3-4)}^{(0.57)} = 43 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(3-4)} = q_{opt}^{(3-4)} + q_x^{(3-4)} = 43 \text{ kom}$$

(4-5)

$$q_{(4-5)}^{(0.71)} = 450 \cdot \left[ \frac{2 \cdot 0.71}{6} - \frac{0.71}{3.5} \right] = 450 \cdot (0.237 - 0.203) = 15.3 \approx 16 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(4-5)} = 0 \text{ [kom]}; q_x^{(4-5)} = q_{(4-5)}^{(0.71)} = 16 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(4-5)} = q_{opt}^{(4-5)} + q_x^{(4-5)} = 16 \text{ kom}$$

(5-6)

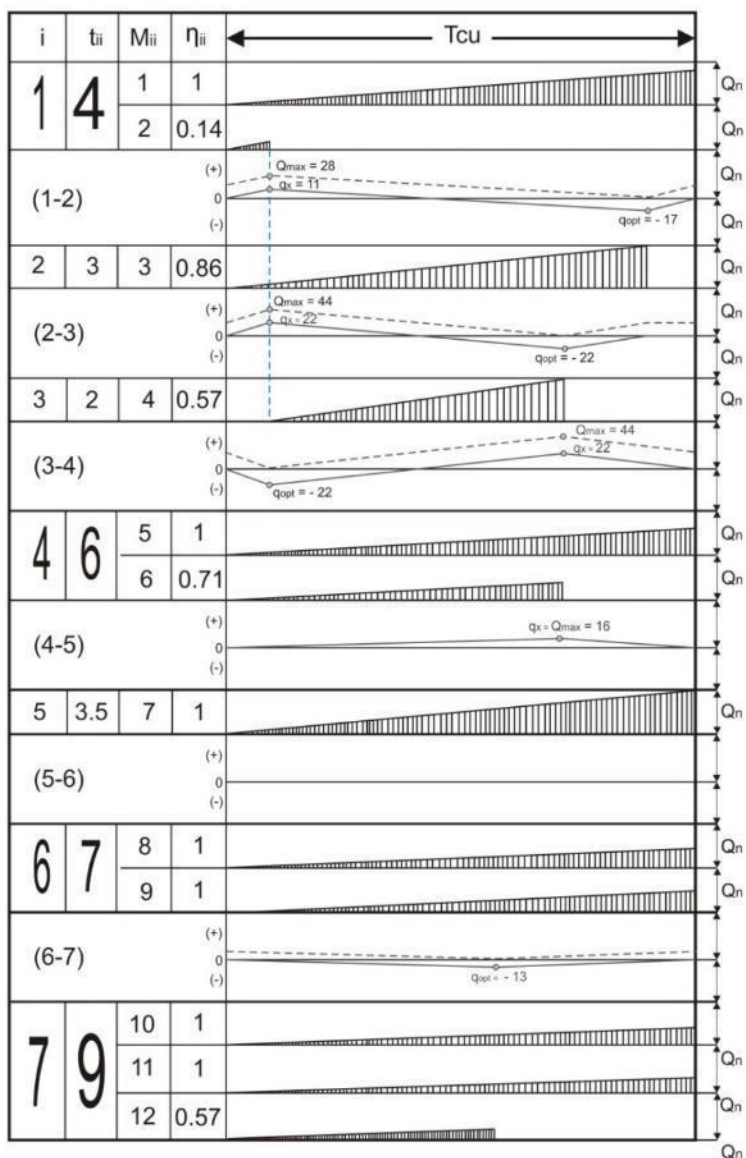
$$\text{Nema smisla } (7 = 2 \cdot 3.5; M_{i5}^{(100\%)} = Q_n \rightarrow M_{i6}^{(100\%)} \cdot 2 = Q_n)$$

(6-7)

$$q_{(6-7)}^{(0.57)} = 450 \cdot \left[ \frac{2 \cdot 0.57}{7} - \frac{2 \cdot 0.57}{9} \right] = 450 \cdot (0.163 - 0.19) = -12.5 \approx -13 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(6-7)} = |q_{(6-7)}^{(0.57)}| = 13 \text{ [kom]}; q_x^{(6-7)} = 0 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(6-7)} = q_{opt}^{(6-7)} + q_x^{(6-7)} = 13 \text{ kom}$$

## V2



(1-2)

$$q_{(1-2)}^{(0.14)} = 450 \cdot \left[ \frac{2 \cdot 0.14}{4} - \frac{0.14}{3} \right] = 450 \cdot (0.07 - 0.047) = 10.35 \approx 11 \text{ kom}$$

$$q_{(1-2)}^{(0.86)} = 450 \cdot \left[ \frac{0.86 + 0.14}{4} - \frac{0.86}{3} \right] = 450 \cdot (0.25 - 0.287) = -16.65 \approx -17 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(1-2)} = |q_{(1-2)}^{(0.86)}| = 17 \text{ [kom]}; q_x^{(1-2)} = q_{(1-2)}^{(0.14)} = 11 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(1-2)} = q_{opt}^{(1-2)} + q_x^{(1-2)} = 28 \text{ kom}$$

(2-3)

$$q_{(2-3)}^{(0.14)} = 450 \cdot \left[ \frac{0.14}{3} - \frac{0}{2} \right] = 450 \cdot (0.047 - 0) = 21.15 \approx 22 \text{ kom}$$

$$q_{(2-3)}^{(0.71)} = 450 \cdot \left[ \frac{0.71}{3} - \frac{0.57}{2} \right] = 450 \cdot (0.237 - 0.285) = -21.6 \approx -22 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(2-3)} = |q_{(2-3)}^{(0.71)}| = 22 \text{ [kom]}; q_x^{(2-3)} = q_{(2-3)}^{(0.14)} = 22 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(2-3)} = q_{opt}^{(2-3)} + q_x^{(2-3)} = 44 \text{ kom}$$

(3-4)

$$q_{(3-4)}^{(0.14)} = 450 \cdot \left[ \frac{0}{2} - \frac{2 \cdot 0.14}{6} \right] = 450 \cdot (0 - 0.047) = -21.15 \approx -22 \text{ kom}$$

$$q_{(3-4)}^{(0.71)} = 450 \cdot \left[ \frac{0.57}{2} - \frac{2 \cdot 0.71}{6} \right] = 450 \cdot (0.285 - 0.237) = 21.6 \approx 22 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(3-4)} = |q_{(3-4)}^{(0.14)}| = 22 \text{ [kom]}; q_x^{(3-4)} = q_{(3-4)}^{(0.71)} = 22 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(3-4)} = q_{opt}^{(3-4)} + q_x^{(3-4)} = 44 \text{ kom}$$

(4-5)

$$q_{(4-5)}^{(0.71)} = 450 \cdot \left[ \frac{2 \cdot 0.71}{6} - \frac{0.71}{3.5} \right] = 450 \cdot (0.237 - 0.203) = 15.3 \approx 16 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(4-5)} = 0 \text{ [kom]}; q_x^{(4-5)} = q_{(4-5)}^{(0.71)} = 16 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(4-5)} = q_{opt}^{(4-5)} + q_x^{(4-5)} = 16 \text{ kom}$$

(5-6)

$$\text{Nema smisla } (7 = 2 \cdot 3.5; M_{i5}^{(100\%)} = Q_n \rightarrow M_{i6}^{(100\%)} \cdot 2 = Q_n)$$

(6-7)

$$q_{(6-7)}^{(0.57)} = 450 \cdot \left[ \frac{2 \cdot 0.57}{7} - \frac{2 \cdot 0.57}{9} \right] = 450 \cdot (0.163 - 0.19) = -12.5 \approx -13 \text{ kom}$$

$$q_{opt}^{(6-7)} = |q_{(6-7)}^{(0.57)}| = 13 \text{ [kom]}; q_x^{(6-7)} = 0 \text{ [kom]}; Q_{max}^{(6-7)} = q_{opt}^{(6-7)} + q_x^{(6-7)} = 13 \text{ kom}$$

### 3.4.1 Diskusija rezulta generisanih prvim eksperimentom

Razmatrajući opisani primer, može se zaključiti da on predstavlja klasičan deterministički pristup koji pruža jasan prikaz procesa proizvodnje serijskog tipa, pri čemu uzima u obzir sve cikluse proizvodnje određene godišnjom količinom proizvoda i režimom rada sistema, s tim da je proces uravnoteženja izvršen na nivou smene.

Sa druge strane, proces posmatran na ovaj način ne uzima u obzir stohastičke parametre koji uzrokuju pojavu nelinearnosti prilikom odvijanja tog procesa. Apsolutna linearnost ne postoji ni u jednom realnom sistemu. Odnosno, postoji mnogo različitih tipova nelinearnosti koji egzistiraju u različitim nivoima realnih sistema. Imajući to u vidu, proces prikazan ovim primerom predstavlja njegovu idealnu reprezentaciju, pri čemu je verovatnoća ove izvedbe u realnosti prilično niska. Na primer, ako vibracija mašine u stvari predstavlja njenu reakciju na sile koje su izazvane pomeranjem delova mašine, i ako su vibracije merene na različitim lokacijama na mašini kako bi se na osnovu njih odredile veličine sile, na osnovu izmerene frekvencije, moguće je pretpostaviti da su sile koje su se javljale imale istu frekvenciju kao i reakcija, i da su izmerene veličine proporcionalne veličinama sila. Pretpostavka da je ponašanje mašine linearno kada je u pitanju reakcija na sile je racionalna za većinu mašina. Međutim, kako se mašine habaju i zavori povećavaju, ili se stvaraju pukotine ili gube elemeti, reakcija mašine ne ostaje dugo linearna i rezultanta izmerenih vibracija različita je od sila koje deluju. Na slici 3.28. ilustrativno je dato poređenje prikaza determinističkog i stohastičkog viđenja izvođenja jedne te iste operacije.

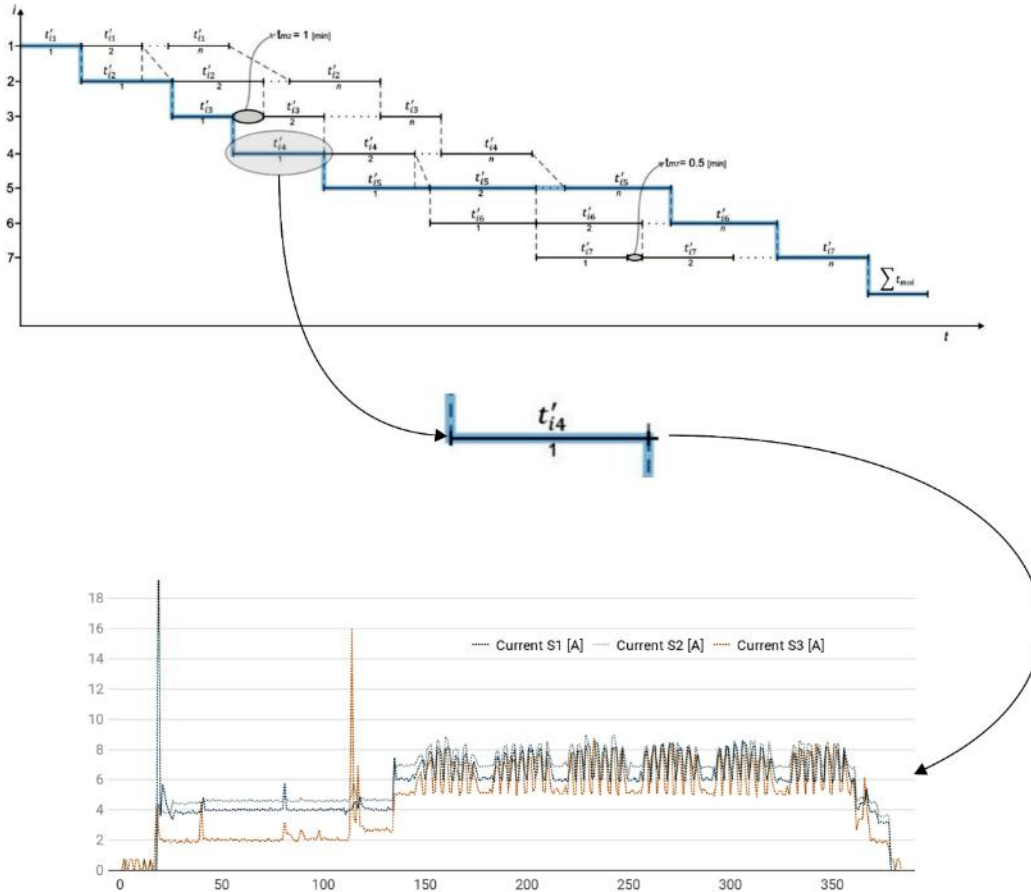
Kako je relacijama od 3.5 do 3.9 prikazana međusobna povezanost ključnih parametara, pojavu nelinearnosti, bez obzira na uzrok, moguće je detektovati preko promene intenziteta sila, kroz promene rada, to jest angažovane snage, odnosno intenziteta korišćenja energije.

Proizvodni sistemi su stoga, u opštem slučaju, nelinearni dinamički sistemi, jer trpe promene tokom vremena, zbog čega se mogu u pojedinim slučajevima učiniti haotičnim, nepredvidljivim ili kontraintuitivnim, u poređenju sa mnogo jednostavnijim linearnim sistemima. Odnosno, ove sisteme karakteriše niz slučajeva koji se tokom vremena dešavaju po nekom zakonu usled funkcionisanja sistema. Pri čemu u nekom momentu duž vremenske linije, bez promena u funkcionisanju sistema, dolazi do određenog stepena deformacije kod narednih slučajeva u tom nizu, pri čemu se pod slučajem podrazumeva događaj koji se pod datim uslovima u datom času, ne mora nužno dogoditi (realizovati).

Sada se može konstatovati da prikazani pristup ide u prilog potvrđivanju mogućeg rešenja problema definsanih hipotezama H1 i H2 koje su navedene u nastavku:

*H1: Identifikacija i uvođenje nelinearnih članova (promenljivih) može imati značajan uticaj na poboljšanje performanse sistema pružajući jasan uvid i realnu reprezentaciju ponašanja sistema usled niza aktivnosti koje mu nelinearno menjaju stanje.*

*H2: Primena modela praćenja ponašanja proizvodnih sistema koje karakteriše nelinearno dinamičko svojstvo a koji se zasniva na principima teorije energetskih tokova u realnom vremenu, pospešuje efikasnije donošenje odluka za povećanje energetske efikasnosti proizvodnih sistema, njihove optimizacije te integraciju novih tehnoloških koncepata.*



Slika 3.28 Prikaz posmatranja prvog komada predmeta rada na 4-oj proizvodnoj operaciji iz determinističkog (gore) i stohastičkog (dole) aspekta

Primenom opisane metode, pomoću prikazanaog tehničkog rešenja, moguće je identifikovati nelinearne članove (promenljive) koji se javljaju u modelu proizvodnog sistema, na osnovu čega se stiče jasan uvid i realna reprezentacija ponašanja sistema usled identifikacije niza aktivnosti koje mu nelinearno menjaju stanje.

Na slici 3.18 se jasno uočava nelinearnost u izvođenju repetitivnih operacija mašine alatke pri izradi perforiranih otvora procesom bušenja, gde mogućnost identifikacije nelinearnosti obezbeđuje tačnije i pouzdanije podatke za proces razumevanja stanja i ponašanja mašine tokom izvođenja procesa rada.

Takođe, ove promene ostavljaju trag koji se definitivno može uočiti kontinualnim praćenjem tokova energije, što je veoma važno za proces odlučivanja, gde mogućnost kvantifikacije intenziteta promene nelinearnih članova ukazuje na pojavu anomalija unutar posmatranog procesa. Pri tome je analizu, kao i trenutne akcije, moguće implementirati u realnom vremenu.

Pored mogućnosti da se u realnom vremenu kvantifikuju anomalije koje se mogu (ali ne moraju) pojaviti, moguće je pratiti i efekte implementiranih mera za poboljšanje procesne performanse odnosno rezultate integracije novih tehnoloških koncepata.

### 3.5 Drugi eksperiment (Mašinski park fabrike Absolute CNC)

Za potrebe analize izabran je proizvodni sistem za oblikovanje i obradu metala Absolute CNC. Posmatrani sistem predstavlja mašinski pogon specijalizovan za automobilsku i vazduhoplovnu industriju, sa fokusom na proizvodnju delova za mašine, elemenata, komponenti, sklopova i podsklopova u količini jednodelnih prototipova ali i obrade velikih razmera. Proces se obavlja uglavnom na CNC obradnim centrima, glodalicama i strugovima, dok se proizvodi uglavnom izvoze na inostrano tržište. Prostornu strukturu posmatranog proizvodnog sistema čine sledeće mašine:

- Schmid VMC-800P,
- Schmid VMC-500P,
- Leadvell MCV-600KSL,
- Takang TNC 05,
- Kia KT 15,
- Haas SL-20,
- Haas ST-20 I,
- Haas ST-20 HE,
- Kasto SBA-260AU,
- Pinnacle VMC 1100S.

Pored njih postoje i mali ručni strugovi, mašine za glodanje i sečenje, stolne brusilice, merni uređaji (Zoller H-320 i U Soft C-400), vijčani kompresor Alup Solo 18 i Alup ADK sušač za komprimovani vazduh.

Ova oprema smatra se značajnim korisnicima energije (ZKE), čiji način rada uslovljava kako se energija u ovom sistemu koristi, odnosno kako se sistem ponaša. Takođe, sveobuhvatan uvid u ponašanje sistema sa aspekta korišćenja energije podrazumeva praćenje i analizu termalnih karakteristika sistema grejanja, hlađenja i ventilacije, kao i sistema osvetljenja i IKT opreme, koji u ovoj studiji nije realizovan, a čiji je koncept integracije prepoznat kao pravac za buduća istraživanja.

Svrha ovog eksperimenta je da obezbedi sledeće:

- Verifikaciju pouzdanog funkcionisanja predloženog tehničkog rešenja pri kontinualnom radu u periodu od mesec dana,
- Prikupljanje podataka o intenzitetu električne struje, za posmatrani period, onih mašina koje su predviđene za rad prema planu i programu proizvodnje i generisanje profila ponašanja,
- Pripremu podataka za automatizovano profilisanje proizvodnih stanja primenom tehnika mašinskog učenja, i
- Pripremu setova podataka za predviđanje budućeg stanja mašina primenom ostalih tehnika i koncepata veštačke inteligencije.

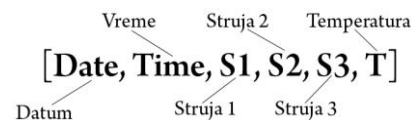
Ekperimentalno testiranje tehničkog rešenja, odnosno Current Profiler-a, u industrijskom okruženju započeto je 31. avgusta i završeno 30. septembra 2020. godine. Tokom tog perioda generisano je, a potom i obrađeno oko 2 milijarde podataka, pri čemu je na kraju procesiranja nešto manje od 17 miliona podataka korišćeno za



generisanje profila ponašanja posmatranih mašina, odnosno segmenata ovog sistema. Distribucija i struktura podataka po mašini/sistemu data je u tabeli 3.6, dok je [video](#)<sup>16</sup> prikaz postavke eksperimenta takođe dostupan.

Tabela 3.6 Distribucija podataka po mašini/sistemu

R.br.	Oznaka mašine/sistema	Tip mašine	Br. uzoraka	Struktura uzorka
1	HAAS SL 20 HE		2.694.778	
2	HAAS SL 20 THE (1)	Strug	2.480.446	
3	HAAS SL 20 THE (2)		2.587.392	
4	HAAS ST 20 Y		2.573.452	
5	SCHMID VMC-800P		171.592	
6	SCHMID VMC-500P	Glodalica	2.571.390	
7	Pinnacle VMC1100S		1.342.193	
8	Kasto SBA-260AU	Testera	2.393.416	



Uzimajući u obzir obim prikupljenih podataka, za generisanje grafičkog prikaza profila ponašanja posmatranih mašina/sistema korišćen je alat [Gnuplot](#)<sup>17</sup> uz sledeća podešavanja:

```
cd 'D:\Absolute_CNC\Merenja\Ready'
set xdata time
set xrange ["2020-08-31,09:24:26":"2020-09-30,09:30:55"]
set format x "%d"
set timefmt "%Y-%m-%d,%H:%M:%S"
set datafile sep ","
set title "Temperatura/Struja/Snaga za mesec"

plot "HAAS(SL20HE)_READY.txt" using 1:5 with lines t "temperatura" lc rgb
"red" lt 1
set xlabel "September"

# Temperatura
set ylabel "Temperatura, [°C]"

# Struja
plot "HAAS(SL20HE)_READY.txt" using 1:2 with lines t "Struja, [A] - S1" lc
rgb "red" lt 1, "HAAS(SL20HE)_READY.txt" using 1:3 with lines t "Struja, [A]
- S2" lc rgb "blue" lt 1, "HAAS(SL20HE)_READY.txt" using 1:4 with lines t
"Struja, [A] - S3" lc rgb "green" lt 1

# Snaga
set ylabel "Snaga, [kW]"
```

U nastavku su na slikama od 3.29 do 3.36 prikazani profili ponašanja posmatranih mašina na osnovu podataka prikupljenih korišćenjem Current Profilera, generisanih na osnovu energetske tokova za posmatrani period.

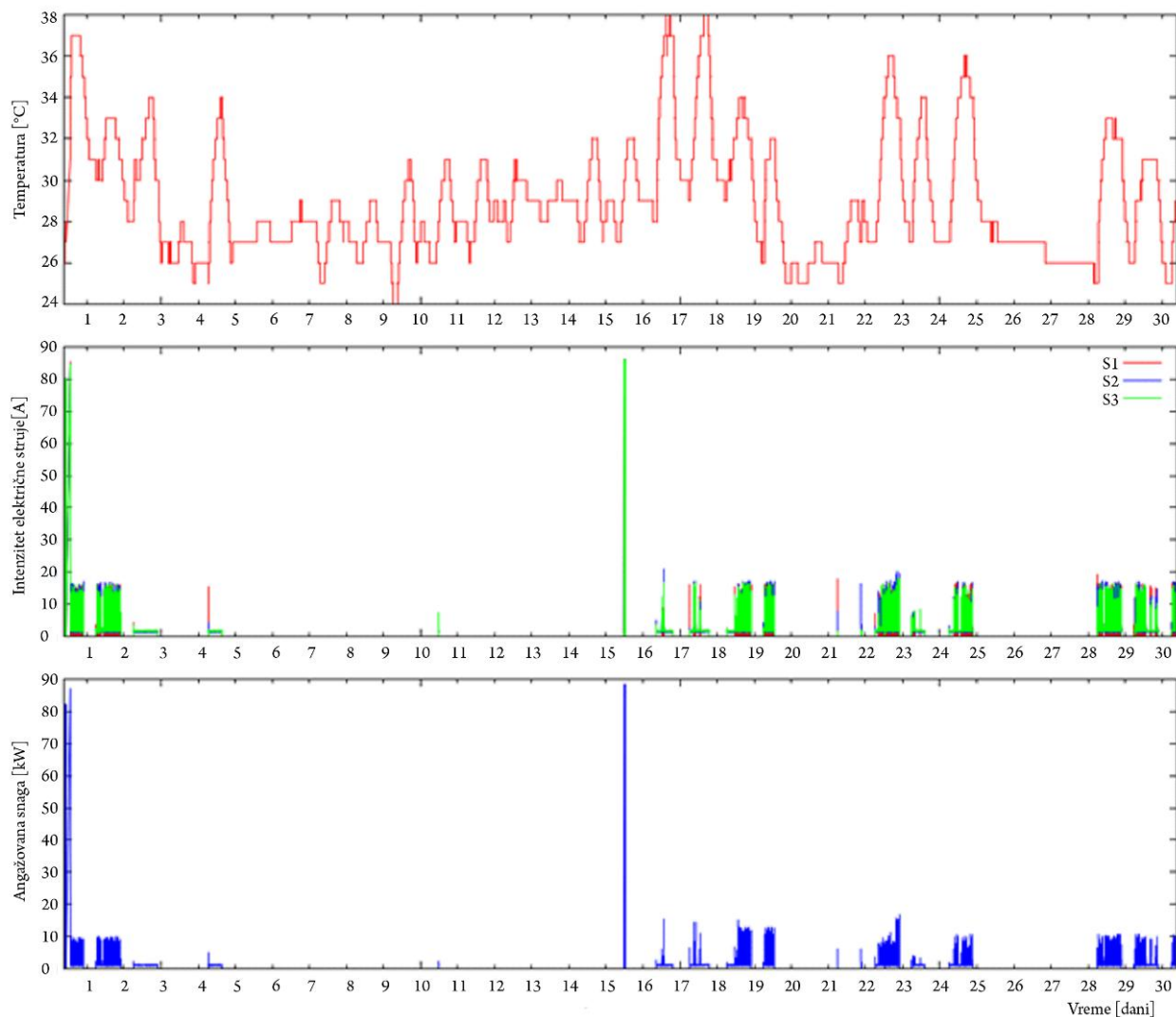
Kako je primenjena metoda detaljno opisana u delu koji se odnosi na prethodni eksperiment, generisani profili su kratko prokomentarisani. Cilj ovog eksperimenta je da se uzorkuju reprezentativni, realni podaci o korišćenju energije za potrebe razvoja modela korišćenjem tehnika i koncepata veštačke inteligencije i implementacije

<sup>16</sup> Link ka video materijalu: <https://www.youtube.com/watch?v=EJjMZO2U1Vs>

<sup>17</sup> Link ka alatu za generisanje grafičkog prikaza podataka: <http://www.gnuplot.info>

podсистema za mašinsko učenje procesa i prediktivno održavanje sa fokusom na tranziciju ka inteligentnim proizvodnim sistemima koje karakteriše visok stepen fleksibilnosti i napredne kontrole.

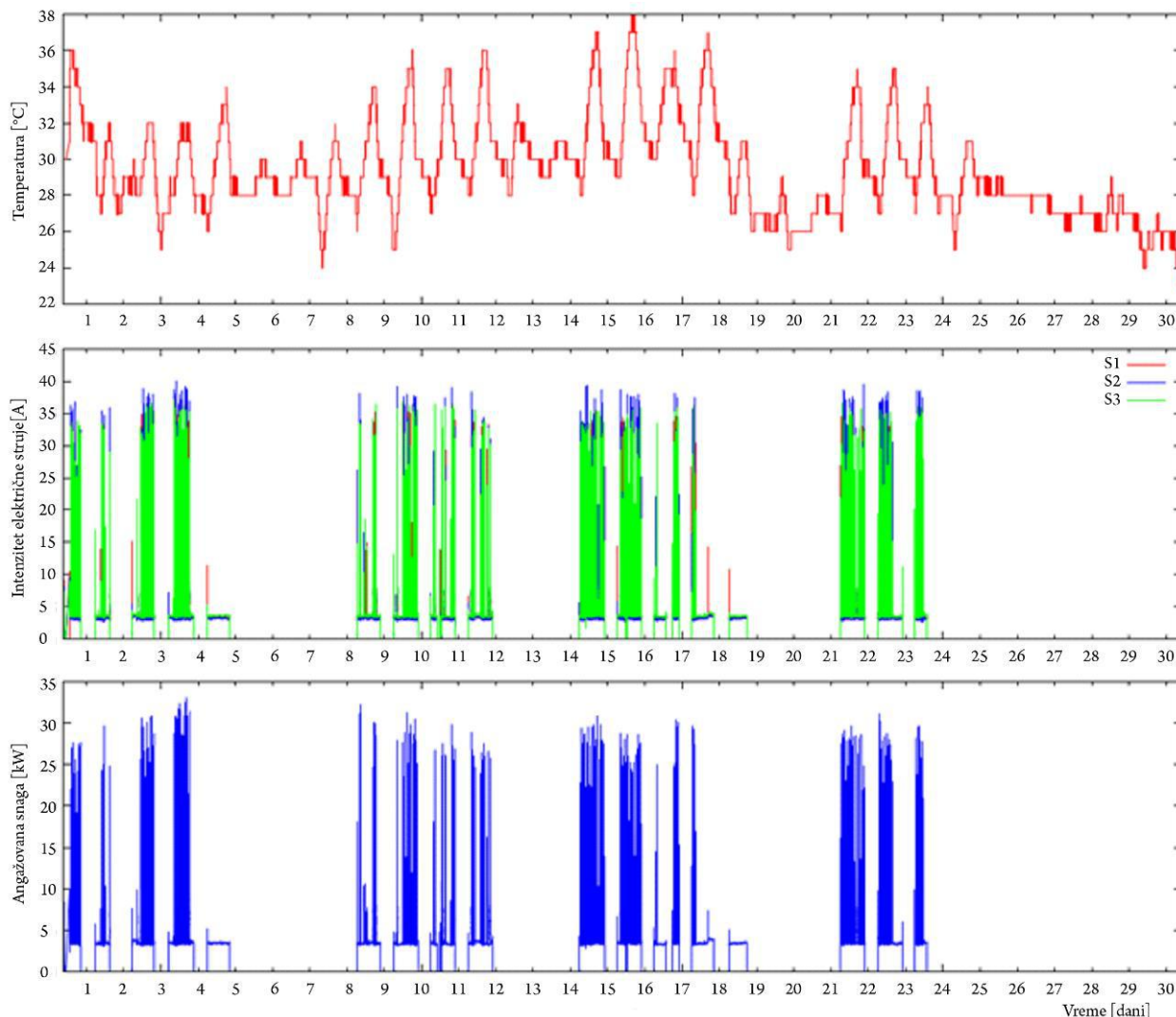
Profil svake mašine prikazane u nastavku sadrži prikaz promene temperature, pri čemu se pod temperaturom podrazumeva radna temperatura mernog uređaja (merena unutar kućišta), promene intenziteta struje po fazama (S1-S3), kao i promene angažovane snage (funkcija promene intenziteta struje), tokom perioda posmatranja.



Slika 3.29 Profil ponašanja mašine HAAS SL 20 HE

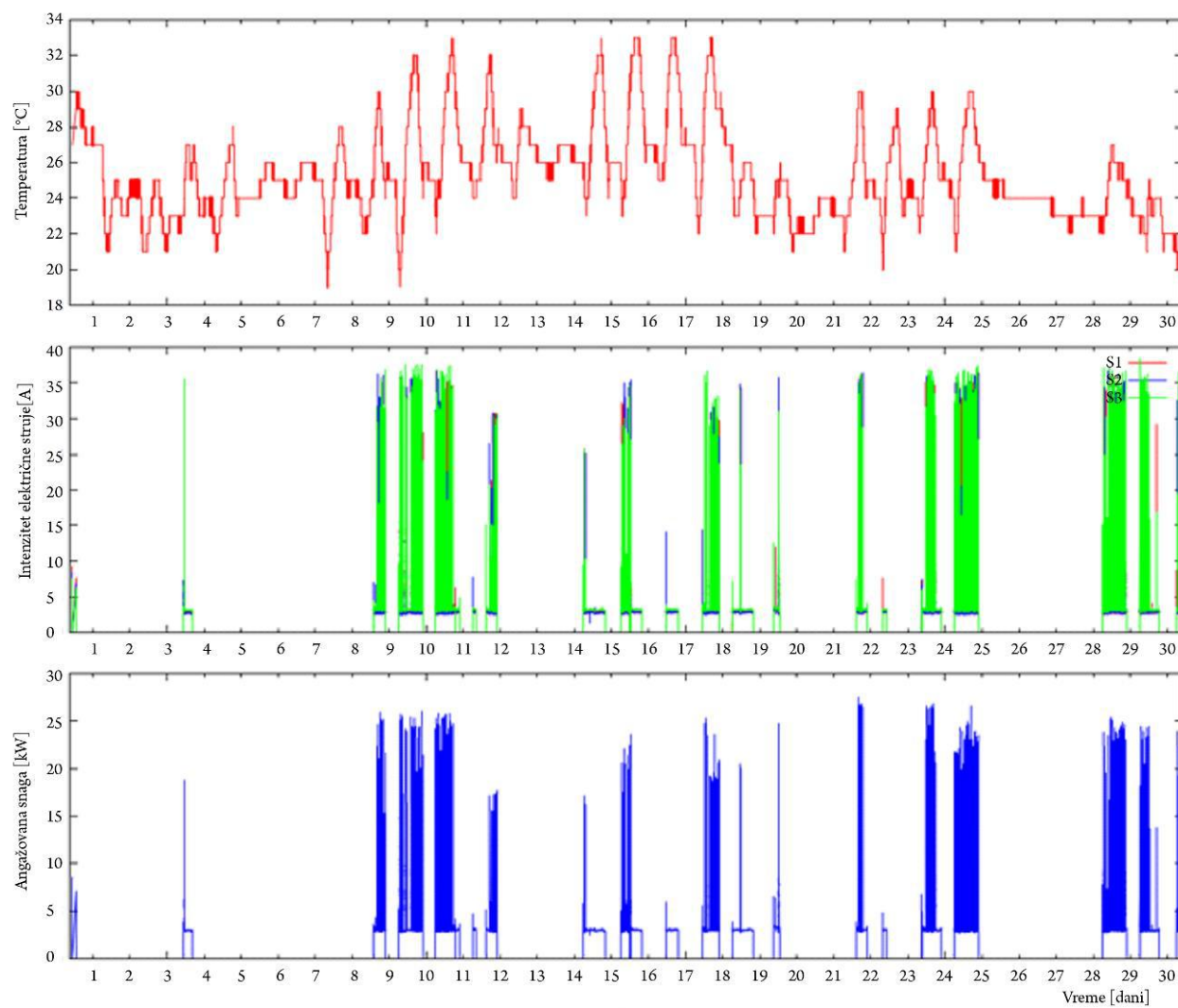
Na slici 3.29 prikazan je profil ponašanja CNC struga (HAAS SL 20 HE). Profili struje, odnosno angažovanja snage jasno oslikavaju periode rada mašine na dnevnom nivou odakle se može uočiti da se pod standardnim ponašanjem ove mašine može smatrati angažovanje snage reda 10-15 kW. Međutim, uređaj je zabeležio ponašanje mašine koje se ne može okarakterisati kao standardno, niti dozvoljeno i to 1. i 15. dana merenja u iznosu od preko 80 kW. Ova karakteristična stanja ukazuju na postojanje određenih anomalija u radu mašine koja su uočena na osnovu načina korišćenja energije. Takođe, iako ovu mašinu karakteriše predimenzionisan prekidački kapacitet (prekidna sposobnost kratkog spoja je 10 kA), intenzitet struje pri punom opterećenju ne bi trebalo da prelazi propisanih 20A,

dok u kratkim intervalima može funkcionisati sa opterećenjem do 35 A maksimalno. Ovo ukazuje na to, da osim što može da dođe do pojave otkaza u radu na posmatranoj mašini, pojava ovih situacija može opteretiti mrežu ako se ovi pikovi poklope sa drugim mašinama u radu usled čega dolazi do pada sistema, odnosno prekida napajanja dela ili sistema u celini.



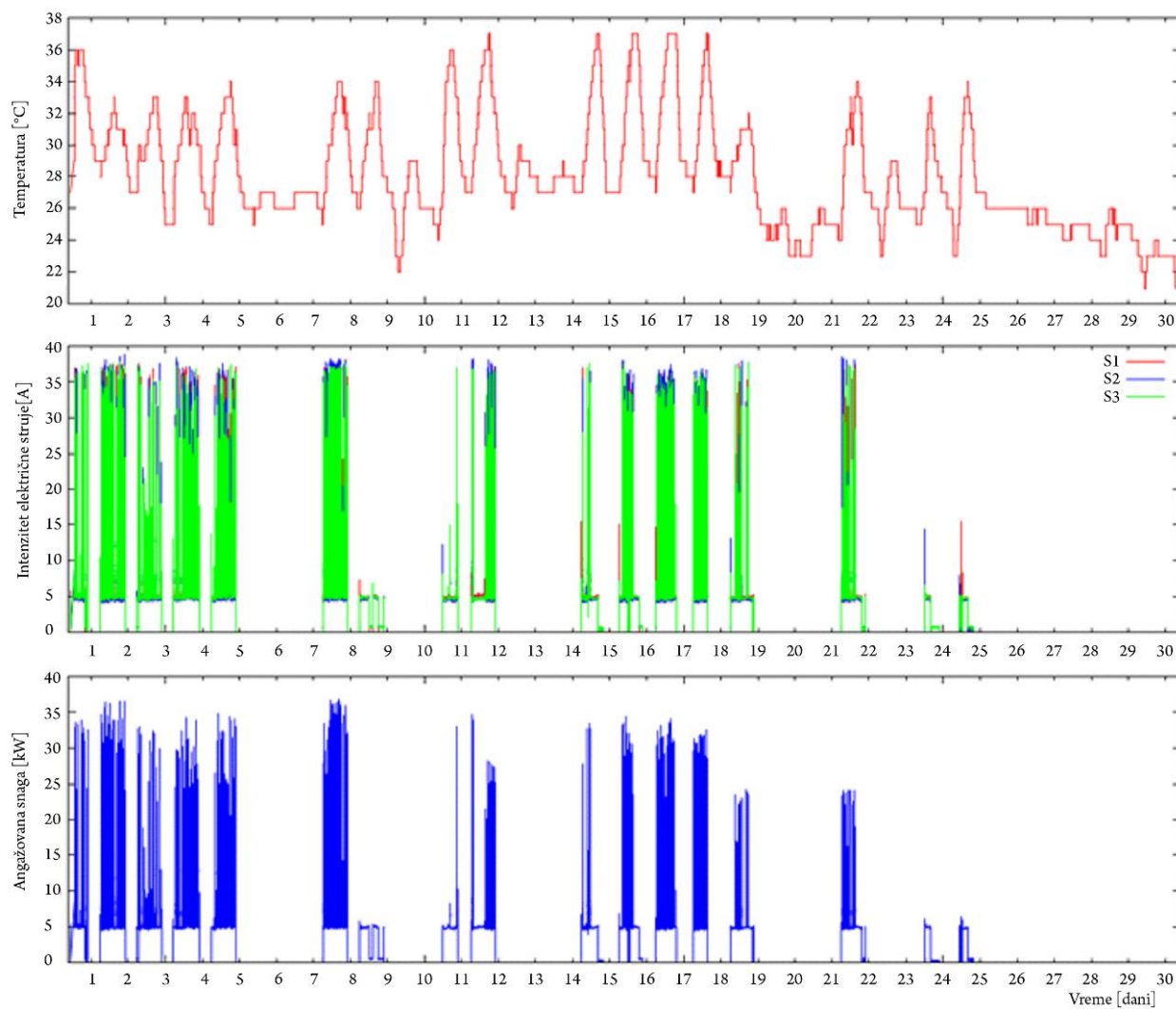
Slika 3.30 Profil ponašanja mašine HAAS SL 20 THE (1)

Slika 3.30, prikazuje prethodno opisane profile za strug istog proizvođača ali za model SL 20 THE. Iako grafički prikaz vizuelno ukazuje na stabilan rad, ovaj model mašine ima iste tehničke karakteristike u vidu napajanja kao i prethodno posmatrani model. Odnosno, iako nema ekstremnih pikova kao u prethodnom slučaju intenzitet struje (a samim tim i angažovana snaga) u znatno većem broju slučajeva premašuju optimalnih 20 A, dok intenzitet struje na fazi 2 u velikom broju slučajeva premašuje i maksimalno dozvoljenih 35A.



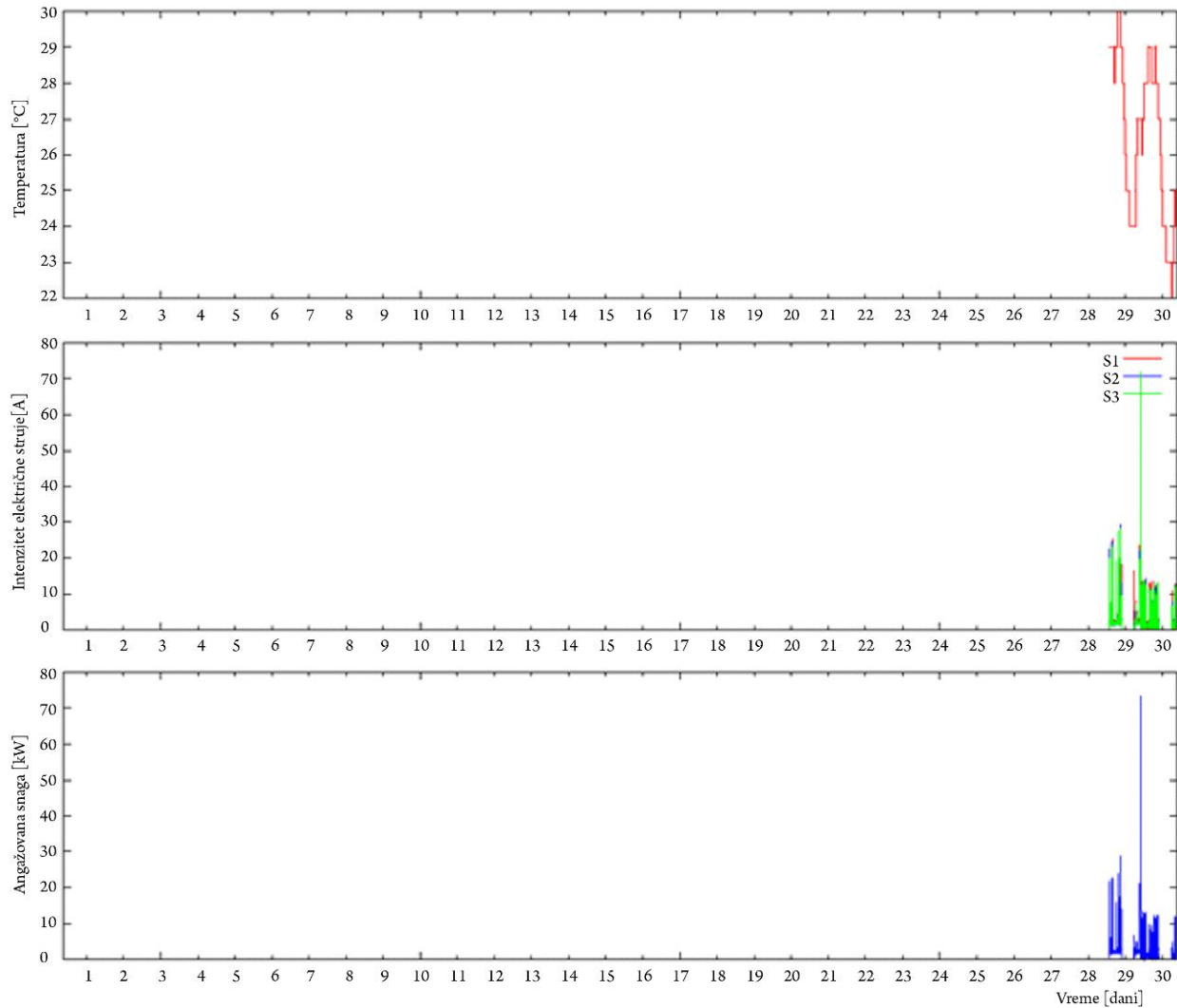
Slika 3.31 Profil ponašanja mašine HAAS SL 20 THE (2)

Slična situacija je vizuelizovana na slici 3.31, za isti model mašine, pri čemu dominira intenzitet struje faze S3.



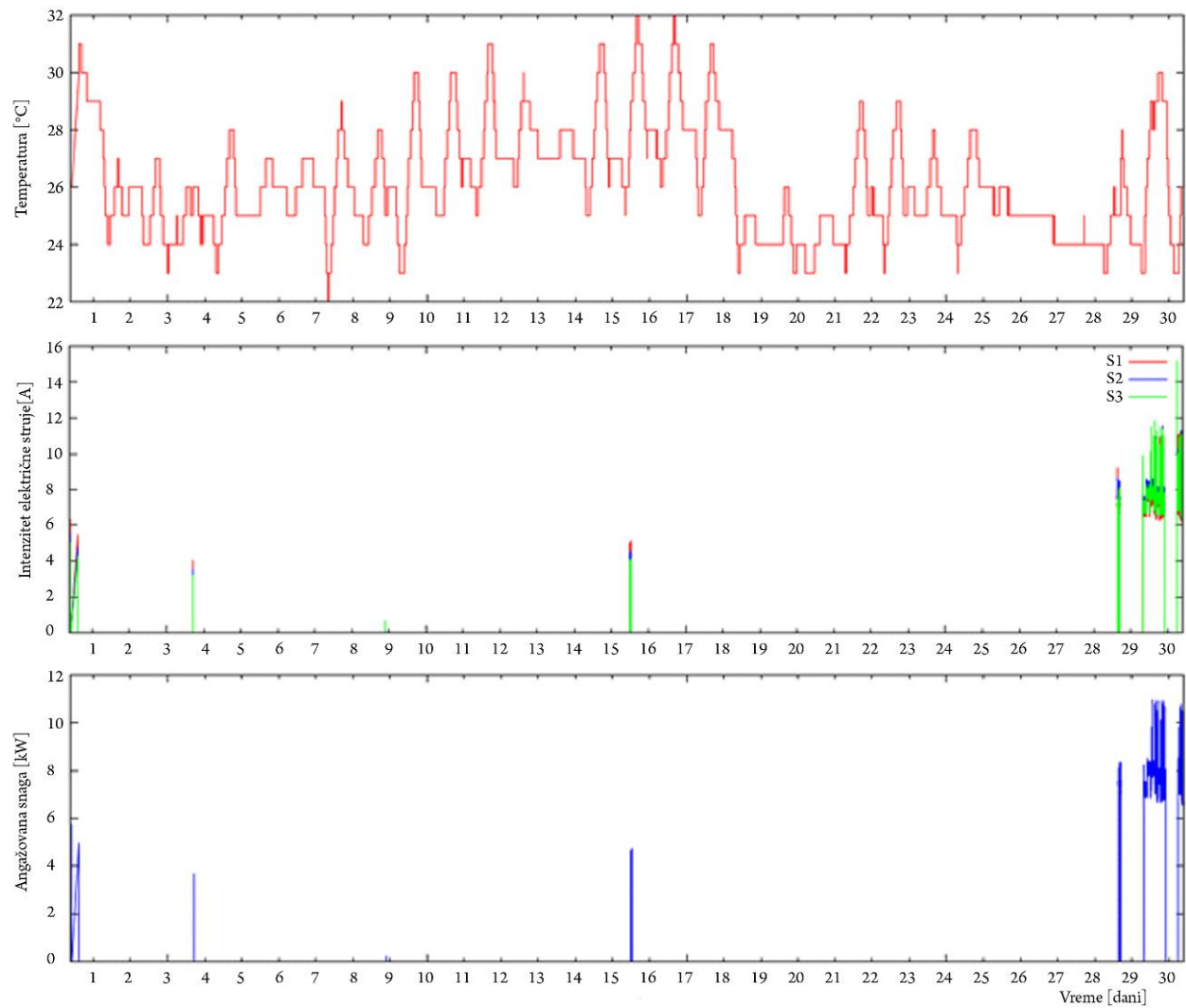
Slika 3.32 Profil ponašanja mašine HAAS ST 20 Y

Nakon razmatranja slike 3.32, evidentno je da svi strugovi premašuju vrednosti indikovane od strane proizvođača, što ukazuje na potencijalnu nestabilnost u radu i prepoterećenje kako samih mašina, tako i sistema u celini. Takođe, tokom perioda merenja, sistem je nekoliko puta (čak i više puta u jednom radnom danu) ostajao bez napajanja, što su merni uređaji zabeležili, a operateri potvrdili. Iako ovo nije bio predmet istraživanja, velika je verovatnoća da je do padova sistema napajanja došlo usled načina rada posmatranih mašina, odnosno poklapanja pikova intenziteta struje u određenim vremenskim tačkama.



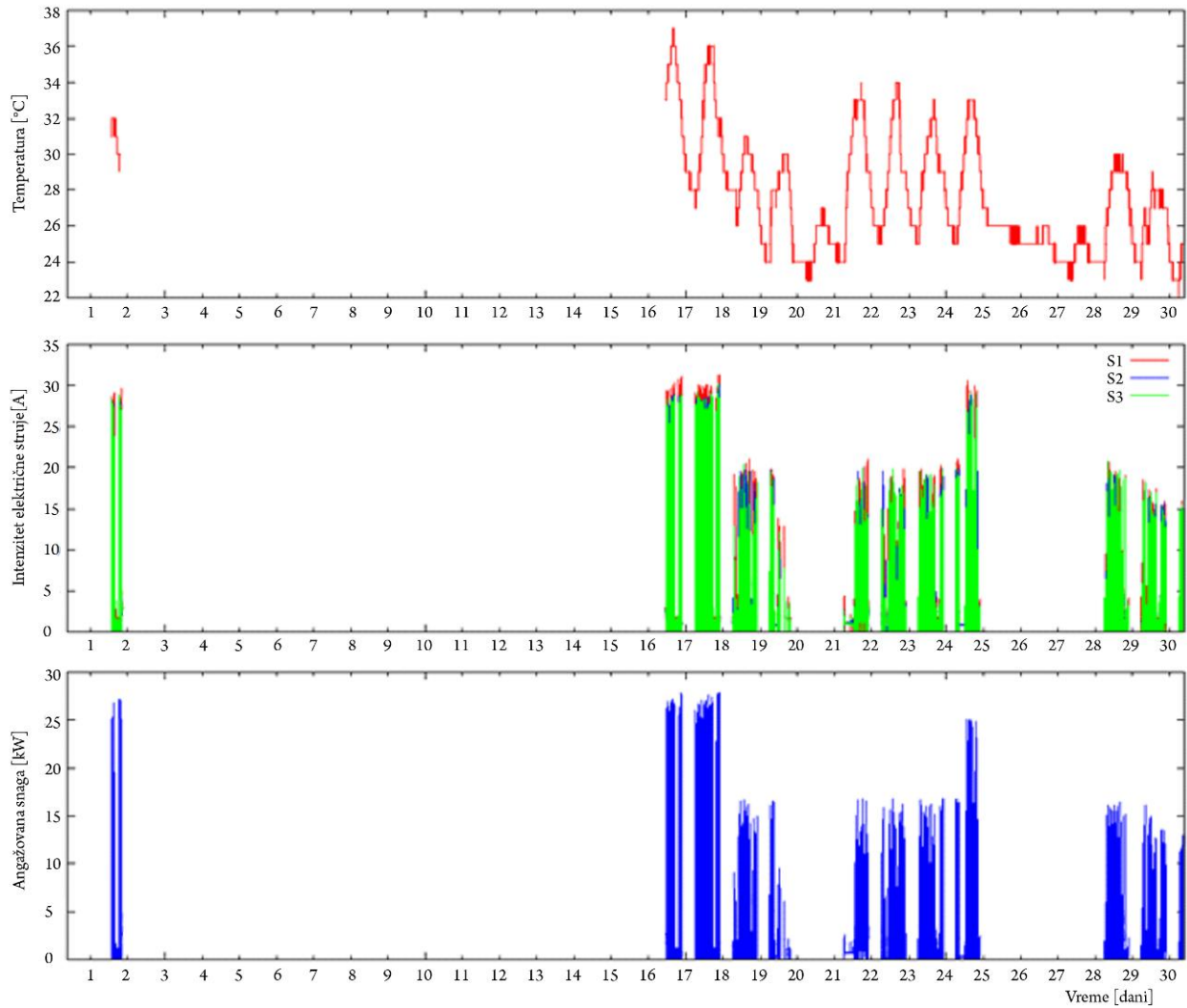
Slika 3.33 Profil ponašanja mašine SCHMID VMC-800P

Profil ponašanja CNC glodalice SCHMID VMC-800P, interesantan je iz razloga što prikazuje efekat pojave otkaza na jednoj od proizvodnih mašina. Kao što se može uočiti na slici 3.33, ova mašina nije radila od 1. pa sve do druge smene 29. dana merenja. Razlog stanja u otkazu je pregorevanje step motora. Očekivano vreme popravke mašine bilo je 7 dana (što je i razlog postavke uređaja za merenje na ovu mašinu), međutim zbog kašnjenja delova, mašina je puštena u rad 21 dan nakon planiranog vremena. Praktično, mašina nije radila mesec dana, što je moglo značajno uticati na poslovanje kompanije u slučaju da je bilo značajnijih potreba za ovim tipom proizvodnog kapaciteta. Takođe, već narednog dana zabeležen je ekstremni pik angažovanja snage od preko 70 kW, što je preko 3 puta više od deklarisanog.



Slika 3.34 Profil ponašanja mašine SCHMID VMC-500P

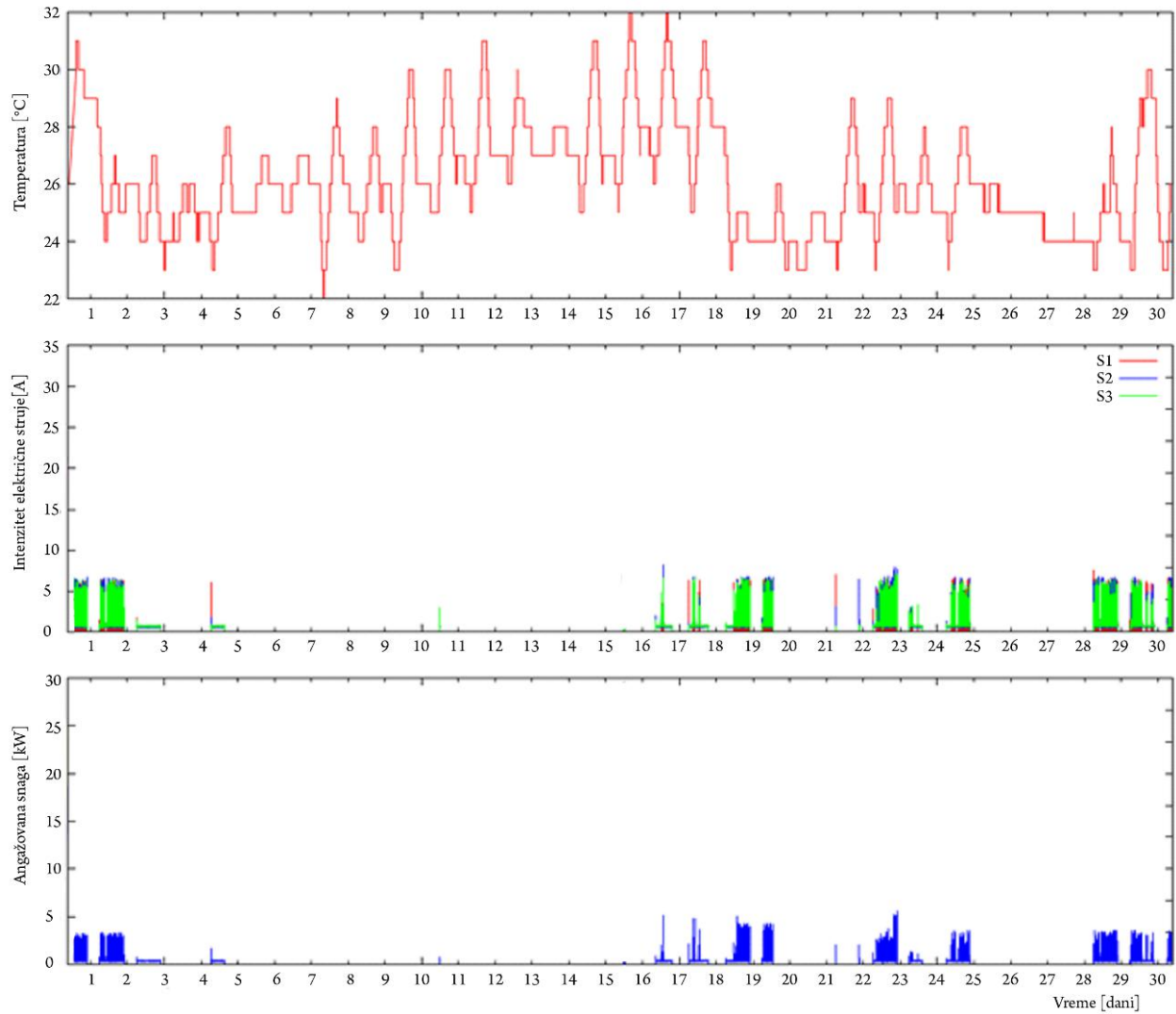
Slika 3.34 prikazuje profil glodalice istog proizvođača za model VMC-500P, pri čemu se može primetiti da je tokom perioda posmatranja ova mašina vrlo kratko bila u upotrebi, pri čemu nisu zabeležena ekstremna stanja u profilu ponašanja.



Slika 3.35 Profil ponašanja mašine Pinnacle VMC 1100S

Na slici 3.35., prikazan je profil za glodalicu Pinnacle VMC 1100S. Ova mašina radila je u prvoj polovini posmatranog perioda u drugoj smeni drugog dana posmatranja, dok je u drugoj polovi perioda posmatranja radila intenzivnije. Ova mašina nije pokazala značajnije anomalije tokom perioda posmatranja, odnosno postoje karakteristični pikovi koji ne premašuju deklarisanu vrednost.





Slika 3.36 Profil ponašanja mašine KASTO SBA-260AU

Poslednja posmatrana mašina je mašinska testera KASTO SBA-260AU, koju ne karakteriše intenzivna upotreba. Ova mašina takođe ne premašuje deklarisanе karakteristike propisane od strane proizvođača.

Za potrebe dalje analize uzorkovani su profili za mašinu HAAS SL 20 HE, kao i za mašinu Pinnacle VMC 1100S (poglavlja 3.5.1 – 3.5.3).

### 3.5.1 Model za automatizovano profilisanje ponašanja sistema na osnovu praćenja tokova energije

Nakon prikupljenih podataka izvršena je selekcija i priprema podataka za potrebe izgradnje modela. Razvoj modela izvršen je u programskom okruženju [Orange Data Mining 3.28](#)<sup>18</sup>, koji predstavlja platformu otvorenog koda za mašinsko učenje i vizuelizaciju podataka koja omogućava vizuelnu izgradnju tokova analize podataka pomoću raznovrsnih setova alata.

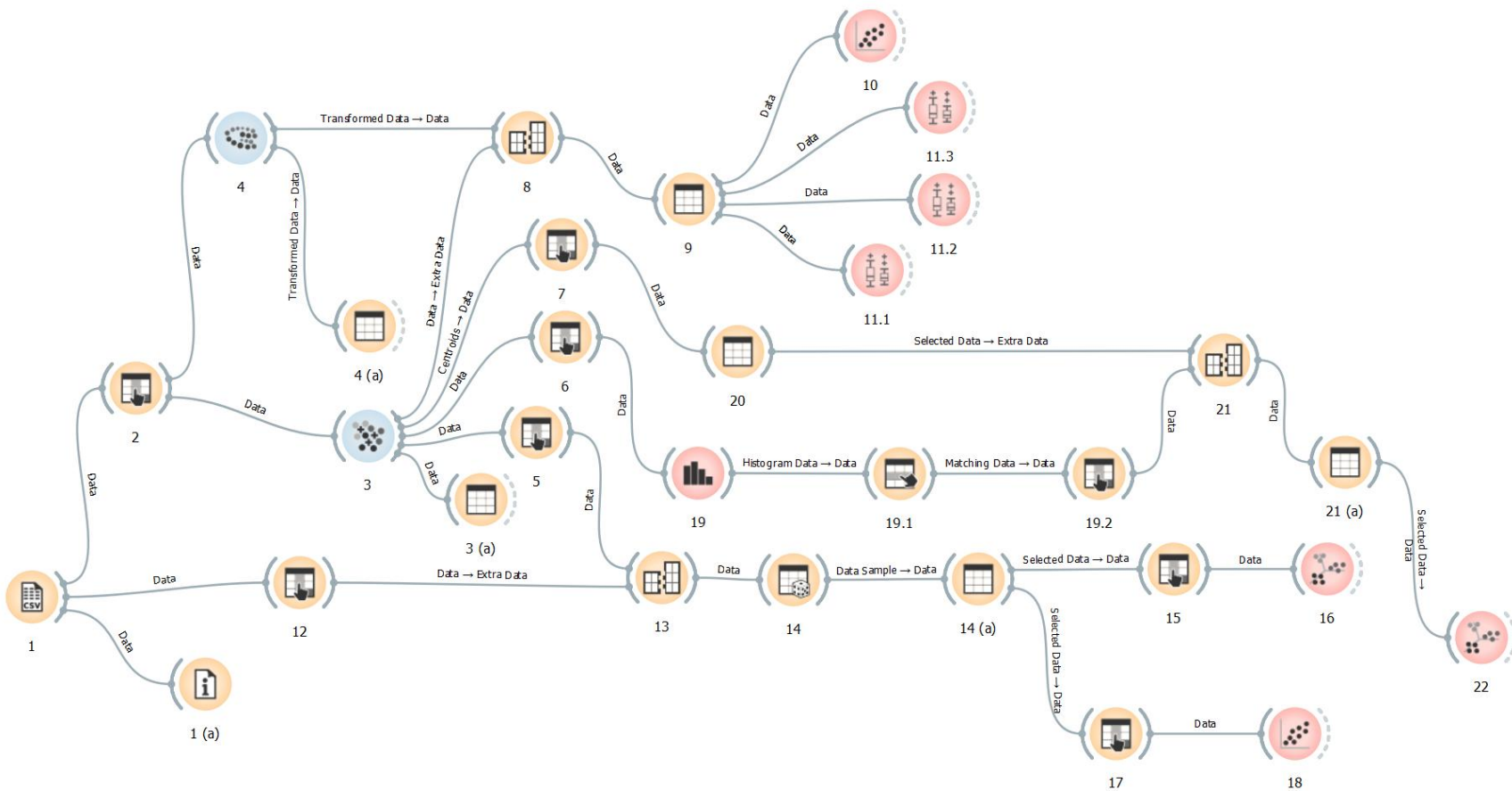
Orange je baziran na sopstvenom formatu podataka, ali može da obrađuje i izvorne Excel datoteke, datoteke sa podacima razdvojenim zarezima ili tabulatorima.

Ulazni skup podataka je obično tabela, sa instancama podataka (uzorcima) u redovima i atributima podataka u kolonama. Atributi mogu biti različitih tipova (numerički, kategorički, datumsko-vremenski i tekstualni), sa dodeljenim ulogama (ulazne karakteristike, meta atributi i klase). Tip i uloga atributa podataka mogu se navesti u zaglavlju tabele podataka, pri čemu se takođe mogu modifikovati korišćenjem dodatnih programskih alata.

Na slici 3.37 dat vizuelni prikaz modela.

---

<sup>18</sup> Link ka stranici za preuzimanje i dodatne informacije: <https://orangedatamining.com>



Slika 3.37 Vizuelni prikaz modela za automatizovanu detekciju stanja i profilisanje ponašanja sistema na osnovu tokova energije

Razvijeni sistem rešava problem klasifikacije. Cilj je da se na osnovu ulaznog seta podataka prepoznaju karakteristična stanja posmatranog sistema u zavisnosti od načina na koji koristi energiju.

U nastavku su detaljno opisani koraci prikazani na slici 3.37, pri čemu su generisani rezultati komentarisani na licu mesta.

### Korak 1: Učitavanje .CSV datoteke (eng. *CSV File Import*)

- Korišćenjem ovog alata učitavaju se podaci iz .CSV formatirane dataoteke u vidu tabele.
- Generiše se izlaz u vidu:
  - skupa podataka (eng. *Dataset*) iz .csv datoteke,
  - okvir podataka (eng. *Data Frame*): pandas DataFrame objekat
- Alat za uvoz CSV datoteke čita datoteke razdvojene zarezima i šalje skup podataka na svoj izlazni kanal. Separatori datoteka mogu biti zarezi, tačke i zarezi, razmaci, tabulatori ili ručno definisani graničnici.
- Izlaz okvira podataka se može koristiti u okviru alata Python Script tako što se povezuje sa ulazom `in_object` (npr. `df = in_object`). Tada se može koristiti običan DataFrame.
- Uvoz u kojem korisnik postavlja parametre može se ponovno otvarati pritiskom na opcije uvoza u alatu, kako bi se podesili tipovi kolona i redova u vidu zaglavlja, ignorisanja ili kategorizacije (npr. normalan red sa podacima).
- Podrazumevano je UTF-8 šifrovanje (eng. *Encoding*) datoteka uz moguće modifikacije.
- Podešavanja uvoza:
  - Razgraničenje ćelija: Tab, Zarez, Tačka-zarez, razmak, itd.
  - Znak navoda: simbol " ili ' definiše šta se smatra tekstem.
  - Separatori brojeva: Grupisanje: graničnici za hiljade, npr. 1,000; Decimala: graničnici za decimala, npr. 1.234.
  - Tip kolone:
    - Automatski: Program će automatski pokušati da odredi tip kolone (Uobičajeno).
    - Numerički: za neprekidne tipove podataka, npr. (1.23, 1.32, 1.42, 1.32)
    - Kategoričan: za diskretne tipove podataka, npr. (braon, zelena, plava)
    - Tekst: za string tipove podataka, npr. (Džon, Olivija, Majk, Džejn)
    - Datum i vreme: za vremenske promenljive, npr. (1970-01-01)
    - Zanemari: ne ispisuj kolonu.
- Pritiskom na Reset će se postavke vratiti u prethodno postavljeno stanje (sačuvano pritiskom na OK u dijalogu Opcije uvoza). Restore Defaults će postaviti postavke na njihove podrazumevane vrednosti. Cancel prekida uvoz, dok OK uvozi podatke i čuva podešavanja.

Za potrebe dalje analize uzorkovan je profil za mašinu strug- HAAS SL 20 HE. Ovaj set podataka u izvornom obliku sadrži 43.221 red, 5 karakteristika i 0 meta podataka i predstavlja 12 sati rada mašine sa periodom uzorkovanja od 1 sekunde:

#### Data info

```
-----  
Name: haas 1a  
Rows: 43221  
Features: 5 numeric
```

### Korak 2: Izbor kolona (*eng. Select Columns*)

- Alat Select Columns koristi se za manuelno sastavljanje domena podataka. Korisnik može odlučiti koji će se atributi koristiti i kako. Program pravi razliku između običnih atributa, (opcionih) atributa klase i meta atributa. Na primer, za izgradnju modela klasifikacije, domen bi bio sastavljen od skupa atributa i atributa diskretne klase. Meta atributi se ne koriste u modeliranju, ali nekoliko alata ih može koristiti kao oznake instance.
- Orange atributi imaju tip i ili su diskretni, kontinualni ili niz znakova (*eng. discrete, continuous or a character string*). Tip atributa je označen simbolom koji se pojavljuje ispred naziva atributa (D, C, S, respektivno).

Ovaj alat služi za definisanje koje će promenljive za potrebe dalje analize biti ignorisane, koje promenljive predstavljaju ključne karakteristike, koje promenljive se targetiraju, kao i koje promenljive se tretiraju kao meta atributi.

Rezultat u ovom slučaju prikazan je u nastavku:

#### Input data

```
-----  
Features: Samples, S1, S2, S3, P
```

#### Output data

```
-----  
Features: S1, S2, S3  
Meta attributes: Samples  
Removed: 1 (P)
```

### Korak 3: k-Means Clustering metoda

k-Means Clustering je metod grupisanja, koji ima za cilj da podeli  $n$  posmatranja u  $k$  grupa (klastera) tako da su posmatranja u okviru grupe bliska dok su posmatranja u različitim grupama udaljena. Ovo rezultira podelom prostora podataka na Voronojeve ćelije.

Ova metoda minimizira varijanse unutar klastera (kvadrat euklidskih rastojanja).

Nenadgledani (*eng. Unsupervised*) k-means algoritam karakteriše slab odnos sa klasifikatorom k-najbližeg suseda (*eng. k-nearest neighbor classifier*), popularnom nadgledanom tehnikom mašinskog učenja za klasifikaciju koja se često meša sa k-means-om zbog imena (Primena k-nearest neighbor classifier-a na centre klastera dobijene pomoću k-means vrednosti klasifikuje nove podatke u postojeće klastere. Ovo je poznato kao klasifikator najbližeg centroida ili Rocchio algoritam [248]).

U konkretnom slučaju alat primenjuje algoritam za grupisanje k-Means na prethodno definisane podatke pri čemu kreira novi skup podataka u kome se indeks klastera koristi kao atribut klase. Originalni atribut klase, ako postoji, premešta se u meta attribute. Rezultati grupisanja za različite  $k$ -ove su prikazani u nastavku:

```
Number of clusters: 9
Optimization: initialize with KMeans++,
              100 re-runs limited to 300 steps

Data
-----
Data instances: 43221
Features: S1, S2, S3
Meta attributes: Samples

Silhouette scores for different numbers of clusters
-----
 2    0.987
 3    0.677
 4    0.815
 5    0.822
 6    0.828
 7    0.836
 8    0.857
 9    0.857
```

Kao metod evaluacije algoritam koristi Siluetu (*eng. Silhouette*), koja suprotstavlja prosečnu udaljenost do elemenata u istom klasteru sa prosečnim rastojanjem do elemenata u drugim klasterima.

Ako iz rezultata prikazanih gore izuzmemo opciju da je moguće posmatrane podatke grupisati u 2 klastera (Silhouette Score: 0,987), sledeća najveća vrednost je opcija generisanja 8 ili 9 grupa, pri čemu je za potrebe dalje analize odabrana opcija koja pretpostavlja da se u ovom setu nalazi 9 tipova stanja u kojima se sistem može naći a koji karakterišu njegovo ponašanje.

Način na koji algoritam počinje grupisanje naziva se metod inicijalizacije. Izabrani metod u ovom slučaju je k-Means++, što znači da se prvi centar bira nasumično, a sledeći se biraju od preostalih tačaka sa verovatnoćom proporcionalnom kvadratu udaljenosti od najbližeg centra.

Takođe, potrebno je definisati dovoljan broj ponovnih izvođenja (*eng. Re-runs*), kao i maksimalno dozvoljen broj iteracija unutar svakog pokretanja algoritma (koji u ovom slučaju iznosi 300). Broj ponovnih izvođenja (koji u ovom slučaju iznosi 100) ukazuje na to koliko puta se algoritam pokreće sa nasumičnih početnih pozicija, pri čemu će se na kraju koristiti onaj rezultat sa najmanjim zbirom kvadrata unutar klastera. Odnosno u ovom slučaju algoritam će se pokretati 100 puta sa nasumičnih početnih pozicija, pre čemu će se prilikom svakog pokretanja izvršiti 300 iteracija kako bi se osiguralo generisanje pouzdanih grupa podataka, odnosno klastera.

Izlazni podaci iz ove metode novi su skupovi podataka strukturirani prema svrsi buduće primene (koraci 5-7) prikazani u okviru podkoraka 3(a):

Data instances: 43221						
Features: 3						
Meta attributes: 3						
Samples	Cluster	Silhouette	S1	S2	S3	
1	C4	?	5.23	4.22	3.64	
2	C1	?	0	0	0	
3	C1	?	0	0.73	0	
4	C1	?	0	0.66	0	
5	C1	?	0	0	0	
6	C1	?	0	0	0	
7	C1	?	0	0	0	
8	C1	?	0	0	0	
9	C1	?	0	0	0	
10	C1	?	0	0	0	
+ 43211 more						

#### Korak 4: Vizuelizacija podataka u nisko-dimenzionalnom prostoru primenom tehnike učenja manifolda (Ovaj korak odvija se simultano uz korak 3)

Ova tehnika takođe spada u kategoriju nenadgledanih metoda dok za cilj ima redukciju nelinearne dimenzionalnosti. Ulazni podaci su podaci definisani u koraku 2, dok se na izlazu dobijaju transformisani podaci, odnosno skup podataka sa smanjenim brojem koordinata. Program zatim šalje nove koordinate koje odgovaraju dvodimenzionalnom prostoru, a takvi podaci se kasnije mogu vizuelizovati pomoću dijagrama rasejanja (*eng. Scatter Plot*) ili drugih alata za vizuelizaciju.

U okviru ove tehnike, moguće je pozvati nekoliko metoda (t-SNE, MDS, Isomap, Locally Linear Embedding i Spectral Embedding), pri čemu je u ovoj studiji korišten metod t-SNE (*eng. t-distributed Stochastic Neighbor Embedding*). t-SNE [249] je alatka za vizuelizaciju visokodimenzionalnih podataka koja pretvara sličnosti između tačaka podataka u zajedničke verovatnoće pokušavajući da minimizira Kullback-Leibler-ovu divergenciju između zajedničkih verovatnoća niskodimenzionalne reprezentacije i podataka visoke dimenzije. t-SNE karakteriše funkcija troškova koja nije konveksna, te je sa različitim inicijalizacijama moguće dobiti različite rezultate. Iz tog razloga preporučljivo je koristiti još neki metod smanjenja dimenzionalnosti (npr. PCA za guste podatke ili TruncatedSVD za retke podatke) da bi se smanjio broj dimenzija na razumnu količinu, ako je broj karakteristika veoma visok. Na taj način moguće je eliminisati deo šuma i ubrzati izračunavanje razmaka u paru između uzoraka [250], [251].

Pored izbora metoda, postoji i nekoliko načina na koji je moguće izmeriti razdaljine. U ovom slučaju se koristi Euklidsko rastojanje.

t-SNE metod zahteva podešavanja još nekih parametara. Prvi parametar je zbunjenost (*eng. Perplexity*), koja je povezana sa brojem najbližih suseda koji se koriste u drugim algoritmima učenja ovog tipa. Veći skupovi podataka obično podrazumevaju veću zbunjenost. Prilikom podešavanja ovog parametra razmatraju se vrednosti između 5 i 50. Odabrana je vrednost 9 jer se toliko tipova stanja očekuje na osnovu koraka 3. Parametar ranog preuveličavanja (*eng. early exaggeration*) kontroliše koliko su prirodni klasteri u originalnom prostoru čvrsti/zgusnuti u transformisanom

prostoru i koliko će prostora biti između njih. Za veće vrednosti, prostor između prirodnih klastera će biti veći u ugrađenom prostoru. Opet, izbor ovog parametra nije veoma kritičan. Ako se funkcija troškova povećava tokom početne optimizacije, faktor ranog preuveličavanja ili stopa učenja mogu biti previsoki, pa je iz tog razloga zadržana preporučena vrednost 12. Sledeći parametar je stopa učenja (*eng. Learning rate*) koja se u primeni t-SNE metode kreće u rasponu od 10 do 1000. Ako je stopa učenja previsoka, podaci mogu izgledati kao „lopta“ sa bilo kojom tačkom približno jednako udaljenom od najbližih suseda. Ako je stopa učenja preniska, većina tačaka može izgledati komprimovano u gustom oblaku sa nekoliko odstupanja. Ako se funkcija troškova zaglavi u lošem lokalnom minimumu, povećanje stope učenja može pomoći. Parametar stope učenja u ovom slučaju iznosi 200. Poslednji parametar je definisanje maksimalnog broja iteracija za optimizaciju gde se preporučuje minimalna vrednost od 250, dok je u ovom slučaju broj iteracija 1000.

Prilikom Inicijalizacije prostora projekcije postoje 2 opcije, nasumična (*eng. Random*) i PCA (*eng. Principal Component Analysis*). PCA inicijalizacija se ne može koristiti ako su rastojanja unapred izračunata ali je obično globalno stabilnija od nasumične inicijalizacije. U ovom slučaju je odabrani način inicijalizacije PCA. Finalno, potrebno je definisati željeni izlaz, odnosno koliko dimenzija transformisanog prostora je potrebno prikazati, što je u ovom slučaju 2.

```
Method: t-SNE  
  
Method parameters  
-----  
  
n_components: 2  
metric: Euclidean  
perplexity: 9  
early_exaggeration: 12  
learning_rate: 200  
n_iter: 1000  
initialization: pca  
  
Data  
-----  
  
Data instances: 43221  
Features: S1, S2, S3  
Meta attributes: Samples
```

Podkorak označen kao 4 (a) omogućava tabelarni prikaz rezultata primene opisane tehnike:



```
Data instances: 43221
Features: 2
Meta attributes: 1
```

Samples	t-SNE-x	t-SNE-y
1	82.3273	27.1961
2	-0.84186	-1.72398
3	-22.6334	36.8539
4	-22.6331	36.8537
5	-0.841861	-1.72398
6	-0.841861	-1.72398
7	-0.841861	-1.72398
8	-0.841861	-1.72398
9	-0.841861	-1.72398
10	-0.841861	-1.72398

```
+ 43211 more
```

#### Korak 5: Izbor kolona

Analogno koraku 2, generisani su novi atributi, kao što je prikazano u nastavku:

##### Input data

```
-----
Features: S1, S2, S3
Meta attributes: Samples, Cluster, Silhouette
```

##### Output data

```
-----
No changes.
```

#### Korak 6: Izbor kolona

##### Input data

```
-----
Features: S1, S2, S3
Meta attributes: Samples, Cluster, Silhouette
```

##### Output data

```
-----
Features: Samples
Meta attributes: S1, S2, S3
Target: Cluster
Removed: 1 (Silhouette)
```

## Korak 7: Izbor kolona

```
Input data
-----
Features: S1, S2, S3
Meta attributes: Samples, Cluster, Silhouette

Output data
-----
Features: S1, S2, S3
Meta attributes: Cluster
Removed: 2 (Silhouette, Samples)
```

## Korak 8: Spajanje podataka (eng. Merge Data)

Ovaj alat spaja dva skupa podataka, na osnovu vrednosti izabranih atributa. Očekivani ulazi su podaci, odnosno skup podataka i dodatni skupovi podataka, dok je izlaz skup podataka sa funkcijama dodatim iz dodatnih podataka. Alat se koristi za horizontalno spajanje dva skupa podataka, na osnovu vrednosti izabranih atributa (kolona). Na ulazu su potrebna minimalno dva skupa podataka, podaci i dodatni podaci. Redovi iz dva skupa podataka se podudaraju sa vrednostima izabranih parova atributa. Alat proizvodi jedan izlaz koji odgovara instancama iz ulaznih podataka kojima se dodaju atributi (kolone) iz ulaznih dodatnih podataka. U ovom slučaju izvršeno je spajanje 2 skupa podataka generisanih u koracima 3 i 4, na način prikazan u nastavku:

```
Merging: Find matching pairs of rows
Match: 'Samples' with 'Samples'
```

## Korak 9: Generisanje tabelarnog prikaza objedinjenog skupa podataka

```
Data instances: 43221
Features: 5
Meta attributes: 3
```

Samples	Cluster	Silhouette	t-SNE-x	t-SNE-y	S1	S2	S3
1	C4	?	82.3273	27.1961	5.23	4.22	3.64
2	C1	?	-0.84186	-1.72398	0	0	0
3	C1	?	-22.6334	36.8539	0	0.73	0
4	C1	?	-22.6331	36.8537	0	0.66	0
5	C1	?	-0.841861	-1.72398	0	0	0
6	C1	?	-0.841861	-1.72398	0	0	0
7	C1	?	-0.841861	-1.72398	0	0	0
8	C1	?	-0.841861	-1.72398	0	0	0
9	C1	?	-0.841861	-1.72398	0	0	0
10	C1	?	-0.841861	-1.72398	0	0	0

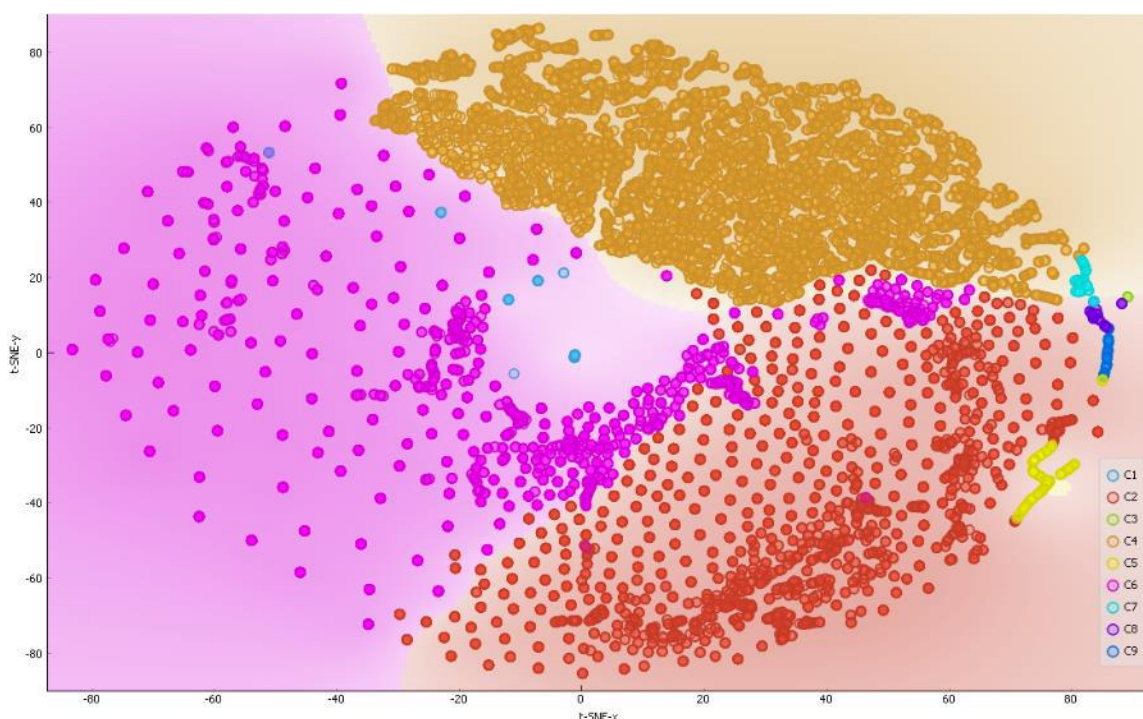
+ 43211 more

## Korak 10: Dijagram rasejanja (*eng. Scatter plot*)

Dijagram rasejanja omogućava vizuelizaciju istraživačke analize koji na ulazu očekuje skup podataka, podskup podataka (podskup instanci) i karakteristike podataka (lista atributa). Izlazi podaci su instance izabrane sa dijagrama kao i set podataka sa dodatnom kolonom koja pokazuje da li je neka tačka izabrana.

Što se tiče same vizuelizacije ovaj alat pruža 2-dimenzionalnu vizualizaciju dijagrama rasejanja za kontinualne attribute. Podaci se prikazuju kao kolekcija tačaka, od kojih svaka ima vrednost atributa x-ose koji određuje položaj na horizontalnoj osi i vrednost atributa y-ose koji određuje poziciju na vertikalnoj osi. Različita svojstva grafikona, kao što su boja, veličina i oblik tačaka, naslovi osa, maksimalna veličina tačke, itd., mogu se podesiti u zavisnosti od atributa.

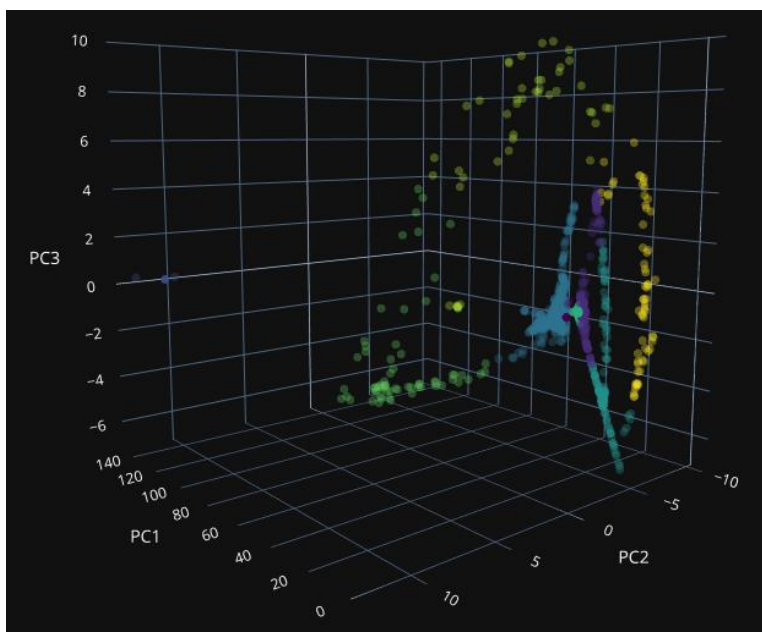
U slučaju ove analize izvršena je vizuelizacija rezultata koraka 4, pri čemu je kao meta atribut za potrebe prikaza pozicija grupa korištena klasterizacija generisana u koraku 3 i prikazan uz podkorak 3(a):



Slika 3.38 Prikaz identifikovanih klastera u 2 dimenzije

Slika 3.38 predstavlja 2D prikaz inicijalnog 3D nivoa jer je određivanje parametara klastera izvršeno na osnovu tri karakteristike iz inicijalnog skupa podataka a to su S1, S2 i S3. Kako je metod inicijalizacije PCA, a iz razloga što Orange nema opciju prikazivanja u 3D, PCA vizuelizacija ovih karakteristika izvršena je uz pomoć internet alata [Plotly](https://chart-studio.plotly.com)<sup>19</sup> i prikazana u tri dimenzije na slici 3.39.

<sup>19</sup> Link ka pomenutom alatu: <https://chart-studio.plotly.com>



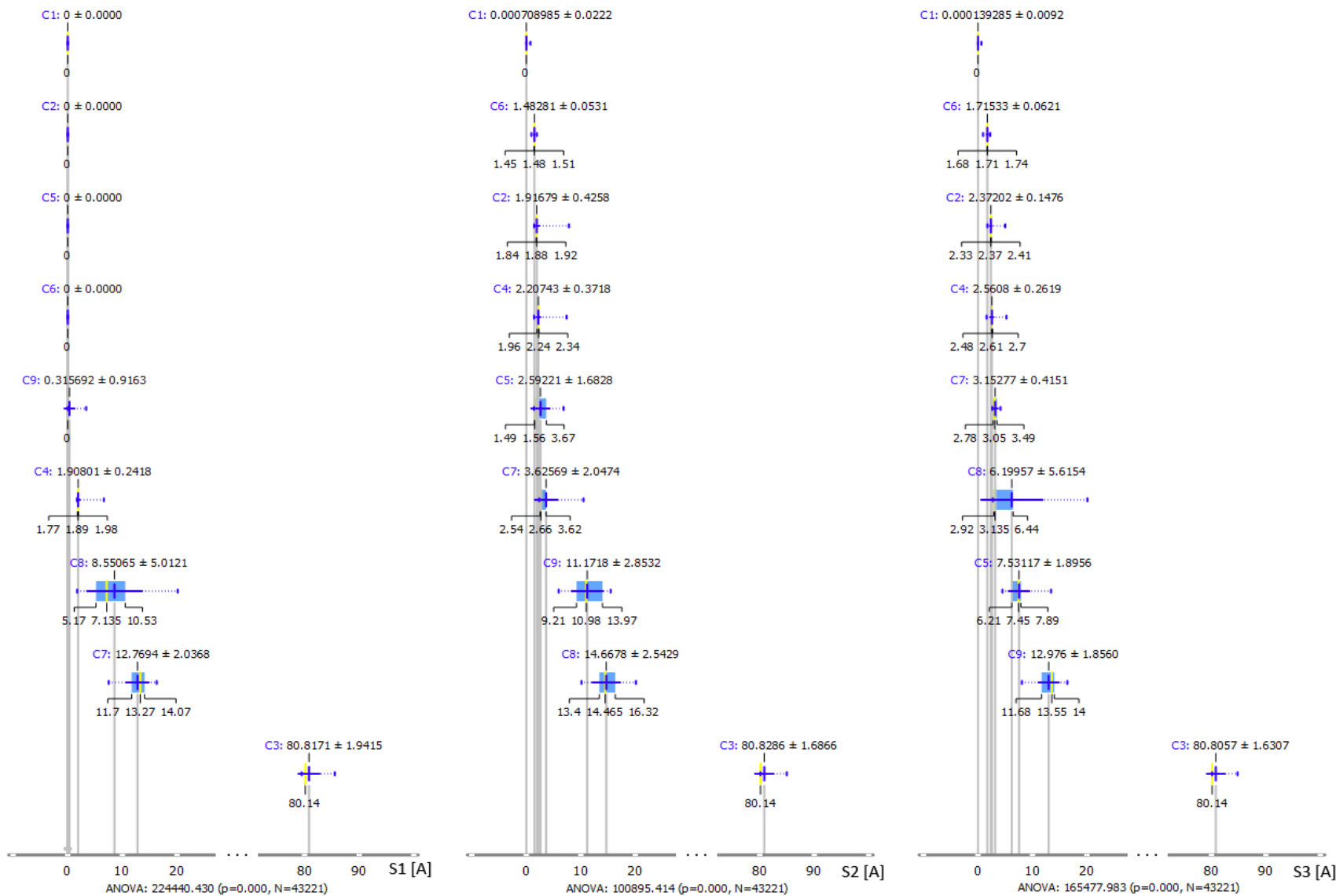
Slika 3.39 Prikaz identifikovanih klastera iz aspekta PCA u 3D

Slika 3.38 predstavlja raspored identifikovanih klastera redukovane dimenzionalnosti iz 3D u 2D.

### Korak 11: Box Plot

Ovaj alat prikazuje distribuciju vrednosti atributa za ulazni skup podataka, pri čemu na izlazu prikazuje izabrane podatke kao instance. Ovaj korak sastoji se iz tri podkoraka (11.1, 11.2 i 11.3) sa ciljem identifikacije strukture klastera za svaku od posmatranih karakteristika (S1, S2 i S3).

Na ovaj način, kvantifikovani su svi klasteri (C1 - C9) u zavisnosti od karakteristika (S1, S2 i S3). Drugim rečima u zavisnosti od intenziteta struje svake faze ponašanje posmatranog sistema karakteriše devet stanja (C1 - C9) u kojima se može naći, pri čemu je za svako stanje kvantifikovan intenzitet struje za svaku od faza (S1, S2 i S3). Ovi rezultati prikazani su na slici 3.40.



Slika 3.40 Kvantifikacija identifikovanih stanja (C1 – C9) za posmatrano ponašanje sistema u zavisnosti od karakteristika (S1, S2 i S3)

## Korak 12: Izbor kolona

U ovom koraku u dalju analizu uvodi se karakteristika, odnosno promenljiva P, koja predstavlja funkciju karakteristika S1, S2 i S3:

```
Input data
-----
Features: Samples, S1, S2, S3, P

Output data
-----
Features: P
Meta attributes: Samples
Removed: 3 (S1, S2, S3)
```

## Korak 13: Spajanje podataka

U ovom koraku kreira se novi skup podataka od izabranih podataka u koraku 5 i 12 pri čemu je način izvršenog objedinjavanja prikazan u nastavku:

```
Merging: Find matching pairs of rows
Match: 'Samples' with 'Samples'
```

## Korak 14: Uzorkovanje podataka (*eng. Data Sampler*)

U ovom koraku izvršen je izbor podskupa instanci podataka iz ulaznog skupa podataka.

```
Sampling type: Random sample with 4999 data instances, deterministic
Input: 43221 instances
Sample: 4999 instances
Remaining: 38222 instances
```

Uz ovaj korak, u okviru podkoraka 14 (a) izvršeno je i generisanje tabelarnog prikaza uzorkovanog skupa podataka:

**Data instances:** 4999  
**Features:** 4  
**Meta attributes:** 3

Samples	Cluster	Silhouette	S1	S2	S3	P
14949	C6	?	0	1.44	1.67	1.12271
34877	C1	?	0	0	0	0
29954	C2	?	0	1.96	2.37	1.56313
1672	C2	?	0	1.83	2.39	1.52342
9130	C4	?	1.96	2.12	2.61	2.41509
31999	C6	?	0	1.5	1.75	1.17325
35212	C1	?	0	0	0	0
2508	C6	?	0	1.49	1.74	1.16603
31592	C2	?	0	1.92	2.39	1.55591
10455	C2	?	0	1.83	2.37	1.5162

+ 4989 more

### Korak 15: Izbor kolona

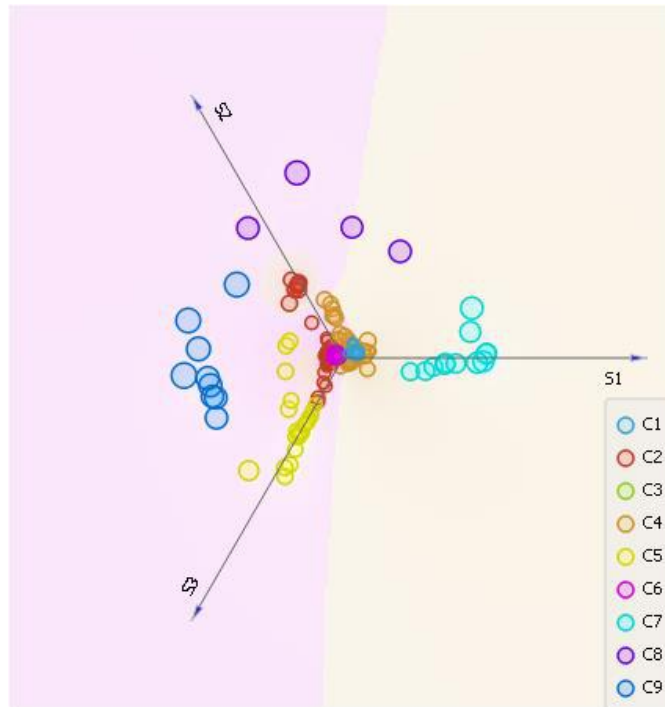
U ovom koraku izvršen je izbor karakteristika za vizuelizaciju:

```
Input data
-----
Features: S1, S2, S3, P
Meta attributes: Samples, Cluster, Silhouette

Output data
-----
Features: S1, S2, S3, P
Target: Cluster
Removed: 2 (Samples, Silhouette)
```

### Korak 16: Linearna projekcija (*eng. Linear Projection*)

Metoda linearne projekcije sa eksploratornom analizom podataka kao ulaz očekuje ulazni skup podataka (podaci), podskup instanci (podskup podataka) i prilagođene projekcijske vektore (projekcija), da bi se na izlazu vizuelizovali izabrani podaci, odnosno instance izabrane sa dijagrama, kao projekcijski vektori (komponente projekcije). Ovaj alat prikazuje linearne projekcije podataka označenih klasama. Podržava različite tipove projekcija kao što su kružna, linearna diskriminantna i PCA analiza. U ovom slučaju korišćena je kružna projekcija za prikaz vrednosti uzorkovanih podataka karakteristika S1, S2 i S3, gde je veličina tačke određena meta atributom (promenljiva P), dok je raspoznavanje identifikovanih stanja moguće uvođenjem meta atributa klaster (cluster), kao ciljane promenljive. Na ovaj način, moguće je uvideti koje karakteristike definišu identifikovana stanja sistema. Rezultati su prikazani na slici 3.41.



Slika 3.41 Linearne projekcije identifikovanih stanja sistema prema karakteristikama (S1 – S3)

Korak 14 bio je neophodan kako bi se generisao adekvatan prikaz dat slikom 3.41.

#### Korak 17: Izbor kolona

U ovom koraku izvršen je izbor karakteristika za dalju vizuelizaciju:

```

Input data
-----
Features: S1, S2, S3, P
Meta attributes: Samples, Cluster, Silhouette

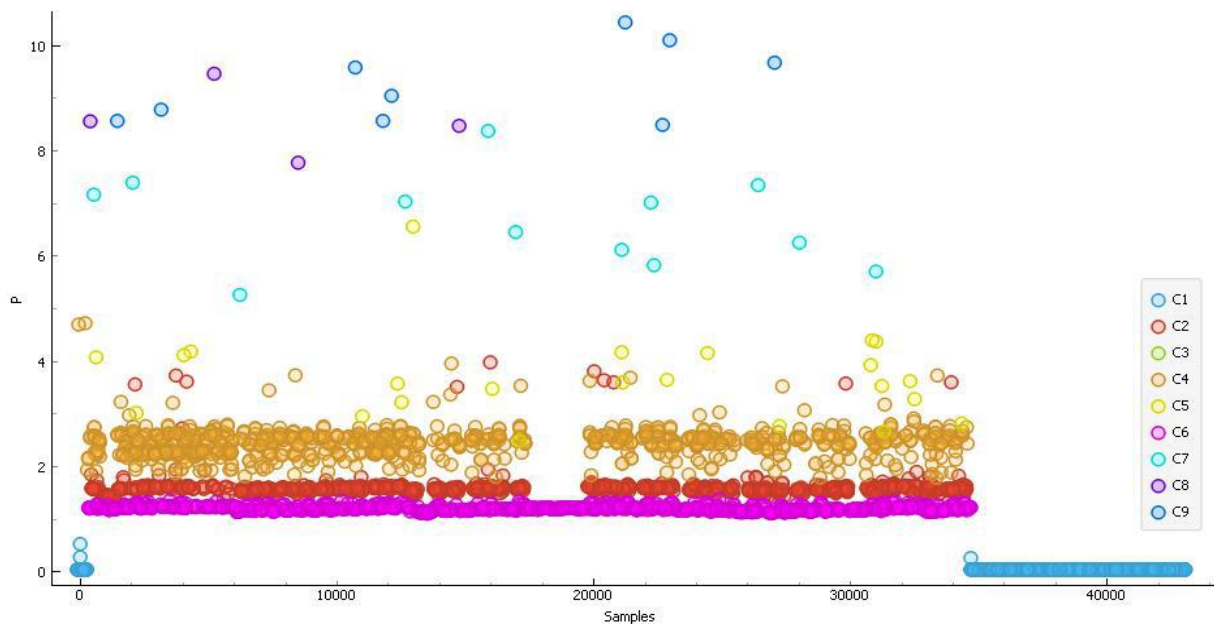
Output data
-----
Features: P
Meta attributes: Samples
Target: Cluster
Removed: 4 (S1, S2, S3, Silhouette)

```

#### Korak 18: Dijagram rasejanja

U ovom koraku prikazana je distribucija promenljive P uz priključen meta atribut klaster (cluster) tokom vremena (Samples). Na ovaj način, moguće je uočiti kada se određena stanja realizuju tokom vremena, odnosno u posmatranom opsegu ponašanja sistema, preko promenljive P koja predstavlja funkciju karakteristika (S1 – S3).

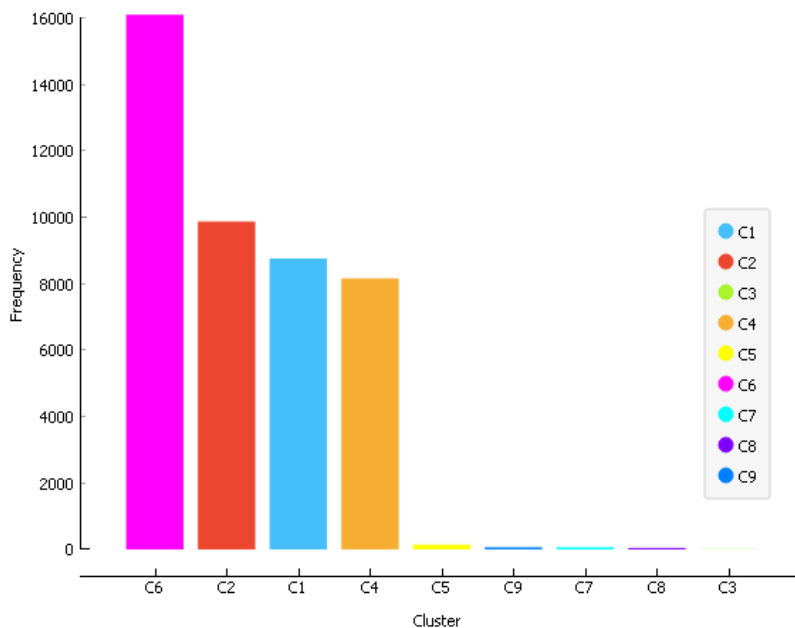




Slika 3.42 Angažovana snaga (P) tokom vremena (Samples) i identifikovana stanja sistema (C1 – C9)

### Korak 19: Distribucije (*eng. Distributions*)

Ovaj alat prikazuje distribuciju vrednosti za jedan atribut (što je u ovom konkretnom slučaju meta atribut cluster). Na ulazu se očekuje ulazni skup podataka dok se na izlazu generišu izabrani podaci, odnosno instance izabrane sa dijagrama. Ovaj alat prikazuje distribuciju vrednosti diskretnih ili kontinuiranih atributa, pri čemu ako podaci sadrže promenljivu klase, distribucije mogu biti uslovljene klasom. Grafikon pokazuje koliko puta (npr. u koliko slučajeva) se svaka vrednost atributa pojavljuje u podacima. Ako podaci sadrže promenljivu klase, biće prikazane distribucije klasa za svaku od vrednosti atributa. Rezultati generisani uz pomoć ovog alata prikazani su na slici 3.43.



Slika 3.43 Distribucija identifikovanih stanja sistema u posmatranom profilu ponašanja

Takođe, na izlazu je moguće dobiti i podatke izrađenog histograma (slika 3.43), odnosno binove kao i broj instanci iz histograma što je neophodno za dalju analizu. Iz tog razloga ovaj korak podrazumeva dva podkoraka (19.1 Izbor redova i 19.2 Izbor kolona):

#### Data

```
-----
Instances: 81
Condition: Count is greater than 0.000000
```

#### Output

```
-----
Matching data: 9 instances
Non-matching data: 72 instances
```

#### Input data

```
-----
Features: Bin, Cluster, Count
```

#### Output data

```
-----
Features: Count
Meta attributes: Cluster
Removed: 1 (Bin)
```

## Korak 20: Tabela prikaz generisanih podataka

Ovaj korak uzima specijalne podatke generisane u koraku 3 na način definisan korakom 7 i smešta ih u tabelu. Podaci od interesa u ovom slučaju su takozvani centroidi odnosno centri klusterskih grupa identifikovanih u koraku 3 na osnovu karakteristika (S1 – S3):

```
Data instances: 9
Features: 3
Meta attributes: 1
```

	Cluster	S1	S2	S3
1	C1	-0.28776	-1.02445	-1.15768
2	C2	-0.28776	0.31445	0.42640
3	C3	57.54921	55.45552	52.80910
4	C4	1.07771	0.51753	0.55248
5	C5	-0.28776	0.78640	3.87199
6	C6	-0.28776	0.01119	-0.01217
7	C7	8.85068	1.50857	0.94783
8	C8	5.83153	9.22447	2.98267
9	C9	-0.06183	6.78159	7.50837

## Korak 21: Spajanje podataka

U ovom koraku kreira se novi skup podataka od izabranih podataka u koraku 19 (odnosno 19.2) i 20 pri čemu je način izvršenog objedinjavanja prikazan u nastavku:

```
Merging: Find matching pairs of rows
Match: 'Cluster' with 'Cluster'
```

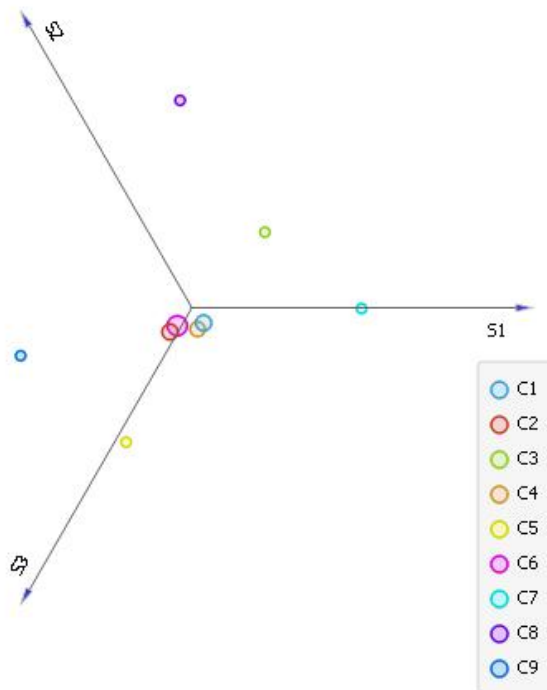
Kao rezultat ovog spajanja u podkoraku 21 (a) generisan je tabelarni prikaz gde su karakteristike (S1 – S3) prikazane kao koordinate euklidskih rastojanja centroida:

**Data instances:** 9  
**Features:** 4  
**Meta attributes:** 1

	Cluster	Count	S1	S2	S3
1	C6	16101	-0.28776	0.01119	-0.01217
2	C2	9873	-0.28776	0.31445	0.42640
3	C1	8759	-0.28776	-1.02445	-1.15768
4	C4	8160	1.07771	0.51753	0.55248
5	C5	145	-0.28776	0.78640	3.87199
6	C9	65	-0.06183	6.78159	7.50837
7	C7	65	8.85068	1.50857	0.94783
8	C8	46	5.83153	9.22447	2.98267
9	C3	7	57.54921	55.45552	52.80910

### Korak 22: Linearna projekcija

Analogno koraku 16, u ovom koraku korišćena je kružna projekcija za prikaz pozicija centara klastera, gde je veličina tačke određena meta atributom (promenljiva P), dok je raspoznavanje identifikovanih stanja moguće uvođenjem meta atributa klaster (cluster), kao targetirane promenljive. Ovi rezultati prikazani su na slici 3.44.



Slika 3.44 Linearne projekcije centara klusterskih grupa

### 3.5.1.1 Diskusija generisanih rezultata

Sistem modela za automatizovano profilisanje ponašanja sistema na osnovu praćenja tokova energije prikazan na slici 3.37 sastoji se iz 22 koraka čija realizacija doprinosi razumevanju funkcionisanja posmatranog sistema na osnovu njegovih energetske tokova.

Generisani model sposoban je da identifikuje, grupiše i kvantifikuje stanja sistema, kao i da identifikovana stanja prikaže u profilu ponašanja.

Imajući to u vidu, rezultati generisani ovim modelom idu u prilog definisanoj hipotezi H3, koja tvrdi da je sticanjem uvida u dinamiku toka energije proizvodnog sistema u realnom vremenu moguće razvijati podsisteme za mašinsko učenje procesa i tranziciju ka inteligentnim sistemima koje karakteriše visok stepen fleksibilnosti i napredne kontrole.

Konkretno, uz pomoć pomenutog sistema analizirani su svi identifikovani klasteri (C1 - C9) u zavisnosti od karakteristika (S1, S2 i S3), odnosno intenziteta struje svake faze, pri čemu ponašanje posmatranog sistema karakteriše devet stanja (C1 - C9) u kojima se može naći. Za svako od identifikovanih stanja izvršena je kvantifikacija prikazana na slici 3.40, dok je na slici 3.42 moguće uočiti kada se određena stanja realizuju tokom vremena, odnosno u posmatranom opsegu ponašanja sistema, preko promenljive P koja predstavlja funkciju karakteristika (S1 – S3).

Pored toga implementacija ovog modela u praksi može biti značajna iz aspekta sticanja uvida u pojavu novih, neočekivanih stanja sistema (posledica nelinearnosti) u realnom vremenu, što omogućava brzo odlučivanje, kao i pravovremenu reakciju i izvođenje neophodnih analiza.

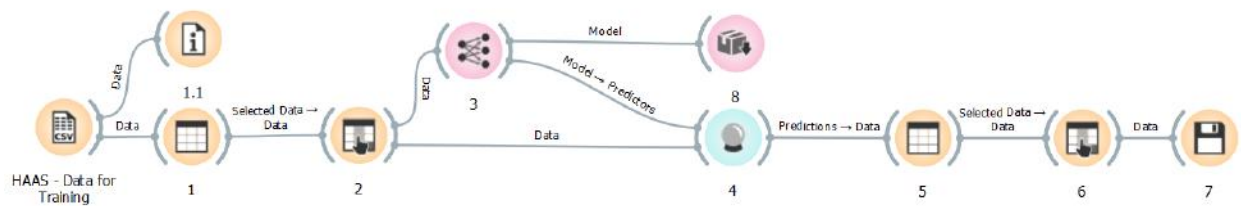
### 3.5.2 Model za određivanje angažovane snage sistema tokom vremena

U ovom poglavlju opisan je model mašinskog učenja, zasnovan na neuronskim mrežama, koji na osnovu podataka o intenzitetu struje, sa određenom tačnošću može odrediti angažovana snaga, odnosno količinu energije koju je sistem iskoristio za posmatrani vremenski period.

Model predstavlja višeslojin perceptron, treniran uobičajenim algoritmom propagacije greške unazad. Za potrebe treniranja, izrade modela, kao i dalje analize, uzorkovan je profil za mašinu strug - HAAS SL20HE.

Iako deluje banalno na osnovu intenziteta struje određivati angažovanu snagu, ovaj model može biti od koristi u onim slučajevima gde postoje samo podaci o intenzitetu struje, pa se sa određenom tačnošću može odrediti angažovana snaga, odnosno količina energije za neki vremenski period. Bitno je napomenuti da je ovaj model funkcionalan u slučajevima gde postoji određeni vid stabilizacije napona.

U nastavku je na slici 3.45 dat vizuelni prikaz modela.



Slika 3.45 Vizuelni prikaz modela za određivanje angažovane snage sistema tokom vremena u zavisnosti od intenziteta struje

Po istom principu kao i u prethodnom poglavlju, u nastavku su detaljno opisani koraci prikazani na slici 3.45, pri čemu su generisani rezultati komentarisani na licu mesta.

### Korak 1: Generisanje tabelarnog prikaza

U ovom koraku tabelarno su prikazani podaci iz koraka 1:

```

Data instances: 43221
Features: 5
Meta attributes: None
  
```

Samples	S1	S2	S3	P
1	5.23	4.22	3.64	4.72549
2	0	0	0	0
3	0	0.73	0	0.26353
4	0	0.66	0	0.23826
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0

+ 43211 more

### Korak 2: Izbor kolona

U ovom koraku izvršen je izbor kolona:

```

Input data
-----
Features: Samples, S1, S2, S3, P

Output data
-----
Features: S1, S2, S3
Meta attributes: Samples
Target: P
  
```

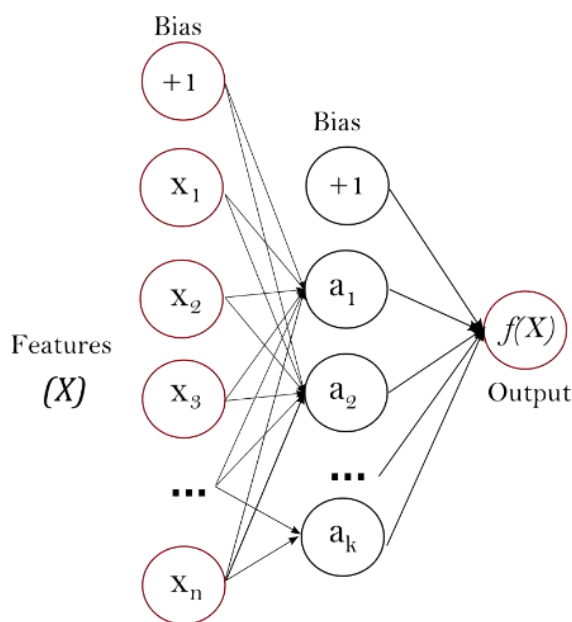
Ovaj deo podrazumeva pripremu podataka za naredni korak.

### Korak 3: Model neuronske mreže (eng. *Neural Network model*)

U ovom koraku generisan je model neuronske mreže na bazi višeslojnog perceptrona. Ovaj korak kao ulaz očekuje ulazni skup podataka kao i metod(e) predprocesiranja. Na izlazu se očekuje predmet učenja (eng. *Learner*), odnosno višeslojni algoritam učenja perceptrona, kao i obučeni model.

Algoritam za učenje pod nadzorom (eng. *Supervised*), uči funkciju  $f(\cdot): R^m \rightarrow R^o$  obučavanjem na skupu podataka, gde je  $m$  broj dimenzija za ulaz, a  $o$  broj dimenzija za izlaz. Imajući u vidu skup karakteristika i cilj, može naučiti aproksimator nelinearne funkcije za klasifikaciju ili regresiju. Razlikuje se od linearne i logističke regresije po tome što između ulaznog i izlaznog sloja može postojati jedan ili više (skrivenih) slojeva.

Slika 3.46 prikazuje jedan skriveni sloj MLP algoritma sa skalarnim izlazom.



Slika 3.46 Jedan skriveni sloj MLP algoritma [252]

Krajnji sloj sa leve strane predstavlja ulazni sloj i sastoji se od skupa neurona  $\{x_i \mid x_1, x_2, \dots, x_m\}$  koji predstavljaju ulazne karakteristike. Svaki neuron u skrivenom sloju transformiše vrednosti iz prethodnog sloja sa ponderisanim linearnim sumiranjem  $x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_mw_m$ , nakon čega sledi funkcija aktivacije  $g(\cdot): R \rightarrow R$  - poput hiperbolične funkcije tanh. Izlazni sloj prima vrednosti iz poslednjeg skrivenog sloja i transformiše ih u izlazne vrednosti [252].

Pre treninga, potrebno je podesiti hiper-parametre modela. Prvi parametar je broj neurona po skrivenom sloju, definisanih kao  $i$ -ti element koji predstavlja broj neurona u  $i$ -tom skrivenom sloju. U ovom slučaju, neuronska mreža sastoji se od 4 sloja sa po 512, 256, 128, 64 neurona u skrivenim slojevima 1, 2, 3 i 4, redom.

Sledeći parametar podrazumeva izbor aktivacione funkcije za skriveni sloj, što je u ovom slučaju ReLu, odnosno ispravljena funkcija linearne jedinice (eng. *Rectified linear unit function*).

Zatim, potrebno je izabrati način rešavanja za optimizaciju težinskih koeficijenata (*eng. Solver*), pri čemu je u ovom slučaju odabran optimizator zasnovan na stohastičkom gradijentu, ADAM. Adam je zamenski algoritam optimizacije za stohastički gradijentni pada (*eng. Stochastic Gradient Descent*) koji se koristi za obuku modela dubokog učenja. Adam kombinuje najbolja svojstva AdaGrad i RMSProp algoritama kako bi obezbedio algoritam optimizacije koji može da se nosi sa retkim gradijentima na problemima gde se očekuje šum.

Nakon toga potrebno je odrediti parametar regularizacije, za koji je u ovom slučaju odabran Alfa. Alfa je termin regularizacije, poznat i kao kazneni termin koji onemogućava prekomerno prilagođavanje ograničavanjem veličine pondera. Povećanje alfa parametra može popraviti visoku varijansu (znak preopterećenja) podsticanjem manjih težina, što rezultuje granicom odluke koja se pojavljuje sa manjim zakrivljenjima. Slično tome, smanjenje alfa parametra može popraviti visoku pristrasnost (znak nedovoljnog prilagođavanja) podsticanjem većih težina, što potencijalno rezultuje komplikovanijom granicom odluke [253].

Poslednji parametar je broj iteracija koji u ovom slučaju iznosi 100.

Na osnovu prethodno prikazanog sumirani su parametri modela neuronske mreže:

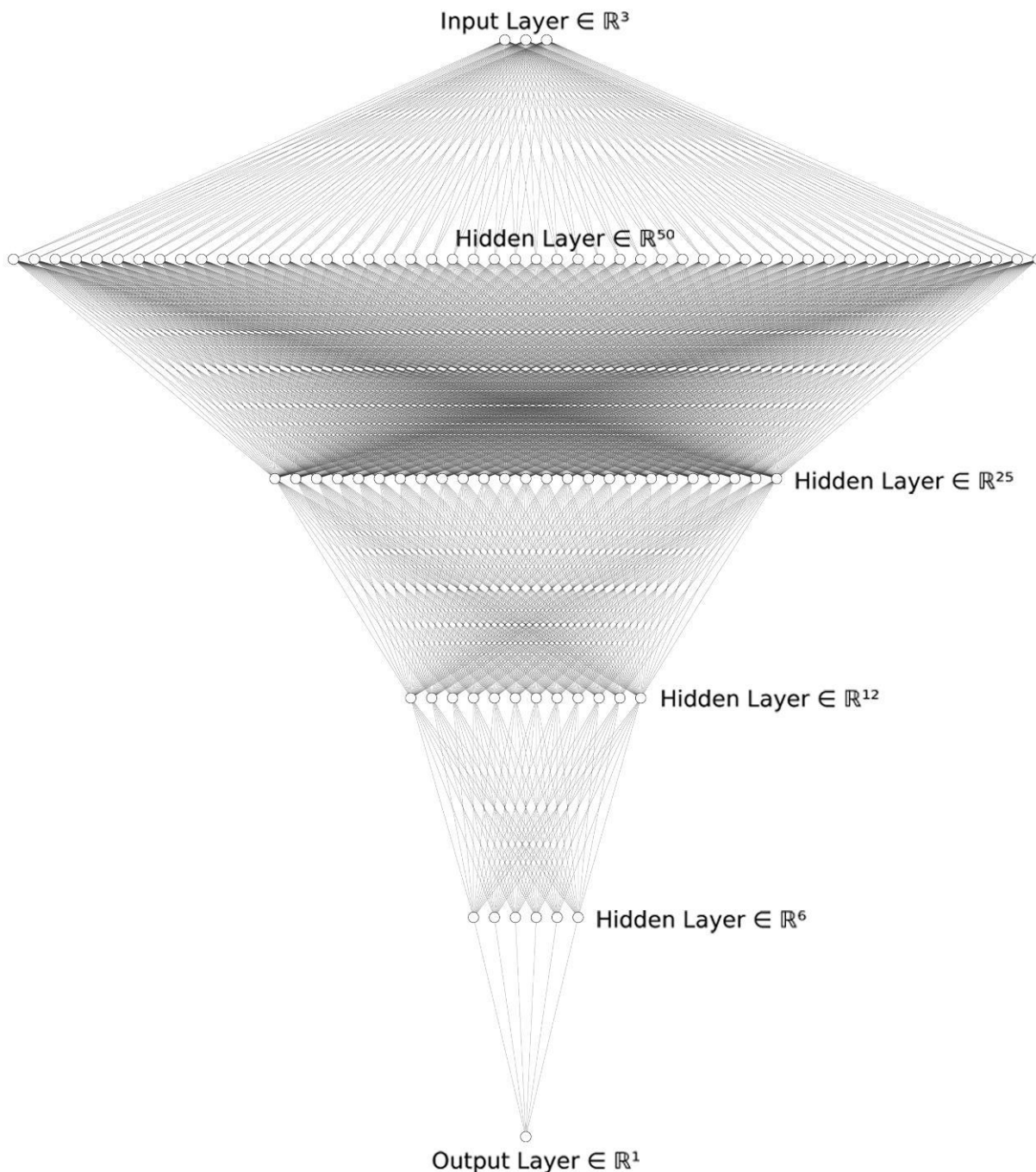
```
Name: Neural Network

Model parameters
-----
Hidden layers: 4
Neurons per layer: 512, 256, 128, 64
Activation: ReLu
Solver: Adam
Alpha: 0.0001
Max iterations: 100
Replicable training: True

Data
-----
Data instances: 43221
Features: S1, S2, S3
Meta attributes: Samples
Target: P
```

U nastavku je na slici 3.47 ilustrativno prikazana struktura mreže.





Slika 3.47 Ilustrativni prikaz generisane neuronske mreže

Data ilustracija ne predstavlja realnu reprezentaciju strukture neuronske mreže iz razloga što je struktura generisane mreže znatno kompleksinija. Međutim realna reprezentacija generisane mreže može se prikazati analogijom, gde ulazni sloj čine tri karakteristike (S1, S2, S3), prvi skriveni sloj na slici prikazan kao sloj od 50 neurona predstavlja 512 neurona realne mreže, drugi skriveni sloj od 25 neurona predstavlja realnih 256, treći skriveni sloj od 12 neurona predstavlja realnih 128, četvrti skriveni sloj od 6 neurona predstavlja realnih 64, dok se u izlaznom sloju nalazi jedna targetirana promenljiva (P).

#### Korak 4: Predviđanja (eng. Predictions)

Ovaj alat koristi se za evaluaciju i prikazuje predviđanja modela nad podacima. Kao ulazni parametri očekuju se ulazni skup podataka (podaci) i prediktori koji se koriste za podatke, dok se na izlazu očekuju podaci sa dodatnim predviđanjima, kao i rezultati testiranja klasifikacionih algoritama.

Sumirana evaluacija modela prikazana je u nastavku:

```
Info
-----
Data: 43221 instances, 5 variables
Features: 3 numeric (No missing values)
Target: numeric
Metas: numeric

-----

Model: 1 model (Neural Network)
-----

Data & Predictions
-----

Neural Network      P      Samples      S1      S2      S3
4.59021             4.72549      1           5.23    4.22    3.64
0.00158145         0             2           0       0       0
0.238722           0.26353      3           0       0.73    0
0.214423           0.23826      4           0       0.66    0
0.00158145         0             5           0       0       0
0.00158145         0             6           0       0       0
0.00158145         0             7           0       0       0
0.00158145         0             8           0       0       0
0.00158145         0             9           0       0       0
0.00158145         0            10          0       0       0
+ 43111 more

Scores
-----

Model      MSE      RMSE      MAE      R2
Neural Network  0.003    0.053    0.014    0.999
```

#### Korak 5: Generisanje tabelarnog prikaza

U ovom koraku tabelarno su prikazani podaci iz koraka 4:

```

Data instances: 43221
Features: 3
Meta attributes: 2
Target: Numeric variable 'P'
-----

  Neural Network      P      Samples      S1      S2      S3

4.59021              4.72549      1          5.23   4.22   3.64
0.00158145          0              2          0       0       0
0.238722            0.26353      3          0       0.73   0
0.214423            0.23826      4          0       0.66   0
0.00158145          0              5          0       0       0
0.00158145          0              6          0       0       0
0.00158145          0              7          0       0       0
0.00158145          0              8          0       0       0
0.00158145          0              9          0       0       0
0.00158145          0             10         0       0       0

+ 43111 more

```

#### Korak 6: Izbor kolona

U ovom koraku izvršen je izbor kolona:

```

Input data
-----
Features: S1, S2, S3
Meta attributes: Samples, Neural Network
Target: P

Output data
-----
Features: P, Neural Network
Meta attributes: Samples
Removed: 3 (S1, S2, S3)

```

#### Korak 7: Čuvanje podataka (*eng. Save Data*)

Ovaj korak omogućuje čuvanje podatka u .CSV formatu za dalju analizu ili pohranjivanje.

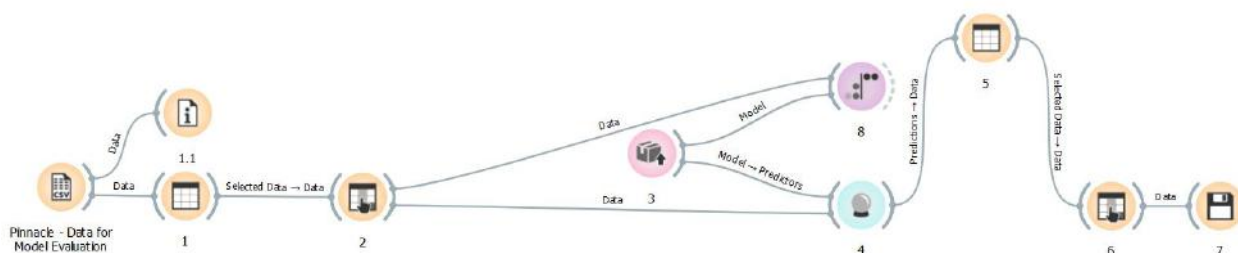
#### Korak 8: Čuvanje modela (*eng. Save Model*)

Uloga ovog koraka je da sačuva model za dalji razvoj i implementaciju. Kreirani model sačuvan je pod nazivom `MlpNN model.pkcls`, i dostupan za dalju eksploataciju.

### 3.5.2.1 Evaluacija modela za određivanje angažovane snage sistema tokom vremena

U ovom poglavlju, prethodno generisani model implementiran je na setu podataka mašine glodalica - Pinnacle VMC 1100S. Svrha evaluacije modela je zapravo sticanje uvida u to koliko dobro generalizuje razmatrani problem, odnosno da li je pogodan za eksploataciju.

U nastavku je na slici 3.48 dat vizuelni prikaz modela.



Slika 3.48 Vizuelni prikaz evaluacije modela za određivanje angažovane snage sistema

Po istom principu kao i u prethodnom poglavlju, u nastavku su detaljno opisani koraci prikazani na slici 3.48, pri čemu su generisani rezultati komentarisani na licu mesta.

#### Korak 1: Generisanje tabelarnog prikaza

U ovom koraku tabelarno su prikazani podaci iz koraka 1:

**Data instances:** 31585  
**Features:** 6  
**Meta attributes:** None

Samples	S1	S2	S3	T	P
1	0	0	1.07	28	0.39
2	0	0.92	0	28	0.33
3	0	0.86	0	28	0.31
4	0	0.86	0	28	0.31
5	0	0.87	0	28	0.31
6	1.72	1.26	0	28	1.08
7	0	1.38	0	28	0.5
8	0	1.38	0	28	0.5
9	0	1.36	0	28	0.49
10	0	1	0	28	0.36

+ 31575 more

#### Korak 2: Izbor kolona

U ovom koraku izvršen je izbor kolona:

**Input data**

-----  
**Features:** Samples, S1, S2, S3, T, P

**Output data**

-----  
**Features:** S1, S2, S3  
**Meta attributes:** Samples  
**Target:** P  
**Removed:** 1 (T)

Ovaj deo podrazumeva pripremu podataka za naredni korak.

**Korak 3: Učitavanje modela** (*eng. Load Model*)

Uloga ovog koraka je da učita prethodno kreirani model (MlpNN model.pkcls) za evaluaciju implementacijom na novom setu podataka.

**Korak 4: Predviđanja** (*eng. Predictions*)

Kao i u slučaju treniranja modela ovaj alat koristi se za evaluaciju i prikazuje predviđanja modela nad novim podacima. Kao ulazni parametri očekuju se ulazni skup podataka (podaci) i prediktori koji se koriste za podatke, dok se na izlazu očekuju podaci sa dodatnim predviđanjima. Sumirana evaluacija modela prikazana je u nastavku:

```

Info
-----
Data: 31585 instances, 5 variables
Features: 3 numeric (No missing values)
Target: numeric
Metas: numeric

-----

Model: 1 model (Neural Network)
-----

Data & Predictions
-----

  Neural Network      P      Samples      S1      S2      S3
-----
0.382081             0.39           1           0           0      1.07
0.310235             0.33           2           0           0.92    0
0.287279             0.31           3           0           0.86    0
0.287279             0.31           4           0           0.86    0
0.291087             0.31           5           0           0.87    0
0.68547              1.08           6           1.72        1.26    0
0.486474             0.5            7           0           1.38    0
0.486474             0.5            8           0           1.38    0
0.486474             0.49           9           0           1.36    0
0.340914             0.36          10           0           1         0

                                + 31575 more

Scores
-----

      Model      MSE      RMSE      MAE      R2
-----
Neural Network  0.015   0.123   0.059   0.997

```

### Korak 5: Generisanje tabelarnog prikaza

U ovom koraku tabelarno su prikazani podaci iz koraka 4:

```

Data instances: 31585
Features: 3
Meta attributes: 2
Target: Numeric variable 'P'
-----

```

Neural Network	P	Samples	S1	S2	S3
0.382081	0.39	1	0	0	1.07
0.310235	0.33	2	0	0.92	0
0.287279	0.31	3	0	0.86	0
0.287279	0.31	4	0	0.86	0
0.291087	0.31	5	0	0.87	0
0.68547	1.08	6	1.72	1.26	0
0.486474	0.5	7	0	1.38	0
0.486474	0.5	8	0	1.38	0
0.486474	0.49	9	0	1.36	0
0.340914	0.36	10	0	1	0

+ 31575 more

### Korak 6: Izbor kolona

U ovom koraku izvršen je izbor kolona:

```

Input data
-----
Features: S1, S2, S3
Meta attributes: Samples, Neural Network
Target: P

Output data
-----
Features: P, Neural Network
Meta attributes: Samples
Removed: 3 (S1, S2, S3)

```

### Korak 7: Čuvanje podataka

Ovaj korak omogućuje čuvanje generisanih podataka u .CSV formatu za dalju analizu ili pohranjivanje.

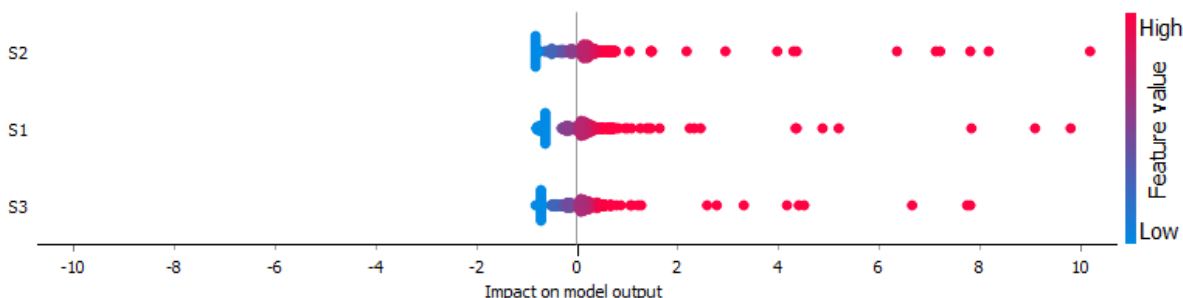
### Korak 8: Objašnjenje modela (*eng. Explain Model*)

Ovaj alat objašnjava model klasifikacije ili regresije u smislu koje karakteristike najviše doprinose i kako doprinose predviđanju za određenu klasu. Kao ulaze alat očekuje skup podataka koji se koristi za izračunavanje objašnjenja kao i primenjeni model. Kao izlaz ovaj alat generiše instance podataka koji pripadaju odabranim tačkama na dijagramu (odabrani podaci), kao i rezultat svakog atributa, po principu gde karakteristike koje više doprinose konačnom predviđanju imaju više ocene.

Objašnjavanje modela vrši se implementacijom SHAP biblioteke, pri čemu alat dobija obučeni model i referentne podatke na ulaz i koristi dostavljene podatke za izračunavanje doprinosa svake karakteristike predviđanju za izabranu klasu.

SHAP (*eng. SHapley Additive exPlanations*) je teoretski pristup za objašnjenje rezultata bilo kog modela mašinskog učenja. Povezuje optimalnu alokaciju kredita sa lokalnim objašnjenjima koristeći klasične Šeplijeve vrednosti iz teorije igara i njihovih povezanih proširenja.

Na slici 3.49 je grafikon koji prikazuje izabrani broj karakteristika koje su najvažnije za model.



Slika 3.49 Grafički prikaz najvažnijih karakteristika implementiranog modela

Slika 7.49 prikazuje najvažnije karakteristike implementiranog modela. Za svaku funkciju, tačke na grafikonu pokazuju SHAP vrednosti (horizontalna osa) za svaku instancu podataka (red) u podacima. SHAP vrednost definiše koliko svaka karakteristika utiče na izlaz modela, pri čemu veća SHAP vrednost (veće odstupanje od centra grafikona) znači da vrednost karakteristike ima veći uticaj na predviđanje za izabranu klasu. Pozitivne SHAP vrednosti (tačke desno od centra) su vrednosti karakteristika sa uticajem na predviđanje za izabranu klasu. Negativne vrednosti (tačke levo od centra) utiču na klasifikaciju u ovoj klasi. Za regresiju, SHAP vrednost pokazuje koliko vrednost karakteristike utiče na predviđenu vrednost iz prosečnog predviđanja. Boje predstavljaju vrednost svake karakteristike, gde crvena boja predstavlja višu, dok plava predstavlja nižu vrednost karakteristike. Opseg boja je definisan na osnovu svih vrednosti u skupu podataka za obeležje. Karakteristike na grafikonu su poredane prema njihovoj relevantnosti za predviđanje (u ovom slučaju S2, S1, S3).

### 3.5.2.2 Diskusija generisanih rezultata

U tabeli 3.7 prikazani su osnovni parametri performanse modela za trening podatke (skup podataka za strug - HAAS SL20HE), kao i podatke za evaluaciju modela (skup podataka za glodalica - Pinnacle VMC 1100S).

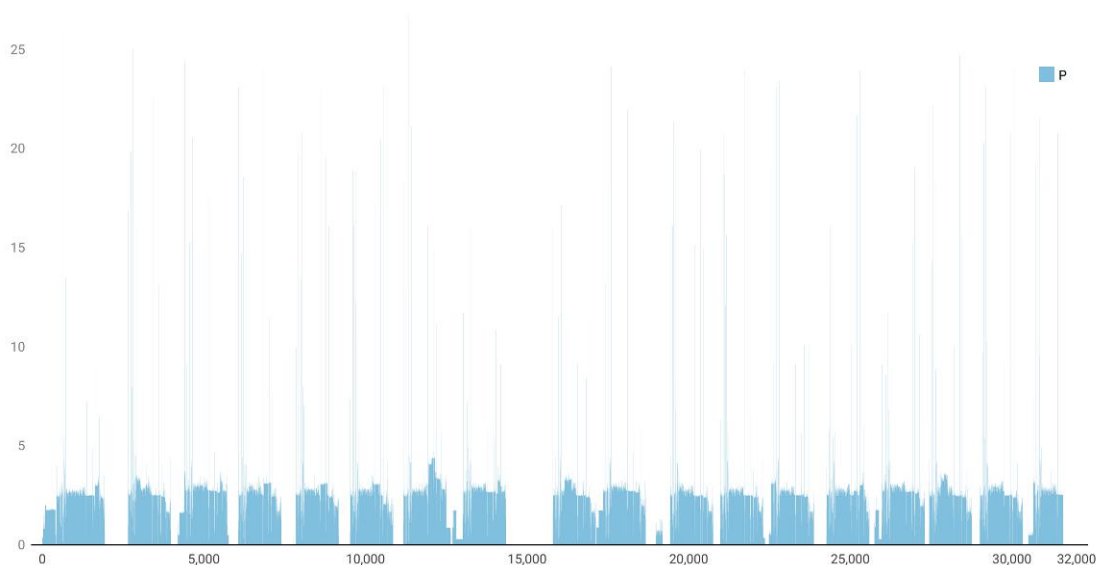
Tabela 3.7 Osnovni parametri performanse modela za trening i evaluaciju

R.br.	Naziv mašine	Tip mašine	Br. uzoraka	MSE	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
1	HAAS SL 20 HE	Strug	43.221	0,003	0,053	0,014	0,999
2	Pinnacle VMC1100S	Glodalica	31.585	0,015	0,123	0,059	0,997

Takođe, pogodnost implementacije generisanog modela navedenih pokazatelje performanse, najbolje se može sagledati kroz vizuelni prikaz dat na slikama 3.50 – 3.52.

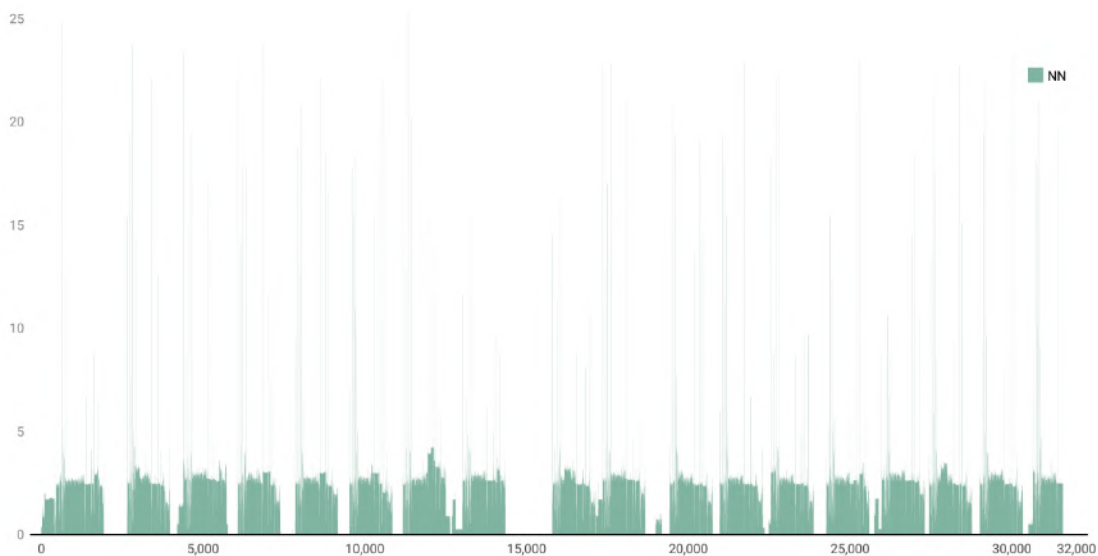


Slika 3.50 prikazuje realne vrednosti angažovane snage ( $P$ )<sup>20</sup> tokom vremena za skup podataka predviđen za evaluaciju modela (tip mašine - glodalica). Ovi podaci dostupni su za preuzimanje ali i u vidu interaktivne vizualizacije.



Slika 3.50 Realne vrednosti angažovane snage tokom vremena ( $y = P$  [kW];  $x = \text{Samples}$  [s])

U nastavku na slici 3.51 prikazane su vrednosti angažovane snage generisane modelom (NN)<sup>21</sup>. Takode, ovi podaci dostupni su za preuzimanje i u vidu interaktivne vizualizacije.

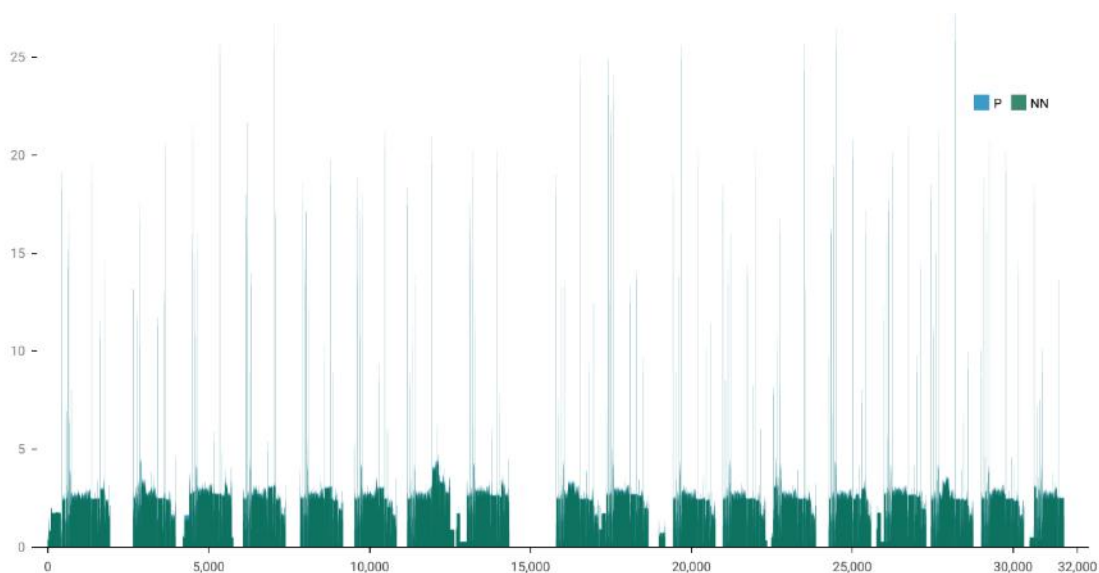


Slika 3.51 Vrednosti angažovane snage tokom vremena generisane modelom ( $y = P$  [kW];  $x = \text{Samples}$  [s])

<sup>20</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji za (P): <https://datawrapper.dwcdn.net/hST0t/1>

<sup>21</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji za (NN): <https://datawrapper.dwcdn.net/kysUc/1>

Zatim, slika 3.52 pruža objedinjen prikaz distribucije realnih i modelom generisanih vrednosti tokom vremena, pri čemu su setovi podataka dostupni za preuzimanje i interaktivnu vizualizaciju (P vs NN)<sup>22</sup>.



Slika 3.52 Distribucija realnih i modelom generisanih vrednosti tokom vremena ( $y = P, NN$  [kW];  $x = \text{Samples}$  [s])

Na osnovu prikazanog, model karakteriše performansa visoke preciznosti sa niskom stopom troškovne funkcije (MSE trening = 0,003, MSE evaluacija = 0,015) što ukazuje da veoma dobro generalizuje dati problem i shodno tome može biti pogodan za dalju eksploataciju.

### 3.5.3 Model predviđanja budućeg stanja sistema

Ovo poglavlje zasnovano je na prethodnom i generiše novo istraživačko pitanje:

**H4:** *Ako je moguća automatizovana identifikacija stanja koja egzistiraju u okviru nekog ponašanja sistema, onda je moguće u određenoj meri predvideti buduće stanje sistema relativno tačno u zavisnosti od dužine vremenskog perioda za koje se predviđanje izvodi.*

Evidentno je da se predviđanje korišćenja energije smatra vitalnim i izazovnim zadatkom u industrijskim ali akademskim krugovima, pri čemu precizno predviđanje korišćenja energije može da pruži validne smernice za alokaciju energetske resursa [254], formulisanje mera za povećanje energetske efikasnosti [255], poboljšanje funkcionisanja energetske ali i proizvodnih sistema, sprovođenje upravljačkih odluka [256], itd. Sa akademske tačke gledišta, razvoj modela predviđanja može se primeniti na razne oblasti gde god figurišu vremenske serije, kao što je na primer predviđanje toka saobraćaja [257] klimatskih promena [258], temperature [259], zaliha [260], sunčevog zračenja [261], itd.

<sup>22</sup> Link ka setovima podataka i interaktivnoj vizuelizaciji za (P vs NN): <https://datawrappwr.dwcnd.net/Y1YC8/1>

Predložene su mnoge metode za predviđanje podataka iz vremenskih serija, a grubo se mogu kategorizovati na statističke analize, mašinsko učenje i duboko učenje. Prikaz i analiza ovih metoda data je u [262].

Dalja analiza u ovom poglavlju razmatra implementaciju dubokog učenja na bazi poboljšane rekurentne neuronske mreže (RNN), odnosno LSTM mreže (eng. *Long Short-Term Memory*).

LSTM je posebna vrsta RNN-a, sposobna da uči dugoročne zavisnosti. Uveli su ih Hochreiter & Schmidhuber 1997, a mnogi istraživači su ih kasnije usavršavali i popularizovali. LSTM izuzetno dobro rade na velikom broju problema jer su eksplicitno dizajnirane da izbegnu dugoročni problem zavisnosti, pri čemu je pamćenje informacija na duge periode praktično njihovo podrazumevano ponašanje, a ne nešto što im je izuzetno mučno da nauče (za razliku od klasičnih RNN) [263].

U nastavku su prokomentarisane osnovne karakteristike parametara neophodnih za izradu i razradu modela baziranih na LSTM tipu mreže za duboko učenje.

Na samom početku, definisan je pojam vremenske serije, pri čemu se pod vremenskom serijom podrazumeva niz numeričkih tačaka podataka sa uzastopnim redosledom. Ove tačke se često mere u redovnim intervalima (svakog meseca, svakog dana, svakog sata, itd.). Učestalost podataka korišćena u ovom istraživanju iznosi 1 sekund, dok je obim podataka definisan zadatkom koji model treba da realizuje.

Primarni cilj algoritma dubokog učenja za datu vremensku seriju je da pronađe funkciju  $f$  takvu da  $Y_t = f(Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-p})$ , odnosno, u ovom slučaju da pronađe funkciju koja objašnjava trenutne vrednosti korišćenja energije na osnovu prethodnog niza vrednosti korišćenja energije istog skupa podataka sa  $p$  koraka u nazad (eng. Lag). U tom slučaju je potrebna funkcija koja pretvara vremensku seriju u matrice X i Y kako bi model dubokog učenja počeo da uči [264]–[266].

Na primer, ako želimo da kreiramo funkciju koja objašnjava trenutne vrednosti vremenske serije koristeći tri koraka u nazad,  $Y_t = f(Y_{t-1}, Y_{t-2}, Y_{t-3})$ , za podatke:

```
ts = [1621.0, 1536.0, 1500.0, 1434.0, 1489.0, 1620.0]
```

Ono što je modelu potrebno da bi mogao da uči je da ovaj niz podataka prikažemo kao dve matrice, odnosno:

```
X = [  
  [1621.0, 1536.0, 1500.0], # prva tri koraka  
  [1536.0, 1500.0, 1434.0], # druga tri koraka  
  [1500.0, 1434.0, 1489.0], # treća tri koraka  
]  
  
Y = [1434.0, 1489.0, 1620.0]
```

Zatim, pored skupa podataka koji se koriste za modeliranje, potrebno je definisati i promenljivu koja je predmet modeliranja (`yhat`) odnosno predviđanja, pri čemu kompleksnost modela zavisi kako od veličine broja koraka unazad (`lag`), tako i od veličine broja koraka koje model treba da nauči da predvidi (`predict_steps`).

Od ovih parametara zavisi struktura modela pri čemu LSTM sloj modela uzima u obzir odnose između svih koraka posmatrane sekvence dok dense sloj obezbeđuje logiku.

Nakon toga, a u zavisnosti od strukture modela potrebno je definisati koliko puta će skup podataka proći kroz mrežu, pri čemu se period od jednog prolaza skupa podataka kroz mrežu naziva epoha (*eng. Epoch*). Takođe, potrebno je definisati i veličinu serije podataka (*eng. Batch size*) odnosno parametar koji ograničava broj uzoraka koji će biti prikazani mreži pre nego što se može izvršiti ažuriranje težine (period treninga), ali važi i u period validacije prilikom fitovanja modela.

Razvoj LSTM modela izvršen je u programskom jeziku Python u okviru Google-ovog istraživačkoga alata „Colaboratory”<sup>23</sup> koji dozvoljava svakome da piše i izvršava proizvoljan Python kod preko pretraživača, a posebno je pogodan za mašinsko učenje, analizu podataka i istraživanje. Tehnički rečeno, Colab je hostovana *Jupiter notebook*<sup>24</sup> usluga koja ne zahteva podešavanje za korišćenje, a istovremeno pruža besplatan pristup računarskim resursima, uključujući i GPU (*eng. Graphics Processing Unit*).

Za potrebe ovog istraživanja generisana su dva zadatka koja je potrebno da model reši:

- **Zadatak 1:** Model treba da omogući predviđanje jednog sledećeg koraka zadate vremenske serije
- **Zadatak 2:** Model treba da omogući predviđanje pet sledećih koraka zadate vremenske serije

### 3.5.3.1 Zadatak 1

**Korak 1:** Priprema Google Drive-a

```
# mount google drive
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
```

**Korak 2:** Učitavanje potrebnih biblioteka

```
import pandas as pd
import numpy as np
from datetime import datetime, timedelta
from matplotlib import pyplot as plt

# Deep learning packages
from keras.models import Sequential
from keras.layers import LSTM, Dense
```

**Korak 3:** Učitavanje podataka iz eksterne.CSV datoteke

```
# Reading the input data
d = pd.read_csv('/content/drive/MyDrive/phd_lstm/Pinnacle1.csv')
```

**Korak 4:** Konverzija datuma i vremena iz učitane datoteke u timeseries format

```
# Formatting to datetime
d['Datetime'] = [datetime.strptime(x, '%m/%d/%Y %H:%M:%S') for x in d['Datetime']]
```

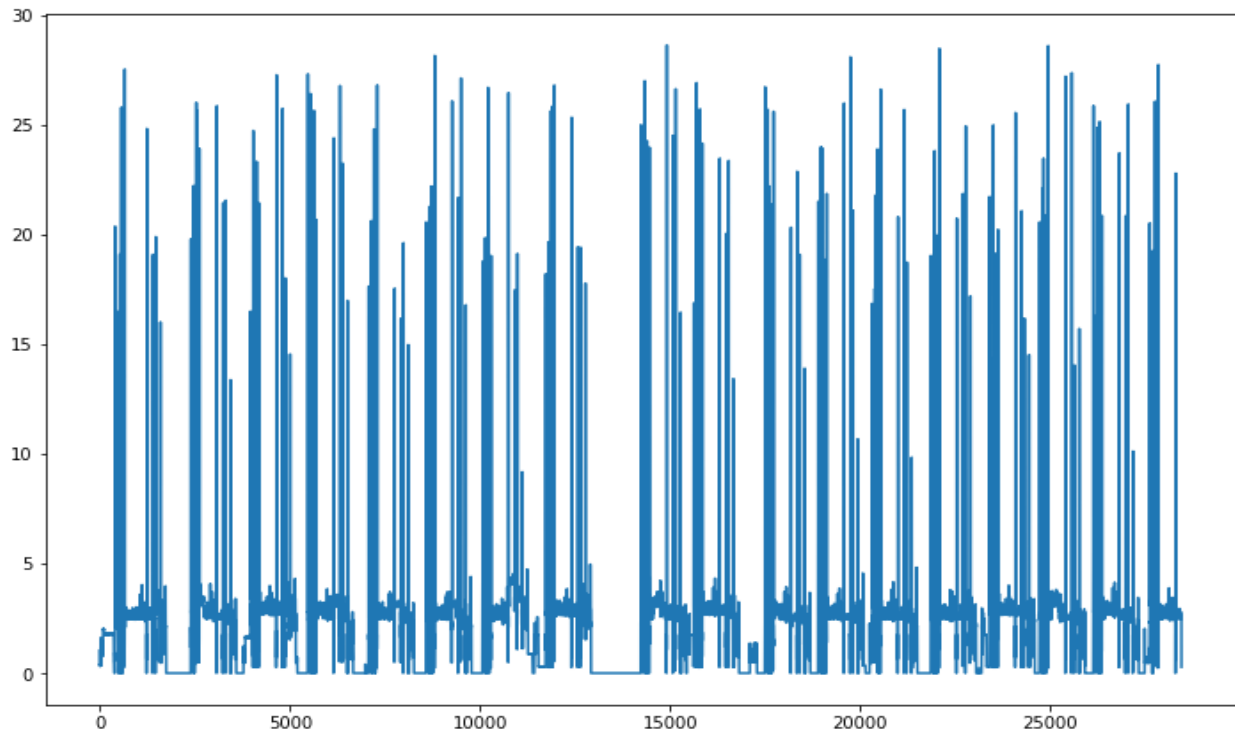
---

<sup>23</sup> Link ka alatu: <https://research.google.com/colaboratory/faq.html>

<sup>24</sup> Link ka alatu: <https://jupyter.org>

### Korak 5: Iscrtavanje promenljive P

```
d_p = d['P']
plt.figure(figsize=(12, 8))
d_p.plot()
plt.show()
```



Slika 3.53 Distribucija promenljive P u vremenu za Pinnacle VMC 1100S (y = P; x = Samples)

### Korak 6: Definisane pomoćne funkcije

```
### POMOCNE FUNKCIJE

def create_X_Y(ts: list, lag: int) -> tuple:
    X, Y = [], []

    if len(ts) - lag <= 0:
        X.append(ts)
    else:
        for i in range(len(ts) - lag):
            Y.append(ts[i + lag])
            X.append(ts[i:i + lag])

    X, Y = np.array(X), np.array(Y)

    X = np.reshape(X, (X.shape[0], X.shape[1], 1))

    return X, Y
```

```

def create_data_for_NN(data, Y_var, lag, train_test_split, use_last_n=None):
    # Extracting the main variable we want to model/forecast
    y = data[Y_var].tolist()

    # Subsetting the time series if needed
    if use_last_n is not None:
        y = y[-use_last_n:]

    # The X matrix will hold the lags of Y
    X, Y = create_X_Y(y, lag)

    # Creating training and test sets
    X_train = X
    X_test = []

    Y_train = Y
    Y_test = []

    if train_test_split > 0:
        index = round(len(X) * train_test_split)
        X_train = X[:len(X) - index]
        X_test = X[-index:]

        Y_train = Y[:len(X) - index]
        Y_test = Y[-index:]

    return X_train, X_test, Y_train, Y_test

```

**Korak 7:** Kreiranje testnih i validacionih podataka povezivanjem definisanih funkcija

```

data = d
Y_var = 'P'
lag = 30
train_test_split = 0.2

X_train, X_test, Y_train, Y_test = create_data_for_NN(data, Y_var, lag, train_test_split, use_last_n=None)

```

**Korak 8:** Definisanje modela

```

# Defining the model
model = Sequential()
model.add(LSTM(200, activation='relu', return_sequences=True, in-
input_shape=(lag, 1)))
model.add(LSTM(300, activation='relu'))
model.add(Dense(256))
model.add(Dense(64))
model.add(Dense(32))
model.add(Dense(1))
# model.compile(optimizer='adam', loss='accuracy')
model.compile(optimizer='adam', loss='mse')
# Defining the model parameter dict
keras_dict = {
    'x': X_train,
    'y': Y_train,
    'validation_data': [X_test, Y_test],
    'batch_size': 256,
    'epochs': 15,
    'shuffle': False
}
# Fitting the model
model.fit(**keras_dict)

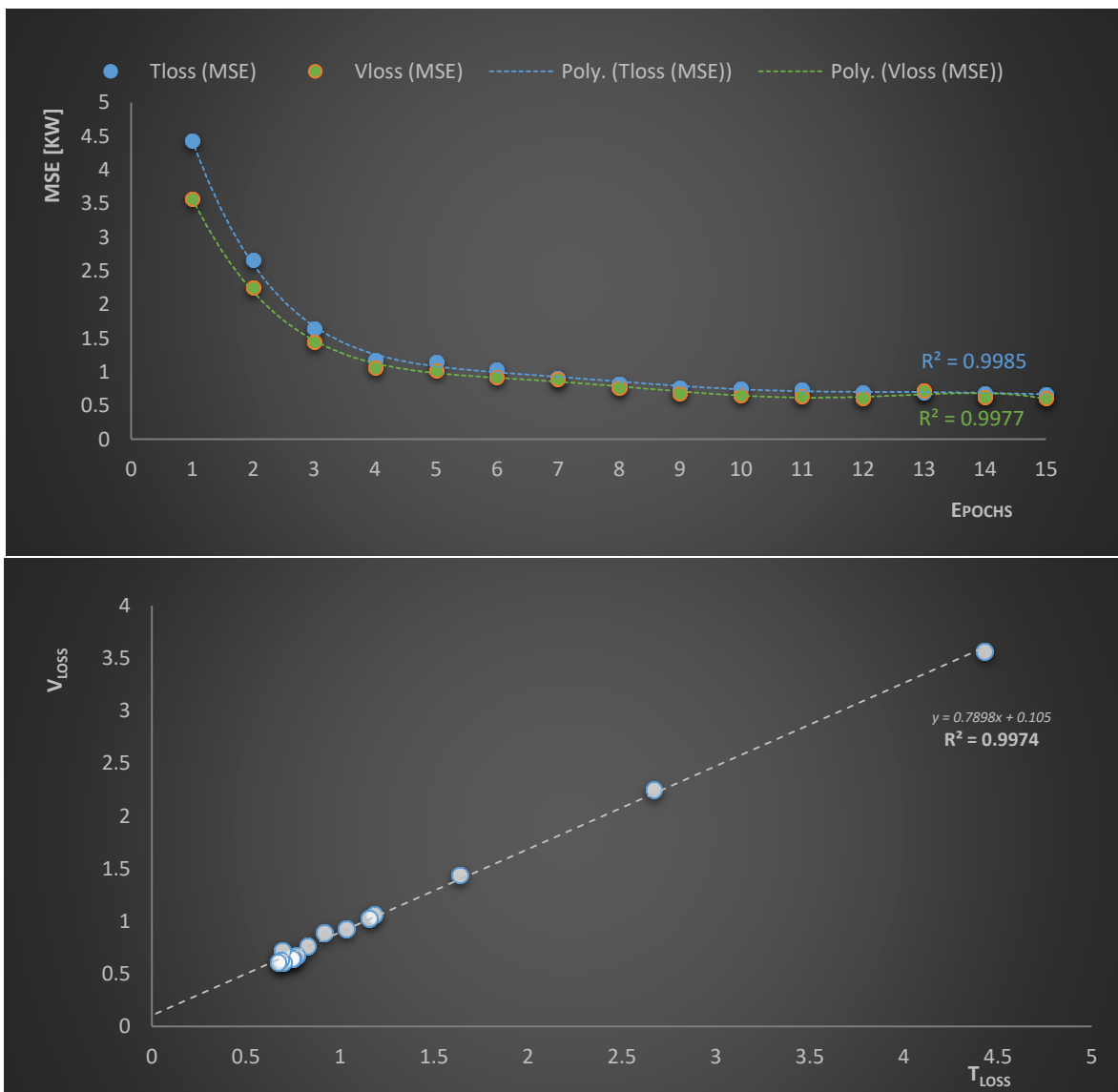
```

### Korak 9: Prikaz procesa učenja kroz epohe

```

Epoch 1/15
89/89 [=====] - 25s 245ms/step - loss: 4.4309 - val_loss: 3.5671
Epoch 2/15
89/89 [=====] - 21s 236ms/step - loss: 2.6693 - val_loss: 2.2504
Epoch 3/15
89/89 [=====] - 19s 218ms/step - loss: 1.6371 - val_loss: 1.4424
Epoch 4/15
89/89 [=====] - 21s 233ms/step - loss: 1.1837 - val_loss: 1.0652
Epoch 5/15
89/89 [=====] - 20s 221ms/step - loss: 1.1548 - val_loss: 1.0261
Epoch 6/15
89/89 [=====] - 20s 224ms/step - loss: 1.0322 - val_loss: 0.9253
Epoch 7/15
89/89 [=====] - 20s 222ms/step - loss: 0.9166 - val_loss: 0.8933
Epoch 8/15
89/89 [=====] - 19s 219ms/step - loss: 0.8276 - val_loss: 0.7635
Epoch 9/15
89/89 [=====] - 20s 225ms/step - loss: 0.7690 - val_loss: 0.6764
Epoch 10/15
89/89 [=====] - 20s 221ms/step - loss: 0.7529 - val_loss: 0.6461
Epoch 11/15
89/89 [=====] - 21s 240ms/step - loss: 0.7444 - val_loss: 0.6442
Epoch 12/15
89/89 [=====] - 20s 226ms/step - loss: 0.6982 - val_loss: 0.6092
Epoch 13/15
89/89 [=====] - 20s 229ms/step - loss: 0.6927 - val_loss: 0.7230
Epoch 14/15
89/89 [=====] - 20s 223ms/step - loss: 0.6860 - val_loss: 0.6308
Epoch 15/15
89/89 [=====] - 20s 221ms/step - loss: 0.6700 - val_loss: 0.6129

```



Slika 3.54 Grafički prikaz toka treniranja

Slika 3.54, prikazuje tok treniranja prilikom treniranja modela i služi za odlučivanje da li je i kad dostignut optimalan nivo učenja. Na osnovu prikazanih podataka može se uočiti da posle 11/12. epohe ne dolazi do značajnijeg pada funkcije greške (*eng. Loss function*), na osnovu čega je moguće zaključiti da je 15 epoha dovoljno za trening modela. Takođe ovo ukazuje da je trenutna arhitektura mreže dosegla svoj optimum.

#### Korak 10: Rezime modela

```
model.summary()
```



Model: "sequential\_10"

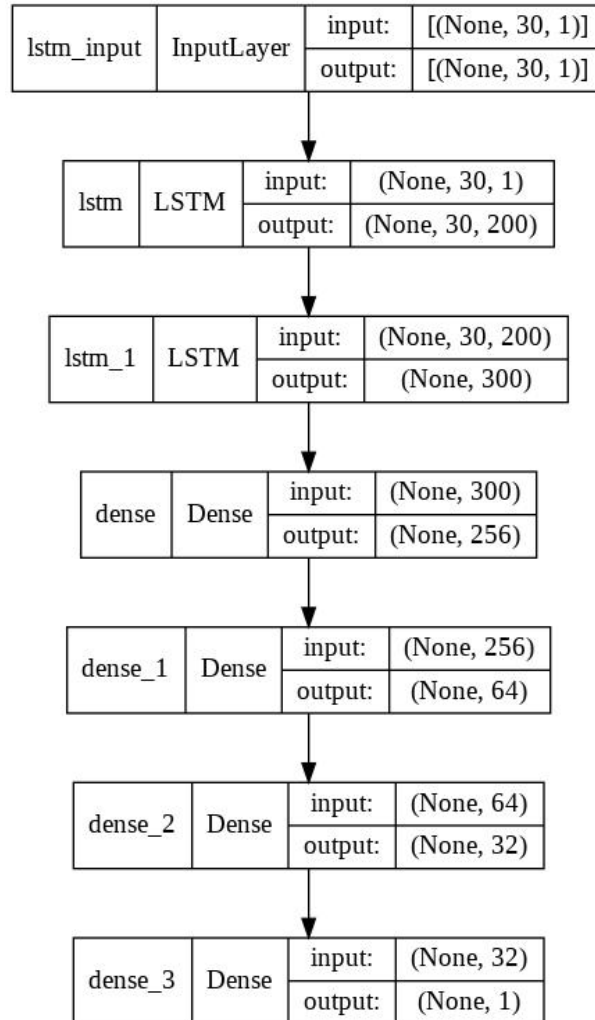
Layer (type)	Output Shape	Param #
lstm (LSTM)	(None, 30, 200)	161600
lstm_1 (LSTM)	(None, 300)	601200
dense (Dense)	(None, 256)	77056
dense_1 (Dense)	(None, 64)	16448
dense_2 (Dense)	(None, 32)	2080
dense_3 (Dense)	(None, 1)	33

=====  
Total params: 858,417  
Trainable params: 858,417  
Non-trainable params: 0

---

### Korak 11: Vizuelizacija modela

```
# Vizuelizacija modela
from keras.utils.vis_utils import plot_model
plot_model(model, to_file='model_plot.png', show_shapes=True, show_layer_names=True)
```



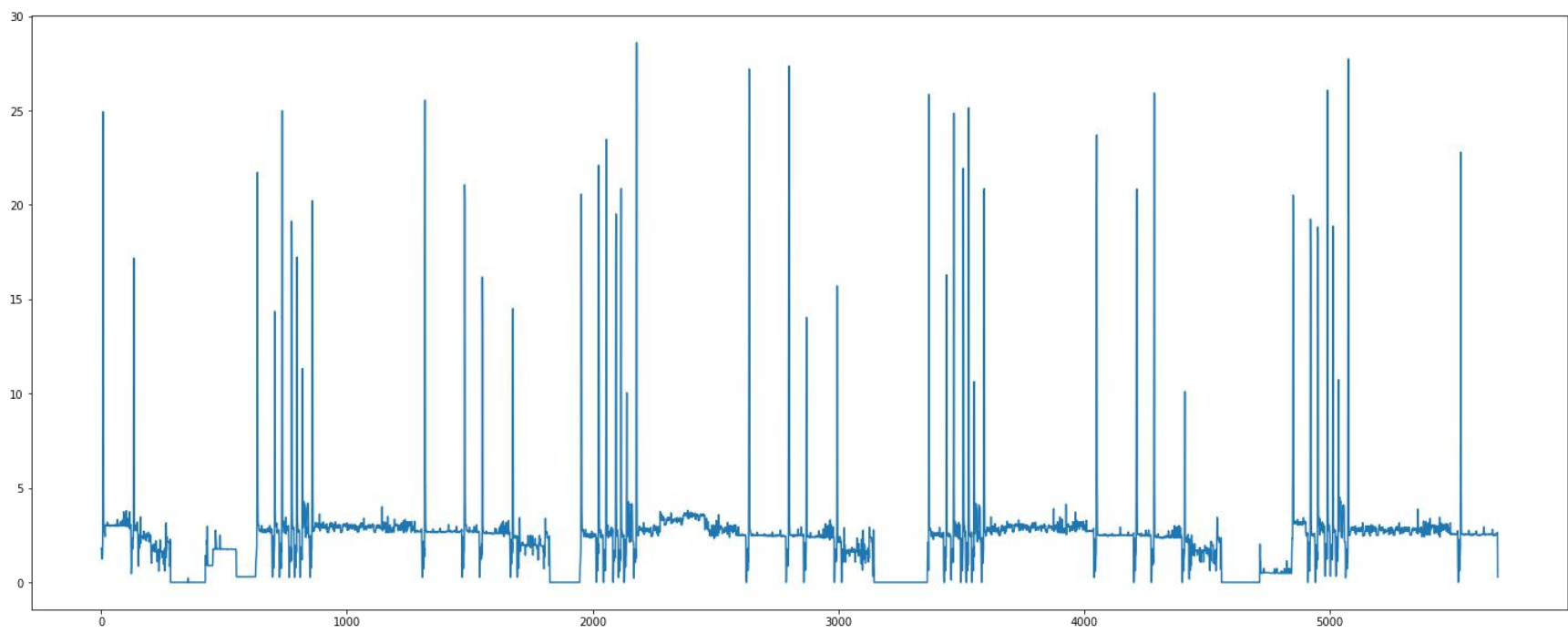
Slika 3.55 Vizuelni prikaz modela sa karakteristikama slojeva

Korak 12: Pozivanje funkcija za predviđanje

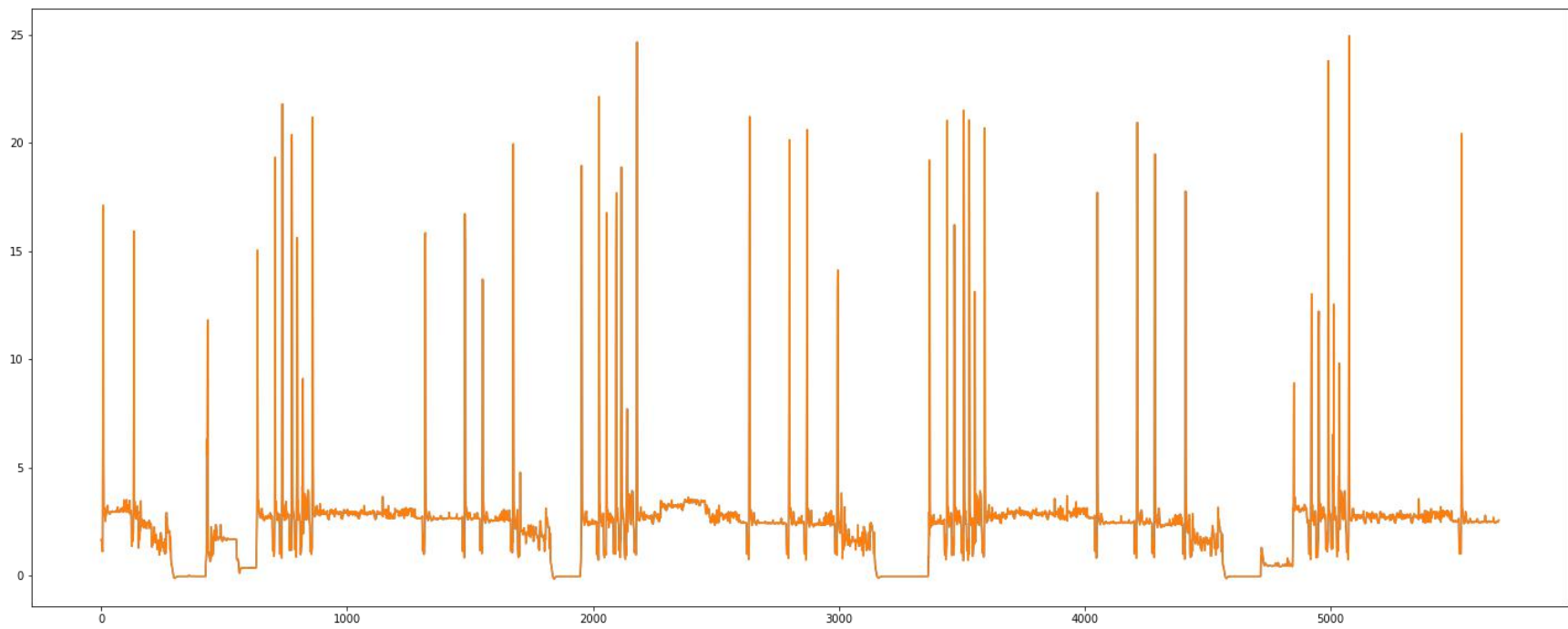
```
yhat = model.predict(X_test)
```

Korak 13: Iscrtavanje grafičkog prikaza stvarnih (1), predviđenih (2) i poređenje 1 i 2 (3)

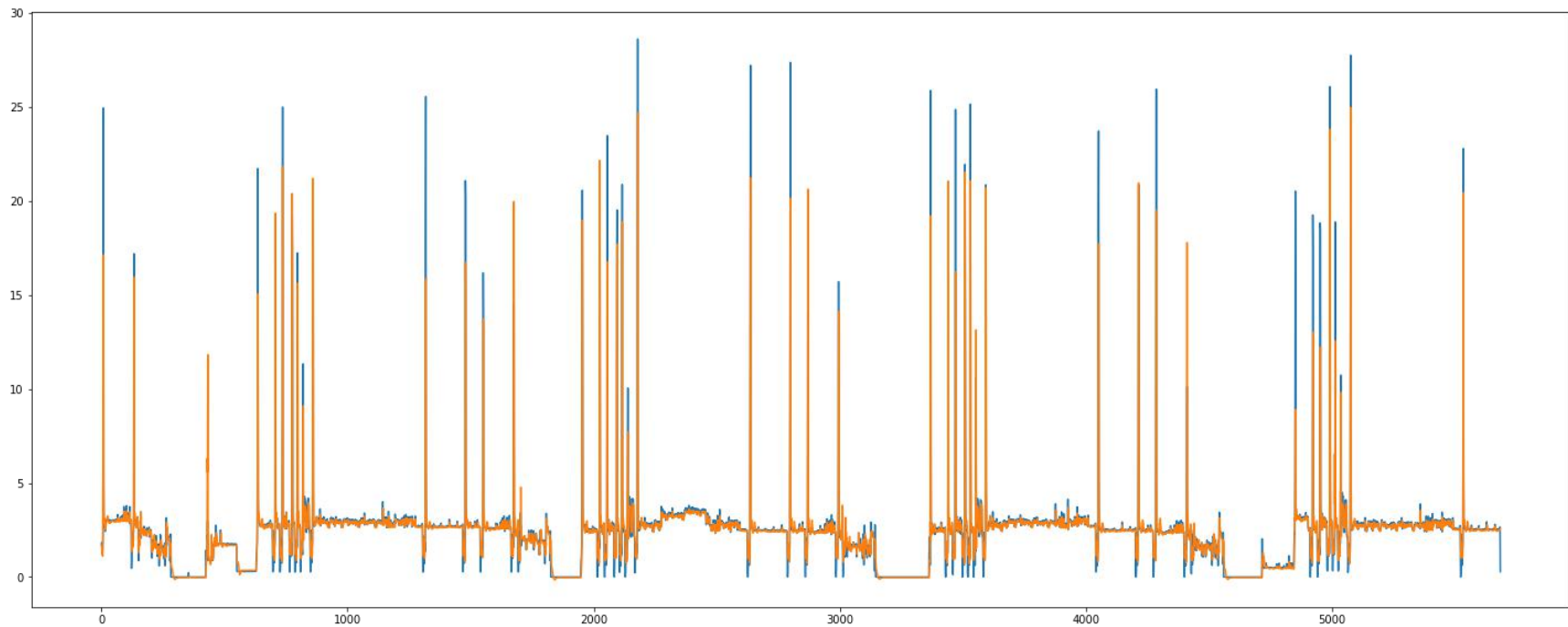
- |     |   |            |
|-----|---|------------|
| (1) | <pre>plt.figure(figsize=(25, 10))<br/>plt.plot(Y_test)</pre>                    | Slika 3.56 |
| (2) | <pre>plt.figure(figsize=(25, 10))<br/>plt.plot(yhat)</pre>                      | Slika 3.57 |
| (3) | <pre>plt.figure(figsize=(25, 10))<br/>plt.plot(Y_test)<br/>plt.plot(yhat)</pre> | Slika 3.58 |



Slika 3.56 Profil stvarnog ponašanja iz validacionog seta podataka



Slika 3.57 Profil predviđenog ponašanja validacionog seta podataka



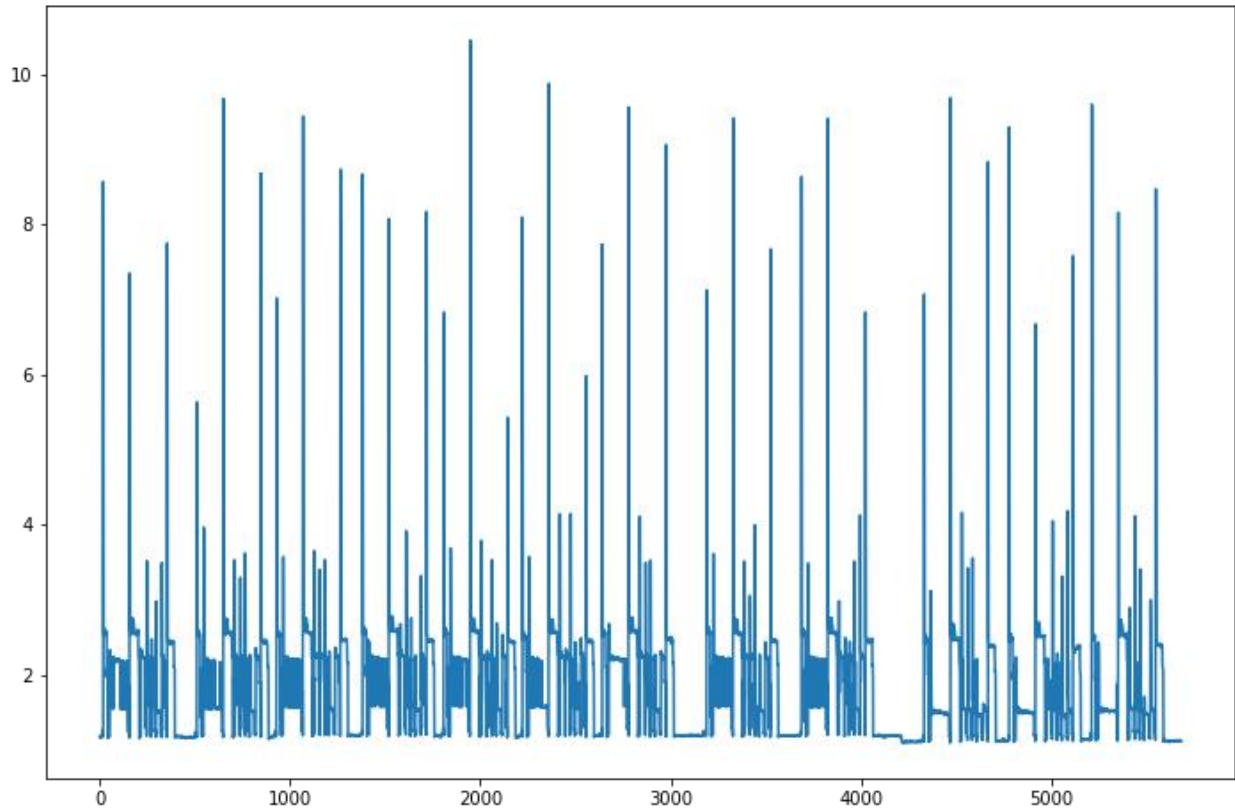
Slika 3.58 Profili stvarnog i predviđenog ponašanja validacionog seta podataka

Model je treniran na stvarnim podacima generisanim uz pomoć prethodno opisanog tehničkog rešenja. Prikazani podaci predstavljaju samo deo ukupnog skupa podataka prikupljenih za vreme rada CNC glodalice Pinaccl VMC 1100S. Generisani model dodatno je testiran na podacima koje do sada nije video. Podaci za ovaj drugi stepen validacije prikupljeni su za CNC strug HAAS SL 20 HE.

**Korak 14:** Učitavanje podataka iz eksterne .CSV datoteke i iscrtavanje profila

```
data_haas = pd.read_csv('/content/drive/MyDrive/phd_lstm/haas_1_datetime_p.csv')

haas_rad = data_haas.iloc[2000:2000+len(X_test)].copy()
haas_rad.reset_index(drop=True, inplace=True)
plt.figure(figsize=(12, 8))
haas_rad['P'].plot()
```



Slika 3.59 Distribucija promenljive P u vremenu za HAAS SL 20 HE ( $y = P$ ;  $x = \text{Samples}$ )

**Korak 15:** Pozivanje funkcije za pripremu podataka

```

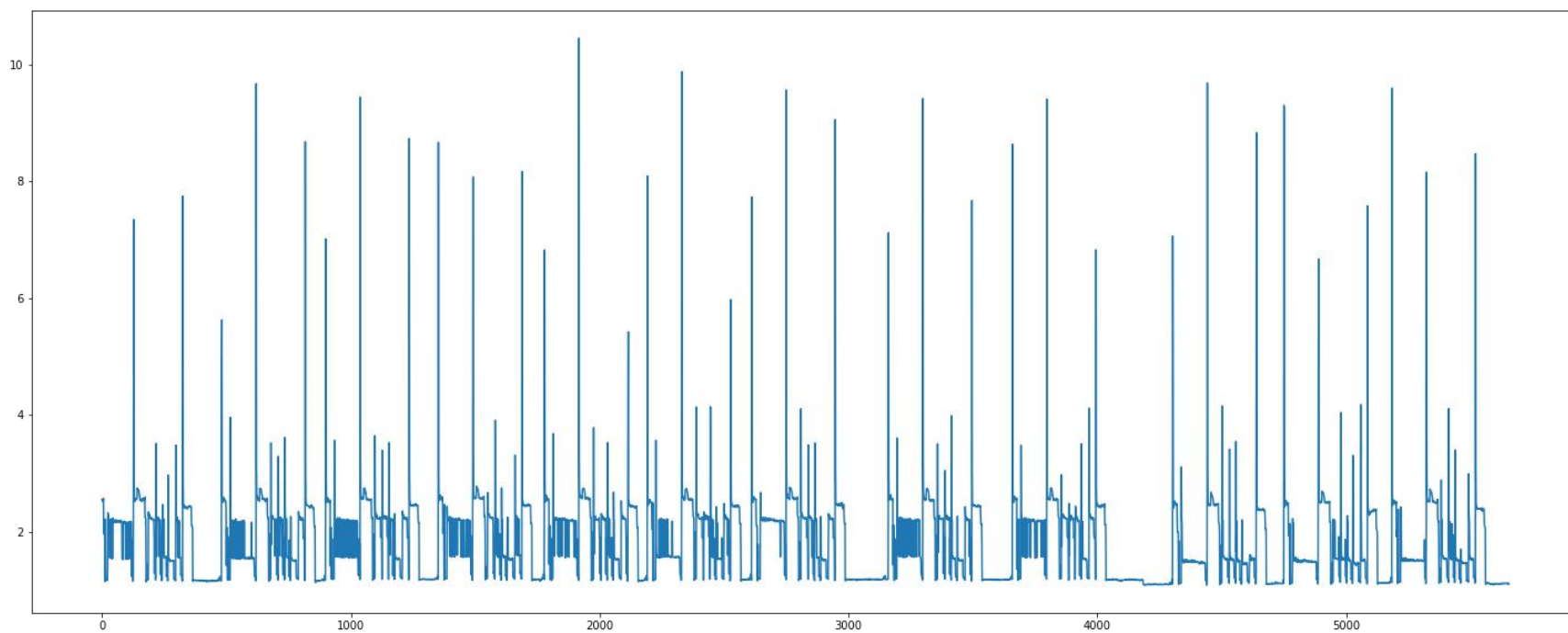
Y_var = 'P'
lag = 30
train_test_split = 1

X_train_h,
X_test_h,
Y_train_h,
Y_test_h = create_data_for_NN(haas_rad, Y_var, lag, train_test_split, use_last_n=None)

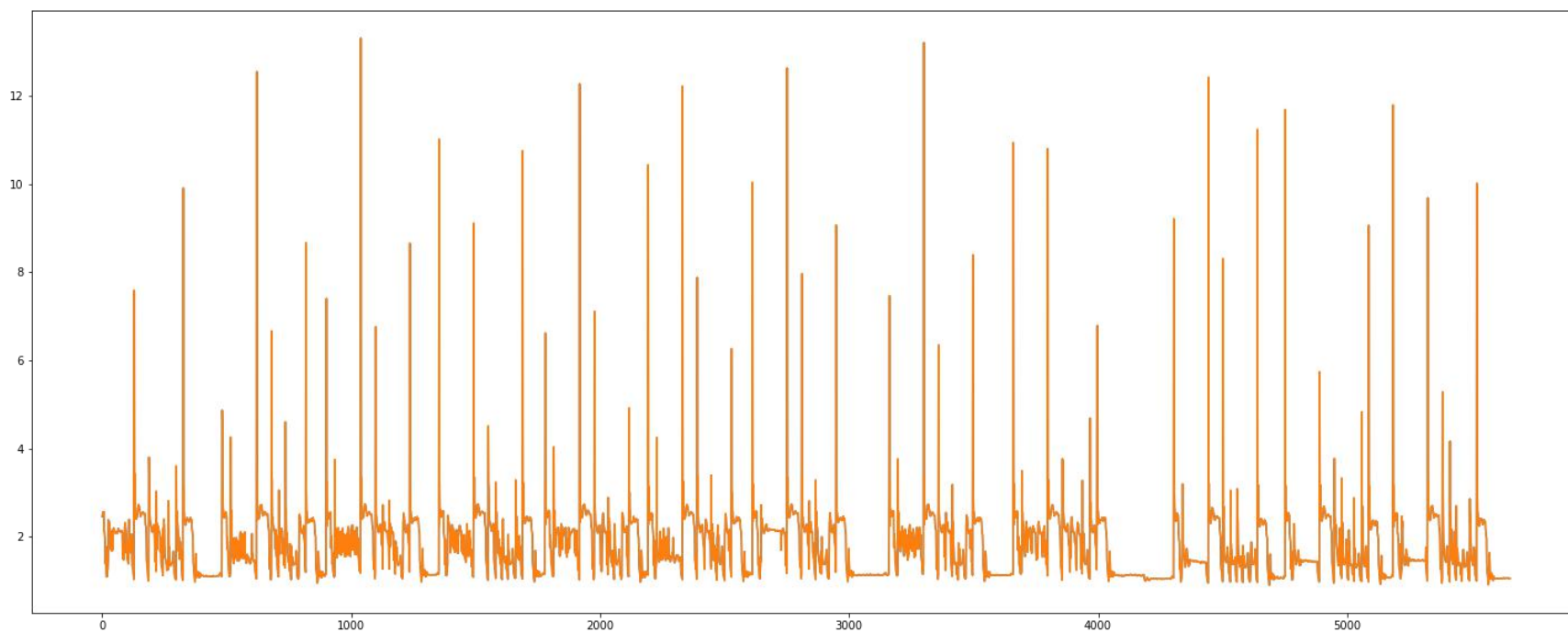
```

**Korak 16:** Iscrtavanje grafičkog prikaza stvarnih (1), predviđenih (2) i poredenje 1 i 2 (3)

- |     |   |            |
|-----|---|------------|
| (1) | <pre>plt.figure(figsize=(25, 10)) plt.plot(Y_test)</pre>                | Slika 3.60 |
| (2) | <pre>plt.figure(figsize=(25, 10)) plt.plot(yhat)</pre>                  | Slika 3.61 |
| (3) | <pre>plt.figure(figsize=(25, 10)) plt.plot(Y_test) plt.plot(yhat)</pre> | Slika 3.62 |

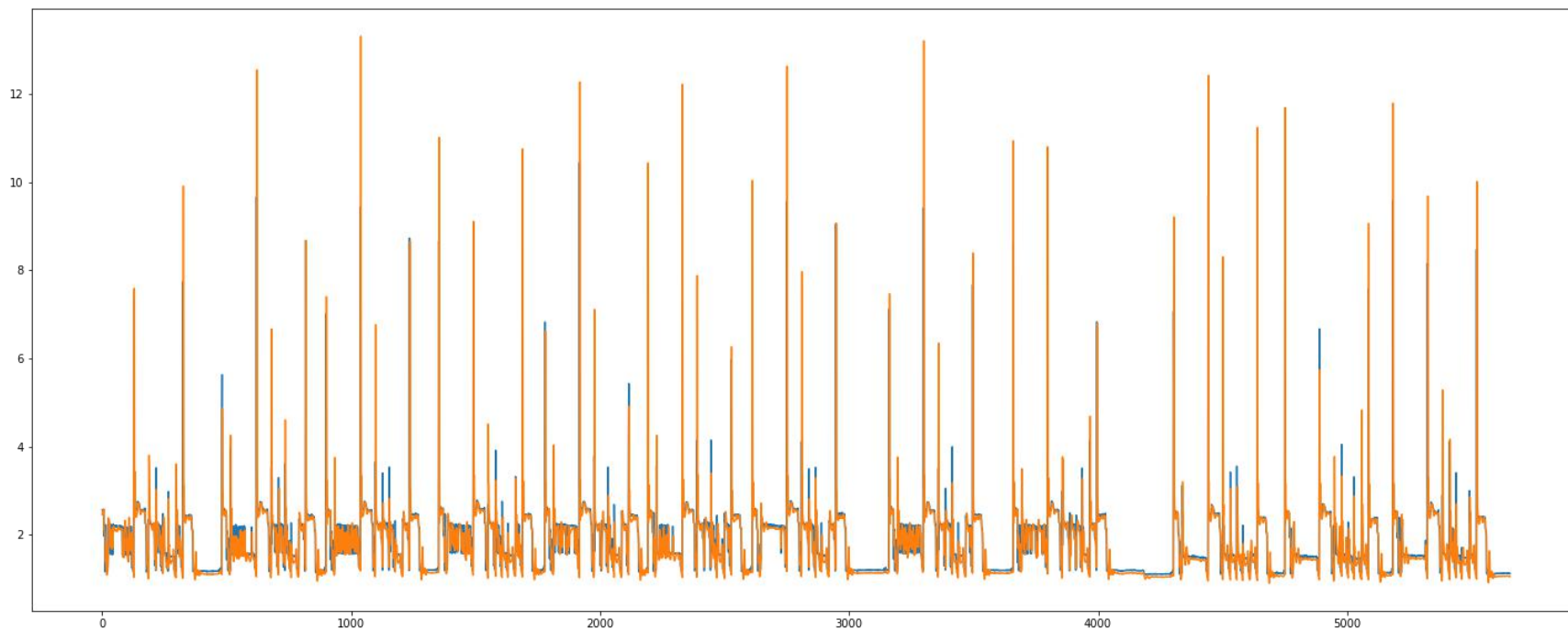


Slika 3.60 Profil stvarnog ponašanja iz validacionog seta podataka za HAAS SL 20 HE



Slika 3.61 Profil predviđenog ponašanja validacionog seta podataka za HAAS SL 20 HE





Slika 3.62 Profili stvarnog i predviđenog ponašanja validacionog seta podataka za HAAS SL 20 HE

#### Korak 17: Evaluacija modela za HAAS SL 20 HE

```
score = model.evaluate(X_test_h, Y_test_h)
print(score)
```

```
177/177 [=====]- 3s 16ms/step - loss: 0.6213
0.6212949156761169
```

#### Korak 18: Sačuvaj model

```
model.save("pinnacle_model_fin.h5")
```

### 3.5.3.2 Diskusija rezultata

Na osnovu prikazanog, generisani model može da predvidi zadato buduće stanje (na osnovu 30 prethodnih, može da predvidi 1 korak u budućnost), na validacionom setu podataka za mašinu Pinnacle VMC 1100S sa greškom MSE = 0,6129, dok na potpuno nepoznatim podacima (HAAS SL 20 HE) model za nijansu ima veću grešku MSE = 0,6213, što znači da ovaj model prilično dobro generalizuje posmatrani problem i može biti primenjen shodno zadatku.

### 3.5.3.3 Zadatak 2

Korak 1: Priprema Google Drive-a

```
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
```

Korak 2: Učitavanje potrebnih biblioteka

```
import pandas as pd
import numpy as np
from datetime import datetime, timedelta
from matplotlib import pyplot as plt
from keras.models import Sequential
from keras.layers import LSTM, Dense
from keras.callbacks import EarlyStopping, ModelCheckpoint
```

- **pandas** je biblioteka za manipulaciju i analizu podataka, sa fokusom na strukture podataka i operacije za manipulisanje numeričkim tabelama i vremenskim serijama
- **numpy** je biblioteka za višedimenzionalne nizove i matrice, zajedno sa velikom kolekcijom matematičkih funkcija za rad na nizovima
- **datetime** obezbeđuje klase za manipulisanje datumima i vremenima
- **matplotlib.pyplot** je biblioteka za crtanje plotova
- **Keras** je softverska biblioteka, odnosno interfejs za rad sa neuronskim mrežama, iz biblioteke TensorFlow

Korak 3: Učitavanje podataka iz eksterne .CSV datoteke

```
d = pd.read_csv('/content/drive/MyDrive/phd_lstm/Pinnacle1.csv')
```

Korak 4: Konverzija datuma i vremena iz učitane datoteke u timeseries format

```
# Formatting to datetime
d['Datetime'] = [datetime.strptime(x, '%m/%d/%Y %H:%M:%S') for x in d['Datetime']]
```

Korak 5: Iscrtavanje promenljive P

```
d_p = d['P']
plt.figure(figsize=(12, 8))
d_p.plot()
plt.show()
```

Rezultat je slika 3.53.

### Korak 6: Definisane pomoćne funkcije

`create_data_for_NN` je glavna funkcija koju pozivamo i, kao što joj ime kaže, ona priprema podatke na način koji traži mreža. Pošto je LSTM layer u pitanju, on zahteva da se podaci oblikuju (**reshape**) na određeni način:

$(22736, 30, 1)$   $(5684, 30, 1)$   $(22736, 5)$   $(5684, 5)$

- $(22736, 30, 1)$  – 22736 broj redova za trening mreže, 30 je prva dimenzija ulazne sekvence, 1 je druga dimenzija ulazne sekvence (t.j u pitanju je niz od 30 sa visinom 1)
- $(22736, 5)$  - 22736 je broj oznaka/labela, odnosno broj redova izlaznih sekvenci, 5 je dužina izlazne sekvence koja se predviđa
- 22736 je broj trening primera (training set)
- 5684 je broj primera za validaciju (test set)

```

def create_X_Y(ts, lag, predict_steps) -> tuple:
    X, Y = [], []

    if len(ts) - lag <= 0:
        X.append(ts)
    else:
        for i in range(len(ts) - lag - predict_steps):

            X.append( ts[i:(i+lag)] )
            Y.append( ts[(i+lag):(i+lag+predict_steps)] )

    X, Y = np.array(X), np.array(Y)
    X = np.reshape(X, (X.shape[0], X.shape[1], 1))

    return X, Y

def create_data_for_NN(data, Y_var, lag, predict_steps,
train_test_split, use_last_n=None):

    # Extracting the main variable we want to model/forecast
    y = data[Y_var].tolist()

    # Subsetting the time series if needed
    if use_last_n is not None:
        y = y[-use_last_n:]

    # The X matrix will hold the lags of Y
    X, Y = create_X_Y(y, lag, predict_steps)

    # Creating training and test sets
    X_train = X
    X_test = []

    Y_train = Y
    Y_test = []

    if train_test_split > 0:
        index = round(len(X) * train_test_split)
        X_train = X[:len(X) - index]
        X_test = X[-index:]

        Y_train = Y[:len(X) - index]
        Y_test = Y[-index:]

    return X_train, X_test, Y_train, Y_test

```

Funkcija uzima promenljivu P iz datog dataframe-a i pretvara je u niz. Zatim pozove drugu funkciju `create_X_Y` koja pretvara niz u sekvence podataka spram željene LSTM arhitekture. U ovom slučaju to je sekvenca od 30 elemenata, koja treba da predviđi sledećih 5. Nakon toga glavna funkcija uradi raspodelu trening i test setova podataka prema zadatom odnosu (80/20).

Korak 7: Kreiranje testnih i validacionih podataka povezivanjem definisanih funkcija

```
Y_var = 'P'
lag = 30
predict_steps = 5
train_test_split = 0.2

X_train, X_test, Y_train, Y_test = create_data_for_NN(d, Y_var, lag, predict_steps, train_test_split)
```

Korak 8: Provera da li je oblikovanje podatka izvršeno kako treba

```
print(X_train.shape, X_test.shape, Y_train.shape, Y_test.shape)

(22736, 30, 1) (5684, 30, 1) (22736, 5) (5684, 5)
```

```
x_df = pd.DataFrame(X_train[:5].reshape(5,30))
print(x_df)
```

	0	1	2	3	...	26	27	28	29
0	0.38627	0.33212	0.31046	0.31046	...	1.52703	1.52703	1.46566	0.70034
1	0.33212	0.31046	0.31046	0.31407	...	1.52703	1.46566	0.70034	1.09383
2	0.31046	0.31046	0.31407	1.07578	...	1.46566	0.70034	1.09383	0.71478
3	0.31046	0.31407	1.07578	0.49818	...	0.70034	1.09383	0.71478	2.07936
4	0.31407	1.07578	0.49818	0.49818	...	1.09383	0.71478	2.07936	1.18047

```
y_df = pd.DataFrame(Y_train[:5].reshape(5,5))
print(y_df)
```

	0	1	2	3	4
0	1.09383	0.71478	2.07936	1.18047	1.08300
1	0.71478	2.07936	1.18047	1.08300	0.35378
2	2.07936	1.18047	1.08300	0.35378	0.35378
3	1.18047	1.08300	0.35378	0.35378	0.66063
4	1.08300	0.35378	0.35378	0.66063	1.62450

```
Y_train[0]
```

```
array([1.083, 0.35378, 0.35378, 0.66063, 1.6245])
```

U ovom slučaju, kao i u prethodnom, posmatramo promenljivu P, a svaki zapis odgovara jednoj sekundi. Uzimamo podskup (niz od 35 uzastopnih vrednosti), pri čemu se prvih 30 koristi kao ulaz u neuronsku mrežu, dok će poslednjih 5 biti vrednosti koje mreža treba da nauči tokom treninga:

	0	1	2	3	...	26	27	28	29	30	31	32	33	34
0	0.38627	0.33212	0.31046	0.31046	...	1.52703	1.52703	1.46566	0.70034	1.09383	0.71478	2.07936	1.18047	1.08300

U fazi treninga mreža uči da na osnovu 30 ulaznih sekvenci (niz prvih 30) predvidi narednih 5, dok u fazi validacije, mreža treba da predvidi 5 vrednosti na osnovu 30 ulaznih sekvenci (slika 3.63).

## Ulazna sekvenca

	0	1	2	3	...	26	27	28	29
0	0.38627	0.33212	0.31046	0.31046	...	1.52703	1.52703	1.46566	0.70034
1	0.33212	0.31046	0.31046	0.31407	...	1.52703	1.46566	0.70034	1.09383
2	0.31046	0.31046	0.31407	1.07578	...	1.46566	0.70034	1.09383	0.71478
3	0.31046	0.31407	1.07578	0.49818	...	0.70034	1.09383	0.71478	2.07936
4	0.31407	1.07578	0.49818	0.49818	...	1.09383	0.71478	2.07936	1.10047

## Izlazna sekvenca

	0	1	2	3	4
0	1.09383	0.71478	2.07936	1.18047	1.08300
1	0.71478	2.07936	1.18047	1.08300	0.35378
2	2.07936	1.18047	1.08300	0.35378	0.35378
3	1.18047	1.08300	0.35378	0.35378	0.66063
4	1.08300	0.35378	0.35378	0.66063	1.62450

Slika 3.63 Šematski prikaz pripreme strukture podataka za potrebe modela baziranog na LSTM mreži - trening par

Princip prikazan na slici 3.63 se ponavlja tako što se niz (podskup od 35 vrednosti) pomera za jedan korak, sve do kraja ulaznog niza.

### Korak 9: Definisavanje modela

```
# Defining the model
model = Sequential(name='lstm_5steps')
model.add(LSTM(512, activation='relu', return_sequences=True, in-
put_shape=(lag, 1), name='lstm_0'))
model.add(LSTM(512, activation='relu', name='lstm_1'))
model.add(Dense(256, name='dense_0'))
model.add(Dense(128, name='dense_1'))
model.add(Dense(64, name='dense_2'))
model.add(Dense(32, name='dense_3'))
model.add(Dense(predict_steps, name='dense_4'))

model.compile(optimizer='adam', loss='mse', metrics=['mae'])

early_stop = EarlyStopping(monitor='val_loss', patience=3, min_delta=0.01)
save_checkpoint = ModelCheck-
point(save_weights_only=False, save_best_only=True, filepath='pinna-
cle_model_5steps_bst.h5' )

# Defining the model parameter dict
keras_dict = {
    'x': X_train,
    'y': Y_train,
    'validation_data':[X_test, Y_test],
    'batch_size': 512,
    'epochs': 100,
    'shuffle': False,
    'callbacks':[early_stop,save_checkpoint]
}

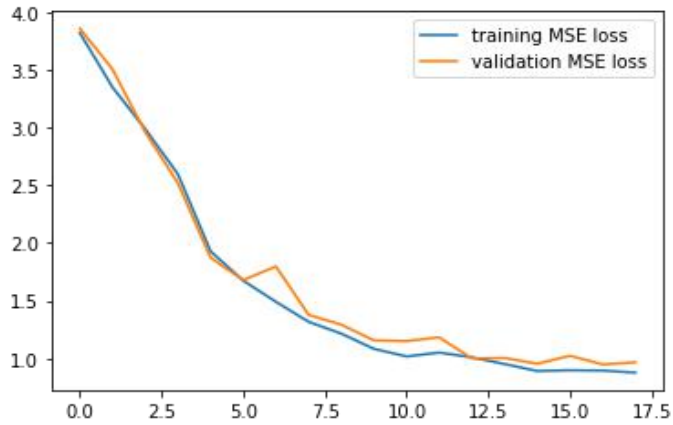
# Fitting the model
history = model.fit(**keras_dict)
```

Prikaz procesa učenja kroz epohe

```
Epoch 1/100  
45/45 [=====] - 250s 6s/step - loss: 3.8256 - val_loss: 3.8640  
Epoch 2/100  
45/45 [=====] - 247s 5s/step - loss: 3.3529 - val_loss: 3.5090  
Epoch 3/100  
45/45 [=====] - 246s 5s/step - loss: 2.9911 - val_loss: 2.9639  
Epoch 4/100  
45/45 [=====] - 246s 5s/step - loss: 2.5988 - val_loss: 2.5214  
Epoch 5/100  
45/45 [=====] - 245s 5s/step - loss: 1.9279 - val_loss: 1.8730  
Epoch 6/100  
45/45 [=====] - 246s 5s/step - loss: 1.6732 - val_loss: 1.6780  
Epoch 7/100  
45/45 [=====] - 247s 6s/step - loss: 1.4896 - val_loss: 1.7971  
Epoch 8/100  
45/45 [=====] - 245s 5s/step - loss: 1.3159 - val_loss: 1.3760  
Epoch 9/100  
45/45 [=====] - 246s 5s/step - loss: 1.2131 - val_loss: 1.2915  
Epoch 10/100  
45/45 [=====] - 245s 5s/step - loss: 1.0810 - val_loss: 1.1546  
Epoch 11/100  
45/45 [=====] - 244s 5s/step - loss: 1.0150 - val_loss: 1.1484  
Epoch 12/100  
45/45 [=====] - 245s 5s/step - loss: 1.0483 - val_loss: 1.1806  
Epoch 13/100  
45/45 [=====] - 246s 5s/step - loss: 1.0073 - val_loss: 0.9970  
Epoch 14/100  
45/45 [=====] - 246s 5s/step - loss: 0.9487 - val_loss: 1.0016  
Epoch 15/100  
45/45 [=====] - 245s 5s/step - loss: 0.8884 - val_loss: 0.9518  
Epoch 16/100  
45/45 [=====] - 245s 5s/step - loss: 0.8949 - val_loss: 1.0209  
Epoch 17/100  
45/45 [=====] - 245s 5s/step - loss: 0.8922 - val_loss: 0.9454  
Epoch 18/100  
45/45 [=====] - 245s 5s/step - loss: 0.8741 - val_loss: 0.9638
```

Korak 10: Iscrtavanje funkcije gubitaka za trening i test skup podataka (MSE)

```
plt.figure()  
plt.plot(history.history['loss'], label='training MSE loss')  
plt.plot(history.history['val_loss'], label='validation MSE loss')  
plt.legend()
```



Slika 3.64 padanje funkcije gubitaka za trening i test skup podataka (MSE)

### Korak 11: Učitavanje i evaluacija prethodno sačuvanog modela

```
# load and evaluate a saved model
from keras.models import load_model

# load model
model = load_model('/content/drive/MyDrive/phd_lstm/pinnacle_model_5steps_bst.h5')
model.summary()
```

Model: "lstm\_5steps"

Layer (type)	Output Shape	Param #
lstm_0 (LSTM)	(None, 30, 512)	1052672
lstm_1 (LSTM)	(None, 512)	2099200
dense_0 (Dense)	(None, 256)	131328
dense_1 (Dense)	(None, 128)	32896
dense_2 (Dense)	(None, 64)	8256
dense_3 (Dense)	(None, 32)	2080
dense_4 (Dense)	(None, 5)	165

```
=====  
Total params: 3,326,597  
Trainable params: 3,326,597  
Non-trainable params: 0  
=====
```

### Korak 12: Evaluacija modela

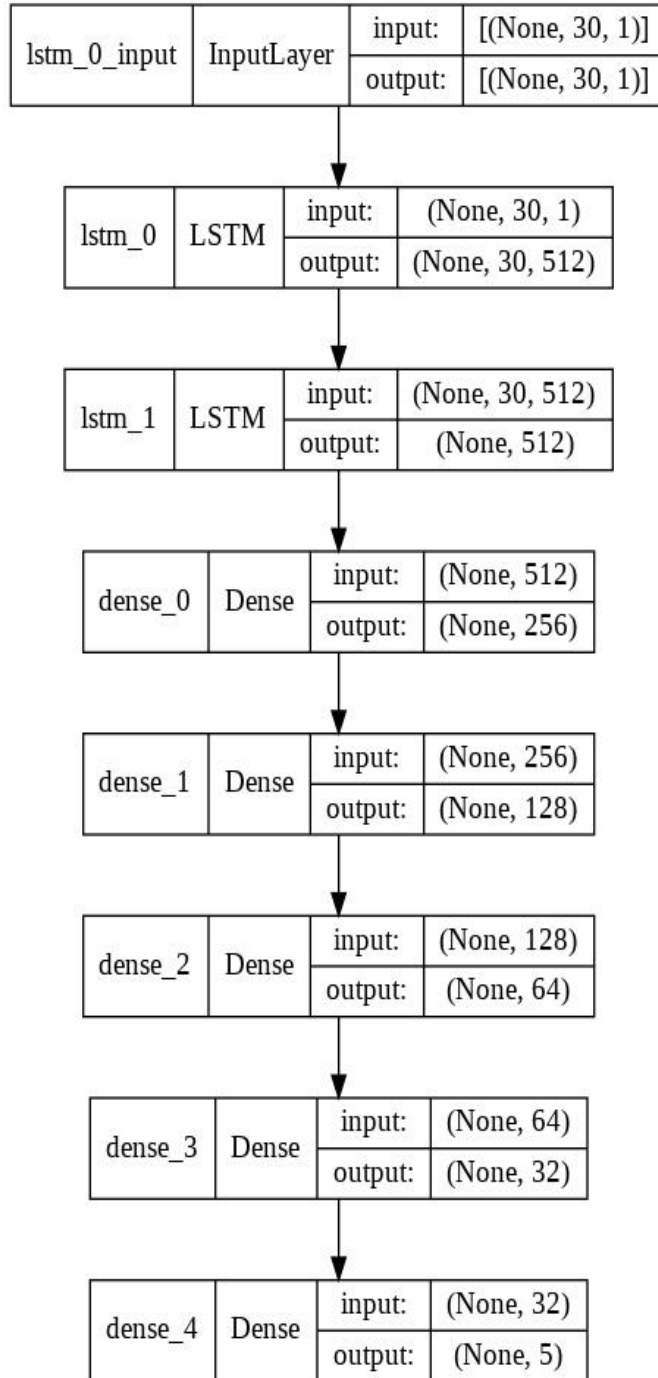
```
# model score
score = model.evaluate(X_test, Y_test)
print(score)
```



178/178 [=====] - 26s 143ms/step - loss: 0.9454  
 [0.9454148411750793]

### Korak 13: Vizuelizacija modela

```
# Vizuelizacija modela
from keras.utils.vis_utils import plot_model
plot_model(model, to_file='model_plot.png', show_shapes=True, show_layer_names=True)
```



Slika 3.65 Vizuelni prikaz modela sa karakteristikama lejera

#### Korak 14: Pozivanje funkcije predviđanja

```
yhat = model.predict(X_test)
```

#### Korak 15: Iscrtavanje pozicija

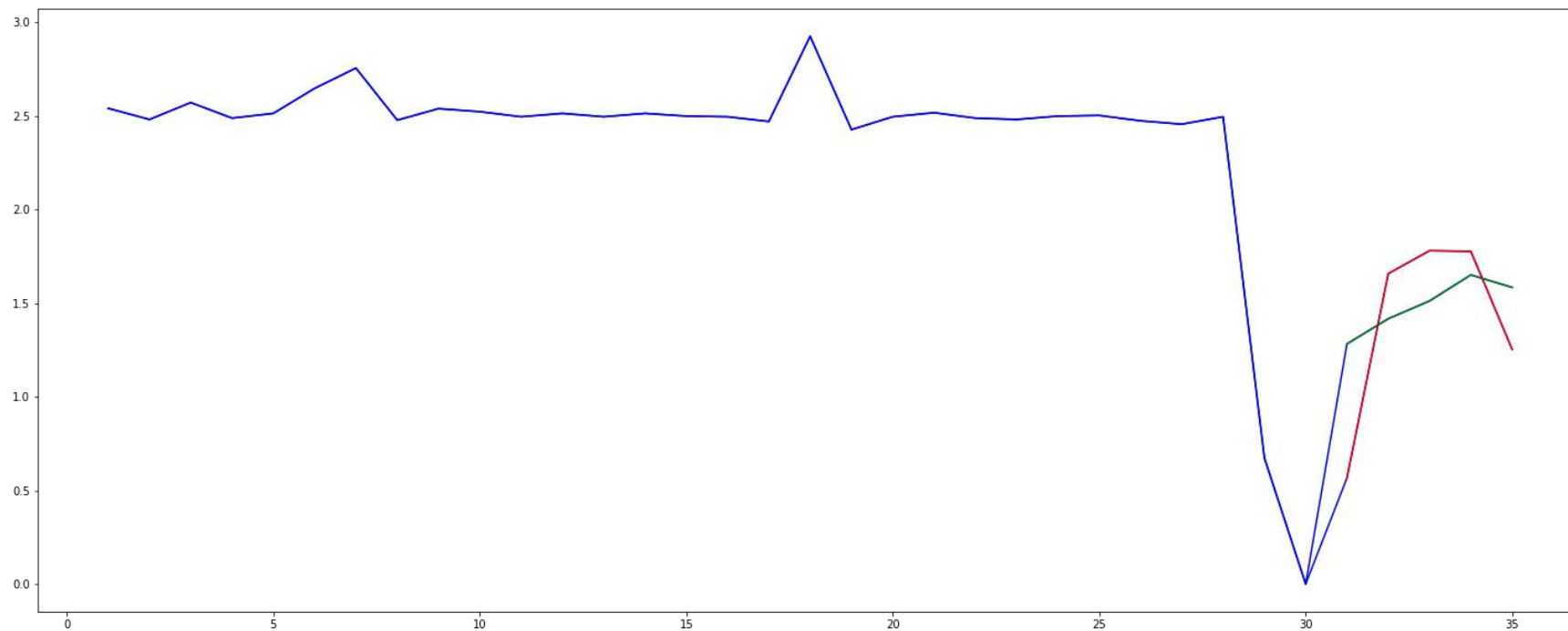
```
poz = 4993
aaa = pd.Series(np.reshape(X_test[poz], 30)).append(pd.Series(np.reshape(Y_test[poz], 5))).reset_index(drop=True)
bbb = pd.Series(np.reshape(X_test[poz], 30)).append(pd.Series(np.reshape(yhat[poz], 5))).reset_index(drop=True)
# bbb = pd.Series(yhat[poz])
aaa.index += 1
bbb.index += 1

plt.figure(figsize=(25, 10))
plt.plot(aaa, 'b') # plava osnovna
plt.plot(aaa[30:], 'r') # stvarno se desilo
plt.plot(bbb, 'b') # plava osnova
plt.plot(bbb[30:], 'g') # predikcija

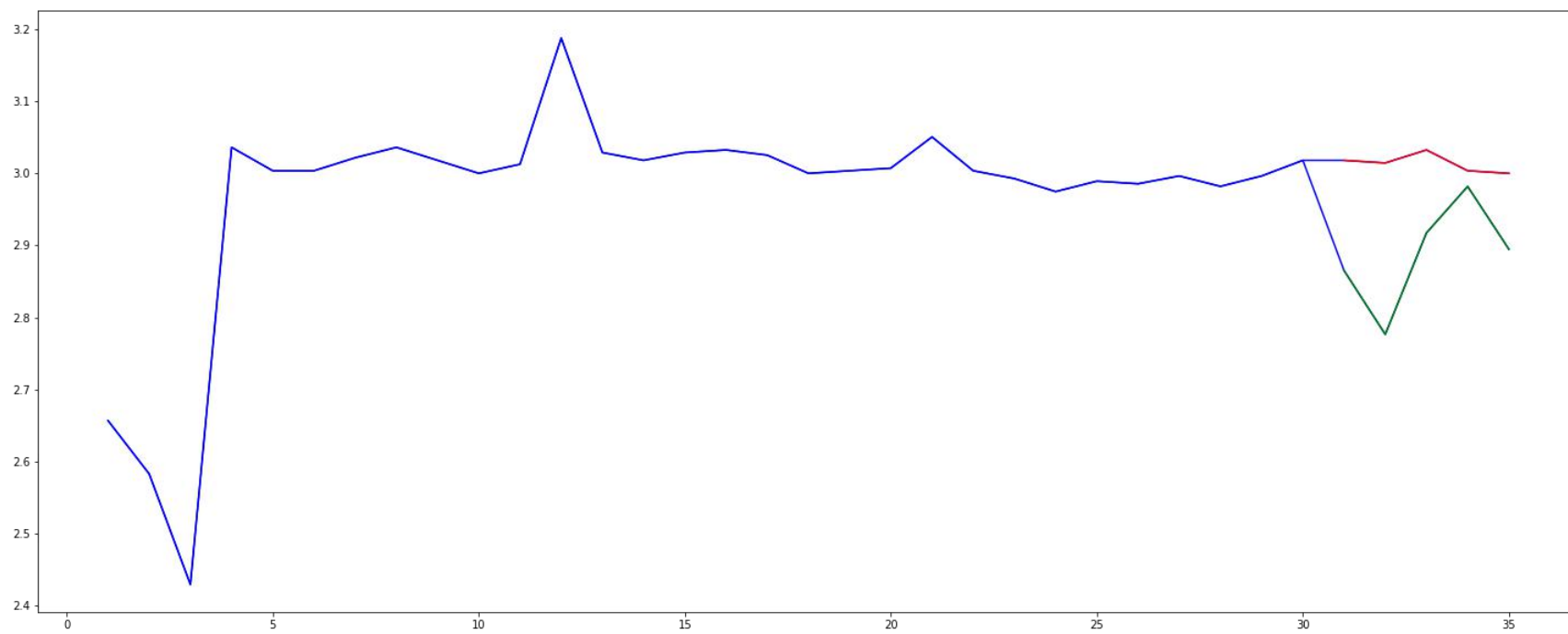
plt.figure(figsize=(25, 10))
plt.plot(Y_test)
plt.plot(yhat)
```

U nastavku su na slikama 3.66 - 3.82 dati prikazi realnih (crveno) i predviđenih vrednosti (zeleno) dok je ulazna sekvenca podataka na osnovu kojih se predviđanje vrši označena plavom bojom.

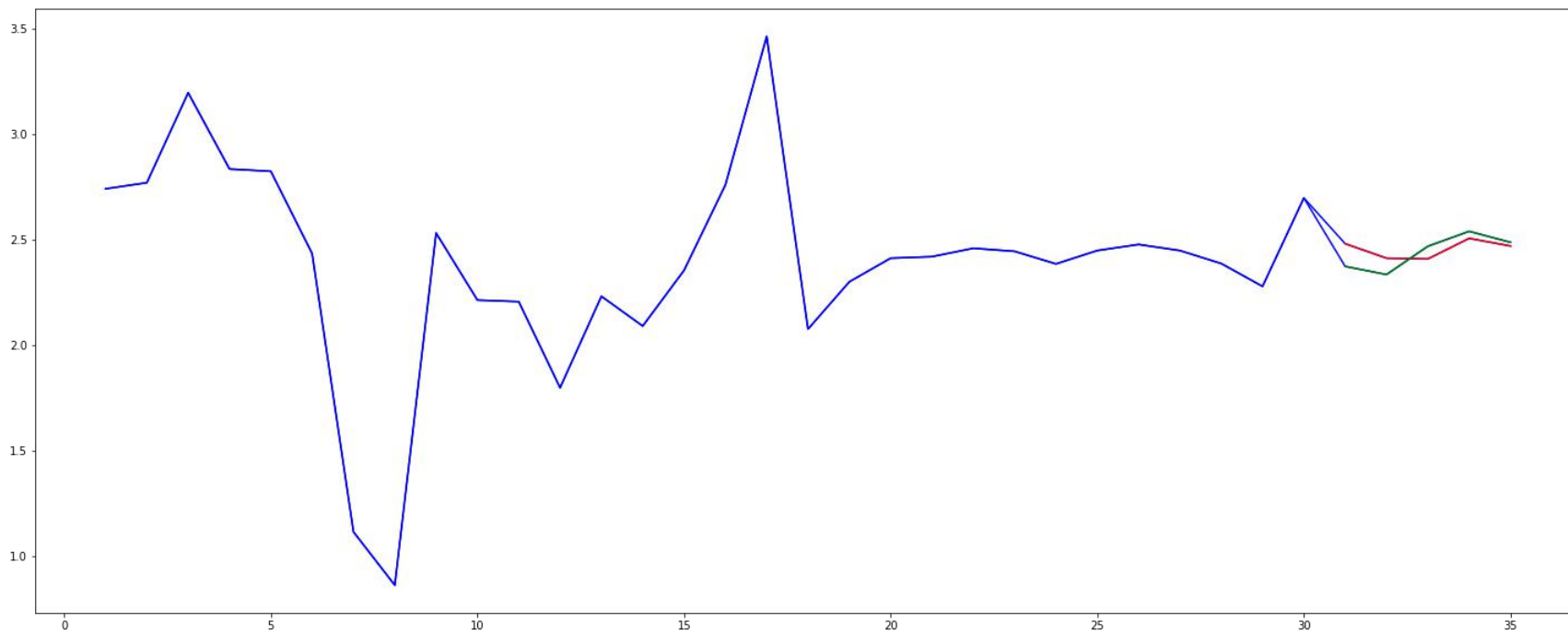
Primeri pozicija:



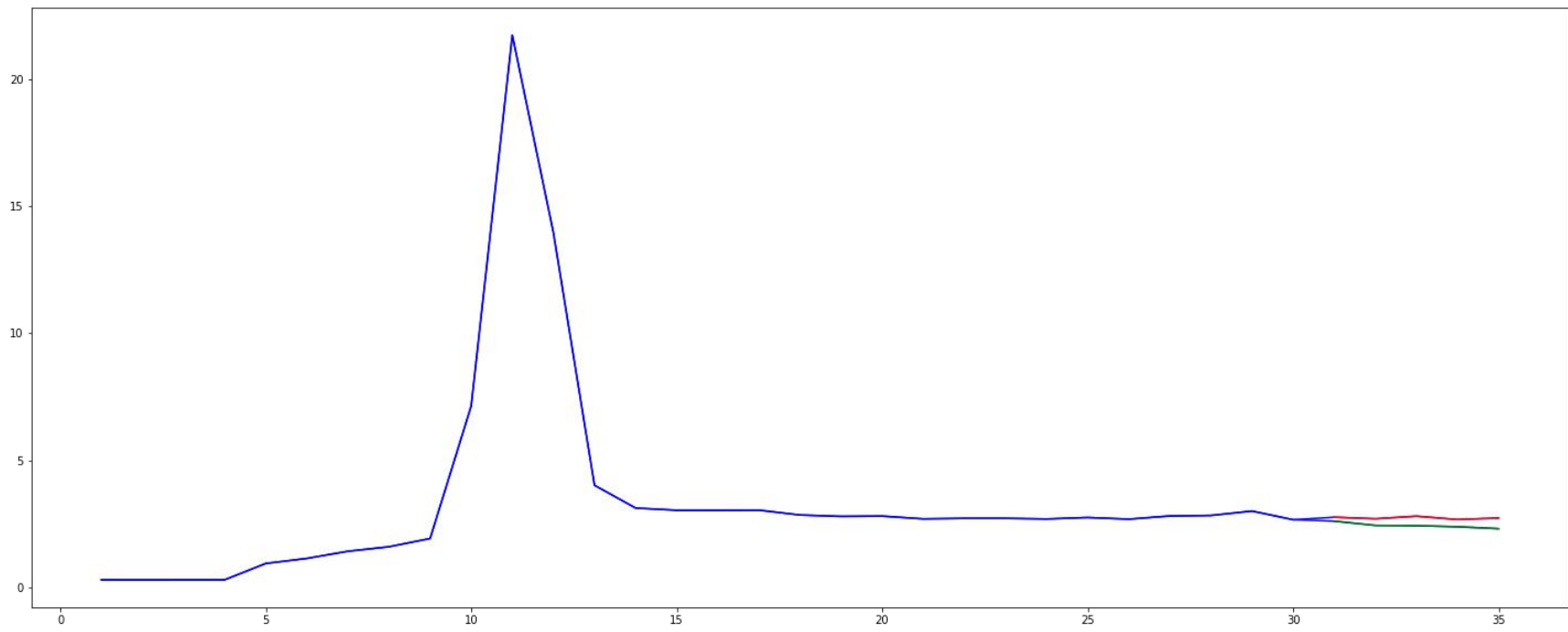
Slika 3.66 Pozicija 2



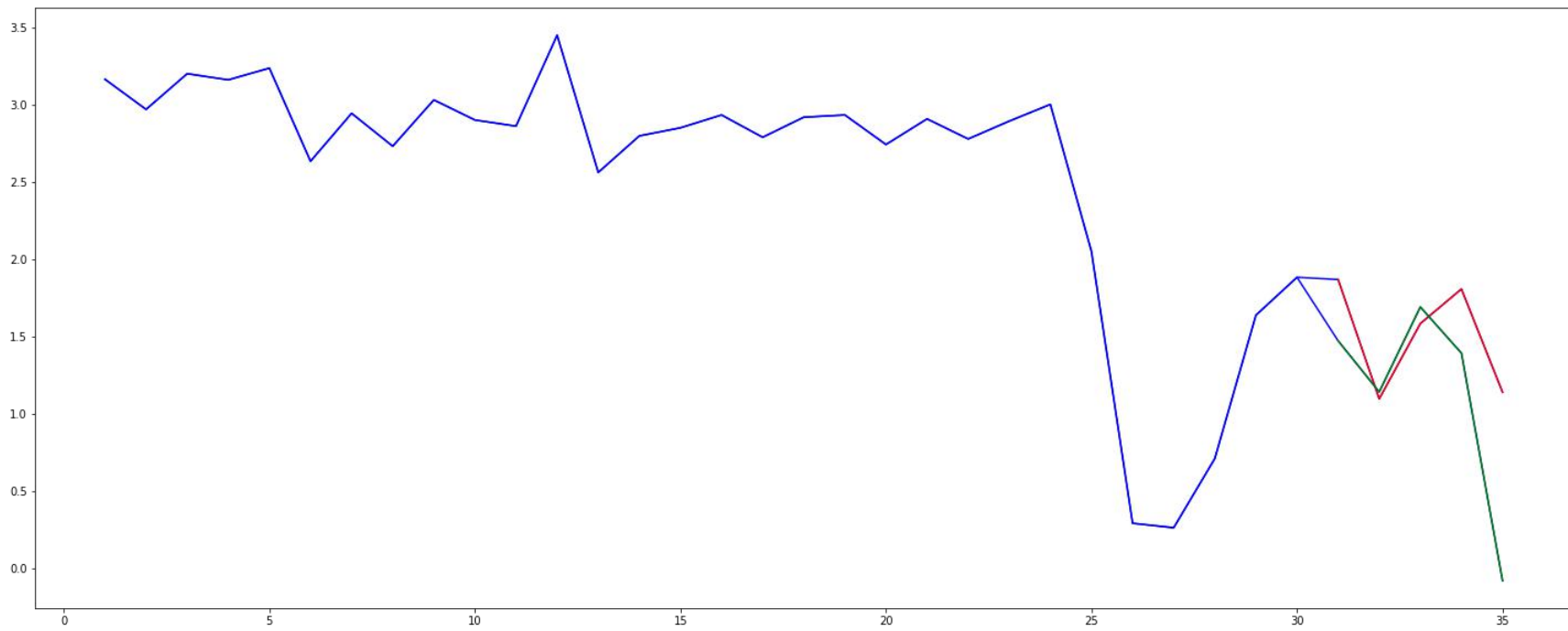
Slika 3.67 Pozicija 47



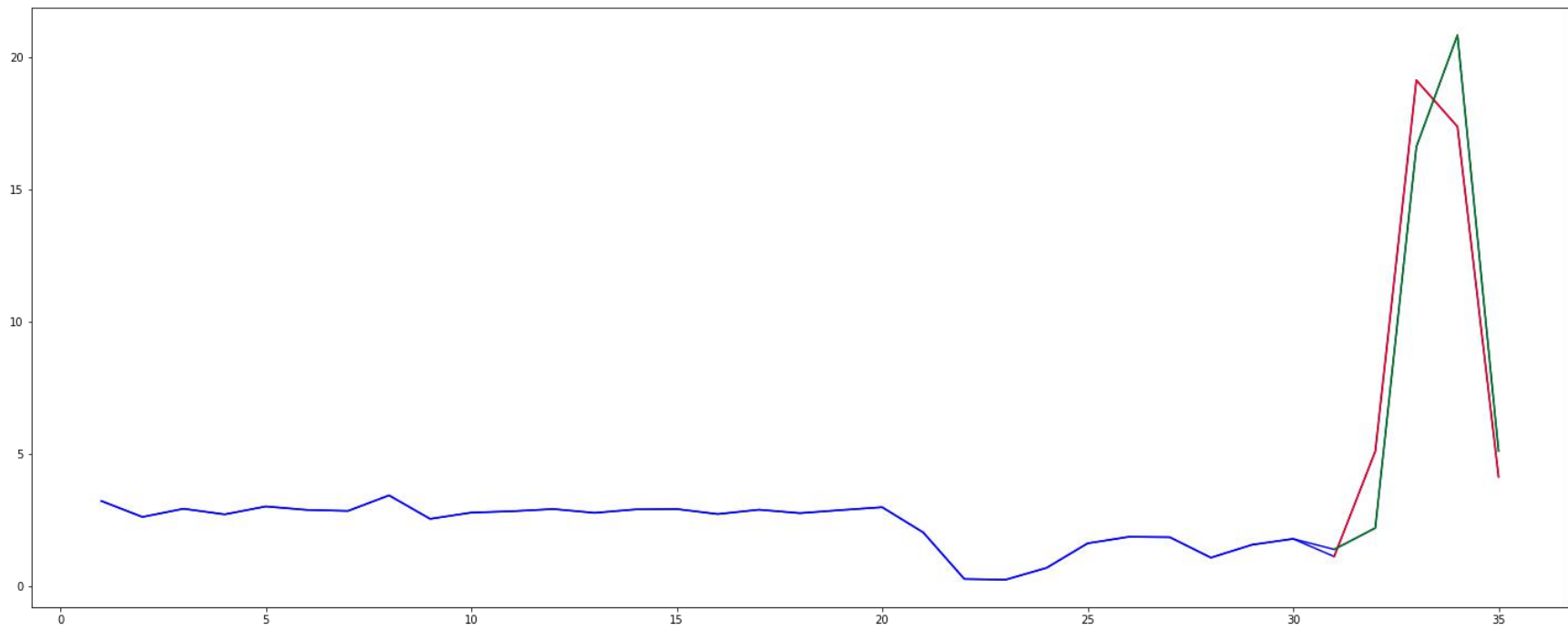
Slika 3.68 Pozicija 178



Slika 3.69 Pozicija 659

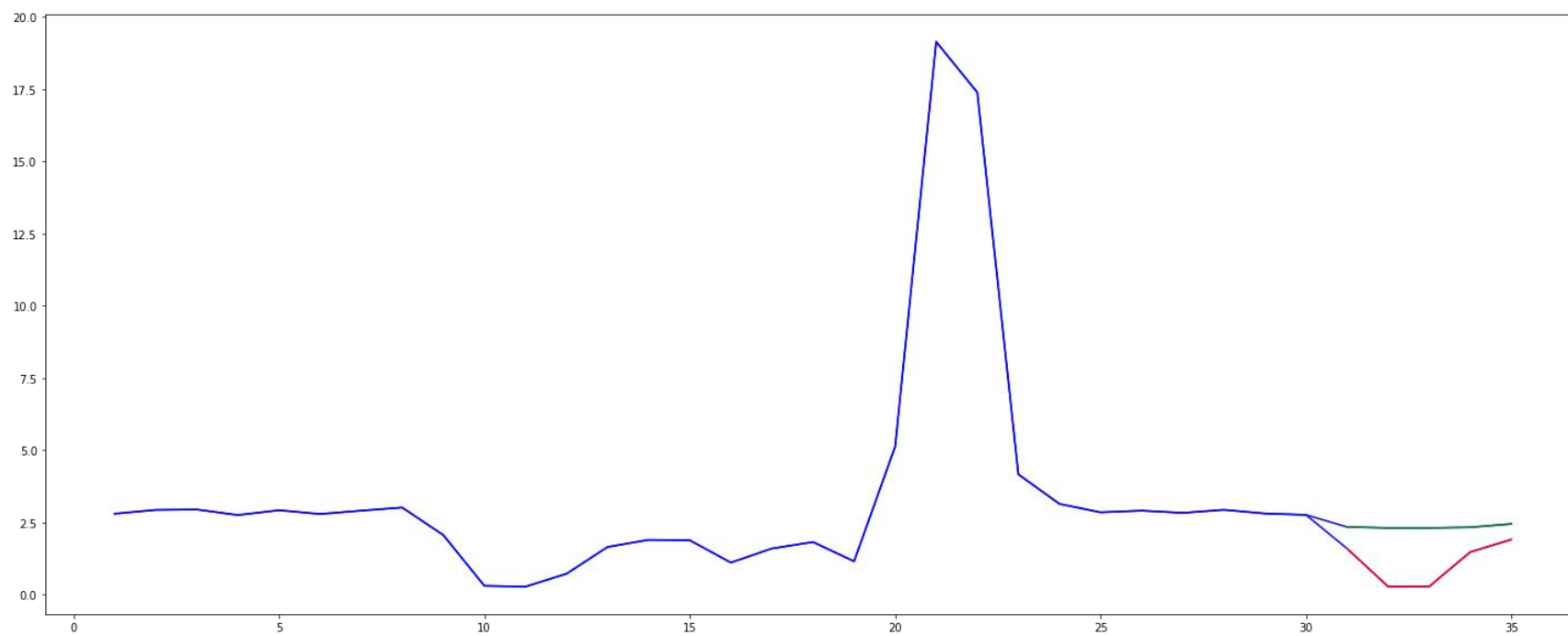


Slika 3.70 Pozicija 773

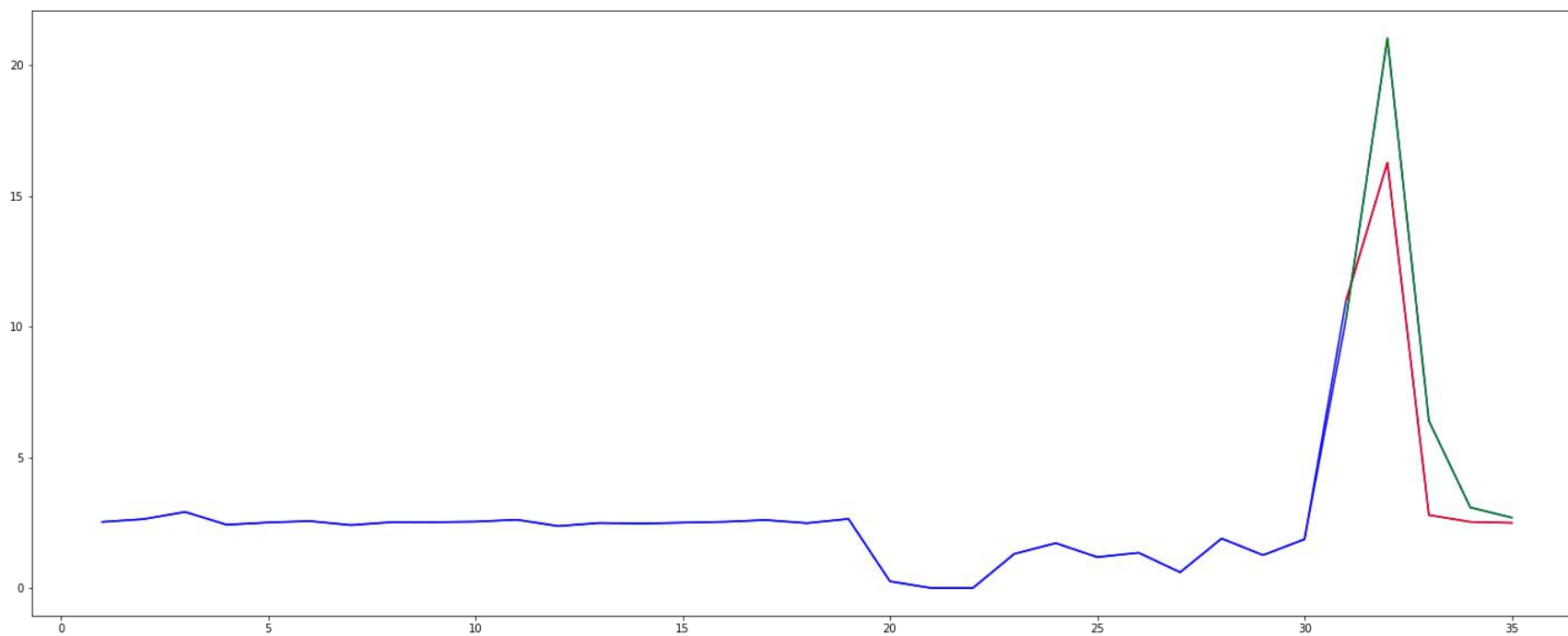


Slika 3.71 Pozicija 777

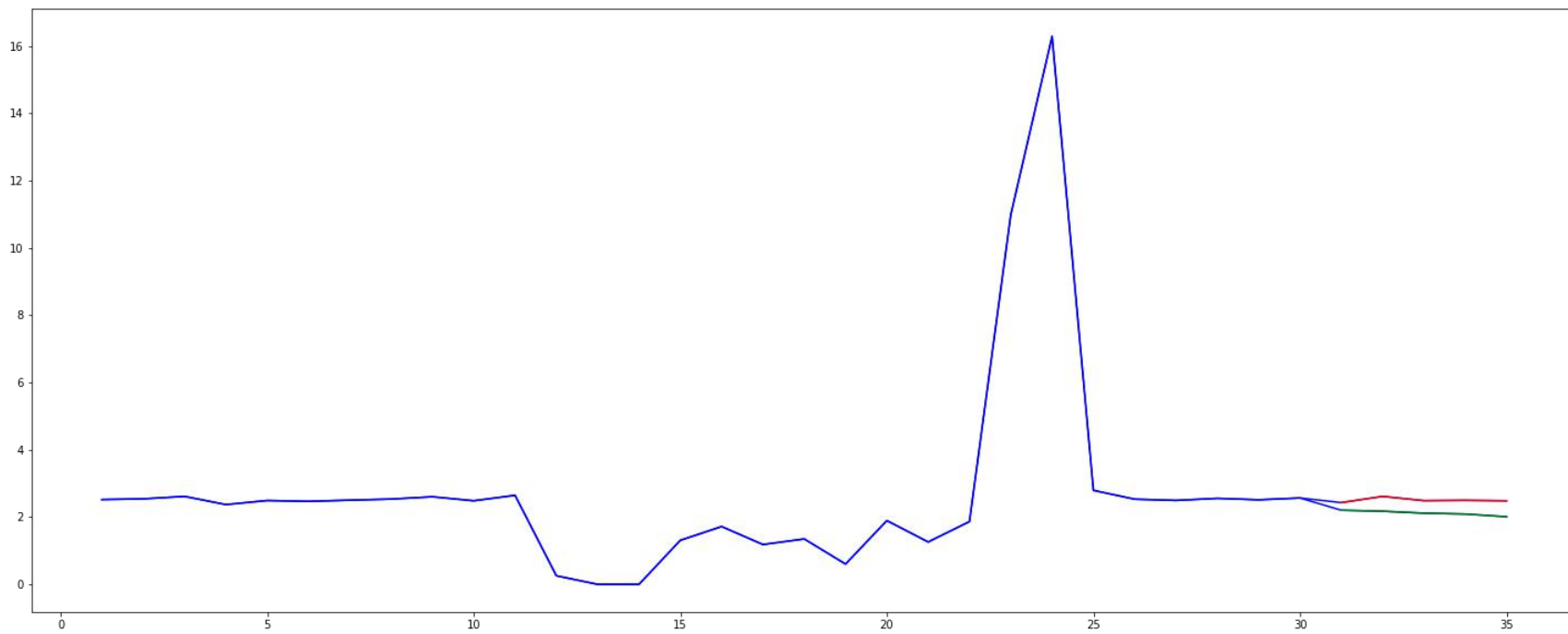




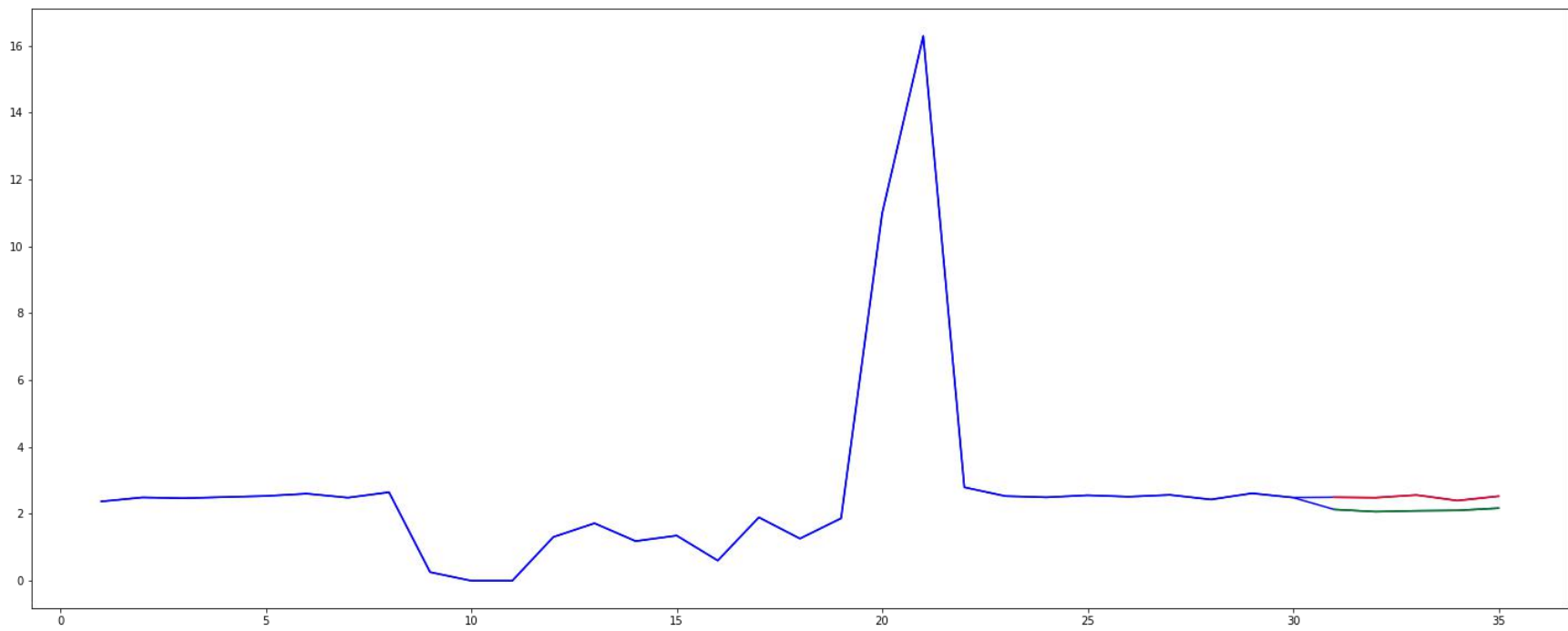
Slika 3.72 Pozicija 789



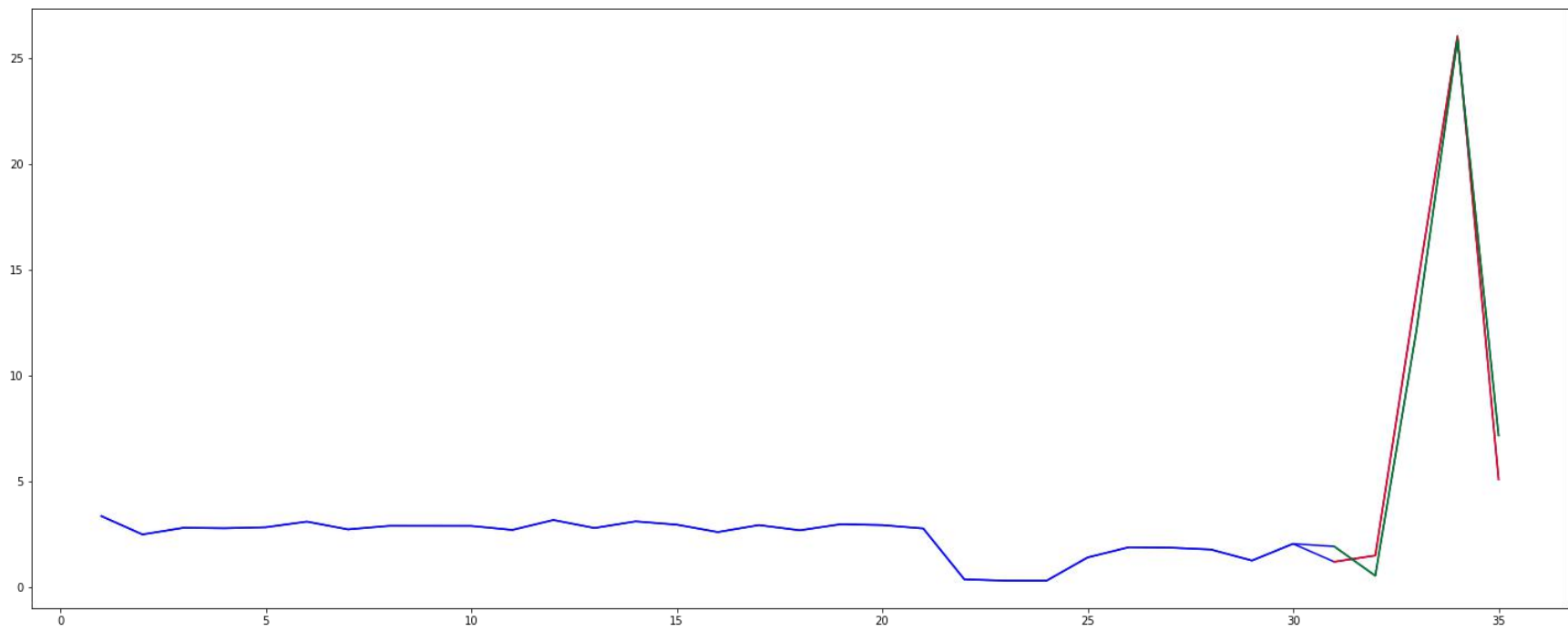
Slika 3.73 Pozicija 3444



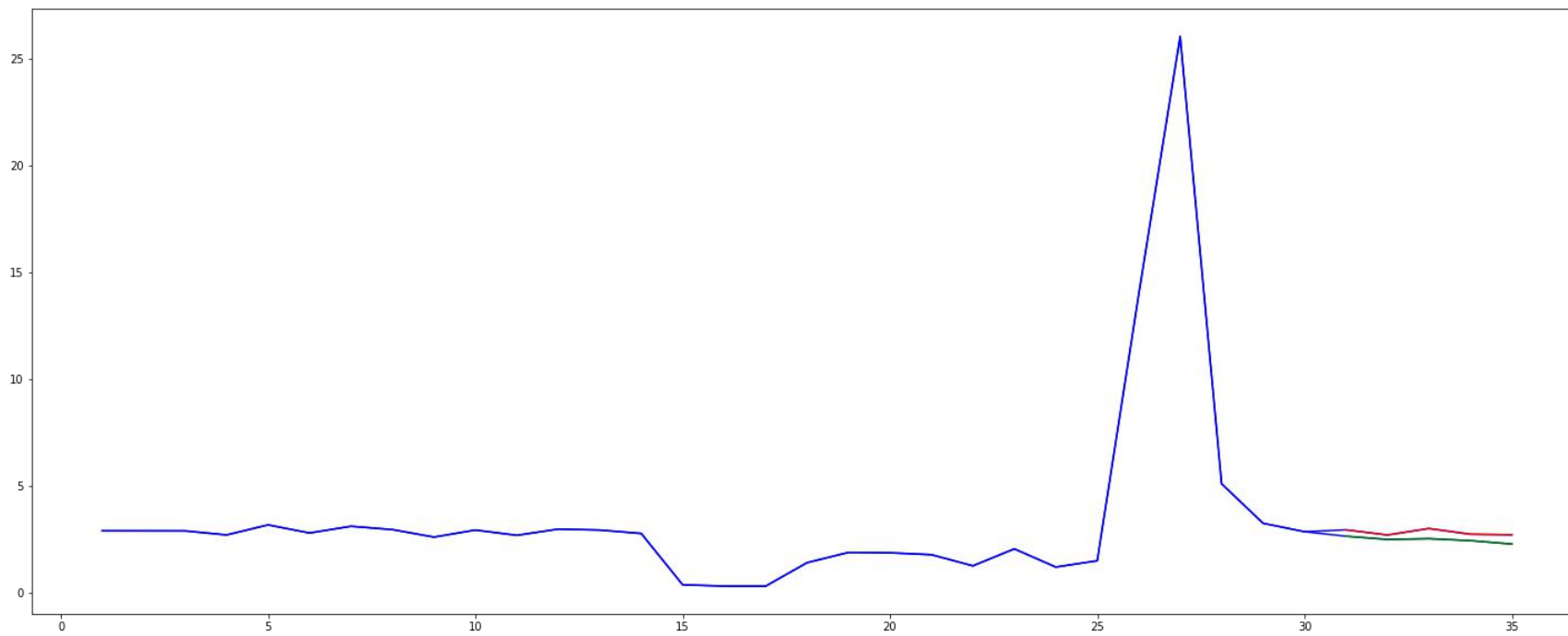
Slika 3.74 Pozicija 3452



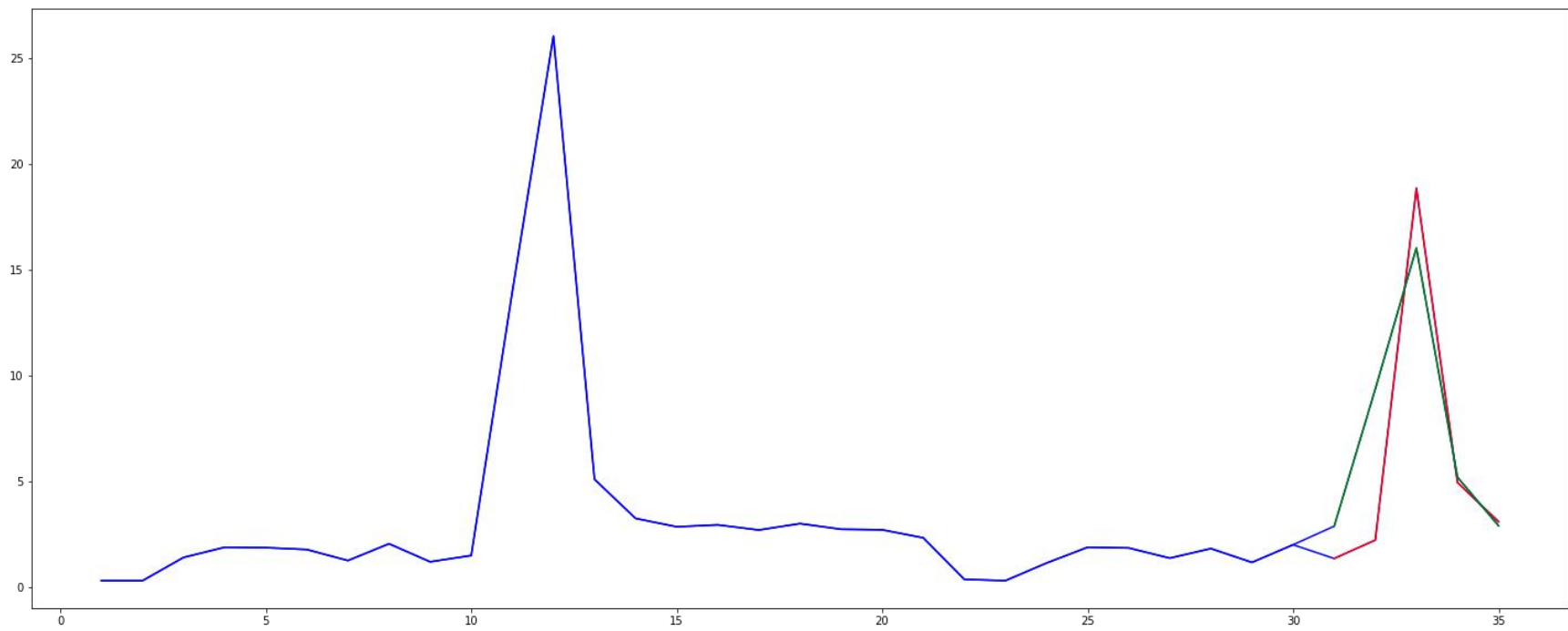
Slika 3.75 Pozicija 3455



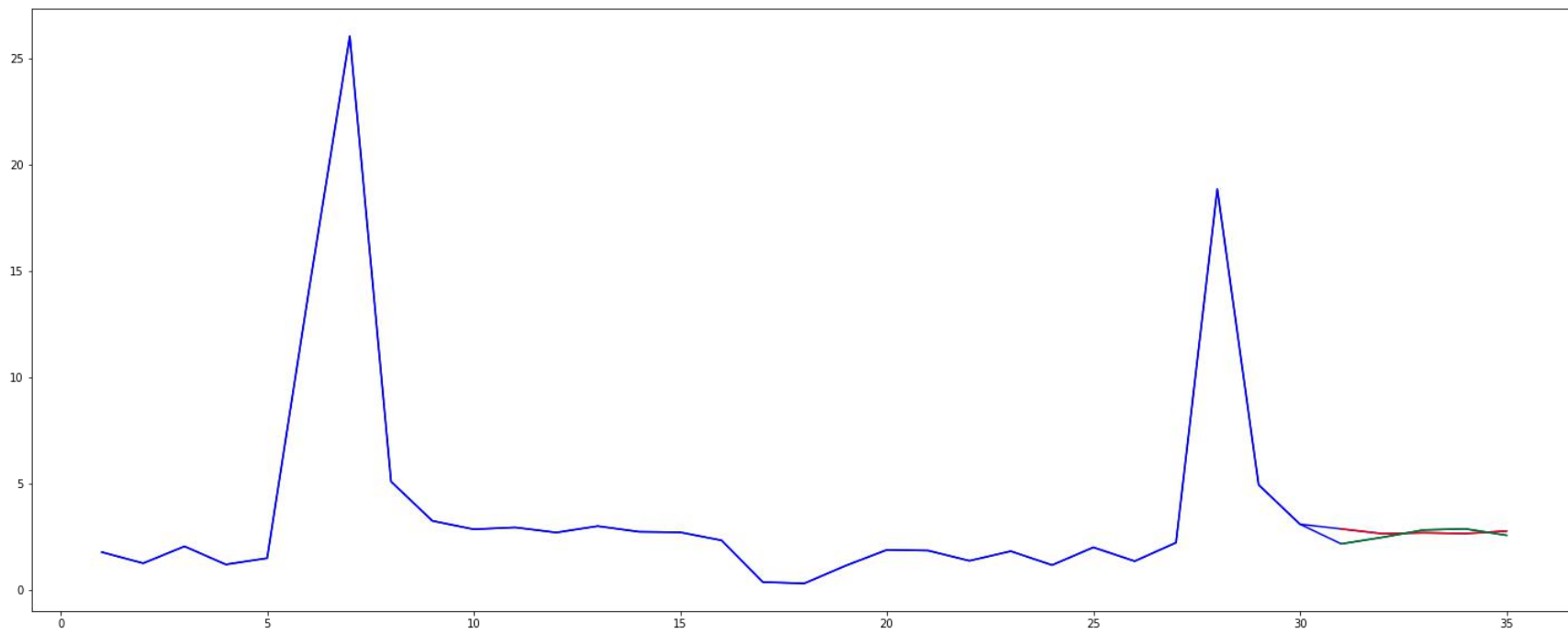
Slika 3.76 Pozicija 4993



Slika 3.77 Pozicija 5000

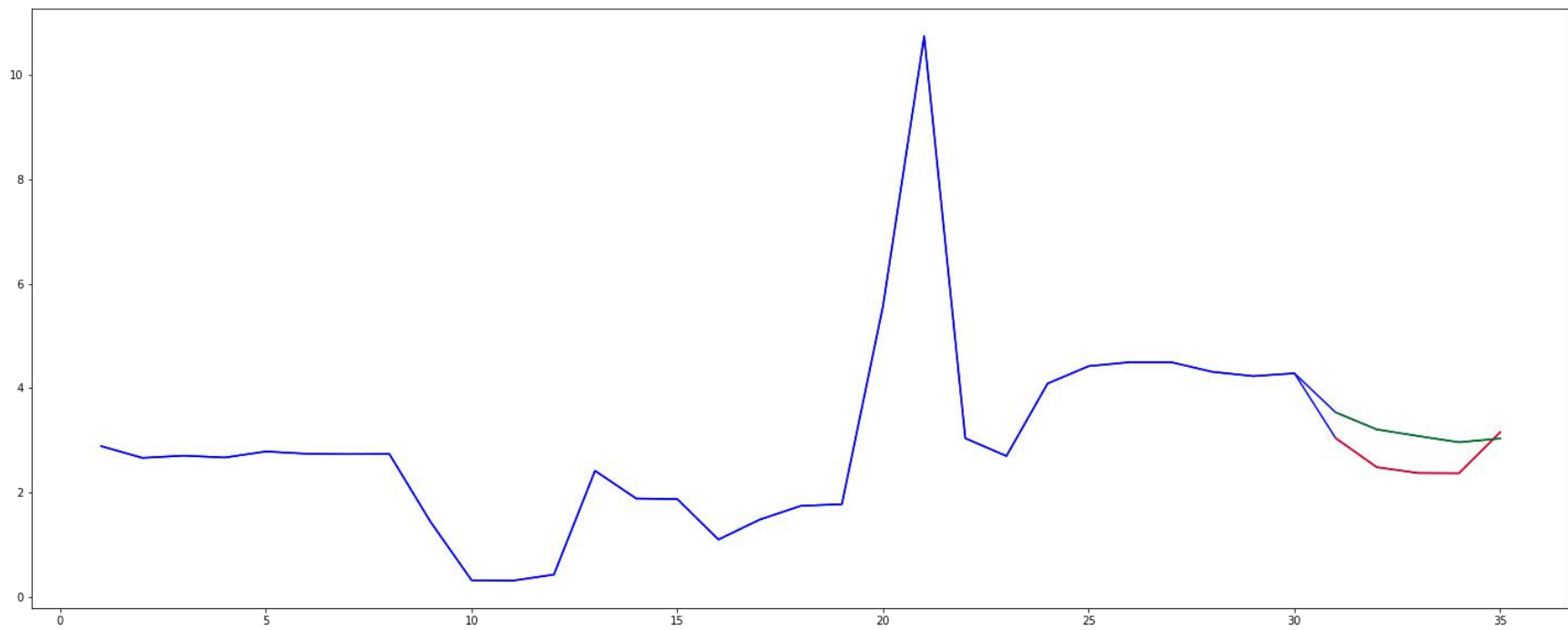


Slika 3.78 Pozicija 5015

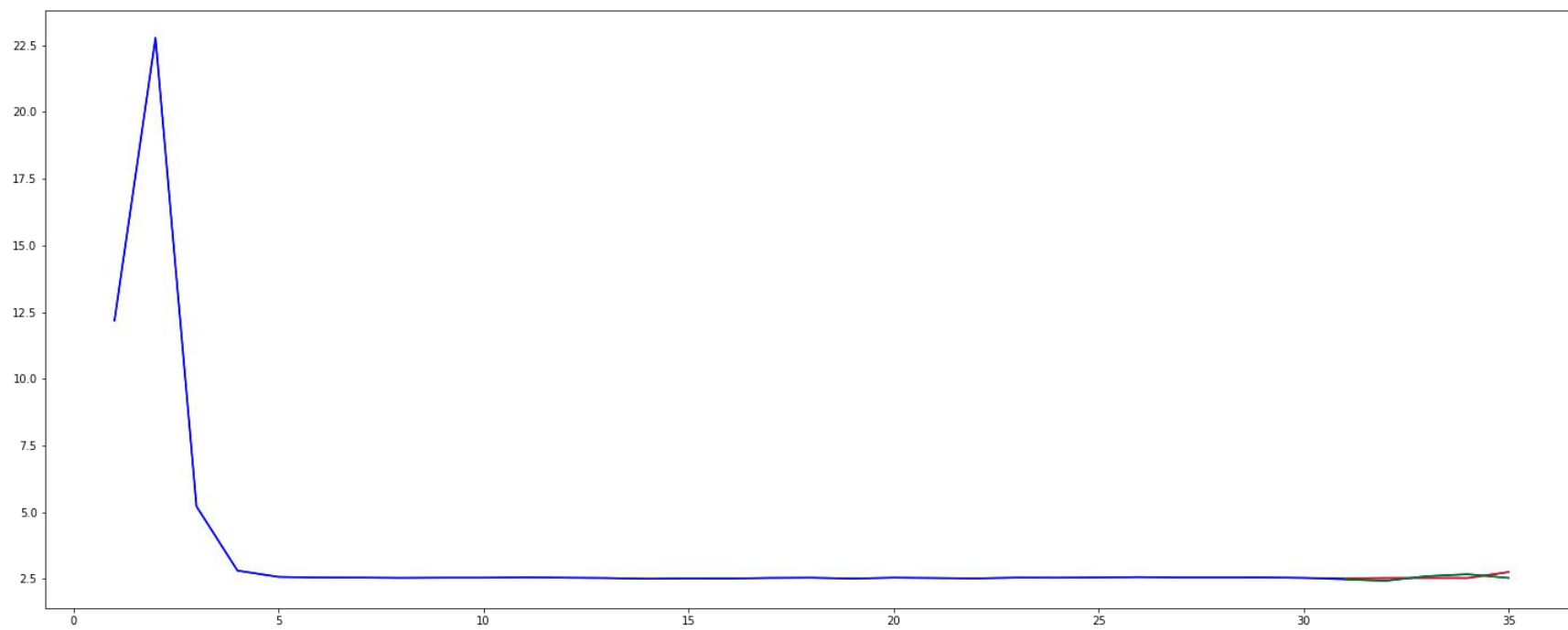


Slika 3.79 Pozicija 5020

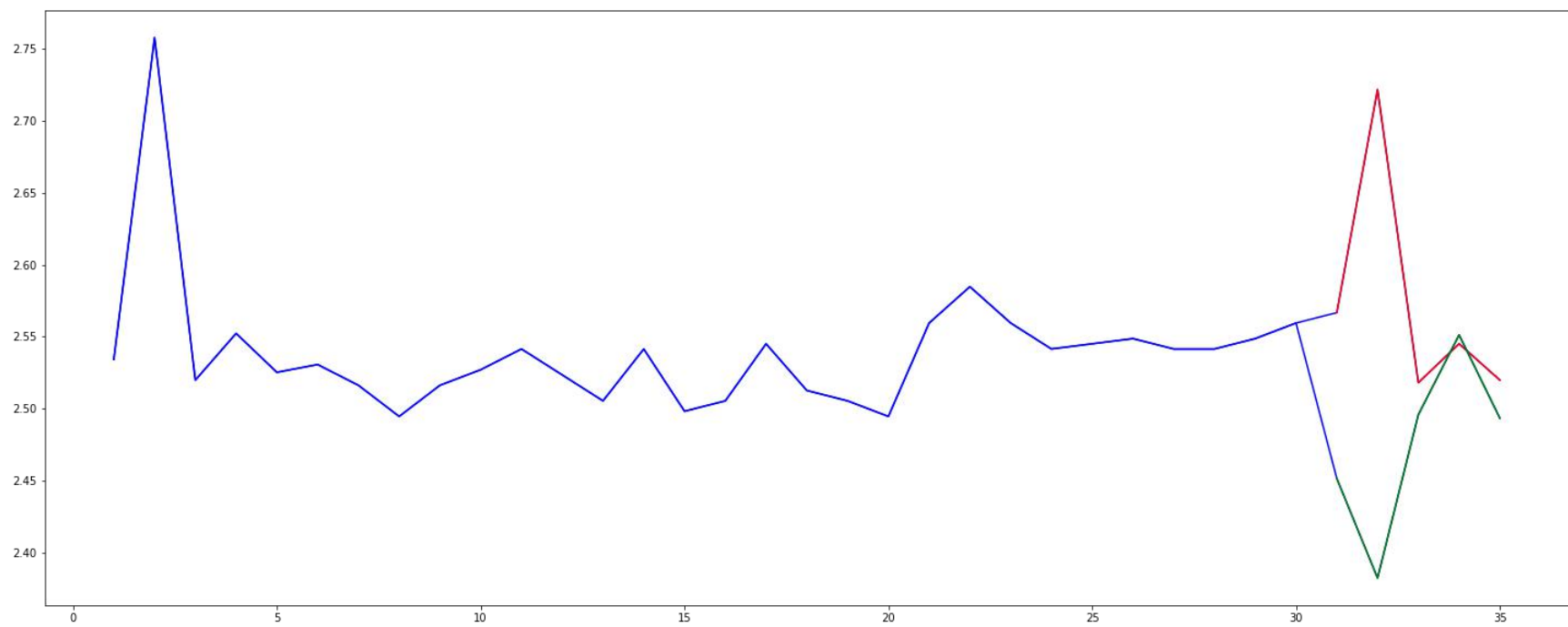




Slika 3.80 Pozicija 5050



Slika 3.81 Pozicija 5567



Slika 3.82 Pozicija 5600

#### 3.5.3.4 Diskusija rezultata

Zaključuje se da generisani model može da predvidi zadato buduće stanje (na osnovu 30 prethodnih, može da predvidi 5 koraka u budućnost), na validacionom setu podataka za mašinu Pinnacle VMC 1100S sa greškom MSE = 0,9454.

Iako je za model generisan u ovom zadatku MSE nešto veća nego u prethodnom, ovaj model je značajno kompleksniji od prethodnog dok se za svako naredno povećanje koraka predviđanja očekuje i povećanje MSE.

Sa druge strane, ovaj model pokazuje prihvatljive rezultate na osnovu čega se zaključuje da je pogodan za primenu.

## 4. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Iako se čini očiglednim, mnoge organizacije nedovoljno razumeju odnos između načina korišćenja energije i procesa proizvodnje, pri čemu, oni koji su primenili IoT rešenja i započeli tranziciju ka konceptima industrije 4.0 shvatili su da im ovaj vid digitalizacije proizvodnih procesa omogućava da bolje razumeju stvarnu potražnju za energijom svojih sistema, procesa ili čak mašina. Na primer, sve veći broj kompanija implementira tehnologije bazirane na obnovljivim izvorima energije sa ciljem sopstvene proizvodnje zelene energije za svopstvene potrebe (*eng. Prosumer*). U ovom slučajevima najčešće se koriste satne vrednosti proizvodnje energije na mesečnom nivou, pri čemu dolazi od određene greške, odnosno nemogućnosti utvrđivanja koliko se efektivno ovako proizvedene energije zapravo integriše tokom procesa proizvodnje, jer se poredbeni podaci nalaze u različitim mernim dimenzijama. U takvim slučajevima predloženo tehničko rešenje može obezbediti uniformnu dimenzionalnost između proizvodnje sa jedne, i potražnje energije sa druge strane, generisanjem profila ponašanja obe strane i praćenjem karakterističnih stanja u kojem se oba sistema mogu naći u nekoj vremenskoj tački duž procesa. Ovo implicira da se u osnovi i Industrija 4.0 i upravljanje energijom baziraju na prikupljanju, korišćenju i kombinovanju podataka u potrazi za optimizacijom.

Tipičan proizvodni sistem predstavlja riznicu podataka, koji se nažalost u većini slučajeva ne koriste. Integracijom relevantnih podataka generisanih putem IoT uređaja, moguće je uspostaviti fleksibilne modele korišćenja energije, na osnovu kojih bi se mogle razvijati i implementirati specifične simulacije procesa za validaciju performansi sistema pre nego što stvarni proizvodni proces dođe do realizacije. Istorijski gledano, za menadžere proizvodnje bilo je gotovo nemoguće uključiti stvarno korišćenje energije ili vode u određene proizvodne matematičke formulacije da bi se utvrdilo koja mašina je najbolja za pokretanje određenih proizvoda. Sa inteligentnim sistemom za upravljanje energijom, ti stvarni brojevi postaju deo jednačine, a to pruža potpuno novu dimenziju u procesu donošenja odluka.

Optimizovano donošenje odluka zasnovano na podacima obezbeđuje tačnu alokaciju troškova energije za proizvode i radne centre u kojima se proizvode. Ova razmatranja su važna i minimiziraju troškove dok obezbeđuju osnovno znanje i iskustvo u razumevanju ponašanja procesa, dok istovremeno povećavaju efikasnost. Iako su pristupi predviđanja zasnovani na modelu, koji se uglavnom baziraju na analitičkim/matematičkim modelima za opisivanje ponašanja sistema i mehanizama fenomena degradacije, pokazali prednost zbog njihove visoke tačnosti i fleksibilnosti u konfigurisanju ulaznih podataka, tačnost predviđanja ovih pristupa u velikoj meri zavisi od same preciznosti datih modela. Ovde nelinearne i stohastičke karakteristike proizvodnih sistema često značajno povećavaju poteškoće u fabričkom analitičkom modelovanju, pošto fleksibilna konfiguracija sistema utiče na parametre modela, što implicira da se ove situacije moraju uzeti u obzir u modifikacijama ovih modela u realnom vremenu.

S druge strane, pristup predviđanja zasnovan na podacima omogućava da se identifikuju trendovi/obraci, greške u razvoju, kao i da se predvidi količina vremena pre nego što dostigne unapred određeni prag tolerancije koristeći informacije iz istorijskih obrađenih podataka (trening podaci). Ovi pristupi predviđanja mogu da identifikuju zdravstveno stanje sistema u realnom vremenu pomoću različitih tehnika kao što su regresione analize, Bajesovi algoritmi, neuronske mreže, fazi logika, itd. Ovi pristupi su precizni u svojoj sposobnosti da se iskustvenim metodama povežu sa prepoznatim sistemskim ponašanjima. Uprkos tome što nije potreban nikakav specifičan fizički model, pristupi zasnovani na podacima zahtevaju sistem praćenja i akvizicije podataka, kao i vreme učenja koje se može osigurati primenom predloženog IoT rešenja.

Korišćenje energije u proizvodnim sistemima predstavlja jednu od najzastupljenijih i najrelevantnijih tema kojoj su nedostatak resursa i uticaj na životnu sredinu nametnuli visoku osetljivost, dok se ukupna održivost javlja kao jedan od primarnih ciljeva tekuće 4. tehnološke revolucije.

Sve više proizvodno orijentisanih kompanija koje se upuštaju u sistematsko upravljanje energijom shvataju da im nedostaje jedan ključni resurs – podaci, na osnovu kojih su pouzdane, tačne i veoma pronicljive informacije o korišćenju energije i povezanosti sa proizvodnjom i pratećim troškovima neprocenjiva sirovina za efektivno i efikasno donošenje odluka.

Proučavanjem literature uočena je ograničenost identifikovanih analiza, alata, metoda, kao i modela, da na sveobuhvatan način kvantifikuju uticajne faktore, intenzitet njihovog delovanja, kao i međusobne relacije na način korišćenja energije posmatranog sistema u realnom vremenu, prvenstveno zbog isključenosti dinamičke komponente posmatranja sistema što je ključno da bi se stekao uvid u stanje i ponašanje nekog sistema na osnovu intenziteta i načina njegovog korišćenja energije.

Analizom konvencionalnih prilaza za kvantifikaciju korišćenja energije u proizvodnim sistemima, konstatovano je da i pored brojnih prednosti, brzine primene i lake implementacije, predloženi pristupi jednostavno nisu zadovoljavajući posmatrano iz aspekta postavljenih hipoteza ovog istraživanja. Iako je potrebno inicijalno uložiti određeni napor, kontinualno merenje neophodno je kako bi se na osnovu uvida u dinamiku energetske tokova mogla identifikovati karakteristična stanja u kojim se posmatrani sistem može naći, odnosno profili ponašanja elemenata sistema, kao i vremenski periodi pojave određenih nelinearnosti u tom ponašanju, koje ukazuju na pojavu anomalija u funkcionisanju sistema.

Predloženo je, razvijeno i implementirano tehničko rešenje koje predstavlja hardverski uređaj za efikasno praćenje korišćenja energije brzoreaktivnih energetske sistema u industrijskim okruženjima, odnosno za akviziciju podataka o intenzitetu električne struje, a koje pripada kategoriji industrijskih IoT uređaja (*IIoT, eng. Industrial Internet of Things*).

Ekperimentalni rad baziran je na metodologiji dizajna eksperimenta a uzorkovanje podataka izvršeno je na dve lokacije pri čemu su obe okarakterisane kao proizvodni sistemi za formiranje i obradu metala.

Za potrebe dokazivanja prve dve hipoteze (H1 i H2), u prvom eksperimentu, ovaj uređaj implementiran je u proizvodnom pogonu kompanije CNC Duo ML, na Shizuoka SV-4020 vertikalnom mašinskom CNC centru. Fokus istraživanja usmeren je na jednu kompleksnu mašinu, identifikaciju intenziteta korišćenja energije prilikom izvođenja operacije, sa ciljem identifikacije tipova stanja u profilu ponašanja tokom procesa rada sa aspekta korišćenja energije. U ovom eksperimentu, razmatrane su dve vrste materijala predmeta rada (aluminijum i čelik), pri čemu je u oba slučaja precizno određeno korišćenje energije tokom izvođenja procesa rada, intenziteti promena u angažovanju snage, i kvantifikovani su relevantni pikovi, nakon čega su generisani profili ponašanja procesa rada (kao kontinualni niz evidentiranih stanja) koji pružaju koristan uvid u procese zasnovane na njihovim tokovima energije, u vidu transparentne forenzike događaja i redundantnih obrazaca promena.

Doprinos primene predloženog pristupa ogleda se u sledećem;

- Prilikom primene bilo koje analitičke, konvencionalne metode potrebno je simultano odrediti dinamiku promene sile i kretanja predmeta rada, što se dalje komplikuje neminovnim poteškoćama pri korišćenju metoda konačnih elemenata ili eksperimentalne modalne analize, odnosno zahteva ekstremno male veličine elemenata da bi se postigla potrebna računaska preciznost.
- Promenljiva koja se određuje ovim pristupom kombinuje efekte i od sila i od brzina, a njihov proizvod, snagu, odnosno intenzitet promene energije, karakteriše dinamičko ponašanje, koje uključuje i odražava potpunu informaciju o njegovoj ravnoteži i kretanju, te stoga prevazilazi ograničenja za proučavanje promena sile i kretanja odvojeno.

Podaci generisani tokom istraživanja potvrđuju hipotezu (H1) da korišćenje energije tehnološke opreme povezane sa proizvodnjom nije konstantna tokom vremena, već dinamična jer je uslovljena i pod uticajem nelinearnosti proizvodnog procesa i stvarnog stanja mašine, gde je nelinearnost u izvođenju ponavljajućih operacija mašine alatke, prilikom izvođenja operacije, moguće uočiti kroz praćenje energetske tokova posmatranog procesa.

Daljom analizom utvrđena je precizna distribucija identifikovanih stanja prvog i drugog reda za posmatranu operaciju. Aktivnosti dodavanja vrednosti iznose 35,32% od ukupnog vremena izvršavanja, odnosno 75,81% (0,47 kWh) od ukupno iskorišćene energije prilikom izvršavanja posmatrane operacije.

Identifikacijom stanja izvršavanja proizvodne operacije potvrđena je i hipoteza (H2), jer je primenom opisane metode, a uz pomoć prikazanoog tehničkog rešenja, moguće identifikovati nelinearne članove (promenljive) koji se javljaju u proizvodnim sistemima, na osnovu čega se stiče jasan uvid i realna reprezentacija ponašanja sistema usled identifikacije niza aktivnosti koje mu nelinearno menjaju stanje. Što je još važnije, mogućnost identifikacije nelinearnosti obezbeđuje tačnije i pouzdanije podatke za proces razumevanja stanja i ponašanja mašine tokom izvođenja procesa rada jer ove promene ostavljaju trag koji se definitivno može uočiti stalnim praćenjem tokova energije, što je veoma važno za proces odlučivanja, gde mogućnost kvantifikacije intenziteta promene nelinearnih članova ukazuje na pojavu anomalija unutar posmatranog procesa pri čemu je analizu, kao i trenutne akcije, moguće implementirati u realnom vremenu. Pored mogućnosti da se u realnom vremenu kvantifikuju anomalije koje se mogu (ali ne moraju) pojaviti, moguće je pratiti i efekte implementiranih mera za poboljšanje procesne performanse odnosno rezultate integracije novih tehnoloških koncepata.

Kako je primenjena metoda detaljno opisana u delu koji se tiče prethodnog eksperimenta, podaci generisani u drugoj eksperimentalnoj postavci iskorišćeni su za potrebe razvoja modela korišćenjem tehnika i koncepata veštačke inteligencije i implementacije podsistema za mašinsko učenje procesa i prediktivno održavanje sa fokusom na tranziciju ka inteligentnim proizvodnim sistemima koje karakteriše visok stepen fleksibilnosti i napredne kontrole.

Svrha, prvog u redu, modela je da se obezbedi automatizovano profilisanje ponašanja sistema na osnovu praćenja tokova energije, pri čemu je razvoj modela izvršen je u programskom okruženju *Orange Data Mining* primenom algoritma za grupisanje k-Means, tehnika Manifold Learning-a i pratećih metoda. Nakon procesa modeliranja, kvantifikovani su svi klasteri (C1 - C9) u zavisnosti od karakteristika (S1, S2 i S3), odnosno u zavisnosti od intenziteta struje svake faze ponašanje posmatranog sistema karakteriše devet stanja (C1 - C9) u kojima se može naći, pri čemu je za svako stanje kvantifikovan intenzitet struje za svaku od faza (S1, S2 i S3). Na osnovu generisanih rezultata moguće je uočiti kada se određena stanja realizuju tokom vremena, odnosno u posmatranom opsegu ponašanja sistema, preko promenljive P koja predstavlja funkciju karakteristika (S1 – S3).

Kao nusproizvod automatizovanog profilisanja stanja i ponašanja sistema generisan je i model neuronske mreže na bazi višeslojnog perceptron algoritma sa propagacijom unazad visoke preciznosti ( $MSE = 0,003$ ,  $RMSE = 0,053$ ,  $MAE = 0,014$ ,  $R^2 = 0,999$ ) koji može biti od koristi u onim slučajevima gde postoje samo podaci o intenzitetu struje, pa se sa određenom tačnošću može odrediti angažovana snaga, odnosno količina energije za neki vremenski period.

Generisani model za automatizovano profilisanje ponašanja sistema na osnovu praćenja tokova energije sastoji se iz dvadeset dva koraka čija realizacija doprinosi razumevanju funkcionisanja posmatranog sistema na osnovu njegovih energetske tokova. Model je sposoban da identifikuje i kvantifikuje stanja sistema, kao i da prikaže identifikovana stanja u profilu ponašanja. Ovim modelom dokazuje se hipoteza (H3), koja tvrdi da je sticanjem uvida u dinamiku toka energije proizvodnog sistema u realnom vremenu moguće razvijati podsisteme za mašinsko učenje procesa i tranziciju ka inteligentnim sistemima koje karakteriše visok stepen fleksibilnosti i napredne kontrole.

Pored toga implementacija ovog modela u praksi može biti značajna sa aspekta sticanja uvida u pojavu novih, neočekivanih stanja sistema (posledica nelinearnosti) u realnom vremenu, što omogućava brzo odlučivanje, kao i pravovremenu reakciju i izvođenje neophodnih analiza.

Na posletku, generisano je novo istraživačko pitanje i postavljeno kao hipoteza (H4), koja tvrdi da ako je moguća automatizovana identifikacija stanja koja egzistiraju u okviru nekog ponašanja sistema, onda je moguće u određenoj meri predvideti buduće stanje sistema relativno tačno u zavisnosti od dužine vremenskog perioda za koje se predviđanje izvodi.

Za potrebe dokazivanja nove hipoteze konstruisan je dinamički model za predviđanja budućih stanja sistema koji se zasniva na implementaciji dubokog učenja na bazi poboljšane rekurentne neuronske mreže (RNN), odnosno LSTM mreže (*eng. Long Short-Term Memory*). Za potrebe ovog istraživanja generisana su dva zadatka koja je potrebno da model reši, odnosno zamišljeni model treba da omogući predviđanje jednog (zadatak 1), odn. pet (zadatak 2) sledećih koraka zadate vremenske serije. Na osnovu prikazanog u poglavlju 3.5.3.1, generisani model može da predvidi zadato buduće stanje (na osnovu trideset prethodnih, može da predvidi jedan korak u budućnost), na validacionom setu podataka za mašinu Pinnacle VMC 1100S sa greškom  $MSE = 0,6129$ , dok na potpuno nepoznatim podacima (mašina HAAS SL 20 HE) model za nijansu ima veću grešku  $MSE = 0,6213$ , što znači da ovaj model prilično dobro generalizuje posmatrani problem i može biti primenjen shodno zadatku.

Takođe, generisani model može da predvidi zadato buduće stanje (na osnovu trideset prethodnih, može da predvidi pet koraka u budućnost), na validacionom setu podataka za mašinu Pinnacle VMC 1100S sa greškom  $MSE = 0,9454$ . Važno je napomenuti da iako je za model generisan u ovom zadatku MSE nešto veća nego u prethodnom, ovaj model je značajno kompleksniji od prethodnog dok se za svako naredno povećanje koraka predviđanja očekuje i povećanje MSE. Sa druge strane, ovaj model pokazuje prihvatljive rezultate na osnovu čega se zaključuje da je pogodan za primenu.

Kao pravac budućih istraživanja prepoznat je razvoj sličnog tehničkog rešenja za potrebe inertnih (termalnih) energetske sistemima kako bi se obezbedili podaci u realnom vremenu u vezi sa promenama u temperaturnom polju predmeta/objekta određene zapremine, za potrebe profilisanja ponašanja sistema zasnovano na entalpiji i entropiji obradom stohastičkih promena pritiska, relativne vlažnosti i temperature suvog termometra. Ovo će biti praćeno



dotatnim senzorskim jedinicama za praćenje UV indeksa, IR i vidljive svetlosti, kao i za profilisanje kvaliteta vazduha u smislu koncentracije opasnih gasova.

U takvom industrijskom okruženju može se primeniti holistički i pre svega dinamički EnMS koji će na kraju moći da pruži potpun, pouzdan i tačan pregled načina na koji se energija u njemu koristi, gde mogućnost integracije dinamičkih KIP-a mogu povećati produktivnost i ukupnu efikasnost resursa. Pored navedenog, značajni napori biće uloženi da se identifikuju brojni modeli za proučavanje energetske efikasnosti sistema uopšte, pri čemu se velika većina njih smatra statičnim po prirodi, što implicira da potraga za načinom njihove modifikacije i implementacije u ovom dinamičnom kontekstu može biti prilično izazovno.

Na osnovu navedenog, proces kvantifikacije korišćenja energije, ne samo da obezbeđuje pouzdane i tačne informacije u realnom vremenu, već otvara vrata ka profilisanju ponašanja sistema, prediktivnom održavanju, forenzici događaja, prognozama zasnovanim na podacima, itd., što daje potpuno novu dimenziju procesu donošenja odluka, čineći ga praktično trenutnim jer, u suštini, problem odlučivanja ne bi postojao kad ne bi postojale alterantive između kojih je potrbno napraviti izbor. Ovakvim pristupom mogućnost pojave alternativa se efektivno može svesti na minimum, a u nekim slučajevima čak i potpuno eliminisati, što omogućava blagovremeno reagovanje i značajno smanjenje vremena posvećenog procesu donošenja odluka.

Upravljanje energijom i energetske podacima postalo je disciplina sama po sebi u kojoj mogućnost pristupa podacima i informacijama po želji, kada se želi i na prilagodljiv način, uz odsustvo tehnološke uslovljenosti, kombinuje dva apsolutno kontradiktorna koncepta u jedan, poznat kao fleksibilna automatizacija, na kojem će se postulirati većina budućih sistema. Iako je sama tema prilično složena, pouka je prilično jednostavna: infrastruktura potrebna za implementaciju okruženja Industrije 4.0 mogla bi biti ista infrastruktura koja omogućava inteligentno upravljanje energijom, što, ako se pažljivo implementira, omogućava proizvodnim sistemima da iskoriste ogroman potencijal ove tehnološke tranzicije i na taj način lako prevaziđu rastuće izazove povezane sa energijom kao što su cena i sigurnost snabdevanja, dok istovremeno mogu da iskoriste šire prednosti u smislu konkurentnosti i produktivnosti.

## **INSTITUCIJE KOJE SU PODRŽALE OVO ISTRAŽIVANJE**

Tehničko rešenje koje je detaljno prikazano i korišćeno za potrebe ovog istraživanja prepoznato je kao inovativno, a razvoj istog finansiran je kroz „*Climate KIC*“ inicijativu Evropskog instituta za Inovacije i tehnologiju (eng. *European Institute of Innovation & Technology, EIT*). Takođe, ovo rešenje prepoznato je i od strane druge EIT-ove inicijative „*InnoEnergy*“, gde je tokom takmičenja isto dostiglo mesto nacionalnog finaliste 2020. godine.

Na takmičenju za najbolju poslovnu ideju Univerziteta u Novom Sadu, organizovanom od strane Univerziteta u Novom Sadu i Poslovnog inkubatora Novi Sad uz saradnju Univerziteta u Segedinu, u okviru ikNNow projekta prekogranične saradnje Mađarske i Srbije HUSRB/1602/41/0158, iste godine, ovo tehničko rešenje osvojilo je 2 mesto od 37 prijavljenih timova.

Na Konkursu za najbolju tehnološku inovaciju u Srbiji, u kategoriji realizovane inovacije 2020, ovo rešenje bilo je jedan od finalista i nagrađeno je 6. mestom među 142 tima, odnosno 536 inovatora.

Trenutno se dalji razvoj ovog, ali i drugih planiranih rešenja finansira putem projekta „*System Dynamics on a ShoeString*“ od strane Fonda za inovacionu delatnost Republike Srbije u vidu obezbeđenog Mini Granta.

## REFERENCE

- [1] T. F. Sherman, *Energy, entropy, and the flow of nature*. New York: Oxford University Press, 2018.
- [2] J. M. Wrigglesworth, *Energy and life*. Taylor & Francis, 1997.
- [3] R. P. (Richard P. Feynman, R. B. Leighton, and M. L. (Matthew L. Sands, *The Feynman lectures on physics*, 2nd ed. Addison-Wesley, 1989.
- [4] A. Einstein, "Physik und realität," *J. Franklin Inst.*, vol. 221, no. 3, pp. 313–347, Mar. 1936.
- [5] Y. Seow and S. Rahimifard, "A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 258–264, Jan. 2011.
- [6] "Eurostat - Energy flow diagrams." [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/sankey.html?geos=EU28&year=2017&unit=GWh&fuels=TOTAL&highlight=\\_&nodeDisagg=0101111100000&flowDisagg=false&translateX=-2074.01824252356&translateY=-100.30496567962552&scale=1.3566043274476718&language=EN](https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/sankey.html?geos=EU28&year=2017&unit=GWh&fuels=TOTAL&highlight=_&nodeDisagg=0101111100000&flowDisagg=false&translateX=-2074.01824252356&translateY=-100.30496567962552&scale=1.3566043274476718&language=EN). [Accessed: 21-Aug-2019].
- [7] "World Energy Outlook 2018," OECD, Nov. 2018.
- [8] G. (Günter) Radons and R. (Reimund) Neugebauer, *Nonlinear dynamics of production systems*. Wiley-VCH, 2004.
- [9] M. Medojevic, M. Medojevic, I. Cosic, M. Lazarevic, and D. Dakic, "Determination and analysis of energy efficiency potential in socks manufacturing system," in *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 2017*.
- [10] E. Giacone and S. Mancò, "Energy efficiency measurement in industrial processes," *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 331–345, Feb. 2012.
- [11] K. Bunse, M. Vodicka, P. Schönsleben, M. Brühlhart, and F. O. Ernst, "Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 6–7, pp. 667–679, Apr. 2011.
- [12] S.-C. Oh and A. J. Hildreth, *Analytics for Smart Energy Management*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [13] C. Rusinko, "Green Manufacturing: An Evaluation of Environmentally Sustainable Manufacturing Practices and Their Impact on Competitive Outcomes," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 54, no. 3, pp. 445–454, Aug. 2007.
- [14] T. Gutowski *et al.*, "Environmentally benign manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States," *J. Clean. Prod.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–17, Jan. 2005.
- [15] M. Hauschild, J. Jeswiet, and L. Alting, "From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives," *CIRP Ann.*, vol. 54, no. 2, pp. 1–21, Jan. 2005.
- [16] K. J. Moss, *Energy management in buildings*. Taylor & Francis, 2006.

- [17] D. Somervell and R. Talbot, *Educated energy management : studies in the effective management of energy resources in educational buildings*. University of Edinburgh, 1991.
- [18] G. Boyd, E. Dutrow, and W. Tunnessen, "The evolution of the ENERGY STAR® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use," *J. Clean. Prod.*, vol. 16, no. 6, pp. 709–715, Apr. 2008.
- [19] W. Dewulf, K. Kellens, Renaldi, and J. Duflou, "The CO2PE! Initiative: Manufacturing oriented Unit-Process LCI in a global context - KU Leuven," in *Going Green – CARE INNOVATION 2010*, 2010.
- [20] T. Devoldere, W. Dewulf, W. Deprez, B. Willems, and J. Duflou, "Improvement potential for energy consumption in discrete part production machines," *Proc. 14th CIRP Int. Conf. Life Cycle Eng. Life Cycle Eng. Sustain. Manuf. Business'*, pp. 311–316, 2007.
- [21] M. Overcash, J. Twomey, and D. Kalla, "Unit Process Life Cycle Inventory for Product Manufacturing Operations," in *ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 1*, 2009, pp. 49–55.
- [22] W. Li, S. Thiede, S. Kara, and C. Herrmann, "A Generic Sankey Tool for Evaluating Energy Value Stream in Manufacturing Systems," *Procedia CIRP*, vol. 61, pp. 475–480, Jan. 2017.
- [23] J. R. Duflou *et al.*, "Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach," *CIRP Ann.*, vol. 61, no. 2, pp. 587–609, Jan. 2012.
- [24] P. H. Brunner and H. Rechberger, "Practical handbook of material flow analysis," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 9, no. 5, pp. 337–338, Sep. 2004.
- [25] H. Lambrecht and M. Schmidt, "Material Flow Networks as a Means of Optimizing Production Systems," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 33, no. 4, p. NA-NA, Jan. 2010.
- [26] S. Bringezu, "Industrial ecology and material flow analysis: Basic concepts, policy relevance and some case studies," in *Perspectives on Industrial Ecology*, Greenleaf Publishing Limited, pp. 19–34.
- [27] M. Teresa Torres, M. Carmen Barros, P. M. Bello, J. J. Casares, and J. Miguel Rodríguez-Blas, "Energy and material flow analysis: Application to the storage stage of clay in the roof-tile manufacture," *Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 963–973, Jun. 2008.
- [28] P. Myerson, *Lean Supply Chain and Logistics Management*. McGraw-Hill Publishing, 2012.
- [29] G. M. Schmidt, M., Raible, C., Keil, R., "Energy and material stream mapping," in *R'07 World-congress-recovery of materials and energy for resource efficiency*.
- [30] A. S. T. Jr. and A. M. Gati, "Environmental Value Stream Mapping (EVSM) as sustainability management tool," in *PICMET '09 - 2009 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology*, 2009, pp. 1689–1698.
- [31] G. Bogdanski, M. Schönemann, S. Thiede, S. Andrew, and C. Herrmann, "An Extended Energy Value Stream Approach Applied on the Electronics Industry," Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 65–72.
- [32] S. Alvandi, W. Li, M. Schönemann, S. Kara, and C. Herrmann, "Economic and environmental value stream map

- (E2VSM) simulation for multi-product manufacturing systems,” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 9, no. 6, pp. 354–362, Nov. 2016.
- [33] Y. Seow, S. Rahimifard, and E. Woolley, “Simulation of energy consumption in the manufacture of a product,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 26, no. 7, pp. 663–680, Jul. 2013.
- [34] C. Herrmann, S. Thiede, S. Kara, and J. Hesselbach, “Energy oriented simulation of manufacturing systems – Concept and application,” *CIRP Ann.*, vol. 60, no. 1, pp. 45–48, Jan. 2011.
- [35] K. Kellens, W. Dewulf, M. Overcash, M. Z. Hauschild, and J. R. Duflou, “Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, no. 2, pp. 242–251, Feb. 2012.
- [36] M. Medojevic, I. Cosic, N. Sremcevic, and M. Lazarevic, “Conceptual Theoretical Model for Life Cycle Energy Analysis of Photovoltaic Modules,” in *proceedings of the 27th DAAAM International Symposium*, 2016, pp. 0534–0543.
- [37] G. Boyd, “Development of a Performance-based Industrial Energy Efficiency Indicator for Automobile Assembly Plants,” Chicago, Illinois, US.
- [38] L. Feng and L. Mears, “Energy Consumption Modeling and Analyses in Automotive Manufacturing Plant,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 138, no. 10, p. 101005, Aug. 2016.
- [39] K. Patil, Y. Seryak, J. Kissock, “Benchmarking Approaches: An Alternative Method to Determine Best Proactive by Examining Plant-Wide Energy Signatures,” in *Proceedings from the ACEEE Summer Studies on Energy Efficiency in Industry*, 2005, vol. Panel Pane, pp. 127–138.
- [40] L. Feng, “Manufacturing System Energy Modeling and Optimization,” 2016.
- [41] S. Alvandi, G. Bienert, and W. Li, “Hierarchical Modelling of Complex Material and Energy Flow in Manufacturing Systems,” *Procedia CIRP*, vol. 29, pp. 92–97, Jan. 2015.
- [42] S. Kara and W. Li, “Unit process energy consumption models for material removal processes,” *CIRP Ann.*, vol. 60, no. 1, pp. 37–40, Jan. 2011.
- [43] N. Diaz, E. Redelsheimer, and D. Dornfeld, “Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use,” in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 263–267.
- [44] S. Thiede, G. Bogdanski, and C. Herrmann, “A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies,” *Procedia CIRP*, vol. 2, pp. 28–33, Jan. 2012.
- [45] N. Weinert, S. Chiotellis, and G. Seliger, “Methodology for planning and operating energy-efficient production systems,” *CIRP Ann.*, vol. 60, no. 1, pp. 41–44, Jan. 2011.
- [46] S. Kara and S. Ibbotson, “Embodied energy of manufacturing supply chains,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 317–323, Jan. 2011.
- [47] S. Rahimifard, Y. Seow, and T. Childs, “Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient

- manufacturing,” *CIRP Ann.*, vol. 59, no. 1, pp. 25–28, Jan. 2010.
- [48] S. Thiede, *Energy efficiency in manufacturing systems*. Springer, 2012.
- [49] T. G. Gutowski, M. S. Branham, J. B. Dahmus, A. J. Jones, A. Thiriez, and D. P. Sekulic, “Thermodynamic Analysis of Resources Used in Manufacturing Processes,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 5, pp. 1584–1590, Mar. 2009.
- [50] E. P. Gyftopoulos and G. P. Beretta, *Thermodynamics : foundations and applications*. Dover Publications, 2005.
- [51] J. T. Xing, *Energy Flow Theory of Nonlinear Dynamical Systems with Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [52] M. Medojevic, P. Díaz Villar, I. Cosic, A. Rikalovic, N. Sremcevic, and M. Lazarevic, “Energy management in industry 4.0 ecosystem: A review on possibilities and concerns,” in *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 0674–0680.
- [53] J. E. Ibarra-Esquer, F. F. González-Navarro, B. L. Flores-Rios, L. Burtseva, and M. A. Astorga-Vargas, “Tracking the Evolution of the Internet of Things Concept Across Different Application Domains,” *Sensors*, vol. 17, no. 6, Jun. 2017.
- [54] S. Talari, M. Shafie-Khah, P. Siano, V. Loia, A. Tommasetti, and J. P. S. Catalão, “A Review of Smart Cities Based on the Internet of Things Concept,” *Energies*, vol. 10, no. 4, Mar. 2017.
- [55] L. Da Xu, W. He, and S. Li, “Internet of things in industries: A survey,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, Nov. 2014.
- [56] M. Swan, “Sensor Mania! The Internet of Things, Wearable Computing, Objective Metrics, and the Quantified Self 2.0,” *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 217–253, Nov. 2012.
- [57] A. Gupta and R. K. Jha, “A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, Aug. 2015.
- [58] N. H. Motlagh, M. Mohammadrezaei, J. Hunt, and B. Zakeri, “Internet of Things (IoT) and the Energy Sector,” *Energies*, vol. 13, no. 2, p. 494, Jan. 2020.
- [59] B. L. Risteska Stojkoska and K. V. Trivodaliev, “A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions,” *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 1454–1464, Jan. 2017.
- [60] H. Hui, Y. Ding, Q. Shi, F. Li, Y. Song, and J. Yan, “5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential,” *Appl. Energy*, vol. 257, p. 113972, Jan. 2020.
- [61] D. M. Petrosanu, G. Carutasu, N. L. Carutasu, and A. Pirjan, “A Review of the Recent Developments in Integrating Machine Learning Models with Sensor Devices in the Smart Buildings Sector with a View to Attaining Enhanced Sensing, Energy Efficiency, and Optimal Building Management,” *Energies*, vol. 12, no. 24, p. 4745, Dec. 2019.
- [62] X. G. Luo, H. B. Zhang, Z. L. Zhang, Y. Yu, and K. Li, “A new framework of intelligent public transportation system based on the internet of things,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 55290–55304, 2019.
- [63] Q. Zhang, “Analysis and use of building heating and thermal energy management system,” *Therm. Sci.*, vol. 24,

no. 5 Part B, pp. 3289–3298, 2020.

- [64] T. Alderucci, L. Patrono, P. Rametta, and P. Munafo, “The effectiveness of an internet of things-aware smart ventilated insulation system,” *Therm. Sci.*, vol. 22, no. Suppl. 3, pp. 909–919, 2018.
- [65] N. Qu and W. You, “Simulation of electric heating prediction model by internet of things technology and room thermal performance analysis,” *Therm. Sci.*, vol. 24, no. 5 Part B, pp. 3139–3147, 2020.
- [66] P. K. Khatua, V. K. Ramachandaramurthy, P. Kasinathan, J. Y. Yong, J. Pasupuleti, and A. Rajagopalan, “Application and assessment of internet of things toward the sustainability of energy systems: Challenges and issues,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 53, p. 101957, Feb. 2020.
- [67] C. K. Metallidou, K. E. Psannis, and E. A. Egyptiadou, “Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 63679–63699, 2020.
- [68] N. Khan, N. Pathak, and N. Roy, “Detecting common insulation problems in built environments using thermal images,” in *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Smart Computing, SMARTCOMP 2019*, 2019, pp. 454–458.
- [69] M. Sophocleous, P. Savva, M. F. Petrou, J. K. Atkinson, and J. Georgiou, “A Durable, Screen-Printed Sensor for In Situ and Real-Time Monitoring of Concrete’s Electrical Resistivity Suitable for Smart Buildings/Cities and IoT,” *IEEE Sensors Lett.*, vol. 2, no. 4, pp. 1–4, Sep. 2018.
- [70] A. Kumar, A. Kumar, and A. Singh, “Energy efficient and low cost air quality sensor for smart buildings,” in *3rd International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT)*, 2017.
- [71] N. Haidar, N. Tamani, F. Nienaber, M. T. Wesseling, A. Bouju, and Y. Ghamri-Doudane, “Data collection period and sensor selection method for smart building occupancy prediction,” in *IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*, 2019, vol. 2019-April.
- [72] P. G. Jeyasheeli and J. V. J. Selva, “An IOT design for smart lighting in green buildings based on environmental factors,” in *4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2017*, 2017.
- [73] A. Pandharipande, M. Zhao, and E. Frimout, “Connected Indoor Lighting Based Applications in a Building IoT Ecosystem,” *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 2, no. 1, pp. 22–26, Sep. 2019.
- [74] B. Q. Li and S. Y. Zheng, “Application research of intelligent monitoring system of longsheng hot spring water temperature based on Internet of Things,” *Therm. Sci.*, vol. 23, no. 5 Part A, pp. 2613–2622, 2019.
- [75] J. Jin, “The use of genetic algorithm in the design of internet of things platform of heat energy collection system,” *Therm. Sci.*, vol. 24, no. 5 Part B, pp. 3177–3184, 2020.
- [76] K. Tanaka, “Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, pp. 6532–6550, Oct. 2011.
- [77] S. Baysan, O. Kabadurmus, E. Cevikcan, S. I. Satoglu, and M. B. Durmusoglu, “A simulation-based methodology for the analysis of the effect of lean tools on energy efficiency: An application in power distribution industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 211, pp. 895–908, Feb. 2019.

- [78] J. K. Choi, D. Thangamani, and K. Kissock, "A systematic methodology for improving resource efficiency in small and medium-sized enterprises," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 147, pp. 19–27, Aug. 2019.
- [79] H. S. Kang *et al.*, "Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 111–128, Jan. 2016.
- [80] S. Jagtap, S. Rahimifard, and L. N. K. Duong, "Real-time data collection to improve energy efficiency: A case study of food manufacturer," *J. Food Process. Preserv.*, p. e14338, 2019.
- [81] F. Shrouf and G. Miragliotta, "Energy management based on Internet of Things: practices and framework for adoption in production management," *J. Clean. Prod.*, vol. 100, pp. 235–246, Aug. 2015.
- [82] L. Meng, E. R. Sanseverino, A. Luna, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1263–1273, Jul. 2016.
- [83] R. Arshad, S. Zahoor, M. A. Shah, A. Wahid, and H. Yu, "Green IoT: An investigation on energy saving practices for 2020 and beyond," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 15667–15681, Jul. 2017.
- [84] A. Ziębik and K. Hoinka, *Energy systems of complex buildings*. Springer, 2013.
- [85] G. J. Klir, *Trends in General Systems Theory*, 1st ed. John Wiley & Sons, 1972.
- [86] L. von Bertalanffy, *General system theory: foundations, development, applications*. New York: George Braziller, 1969.
- [87] C. E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 27, pp. 623–656, 1948.
- [88] A. Hall, *A methodology for systems engineering*. Princeton N.J.: Van Nostrand, 1962.
- [89] W. Leontief, *Input-Output Economics*. 1986.
- [90] CIRP, "Wörterbuch der Fertigungstechnik Bd. 3 / Produktionssysteme / Manufacturing Systems / Systèmes de Production,," 2004.
- [91] CIRP, *Wörterbuch der Fertigungstechnik/Dictionary of Production Engineering/Dictionnaire des Techniques de Production Mécanique Vol. II*. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [92] S. Thiede, "Energy Efficiency in Manufacturing Systems," 2012.
- [93] Oxford University Press, "Oxford Dictionaries Online." .
- [94] C. Herrmann, L. Bergmann, S. Thiede, and A. Zein, "Framework for integrated analysis of production systems," *Adv. Life Cycle Eng. Sustain. Manuf. Businesses - Proc. 14th CIRP Conf. Life Cycle Eng.*, pp. 195–200, 2007.
- [95] E. Howard, "The Evolution of the Industrial Ages: Industry 1.0 to 4.0," 2018. [Online]. Available: <https://www.simio.com/blog/2018/09/05/evolution-industrial-ages-industry-1-0-4-0/>. [Accessed: 04-Dec-2021].
- [96] K. K. B. Hon, "Performance and Evaluation of Manufacturing Systems," *CIRP Ann.*, vol. 54, no. 2, pp. 139–154, Jan. 2005.



- [97] G. Chryssolouris, *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. Springer-Verlag, 2006.
- [98] H. P. Wiendahl and P. Scholtissek, "Management and Control of Complexity in Manufacturing," *CIRP Ann.*, vol. 43, no. 2, pp. 533–540, Jan. 1994.
- [99] N. P. Suh, *Complexity : theory and applications*. Oxford University Press, 2005.
- [100] A. V. Deshmukh, J. J. Talavage, and M. M. Barash, "Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of static complexity," <http://dx.doi.org/10.1080/07408179808966508>, vol. 30, no. 7, pp. 645–655, 2007.
- [101] N. Papakostas, K. Efthymiou, D. Mourtzis, and G. Chryssolouris, "Modelling the complexity of manufacturing systems using nonlinear dynamics approaches," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 437–440, 2009.
- [102] X. Lu, D. Clements-Croome, and M. Viljanen, "Integration of chaos theory and mathematical models in building simulation. Part II: Conceptual frameworks," *Autom. Constr.*, vol. 19, no. 4, pp. 452–457, Jul. 2010.
- [103] S. H. Kellert, *In the wake of chaos : unpredictable order in dynamical systems*. University of Chicago Press, 1993.
- [104] A. Wolf, J. B. Swift, H. L. Swinney, and J. A. Vastano, "Determining Lyapunov exponents from a time series," *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 16, no. 3, pp. 285–317, Jul. 1985.
- [105] J. P. M. Schmitz, D. A. Van Beek, and J. E. Rooda, "Chaos in discrete production systems?," *J. Manuf. Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 236–246, Jan. 2002.
- [106] T. Beaumariage and K. Kempf, "Nature and origin of chaos in manufacturing systems," in *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, 1994, pp. 169–174.
- [107] P. Massotte, "Behavioural analysis of a complex system," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 66–76, Jan. 1996.
- [108] I. Katzorke and A. Pikovsky, "Chaos and complexity in a simple model of production dynamics," *Discret. Dyn. Nat. Soc.*, vol. 5, no. 3, pp. 179–187, 2000.
- [109] K. Peters, J. Worbs, U. Parlitz, and H.-P. Wiendahl, "Manufacturing Systems with Restricted Buffer Sizes," in *Nonlinear Dynamics of Production Systems*, John Wiley & Sons, Ltd, 2005, pp. 39–54.
- [110] K.-J. Wang, H.-M. Wee, S.-F. Gao, and S.-L. Chung, "Production and inventory control with chaotic demands," *Omega*, vol. 33, no. 2, pp. 97–107, Apr. 2005.
- [111] R. Donner, B. Scholz-Reiter, and U. Hinrichs, "Nonlinear characterization of the performance of production and logistics network," *J. Manuf. Syst.*, vol. 2, no. 27, pp. 84–99, Apr. 2008.
- [112] J. Sarkis, "An empirical analysis of productivity and complexity for flexible manufacturing systems," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 48, no. 1, pp. 39–48, Jan. 1997.
- [113] M. D. Alfaro and J. M. Sepulveda, "Chaotic behavior in manufacturing systems," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 1, no. 101, pp. 150–158, 2006.
- [114] B. Scholz-Reiter, M. Freitag, and A. Schmieder, "Modelling and Control of Production Systems based on Nonlinear Dynamics Theory," *CIRP Ann.*, vol. 51, no. 1, pp. 375–378, Jan. 2002.

- [115] G. Chryssolouris, N. Giannelos, N. Papakostas, and D. Mourtzis, "Chaos Theory in Production Scheduling," *CIRP Ann.*, vol. 53, no. 1, pp. 381–383, Jan. 2004.
- [116] N. Giannelos, N. Papakostas, D. Mourtzis, and G. Chryssolouris, "Dispatching policy for manufacturing jobs and time-delay plots," <https://doi.org/10.1080/09511920600786604>, vol. 20, no. 4, pp. 329–337, Jun. 2007.
- [117] H. A. ElMaraghy and M. Manns, "Transition of interarrival time patterns between automated and manual configurations of assembly systems," *J. Manuf. Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2007.
- [118] N. Papakostas and D. Mourtzis, "An Approach for Adaptability Modeling in Manufacturing -Analysis Using Chaotic Dynamics," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 491–494, 2007.
- [119] G. Frizelle and Y. Suhov, "The measurement of complexity in production and other commercial systems," *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 464, no. 2098, pp. 2649–2668, Oct. 2008.
- [120] J. Efstathiou, A. Calinescu, and G. Blackburn, "A web-based expert system to assess the complexity of manufacturing organizations," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 18, no. 3–4, pp. 305–311, Jun. 2002.
- [121] S. Sivadasan, J. Efstathiou, A. Calinescu, and L. H. Huatuco, "Advances on measuring the operational complexity of supplier–customer systems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 171, no. 1, pp. 208–226, May 2006.
- [122] A. V. Deshmukh, "Complexity and chaos in manufacturing systems," 1993.
- [123] S. J. Hu, X. Zhu, H. Wang, and Y. Koren, "Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains," *CIRP Ann.*, vol. 57, no. 1, pp. 45–48, Jan. 2008.
- [124] X. Zhu, S. J. Hu, Y. Koren, and S. P. Marin, "Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 130, no. 5, pp. 0510131–05101310, Oct. 2008.
- [125] H. Wang and S. J. Hu, "Manufacturing complexity in assembly systems with hybrid configurations and its impact on throughput," *CIRP Ann.*, vol. 59, no. 1, pp. 53–56, Jan. 2010.
- [126] Y. Koren, S. J. Hu, and T. W. Weber, "Impact of Manufacturing System Configuration on Performance," *CIRP Ann.*, vol. 47, no. 1, pp. 369–372, Jan. 1998.
- [127] H. A. ElMaraghy, O. Kuzgunkaya, and R. J. Urbanic, "Manufacturing Systems Configuration Complexity," *CIRP Ann.*, vol. 54, no. 1, pp. 445–450, Jan. 2005.
- [128] Y.-S. Kim, "A system complexity approach for the integration of product development and production system design," Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [129] K. Efthymiou, A. Pagoropoulos, N. Papakostas, D. Mourtzis, and G. Chryssolouris, "Manufacturing Systems Complexity Review: Challenges and Outlook," *Procedia CIRP*, vol. 3, no. 1, pp. 644–649, Jan. 2012.
- [130] W. H. ElMaraghy and R. J. Urbanic, "Assessment of manufacturing operational complexity," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 53, no. 1, pp. 401–406, 2004.
- [131] K. Efthymiou, N. Papakostas, D. Mourtzis, and G. Chryssolouris, "Fluid Dynamics Analogy to Manufacturing Systems," in *42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 2008.
- [132] P. Romano, "How can fluid dynamics help supply chain management?," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 118, no. 2, pp.

- 463–472, Apr. 2009.
- [133] H. Schleifenbaum, J. Y. Uam, S. Günther, and Hinke. C, “Turbulence in Production Systems - Fluid Dynamics and its Contributions to Production Theory,” in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2009 Vol IIWCECS 2009*, 2009.
  - [134] K. Windt, F. Böse, and T. Philipp, “Autonomy in production logistics: Identification, characterisation and application,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 24, no. 4, pp. 572–578, Aug. 2008.
  - [135] R. Vrabčič and P. Butala, “Computational mechanics approach to managing complexity in manufacturing systems,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 1, no. 60, pp. 503–506, 2011.
  - [136] K. Efthymiou, A. Pagoropoulos, N. Papakostas, D. Mourtzis, and G. Chryssolouris, “Manufacturing systems complexity: An assessment of manufacturing performance indicators unpredictability,” *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 324–334, Jan. 2014.
  - [137] F. Kasper and H. G. Schuster, “Easily calculable measure for the complexity of spatiotemporal patterns,” *Phys. Rev. A*, vol. 36, no. 2, p. 842, Jul. 1987.
  - [138] C. Schmidt, W. Li, S. Thiede, S. Kara, and C. Herrmann, “A methodology for customized prediction of energy consumption in manufacturing industries,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 163–172, Apr. 2015.
  - [139] C. Breidenich, D. Magraw, A. Rowley, and J. W. Rubin, “The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change,” *Am. J. Int. Law*, vol. 92, no. 2, pp. 315–331, Apr. 1998.
  - [140] J. R. Duflou *et al.*, “Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach,” *CIRP Ann.*, vol. 61, no. 2, pp. 587–609, Jan. 2012.
  - [141] S. Thiede, G. Bogdanski, and C. Herrmann, “A systematic method for increasing the energy and resource efficiency in manufacturing companies,” *Procedia CIRP*, vol. 2, no. 1, pp. 28–33, 2012.
  - [142] H. S. Yoon *et al.*, “A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol. 2014 13*, vol. 1, no. 3, pp. 261–279, Feb. 2015.
  - [143] W. Li, M. Winter, S. Kara, and C. Herrmann, “Eco-efficiency of manufacturing processes: A grinding case,” *CIRP Ann.*, vol. 61, no. 1, pp. 59–62, Jan. 2012.
  - [144] T. Gutowski, J. Dahmus, and A. Thiriez, “Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes,” in *13th CIRP International Conference of Life Cycle Engineering*, 2006.
  - [145] J. R. Duflou, K. Kellens, Renaldi, Y. Guo, and W. Dewulf, “Critical comparison of methods to determine the energy input for discrete manufacturing processes,” *CIRP Ann.*, vol. 61, no. 1, pp. 63–66, Jan. 2012.
  - [146] Y. He, F. Liu, T. Wu, F. P. Zhong, and B. Peng, “Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, vol. 226, no. 2, pp. 255–266.
  - [147] A. Dietmair and A. Verl, “A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimisation in manufacturing,” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 123–133, Jun. 2009.

- [148] W. Lee, C. Y. Lee, and B. K. Min, "Simulation-based energy usage profiling of machine tool at the component level," *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 183–189, 2014.
- [149] N. Frigerio, A. Matta, L. Ferrero, and F. Rusinà, "Modeling energy states in machine tools: An automata based approach," in *Re-Engineering Manufacturing for Sustainability - Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2013, pp. 203–208.
- [150] E. Abele, S. Schrems, C. Eisele, and P. Schraml, "Simulation-Based Assessment of the Energy Consumption of Manufacturing Processes," in *Leveraging Technology for a Sustainable World - Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 2012, pp. 375–379.
- [151] E. Abele, C. Eisele, and S. Schrems, "Simulation of the Energy Consumption of Machine Tools for a Specific Production Task," in *Leveraging Technology for a Sustainable World - Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 2012, pp. 233–237.
- [152] S. Kara and W. Li, "Unit process energy consumption models for material removal processes," *CIRP Ann.*, vol. 60, no. 1, pp. 37–40, Jan. 2011.
- [153] F. Qureshi, W. Li, S. Kara, and C. Herrmann, "Unit Process Energy Consumption Models for Material Addition Processes: A Case of the Injection Molding Process," in *Leveraging Technology for a Sustainable World - Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 2012, pp. 269–274.
- [154] W. Li, S. Kara, and B. Kornfeld, "Developing unit process models for predicting energy consumption in industry: A case of extrusion line," in *Re-Engineering Manufacturing for Sustainability - Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2013, pp. 147–152.
- [155] S. Ibbotson, S. Kara, C. Herrmann, and S. Thiede, "Impact of Process Selection on Material and Energy Flow," in *Re-Engineering Manufacturing for Sustainability - Proceedings of the 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2013, pp. 159–163.
- [156] W. Li, A. Zein, S. Kara, and C. Herrmann, "An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools," in *Glocalised Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2011, pp. 268–273.
- [157] N. Weinert, S. Chiotellis, and G. Seliger, "Methodology for planning and operating energy-efficient production systems," *CIRP Ann.*, vol. 60, no. 1, pp. 41–44, Jan. 2011.
- [158] H. Lasi, P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, Aug. 2014.
- [159] J. Lee, B. Bagheri, and H. A. Kao, "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," *Manuf. Lett.*, vol. 3, pp. 18–23, Jan. 2015.
- [160] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, and C. Zhang, "Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination," *Comput. Networks*, vol. 101, pp. 158–168, Jun. 2016.
- [161] W. Shen and D. H. Norrie, "Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey," *Knowl. Inf. Syst.* 1999 12, vol. 1, no. 2, pp. 129–156, Jul. 2013.

- [162] S. Wang, J. Wan, D. Li, and C. Zhang, "Implementing smart factory of Industrie 4.0," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 2016, Jan. 2016.
- [163] J. Wan *et al.*, "A Manufacturing Big Data Solution for Active Preventive Maintenance," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 13, no. 4, pp. 2039–2047, Aug. 2017.
- [164] D. McFarlane, S. Sarma, J. L. Chirn, C. Y. Wong, and K. Ashton, "Auto ID systems and intelligent manufacturing control," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 16, no. 4, pp. 365–376, Jun. 2003.
- [165] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, "Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, Oct. 2017.
- [166] Y. Liu and X. Xu, "Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 139, no. 3, Mar. 2017.
- [167] A. Kusiak, *Intelligent manufacturing systems*. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice Hall, 1990.
- [168] B. hu Li, B. cun Hou, W. tao Yu, X. bing Lu, and C. wei Yang, "Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review," *Front. Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 86–96, Jan. 2017.
- [169] J. Davis, T. Edgar, J. Porter, J. Bernaden, and M. Sarli, "Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 47, pp. 145–156, Dec. 2012.
- [170] A. B. Feeney, S. P. Frechette, and V. Srinivasan, "A Portrait of an ISO STEP Tolerancing Standard as an Enabler of Smart Manufacturing Systems," *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 15, no. 2, Jun. 2015.
- [171] Festo, "Qualification for Industry 4.0 - Highlights - Festo Didactic." [Online]. Available: <https://www.festo-didactic.com/int-en/highlights/qualification-for-industry-4.0>. [Accessed: 06-Dec-2021].
- [172] Y. Koren, W. Wang, and X. Gu, "Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 5, pp. 1227–1242, Mar. 2016.
- [173] E. Oztemel, "Intelligent Manufacturing Systems," in *Artificial Intelligence Techniques for Networked Manufacturing Enterprises Management*, Springer, London, 2010, pp. 1–41.
- [174] J. Barbosa, P. Leitão, E. Adam, and D. Trentesaux, "Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution," *Comput. Ind.*, vol. 66, pp. 99–111, Jan. 2015.
- [175] R. Y. Zhong, Q. Y. Dai, T. Qu, G. J. Hu, and G. Q. Huang, "RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 2, pp. 283–292, Apr. 2013.
- [176] F. Tao, Y. Cheng, L. Da Xu, L. Zhang, and B. H. Li, "CCIoT-CMfg: Cloud computing and internet of things-based cloud manufacturing service system," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1435–1442, 2014.
- [177] Z. Bi, L. Da Xu, and C. Wang, "Internet of things for enterprise systems of modern manufacturing," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1537–1546, 2014.
- [178] F. Xia, L. T. Yang, L. Wang, and A. Vinel, "Internet of Things," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 25, no. 9, pp. 1101–1102, Sep. 2012.

- [179] D. Lund, C. Macgillivray, V. Turner, and M. Morales, "Worldwide and Regional Internet of Things (IoT) 2014-2020 Forecast: A Virtuous Circle of Proven Value and Demand," Oct. 2013.
- [180] Y. M. Wang, Y. S. Wang, and Y. F. Yang, "Understanding the determinants of RFID adoption in the manufacturing industry," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 77, no. 5, pp. 803–815, Jun. 2010.
- [181] Z. X. Guo, E. W. T. Ngai, C. Yang, and X. Liang, "An RFID-based intelligent decision support system architecture for production monitoring and scheduling in a distributed manufacturing environment," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 159, pp. 16–28, Jan. 2015.
- [182] X. Xu, "From cloud computing to cloud manufacturing," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 28, no. 1, pp. 75–86, Feb. 2012.
- [183] L. Zhang *et al.*, "Cloud manufacturing: a new manufacturing paradigm," *Enterp. Inf. Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 167–187, Mar. 2014.
- [184] M. Armbrust *et al.*, "A view of cloud computing," *Commun. ACM*, vol. 53, no. 4, pp. 50–58, Apr. 2010.
- [185] Q. Zhang, L. Cheng, and R. Boutaba, "Cloud computing: State-of-the-art and research challenges," *J. Internet Serv. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 7–18, May 2010.
- [186] V. K. Saxena and S. Pushkar, "Cloud computing challenges and implementations," in *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, 2016, pp. 2583–2588.
- [187] X. Tan and B. Ai, "The issues of cloud computing security in high-speed railway," in *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology, EMEIT 2011*, 2011, vol. 8, pp. 4358–4363.
- [188] M. Hajivali, M. T. Alrashdan, F. Fatemi Moghaddam, and A. Z. M. Alothmani, "Applying an agent-based user authentication and access control model for cloud servers," in *International Conference on ICT Convergence*, 2013, pp. 807–812.
- [189] R. K. Banyal, P. Jain, and V. K. Jain, "Multi-factor authentication framework for cloud computing," in *Proceedings of International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation*, 2013, pp. 105–110.
- [190] M. Sharkh, M. Jammal, A. Shami, and A. Ouda, "Resource allocation in a network-based cloud computing environment: Design challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 11, pp. 46–52, 2013.
- [191] S. T. Maguluri, R. Srikant, and L. Ying, "Stochastic models of load balancing and scheduling in cloud computing clusters," in *Proceedings - IEEE INFOCOM*, 2012, pp. 702–710.
- [192] K. Al Nuaimi, N. Mohamed, M. Al Nuaimi, and J. Al-Jaroodi, "A survey of load balancing in Cloud Computing: Challenges and algorithms," in *Proceedings - IEEE 2nd Symposium on Network Cloud Computing and Applications, NCCA 2012*, 2012, pp. 137–142.
- [193] M. Randles, D. Lamb, and A. Taleb-Bendiab, "A comparative study into distributed load balancing algorithms for cloud computing," in *24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA 2010*, 2010, pp. 551–556.
- [194] R. Moreno-Vozmediano, R. S. Montero, and I. M. Llorente, "Key challenges in cloud computing: Enabling the

- future internet of services,” *IEEE Internet Comput.*, vol. 17, no. 4, pp. 18–25, 2013.
- [195] A. Khajeh-Hosseini, D. Greenwood, and I. Sommerville, “Cloud migration: A case study of migrating an enterprise IT system to IaaS,” in *Proceedings - 2010 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing, CLOUD 2010*, 2010, pp. 450–457.
- [196] M. A. Chauhan and M. A. Babar, “Migrating service-oriented system to cloud computing: An experience report,” in *Proceedings - 2011 IEEE 4th International Conference on Cloud Computing, CLOUD 2011*, 2011, pp. 404–411.
- [197] D. Petcu, “Portability and Interoperability between Clouds: Challenges and Case Study,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2011, vol. 6994 LNCS, pp. 62–74.
- [198] L. Schubert, *The future of cloud computing : opportunities for European cloud computing beyond 2010 : --expert group report*, Public version 1.0. [Europe]: European Commission Information Society and Media, 2010.
- [199] F. F. Moghaddam, M. Ahmadi, S. Sarvari, M. Eslami, and A. Golkar, “Cloud computing challenges and opportunities: A survey,” in *2015 International Conference on Telematics and Future Generation Networks, TAFGEN 2015*, 2015, pp. 34–38.
- [200] D. Wu, M. J. Greer, D. W. Rosen, and D. Schaefer, “Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 564–579, Oct. 2013.
- [201] Y. Lu and X. Xu, “A semantic web-based framework for service composition in a cloud manufacturing environment,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 42, pp. 69–81, Jan. 2017.
- [202] F. Tao, Y. Zuo, L. Da Xu, and L. Zhang, “IoT-Based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1547–1557, 2014.
- [203] VDI and ZVEI, “Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) - Status Report,” Düsseldorf, Jul. 2015.
- [204] X. Vincent Wang and X. W. Xu, “An interoperable solution for Cloud manufacturing,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 4, pp. 232–247, Aug. 2013.
- [205] Y. Liu, X. Xu, L. Zhang, L. Wang, and R. Y. Zhong, “Workload-based multi-task scheduling in cloud manufacturing,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 45, pp. 3–20, Jun. 2017.
- [206] B. University of California, “Cyber-Physical Systems.” [Online]. Available: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps//>. [Accessed: 07-Dec-2021].
- [207] E. A. Lee and S. A. Seshia, *Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach (Errata; V.2.2; Errata\_all; V1.08; V2.0)*, 2nd ed. 2017.
- [208] R. Baheti and H. Gill, “Cyber-Physical Systems,” in *2019 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, 2019, pp. 430–432.
- [209] E. A. Lee, “Cyber Physical Systems : Design Challenges ,” in *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2008, pp. 363–369.

- [210] Y. Tan, S. Goddard, and L. C. Pérez, “A prototype architecture for cyber-physical systems,” *ACM SIGBED Rev.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–2, Jan. 2008.
- [211] P. Derler, E. A. Lee, and A. Sangiovanni Vincentelli, “Modeling cyber-physical systems,” *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 1, pp. 13–28, 2012.
- [212] S. Ali, S. Bin Qaisar, H. Saeed, M. F. Khan, M. Naeem, and A. Anpalagan, “Network Challenges for Cyber Physical Systems with Tiny Wireless Devices: A Case Study on Reliable Pipeline Condition Monitoring,” *Sensors 2015, Vol. 15, Pages 7172-7205*, vol. 15, no. 4, pp. 7172–7205, Mar. 2015.
- [213] J. Manyika *et al.*, “Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity,” May 2011.
- [214] M. Jones, “Big Data Is a ‘New Natural Resource,’ IBM Says,” *Government Technology*, 27-Jun-2012.
- [215] J. Lee, E. Lapira, B. Bagheri, and H. an Kao, “Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment,” *Manuf. Lett.*, vol. 1, no. 1, pp. 38–41, Oct. 2013.
- [216] D. Barton and D. Court, “Making Advanced Analytics Work For You,” *Harv. Bus. Rev.*, p. 7, 2012.
- [217] J. Lee, F. Wu, W. Zhao, M. Ghaffari, L. Liao, and D. Siegel, “Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 42, no. 1–2, pp. 314–334, Jan. 2014.
- [218] B. Brown, M. Chui, and J. Manyika, “Are you ready for the era of ‘big data’?,” *McKinsey Quarterly*, 01-Oct-2011.
- [219] J. Hashim, “Information Communication Technology (ICT) Adoption Among SME Owners in Malaysia,” *Int. J. Bus. Inf.*, vol. 2, pp. 221–240, 2007.
- [220] N. Bloom, L. Garicano, R. Sadun, and J. Van Reenen, “The Distinct Effects of Information Technology and Communication Technology on Firm Organization,” *Manage. Sci.*, vol. 60, no. 12, pp. 2859–2885, Nov. 2014.
- [221] M. Colin, R. Galindo, and O. Hernández, “Information and Communication Technology as a Key Strategy for Efficient Supply Chain Management in Manufacturing SMEs,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 55, pp. 833–842, Jan. 2015.
- [222] E. Ketteni, C. Kottaridi, and T. P. Mamuneas, “Information and communication technology and foreign direct investment: interactions and contributions to economic growth,” *Empir. Econ.*, vol. 48, no. 4, pp. 1525–1539, Jun. 2015.
- [223] W. Zhang, W. Fang, Q. Zhao, X. Ji, and G. Jia, “Energy efficiency in internet of things: An overview,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 63, no. 2, pp. 787–811, 2020.
- [224] X. Liu and Q. Liu, “A dual-spline approach to load error repair in a HEMS sensor network,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 57, no. 2, pp. 179–194, 2018.
- [225] M. M. Medojević, B. B. Tejić, M. S. Medojević, and M. V. Kljajić, “Design and development of IIoT-based system for behavior profiling of nonlinear dynamic production systems based on energy flow theory,” *Therm. Sci.*, vol. online first, no. 00, pp. 228–228, 2021.
- [226] AI-Thinker team, “SP8266 ESP-07 Wi-Fi Serial Transceiver Wireless Board Module Datasheet,” 2015. [Online]. Available: [https://www.mikrocontroller.net/attachment/338570/Ai-thinker\\_ESP-](https://www.mikrocontroller.net/attachment/338570/Ai-thinker_ESP-)



- 07\_WIFI\_Module-EN.pdf [Accessed: 08-Dec-2021].
- [227] L. Electronics Source Co., “Arduino Nano 3.1 Datasheet.” [Online]. Available: <https://www.es.co.th/Schematic/PDF/ARMB-0022.PDF>. [Accessed: 08-Dec-2021].
- [228] HAOYU Electronics, “MP1584 Buck / Step Down 3A Adjustable Regulator Module.” [Online]. Available: <https://www.hotmcu.com/mp1584-buck-step-down-3a-adjustable-regulator-module-p-82.html>. [Accessed: 08-Dec-2021].
- [229] HAOYU Electronics, “5V USB Output Boost Regulator Module.” [Online]. Available: <https://www.hotmcu.com/09v5v-input-5v-usb-output-boost-regulator-module-p-151.html>. [Accessed: 08-Dec-2021].
- [230] Addicore, “TP4056 / TC4056A Lithium Battery Charger and Protection Module.” [Online]. Available: <https://www.addicore.com/TP4056-Charger-and-Protection-Module-p/ad310.htm>. [Accessed: 08-Dec-2021].
- [231] Maxim Integrated, “I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal DS3231.” [Online]. Available: [www.maxim-ic.com/thermal-tutorial](http://www.maxim-ic.com/thermal-tutorial). [Accessed: 08-Dec-2021].
- [232] Oregon State University, “SD Card Module Slot Socket Reader.” [Online]. Available: [https://eecs.oregonstate.edu/tekbots/modules/sd\\_card](https://eecs.oregonstate.edu/tekbots/modules/sd_card). [Accessed: 08-Dec-2021].
- [233] Vishay, “OLED-128O064D-BPP3N00000 128 x 64 Graphic OLED.” [Online]. Available: [www.vishay.com/doc?91000](http://www.vishay.com/doc?91000). [Accessed: 08-Dec-2021].
- [234] YHDC, “SCT013 Datasheet.”.
- [235] C. Götz, “MQTT 101 – How to Get Started with the lightweight IoT Protocol | The Eclipse Foundation.” [Online]. Available: [https://www.eclipse.org/community/eclipse\\_newsletter/2014/october/article2.php](https://www.eclipse.org/community/eclipse_newsletter/2014/october/article2.php). [Accessed: 08-Dec-2021].
- [236] K. Chooruang and P. Mangkalakeeree, “Wireless Heart Rate Monitoring System Using MQTT,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 86, pp. 160–163, Jan. 2016.
- [237] M. H. Amaran, N. A. M. Noh, M. S. Rohmad, and H. Hashim, “A Comparison of Lightweight Communication Protocols in Robotic Applications,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 76, pp. 400–405, Jan. 2015.
- [238] M. A. Prada, P. Reguera, S. Alonso, A. Morán, J. J. Fuertes, and M. Domínguez, “Communication with resource-constrained devices through MQTT for control education,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 6, pp. 150–155, Jan. 2016.
- [239] InfluxData, “Act in Time, Build on InfluxDB.” [Online]. Available: <https://www.influxdata.com/>. [Accessed: 08-Dec-2021].
- [240] Grafana Labs, “Grafana: The open observability platform .” [Online]. Available: <https://grafana.com/>. [Accessed: 08-Dec-2021].
- [241] Docker Docs, “Docker overview | Docker Documentation.” [Online]. Available: <https://docs.docker.com/get-started/overview/>. [Accessed: 08-Dec-2021].

- [242] Ministarstvo građevinarstva saobraćaja i infrastrukture, *PRAVILNIK O ENERGETSKOJ EFIKASNOSTI ZGRADA I UVODNE ODREDBE*. 2011, p. 59.
- [243] M. Planck, *Vorlesungen über Thermodynamik*. De Gruyter, 1954.
- [244] S. Thiede, G. Bogdanski, and C. Herrmann, "A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies," in *1st CIRP Global Web Conference: Interdisciplinary Research in Production Engineering*, 2012, vol. Complete, no. 2, pp. 28–33.
- [245] A. Dietmair and A. Verl, "A generic energy consumption model for decision making and energy efficiency optimisation in manufacturing," *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 123–133, Jun. 2009.
- [246] P. Myerson, *Lean Supply Chain and Logistics Management*, 1st ed., no. November. McGraw-Hill Education, 2012.
- [247] D. Zelenovic, *Projektovanje proizvodnih sistema: The design of production systems : tokovi*. Fakultet tehničkih nauka, 2003.
- [248] Wikipedia, "k-means clustering ." [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/K-means\\_clustering](https://en.wikipedia.org/wiki/K-means_clustering). [Accessed: 09-Dec-2021].
- [249] L. Van Der Maaten and G. Hinton, "Visualizing Data using t-SNE," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 9, pp. 2579–2605, 2008.
- [250] L. van der Maaten, "t-SNE ." [Online]. Available: <https://lvdmaaten.github.io/tsne/>. [Accessed: 09-Dec-2021].
- [251] scikit-learn 1.0.1 documentation, "sklearn.manifold.TSNE." [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.manifold.TSNE.html?highlight=tsne#sklearn.manifold.TSNE>. [Accessed: 09-Dec-2021].
- [252] scikit-learn 1.0.1 documentation, "1.17. Neural network models (supervised) ." [Online]. Available: [https://scikit-learn.org/stable/modules/neural\\_networks\\_supervised.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/neural_networks_supervised.html). [Accessed: 09-Dec-2021].
- [253] scikit-learn 1.0.1 documentation, "Varying regularization in Multi-layer Perceptron ." [Online]. Available: [https://scikit-learn.org/stable/auto\\_examples/neural\\_networks/plot\\_mlp\\_alpha.html](https://scikit-learn.org/stable/auto_examples/neural_networks/plot_mlp_alpha.html). [Accessed: 09-Dec-2021].
- [254] J. Liu, Y. Chen, J. Zhan, and F. Shang, "An On-Line Energy Management Strategy Based on Trip Condition Prediction for Commuter Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 5, pp. 3767–3781, May 2018.
- [255] B. Han, D. Zhang, and T. Yang, "Energy consumption analysis and energy management strategy for sensor node," in *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2008*, 2008, pp. 211–214.
- [256] H.-T. Pao, "Forecast of electricity consumption and economic growth in Taiwan by state space modeling" *Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 1779–1791, 2009.
- [257] H. Yin, S. C. Wong, J. Xu, and C. K. Wong, "Urban traffic flow prediction using a fuzzy-neural approach," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 85–98, Apr. 2002.

- [258] S. Rasp and S. Lerch, "Neural Networks for Postprocessing Ensemble Weather Forecasts," *Mon. Weather Rev.*, vol. 146, no. 11, pp. 3885–3900, Nov. 2018.
- [259] Q. Zhang, H. Wang, J. Dong, G. Zhong, and X. Sun, "Prediction of Sea Surface Temperature Using Long Short-Term Memory," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 14, no. 10, pp. 1745–1749, Oct. 2017.
- [260] Y. Zuo and E. Kita, "Stock price forecast using Bayesian network," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 8, pp. 6729–6737, Jun. 2012.
- [261] F. Nomiyama, J. Asai, T. Murakami, and J. Murata, "A study on global solar radiation forecasting using weather forecast data," in *2011 IEEE 54th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, 2011.
- [262] J. Q. Wang, Y. Du, and J. Wang, "LSTM based long-term energy consumption prediction with periodicity," *Energy*, vol. 197, p. 117197, Apr. 2020.
- [263] Colah's blog, "Understanding LSTM Networks ," 27-Aug-2015. [Online]. Available: <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>. [Accessed: 09-Dec-2021].
- [264] M. Mayank, "A practical guide to RNN and LSTM in Keras ," *Towards Data Science*, 17-Oct-2020. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/a-practical-guide-to-rnn-and-lstm-in-keras-980f176271bc>. [Accessed: 09-Dec-2021].
- [265] Pathmind, "A Beginner's Guide to LSTMs and Recurrent Neural Networks ." [Online]. Available: <https://wiki.pathmind.com/lstm>. [Accessed: 09-Dec-2021].
- [266] J. Brownlee, "Multi-Step LSTM Time Series Forecasting Models for Power Usage," *Machine Learning Mastery - Deep Learning for Time Series*, 10-Oct-2018. [Online]. Available: <https://machinelearningmastery.com/how-to-develop-lstm-models-for-multi-step-time-series-forecasting-of-household-power-consumption/>. [Accessed: 09-Dec-2021].
- [267] "Energy Efficiency Measure - an overview | ScienceDirect Topics." [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/energy-efficiency-measure>. [Accessed: 21-Aug-2019].

Ovaj Obrazac čini sastavni deo doktorske disertacije, odnosno doktorskog umetničkog projekta koji se brani na Univerzitetu u Novom Sadu. Popunjen Obrazac ukoričiti iza teksta doktorske disertacije, odnosno doktorskog umetničkog projekta.

## Plan tretmana podataka

Naziv projekta/istraživanja
ANALIZA PONAŠANJA PROIZVODNIH SISTEMA NA OSNOVU TEORIJE ENERGETSKIH TOKOVA NELINEARNIH DINAMIČKIH SISTEMA
Naziv institucije/institucija u okviru kojih se sprovodi istraživanje
a) Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu b) Proizvodni sistem kompanije CNC Duo ML v) Proizvodni sistem kompanije Absolute CNC g) Poslovni inkubator u Novom Sadu (prostorije kompanije EnergyPulse DOO)
Naziv programa u okviru kog se realizuje istraživanje
Istraživanje je realizovano za potrebe izrade doktorske disertacije na Departmanu za industrijsko inženjerstvo/inženjerski menadžment.
1. Opis podataka
<p>1.1 Vrsta studije</p> <p><i>Ukratko opisati tip studije u okviru koje se podaci prikupljaju</i></p> <p>Studija sprovedena u okviru disertacije obuhvata eksperimentalna istraživanja sa ciljem empirijske verifikacije predloženih modela za analizu ponašanja proizvodnih sistema na osnovu teorije energetskih tokova nelinearnih dinamičkih sistema.</p> <p>1.2 Vrste podataka</p> <p><input checked="" type="radio"/> a) kvantitativni b) kvalitativni</p> <p>1.3. Način prikupljanja podataka</p> <p>a) ankete, upitnici, testovi b) kliničke procene, medicinski zapisi, elektronski zdravstveni zapisi v) genotipovi: navesti vrstu _____ g) administrativni podaci: navesti vrstu _____ d) uzorci tkiva: navesti vrstu _____ đ) snimci, fotografije: navesti vrstu _____ e) tekst, navesti vrstu _____ ž) mapa, navesti vrstu _____</p>

z) ostalo: procesni podaci u vidu numeričkih vrenosti prikupljeni iz proizvodnih sistema

### 1.3 Format podataka, upotrebljene skale, količina podataka

#### 1.3.1 Upotrebljeni softver i format datoteke:

- a) Excel fajl, datoteka .csv
- b) SPSS fajl, datoteka \_\_\_\_\_
- c) PDF fajl, datoteka \_\_\_\_\_
- d) Tekst fajl, datoteka \_\_\_\_\_
- e) JPG fajl, datoteka \_\_\_\_\_
- f) Ostalo, datoteka \_\_\_\_\_

#### 1.3.2. Broj zapisa (kod kvantitativnih podataka)

- a) broj varijabli: 6
- b) broj merenja (ispitanika, procena, snimaka i sl.): oko 17 miliona nizova podataka

#### 1.3.3. Ponovljena merenja

- a) da
- b) ne

Ukoliko je odgovor da, odgovoriti na sledeća pitanja:

- a) vremenski razmak između ponovljenih mera je \_\_\_\_\_
- b) varijable koje se više puta mere odnose se na \_\_\_\_\_
- v) nove verzije fajlova koji sadrže ponovljena merenja su imenovane kao \_\_\_\_\_

Napomene:

\_\_\_\_\_

*Da li formati i softver omogućavaju deljenje i dugoročnu validnost podataka?*

- a) Da
- b) Ne

*Ako je odgovor ne, obrazložiti* \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 2. Prikupljanje podataka

### 2.1 Metodologija za prikupljanje/generisanje podataka

#### 2.1.1. U okviru kog istraživačkog nacrta su podaci prikupljeni?

- a) eksperiment, navesti tip: eksperimentalna akvizicija podataka u realnim proizvodnim sistemima
- b) korelaciono istraživanje, navesti tip \_\_\_\_\_
- c) analiza teksta, navesti tip: sistematski pregled relevantne literature

d) ostalo, navesti šta \_\_\_\_\_

2.1.2 Navesti vrste mernih instrumenata ili standarde podataka specifičnih za određenu naučnu disciplinu (ako postoje).  
Senzori za neinvazivnu akviziciju podataka o intenzitetu struje „YHDC Split core current transformer SCT-013-000“

2.2 Kvalitet podataka i standardi

2.2.1. Tretman nedostajućih podataka

a) Da li matrica sadrži nedostajuće podatke? Da  Ne

Ako je odgovor da, odgovoriti na sledeća pitanja:

a) Koliki je broj nedostajućih podataka? \_\_\_\_\_

b) Da li se korisniku matrice preporučuje zamena nedostajućih podataka? Da  Ne

v) Ako je odgovor da, navesti sugestije za tretman zamene nedostajućih podataka

\_\_\_\_\_

2.2.2. Na koji način je kontrolisan kvalitet podataka? Opisati

Podaci su pripremljeni i obrađeni u skladu sa predloženom metodologijom za razvoj modela za za analizu ponašanja proizvodnih sistema na osnovu teorije energetske tokova nelinearnih dinamičkih sistema.

2.2.3. Na koji način je izvršena kontrola unosa podataka u matricu?

Podaci se automatski zapisuju u matricu u trenutku njihovog generisanja prema prikazanom firmware-u

### 3. Tretman podataka i prateća dokumentacija

3.1. Tretman i čuvanje podataka

3.1.1. Podaci će biti deponovani u repozitorijume koje je kandidat naveo u istraživačkom radu.

3.1.2. URL adresa \_\_\_\_\_

3.1.3. DOI \_\_\_\_\_

3.1.4. Da li će podaci biti u otvorenom pristupu?

a)  Da

b) Da, ali posle embarga koji će trajati do \_\_\_\_\_

v)  Ne

Ako je odgovor ne, navesti razlog \_\_\_\_\_

3.1.5. Podaci neće biti deponovani u repozitorijum, ali će biti čuvani.

Obrazloženje

\_\_\_\_\_

---

---

### 3.2 Metapodaci i dokumentacija podataka

3.2.1. Koji standard za metapodatke će biti primenjen? Nije definisano

3.2.1. Navesti metapodatke na osnovu kojih su podaci deponovani u repozitorijum.

---

---

*Ako je potrebno, navesti metode koje se koriste za preuzimanje podataka, analitičke i proceduralne informacije, njihovo kodiranje, detaljne opise varijabli, zapisa itd.*

---

---

---

---

### 3.3 Strategija i standardi za čuvanje podataka

3.3.1. Do kog perioda će podaci biti čuvani u repozitorijumu? Neograničeno

3.3.2. Da li će podaci biti deponovani pod šifrom? Da  Ne

3.3.3. Da li će šifra biti dostupna određenom krugu istraživača? Da  Ne

3.3.4. Da li se podaci moraju ukloniti iz otvorenog pristupa posle izvesnog vremena?

Da  Ne

Objasni

---

---

## 4. Bezbednost podataka i zaštita poverljivih informacija

Ovaj odeljak MORA biti popunjen ako vaši podaci uključuju lične podatke koji se odnose na učesnike u istraživanju. Za druga istraživanja treba takođe razmotriti zaštitu i sigurnost podataka.

### 4.1 Formalni standardi za sigurnost informacija/podataka

Istraživači koji sprovode ispitivanja s ljudima moraju da se pridržavaju Zakona o zaštiti podataka o ličnosti ([https://www.paragraf.rs/propisi/zakon\\_o\\_zastiti\\_podataka\\_o\\_licnosti.html](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html)) i odgovarajućeg institucionalnog kodeksa o akademskom integritetu.

4.1.2. Da li je istraživanje odobreno od strane etičke komisije? Da  Ne

Ako je odgovor Da, navesti datum i naziv etičke komisije koja je odobrila istraživanje

---

4.1.2. Da li podaci uključuju lične podatke učesnika u istraživanju? Da  Ne

Ako je odgovor da, navedite na koji način ste osigurali poverljivost i sigurnost informacija vezanih za ispitanike:

- a) Podaci nisu u otvorenom pristupu
  - b) Podaci su anonimizirani
  - c) Ostalo, navesti šta
- 
- 

## 5. Dostupnost podataka

5.1. Podaci će biti

- javno dostupni
- b) dostupni samo uskom krugu istraživača u određenoj naučnoj oblasti
- c) zatvoreni

5.4. Navesti licencu pod kojom će prikupljeni podaci biti arhivirani.

autorstvo – nekomercijalno - bez prerade

## 6. Uloge i odgovornost

6.1. Navesti ime i prezime i mejl adresu vlasnika (autora) podataka

Milovan Medojević, email: [medojevicmilovan@gmail.com](mailto:medojevicmilovan@gmail.com)

6.2. Navesti ime i prezime i mejl adresu osobe koja održava matricu s podacima

Milovan Medojević, email: [medojevicmilovan@gmail.com](mailto:medojevicmilovan@gmail.com)

6.3. Navesti ime i prezime i mejl adresu osobe koja omogućuje pristup podacima drugim istraživačima

Milovan Medojević, email: [medojevicmilovan@gmail.com](mailto:medojevicmilovan@gmail.com)