

Analiza funkcionalnosti MES sustava

Lončar, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:954473>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Lončar

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Cajner, dipl. ing.

Student:

Ivan Lončar

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem mentoru Izv. prof. dr. sc. Hrvoju Cajneru na stručnom vodstvu i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem gospodinu Davidu Burcaru iz poduzeća Vanado na izdvojenom vremenu i upoznavanju s radom u sustavu PAUK.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na podršci u izazovnim i beznadnim trenucima, na razumijevanju svaki put kada sam im uskratio svoje vrijeme i na strpljenju tijekom cijelog studija.

Ivan Lončar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-14/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22-	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN LONČAR**

Mat. br.: 0035207389

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza funkcionalnosti MES sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of the functionality of the MES system**

Opis zadatka:

Praćenje parametara proizvodnje, planiranje resursa te upravljanje procesima je kompleksna aktivnost koja iziskuje upotrebu informacijskog sustava. Sustav koji povezuje, nadzire i kontrolira složene proizvodne sustave i tokove informacija naziva se MES sustav (eng. Manufacturing execution system). Glavni cilj MES sustava je osigurati učinkovito izvršenje proizvodnih operacija i povećati učinkovitost proizvodnje. Pored osnovnih moguće su i dodatne funkcionalnosti sustava, a ovisno o specifičnom zahtjevu i ograničenjima krajnjih korisnika.

U radu je potrebno:

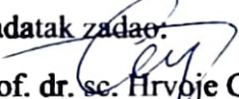
1. Dati presjek postojećih sustava za praćenje i kontrolu proizvodnje.
2. Analizirati funkcionalnosti postojećih MES sustava.
3. Kroz primjer prikazati primjenu i mogućnosti dostupnog MES sustava.
4. Analizirati mogućnosti unaprjeđenja funkcionalnosti dostupnog MES sustava te konceptualno razraditi dodatne funkcionalnosti.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Hrvoje Cajner

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
POPIS KRATICA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. MES SUSTAVI	3
2.1. Povijesni pregled razvoja MES sustava	5
2.2. Ključne funkcionalnosti MES-a.....	6
2.3. MES u okviru ISA-95 standarda	11
2.4. Razvoj i integracija MES-a	13
3. MES SUSTAVI U OKVIRU INDUSTRIJE 4.0	15
3.1. Industrija 4.0	15
3.1.1. Osnovna načela Industrije 4.0.....	16
3.1.2. Struktura pametne tvornice	17
3.1.3. Tehnologije Industrije 4.0	18
3.2. Uloge MES sustava u Industriji 4.0	21
4. ANALIZA POSTOJEĆIH MES SUSTAVA	23
4.1. MES funkcionalnosti i razine inteligencije.....	23
4.2. Usporedba MES sustava	25
5. SUSTAV ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNOM – PAUK	27
5.1. Općenito o sustavu PAUK	27
5.2. Laboratorij za proizvodni menadžment	29
5.3. Prikaz funkcionalnosti sustava PAUK.....	30
5.4. Prijedlog unaprjeđenja funkcionalnosti sustava PAUK.....	37
5.4.1. Pareto analiza	37
5.4.2. Statistička kontrola procesa (SPC).....	39
5.4.2.1. Kontrolne karte	39
5.4.2.2. Procjena sposobnosti procesa	40
5.4.3. Konceptualna razrada unaprjeđenja i simulirani primjeri primjene.....	42
6. ZAKLJUČAK.....	48
LITERATURA.....	49
PRILOZI.....	51

POPIS SLIKA

Slika 1.	MESA-11 model ključnih funkcionalnosti [7].....	10
Slika 2.	MES okviru ISA-95 standarda [5], [7].....	12
Slika 3.	ISA-95 model općih aktivnosti upravljanja proizvodnim operacijama [7].....	13
Slika 4.	Tok informacija u pametnoj tvornici [12].....	18
Slika 5.	Shema pametne tvornice [13].....	21
Slika 6.	Laboratorij za proizvodni menadžment.....	30
Slika 7.	PAUK – početni zaslon.....	31
Slika 8.	PAUK – izbornik.....	31
Slika 9.	PAUK – kreiranje gotovog proizvoda.....	32
Slika 10.	PAUK – kreiranje narudžbe.....	32
Slika 11.	PAUK – kreiranje radnog naloga.....	33
Slika 12.	Primjer radnog naloga (ispis).....	33
Slika 13.	PAUK – radna stanica - sučelje.....	34
Slika 14.	PAUK – radna stanica – aktivna operacija.....	34
Slika 15.	PAUK – radna stanica – odjava operacije.....	35
Slika 16.	PAUK – praćenje proizvodnje.....	35
Slika 17.	PAUK – analiza rada – tehnološki postupci.....	35
Slika 18.	Praćenje produktivnosti radnika (Excel).....	36
Slika 19.	Primjer Pareto dijagrama.....	38
Slika 20.	Dijagram izbora kontrolne karte [15].....	40
Slika 21.	Dijagram normalne raspodjele unutar zahtijevanih granica specifikacija.....	41
Slika 22.	Dijagram tijeka aktivnosti u analizi procesa.....	42
Slika 23.	Simulirani primjer x -MR karte procesa pod kontrolom.....	45
Slika 24.	Simulirani primjer x -MR karte procesa koji nije pod kontrolom.....	45
Slika 25.	Simulirani primjer procjene sposobnosti procesa.....	46
Slika 26.	Simulirani primjer Pareto dijagrama za proces zavarivanja.....	47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Industrijska MES rješenja – funkcionalnosti [6].....	25
Tablica 2. Industrijska MES rješenja – razina inteligencije [6]	26
Tablica 3. Vrijednosti konstanti za x - MR kontrolne karte [15].....	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
\overline{MR}	-	aritmetička sredina raspona koji se mijenja
C_p	-	potencijalna sposobnost
C_{pk}	-	demonstrirana izvrsnost
D_3	-	konstanta x - MR kontrolne karte
D_4	-	konstanta x - MR kontrolne karte
E_2	-	konstanta x - MR kontrolne karte
k	-	broj uzetih uzoraka
\bar{x}	-	aritmetička sredina uzorka
x_i	-	vrijednost u točki i

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AI	<i>Artificial Intelligence</i> – umjetna inteligencija
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – računalom potpomognuto oblikovanje
CAQ	<i>Computer Aided Quality Assurance</i> – računalom potpomognuto osiguravanje kvalitete
CIM	<i>Computer Integrated Manufacturing</i> – računalno integrirana proizvodnja
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i> – kibernetičko-fizički sustavi
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> – planiranje resursa poduzeća
FSB	Fakultet strojarstva i brodogradnje
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i> – industrijski internet stvari
IoT	<i>Internet of Things</i> – internet stvari
ISA	<i>International Society of Automation</i> – Međunarodno društvo za automatizaciju
IT	informacijske tehnologije
KPI	<i>Key Performance Indicator</i> – ključni pokazatelji uspješnosti
LCL (DKG)	<i>Lower Control Limit</i> – donja kontrolna granica
LIMS	<i>Laboratory Information Management System</i> – sustav upravljanja laboratorijskim informacijama
LSL (DGS)	<i>Lower Specification Limit</i> – donja granica specifikacije
MES	<i>Manufacturing Execution System</i> – sustav izvršenja proizvodnje
MESA	<i>Manufacturing Enterprise Solutions Association International</i>
MOM	<i>Manufacturing Operations Management</i> – upravljanje proizvodnim operacijama
MR	<i>Moving Range</i> – raspon koji se mijenja
PAUK	Praćenje, analiza, ušteda i kontrola
PDA	<i>Production Data Acquisition</i> – prikupljanje podataka o proizvodnji
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i> – programabilni logički kontroler
QR	<i>Quick Response</i> – brzi odziv
RFID	<i>Radio-frequency identification</i> – radiofrekvencijska identifikacija
RTDB	<i>Real-time Database</i> – baze podataka u stvarnom vremenu
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> – nadzorna kontrola i prikupljanje podataka
SPC	<i>Statistical Process Control</i> – statistička kontrola procesa
UCL (GKG)	<i>Upper Control Limit</i> – gornja kontrolna granica
URL	<i>Uniform Resource Locator</i> – ujednačeni lokator izvora
USL (GGS)	<i>Upper Specification Limit</i> – gornja granica specifikacije

SAŽETAK

U cilju postizanja veće učinkovitosti i optimizacije proizvodnje, proizvodna poduzeća u prošlosti su ručno prikupljala podatke o proizvodnim procesima. Naglim razvojem računalnih mogućnosti počela su se razvijati programska rješenja koja su proces prikupljanja podataka i praćenja proizvodnje znatno olakšala. Devedesetih godina prošlog stoljeća takvi sustavi, koji su često bili namijenjeni specifičnoj upotrebi pojedinog poduzeća, počeli su se standardizirati i poznati su pod nazivom *Manufacturing Execution System*.

Tema ovog diplomskog rada je analiza funkcionalnosti MES sustava, odnosno sustava za praćenje i upravljanje proizvodnjom. U radu je dan kratak pregled razvoja MES sustava kroz godine, opisane su ključne funkcionalnosti koje takvi sustavi moraju sadržavati, napravljena je usporedba funkcionalnosti postojećih industrijskih rješenja te su analizirane funkcionalnosti dostupnog MES sustava – PAUK – koje je razvilo hrvatsko poduzeće Vanado. Na kraju je razrađen koncept mogućih unaprjeđenja prethodno analiziranog MES sustava. Unaprjeđenja su razrađena prema kriteriju najvećeg doprinosa u procesu analize i upravljanja proizvodnim procesima uz jednostavnu implementaciju.

Ključne riječi: MES, funkcionalnosti, proizvodni proces, proizvodno postrojenje, upravljanje, Industrija 4.0

SUMMARY

In order to achieve greater efficiency and optimization of production, manufacturing companies in the past manually collected data on production processes. With the sudden development of computer capabilities, software solutions began to be developed that made the process of data collection and production monitoring much easier. In the 1990s, such systems, which were often intended for the specific use of an individual company, began to be standardized and are known as Manufacturing Execution System.

The topic of this thesis is the analysis of the functionalities of the MESs, that is, the systems for monitoring and managing production. The paper provides a brief overview of the development of MESs over the years, describes the key functionalities that such systems must contain, compares the functionality of existing industrial solutions, and analyses the functionality of the available MES – PAUK – developed by the Croatian company Vanado. In the end, the concept of possible improvements to the previously analysed MES was elaborated. Improvements were developed according to the criterion of the greatest contribution in the process of analysis and management of production processes with simple implementation.

Keywords: MES, functionalities, production process, manufacturing facility, management, Industry 4.0

1. UVOD

Proizvodna industrija vrlo je kompetitivna i stalno se mijenja i razvija, stoga poduzeća, kako bi opstala i bila konkurentna na tržištu, moraju biti agilna i kontinuirano se poboljšavati. [1]

Globalizacijom gospodarstva i s njom povezanih trendova stalno rastuće potražnje, masovne proizvodnje po mjeri, povećanja proizvodne efikasnosti, skraćanja ciklusa inovacija, osiguravanja visoke kvalitete, prediktivnih proizvodnih sustava, odziva proizvodnje itd., proizvodna poduzeća pod stalnim su pritiskom izazova koje im ona nameće. [2], [3]

Konvencionalne tvornice određene su vlastitim proizvodima čija se vrijednost primarno mjeri materijalnim sastavnicama, no to danas više nije tako te fokus s kontrole proizvodnog stvaranja (vertikalna integracija) prelazi na kontrolu kupčeve percepcije proizvoda. Proizvodna poduzeća koja se žele istaknuti trebaju strategiju koja kupcima nudi dodanu vrijednost, što podrazumijeva visoku fleksibilnost, kratko vrijeme i visoku pouzdanost isporuke, širok raspon varijanti, kraći životni ciklus proizvoda itd. Drugim riječima svojstva koja ne nastaju proizvodnjom, već procesima. [4]

Samo usvajanje najnovijih tehnologija nije uvijek dostatno za povećanje stope proizvodnje, unaprjeđenje kvalitete ili povećanje profita, stoga proizvodna poduzeća, odnosno njihovi rukovoditelji operacija moraju stvoriti okruženje koje će im omogućiti preciznu kontrolu proizvodnje, a istovremeno dati uvid u kritične procese. [1]

Razvojem informacijskih tehnologija (IT) preobrazio se način vođenja kompanija i stvorile su se nove mogućnosti unaprjeđivanja proizvodnje. U današnjim složenim i izazovnim proizvodnim okruženjima, ključ uspjeha krije se u prepoznavanju važnih trendova, pravovremenoj reakciji i primjeni novih tehnologija, stoga je moderno rukovođenje proizvodnjom nezamislivo bez upotrebe informacijskih sustava.

U cilju povećanja produktivnosti, kompanije su desetljećima ulagale u informacijske sustave, što je rezultiralo stabilnim rastom tržišta informacijskih sustava za poduzeća. Informacijski sustavi poput ERP (engl. *Enterprise Resource Planning*) sustava, stekli su značajan status na tržištu – 80 % tvrtki s liste *Fortune 500* koristi ERP sustave za upravljanje operacijama, a sve veći broj malih i srednjih poduzeća prati njihove stope. [5]

ERP sustavi obuhvaćaju module za planiranje proizvodnje, praćenje inventure, predviđanje potražnje, evidenciju troškova, marketing za proizvodna poduzeća itd., no podaci koje oni

prikupljaju i integriraju ažuriraju se periodično i nedostaje im brzina i razina detalja koja je ključna za trenutno djelovanje na događaje koji se zbivaju u proizvodnom pogonu. [6]

Zbog nedostatnosti ERP-a u upravljanju operacijama proizvodnih pogona u stvarnom vremenu [6], devedesetih godina prošloga stoljeća, otkrivši prazninu na tržištu, prodavači softvera započeli su razvijati softvere po mjeri za operatere, nadzornike, planere, rukovoditelje pogona, voditelje, inženjere, održavatelje i ostale proizvodne djelatnike kako bi im pružili funkcionalnosti koje su nedostajale ERP sustavima. Kroz godine koje su slijedile počeli su razvijati standardna rješenja kojima su s vremenom dodavali sve više funkcionalnosti. [7]

Ta rješenja poznata su pod imenom sustavi izvršenja proizvodnje, odnosno MES (engl. *Manufacturing Execution System*) sustavi.

2. MES SUSTAVI

Sustavi izvršenja proizvodnje, engleske skraćenice MES, naziv je za računalne sustave za rukovođenje proizvodnjom i svakodnevnim operacijama, iznad razine automatske kontrole. [8] To podrazumijeva nadziranje, praćenje, dokumentiranje i kontroliranje proizvodnih procesa, od sirovih materijala do gotovih proizvoda. Kao poveznica između ERP sustava i sustava kontrole procesa, MES donosi odluka pruža podatke koji su im potrebni kako bi optimizirali proizvodnju i pogon učinili učinkovitijim. [9]

MES sustavi, na temelju trenutanih podataka, vode, iniciraju, odgovaraju i izvješćuju o aktivnostima unutar postrojenja u trenutku kada se one odvijaju. Takav brz odziv na promjenjive uvjete, uz usredotočenost na smanjenje aktivnosti koje ne dodaju vrijednost, omogućuje učinkovite operacije i procese postrojenja. [8]

Glavna funkcionalna područja koja MES obuhvaća su [8]:

- **planiranje proizvodnje** – izrada izvedivih i optimiziranih operativnih planova, dodjela opreme i uputa, definiranje postupanja s radnim nalogima, procjena trenutanih mogućnosti proizvodnog pogona
- **izvršenje proizvodnje** – izvođenje proizvodnih planova na siguran, pouzdan i efikasan način
- **upravljanje operacijama** – određivanje sigurnih operativnih granica, nadziranje uvjeta procesa, priopćenje operativnih planova, izvješćivanje o aktivnostima u smjeni, upravljanje radnim zadacima i procedurama
- **upravljanje proizvodnjom** – mjerenje stvarne proizvodnje, usklađivanje proizvodnje za interno i fiskalno izvješćivanje, procjena proizvodnje temeljem podataka o kvaliteti, izvješćivanje o proizvodnom učinku

Kako je već prethodno spomenuto, današnji proizvođači pod velikim su pritiskom jer moraju brzo razvijati proizvode visoke kvalitete uz što manje troškove. Upotrebom MES-a informacije iz pogona postaju dostupne ostatku poduzeća, što organizacijama omogućuje bržu prilagodbu na promjenjive uvjete i zahtjeve tržišta.

Pogodnosti korištenja MES sustava su [8], [9]:

- **poboljšana kontrola kvalitete** – prijenosom informacija u stvarnom vremenu, tvornice mogu odmah identificirati probleme i po potrebi zaustaviti proizvodnju čime se smanjuje otpad, utrošak materijala, škart i dorada proizvoda
- **povećano vrijeme rada** – vrijeme rada podrazumijeva vrijeme u kojem strojevi rade, a proizvodnja teče po planu; MES integrira planiranje i održavanje kako bi se maksimizirao tok proizvoda i iskoristivost opreme (uravnotežuje resurse osoblja, materijala i opreme)
- **smanjenje inventara** – pomoću MES-a zapisi inventara neprestano se ažuriraju novom proizvodnjom, otpadom, nesukladnim materijalom itd., što omogućuje odjelima nabave, otpreme i planiranja da u svakom trenutku znaju točno koji materijal je raspoloživ; time se smanjuje nepotrebno gomilanje zaliha za iznenadne („za svaki slučaj“) potrebe
- **uklanjanje papirologije** – uklanjanjem papirologije umanjuje se vjerojatnost ljudske pogreške, a isto tako podaci prikupljeni u pogonu trenutno su dostupni donosiocima odluka preko svih integriranih sustava, za donošenje odluka u stvarnom vremenu
- **poboljšana sljedivost proizvoda** – MES prati cijeli proizvodni ciklus, od početka do kraja, grupirajući konačne proizvode ili serije s odgovarajućim podacima o proizvodnji; ti podaci omogućuju usklađenost s propisima za proizvođače koji podliježu posebnim regulativama države ili industrije
- **preciznije praćenje troškova** – troškovi rada, otpada, zastoja, alata itd., bilježe se izravno iz pogona, čim se pojave; time informacije postaju pouzdanije i djelotvornije za određivanje cijene rada i profitabilnosti poslovanja
- **poboljšanje zadovoljstva kupaca** – imajući na raspolaganju, u svakom trenutku, uvid u stanje zaliha i strojeva, proizvođači mogu lakše planirati proizvodnju u slučaju hitnih zahtjeva kupaca.

2.1. Povijesni pregled razvoja MES sustava

MES sustavi svoje korijene vuku iz sustava za prikupljanje podataka iz ranih 80-ih godina 20. stoljeća, kao što su PDA (engl. *Production Data Acquisition*) i CAQ (*Computer Aided Quality Assurance*) [4], SCADA (engl. *Supervisory Control and Data Acquisition*) i PLC (engl. *Programmable Logic Controller*).

Nerijetko su ti sustavi bili izolirana rješenja za pojedine odjele u poduzeću stoga se javila ideja za razvojem integriranih proizvodnih sustava, odnosno računalno integrirane proizvodnje – CIM (engl. *Computer Integrated Manufacturing*). No, iako je to rano prepoznato, provedba je često bila neuspješna zbog složenosti takvih sustava, nedostatka standardizacije i nerazvijenosti, tada dostupnih, tehnologija. [2]

Razvoj kompjuterizacije proizvodnih operacija može se podijeliti u četiri stadija [10]:

- 1) računovodstveni sustavi i jednostavni sustavi upravljanja zalihama
- 2) MRPII sustavi s naglašenim pristupom planiranju materijala
- 3) specifični sustavi za proizvodne pogone, ponavljajuće procese i sl.
- 4) funkcionalna proširenja i nove informacijske tehnologije utjelovljene u MES-u.

Računovodstvo je među prvim disciplinama u poslovanju koje je automatizirano pomoću računalnih sustava, a prve proizvodne primjene pojavile su se kao nusprodukt kompjuterizacije računovodstva, što je u većini slučajeva obuhvaćalo računovodstvo zaliha. Međutim, potreba za programskim rješenjima namijenjenima isključivo proizvodnji, a ne samo financijski orijentiranim informacijama, dovela je do razvoja MRP (engl. *Manufacturing Resource Planning*) sustava. Oni su razvijeni tako da povežu sve operativne funkcije proizvodne organizacije, od inženjerstva do proizvodnje te da se reaktivni način upravljanja zamijeni pristupom planiranja odozgo prema dolje. [10]

Tri glavne funkcije MRP sustava su [10]:

- 1) **definiranje proizvodnje** – opisuje i kvantificira veze između sirovina, kupovnih i proizvedenih dijelova, podsklopova i gotovih proizvoda; sadrži informacije o vodećim vremenima (engl. *lead time*), troškovima, kvaliteti, materijalima itd.
- 2) **kontrola materijala** – održavanje bilance materijala i računovodstvo troškova zaliha

- 3) **planiranje materijala** – obuhvaća funkcije za analizu ponude i potražnje planiranih dijelova/materijala (Što? Kada? Koliko?).

MRP sustavi pokazali su se vrlo korisnim – istovremeno smanjujući zalihe i poboljšavajući zadovoljstvo kupaca. Svoj vrhunac doživjeli su krajem 70-ih i početkom 80-ih godina 20. stoljeća. Kako su MRP sustavi sazrijevali, dodavane su dodatne funkcionalnosti radi definiranja redoslijeda operacija, kontrole pogona i planiranja kapaciteta. Te funkcionalnosti omogućile su proširen uvid u troškove, generiranje proizvodnih naloga te praćenje statusa rada. Međutim, problemi koji se javljaju kod MRP sustava su sljedeći:

- nepravilno strukturiranje sastavnica
- zastarjeli standardi vremena usmjeravanja
- nerealno određivanje vodećih vremena
- nerealni rasporedi kao posljedica nepostojanja povratne informacije o operacijama iz pogona u stvarnom vremenu. [10]

MES sustavi ispravili su te nedostatke omogućujući nadzor aktivnosti u pogonu s većom rezolucijom (sati/minute) i integrirajući planiranje konačnih kapaciteta radi brže reakcije na promjene. Nadalje, MES sustavi kontinuirano analiziraju aktivnosti kako bi odziv na događaje u pogonu bio brži. [8]

2.2. Ključne funkcionalnosti MES-a

Globalna neprofitna organizacija *MESA International*, u cilju standardizacije MES sustava, 1997. godine okupila je tadašnje glavne dobavljače programskih rješenja na tržištu predlažući formalnu definiciju MES-a:

„MES isporučuje informacije koje omogućuju optimizaciju proizvodnih aktivnosti od pokretanja narudžbe do gotovih proizvoda. Koristeći aktualne i točne podatke, MES vodi, pokreće, odgovara i izvještava o aktivnostima postrojenja kako se one odvijaju. Rezultirajući brzi odgovor na promjenjive uvjete, zajedno s fokusom na smanjenje aktivnosti bez dodane vrijednosti, pokreće učinkovite operacije i procese postrojenja. MES poboljšava povrat na

operativnu imovinu, kao i pravodobnu isporuku, promet zaliha, bruto maržu i učinak novčanog toka. MES dvosmjernom komunikacijom pruža ključne informacije o proizvodnim aktivnostima u cijelom poduzeću i opskrbnom lancu.“ [5]

Kako bi se zadovoljile potrebe raznih proizvodnih okruženja, MESA je objavila rad u kojemu je kroz model definirala jedanaest ključnih funkcionalnosti MES-a. S vremenom je taj model dodatno razvijen, no tih jedanaest originalnih funkcionalnosti pružaju temelj za vođenje gotovo bilo kojeg tipa tvornice i sastavni su dio današnjih MES-a. [9]

Ključne funkcionalnosti MES-a prema MESA-11 modelu [10]:

1) **Raspodjela i status resursa**

Upravljanje resursima uključujući strojeve, alate, rad, materijale, ostalu opremu i stvari poput dokumentacije koja mora biti na raspolaganju kako bi se moglo započeti s radom, odnosno operacijama. Uporaba podataka u stvarnom vremenu radi praćenja i analiziranja statusa resursa. Pružanje detaljne povijesti resursa i osiguravanje ispravnog postavljanja opreme za obradu. Upravljanje ovim resursima ključno je za planiranje operacija/proizvodnje.

2) **Planiranje operacija**

Optimizacija proizvodnje odabirom redoslijeda i vremenskih aktivnosti temeljem prioriteta, atributa, karakteristika i/ili uputa povezanih s određenim proizvodnim jedinicama u operaciji. Prepoznavanje alternativnih i preklapajućih, odnosno paralelnih operacija kako bi se izračunalo njihovo točno trajanje ili opterećenost opreme, a potom napravile potrebne prilagodbe.

3) **Otpremanje proizvodnih jedinica**

Upravljanje protokom proizvodnih jedinica u vidu poslova, narudžbi, serija i radnih naloga. Informacije o otpremi prikazane su redoslijedom u kojem se posao treba obaviti i mijenjaju se u stvarnom vremenu kako se događaji odvijaju u tvornici. Mogućnost brzog i proračunatog mijenjanja propisanog rasporeda u tvornici, kao i mogućnost kontrole količine rada u procesu u bilo kojem trenutku.

4) **Kontrola dokumenata**

Upravljanje tokom informacija u stvarnom vremenu, u proizvodnoj jedinici, što uključuje radne upute, crteže, standardne operativne postupke, zapise serija, obavijesti o izmjenama, komunikaciju između smjena, kao i mogućnost uređivanja tih informacija te pohranjivanje povijesnih podataka. Slanje uputa sve do operativne razine, uključujući pružanje podataka operaterima ili uputa kontrolnim uređajima. Obuhvaćanje certifikacija rada i radnih uvjeta u skladu s ekološkim, zdravstvenim i sigurnosnim propisima te ISO standarda kao što su postupci korektivnih radnji.

5) **Prikupljanje podataka**

Praćenje i prikupljanje unutaroperacijskih, proizvodnih i parametarskih podataka radi povećanja efikasnosti i mogućnosti donošenja boljih odluka. Podaci iz tvornice mogu se prikupljati ručno ili automatski iz opreme do „u minutu“.

6) **Upravljanje radom**

Pruža status osoblja u vremenskom okviru „do minute“. Uključuje izvješćivanje o radnom vremenu i prisutnosti, kao i mogućnost praćenja neizravnih aktivnosti poput pripreme materijala ili rada, što omogućuje optimizaciju raspodjele rada (manje gubljenje vremena) te izračun troškova na temelju pojedinih aktivnosti. Obuhvaća interakciju s raspodjelom resursa radi optimalnog usklađivanja.

7) **Upravljanje kvalitetom**

Pruža analizu mjerenja prikupljenih u proizvodnji u stvarnom vremenu kako bi se osigurala odgovarajuća kontrola kvalitete proizvoda i identificirala odstupanja od kvalitete, odnosno problemi koje treba riješiti. Preporuka radnji za rješenje nastalih problema povezujući posljedice, radnje i rezultate kako bi se utvrdio uzrok. Upotreba statističke kontrole procesa (engl. *SPC – Statistical Process Control*) radi praćenja i upravljanja operacijama i provođenje analize u sustavu upravljanja laboratorijskim informacijama (engl. *LIMS – Laboratory Information Management System*).

8) Upravljanje procesom

Nadziranje proizvodnje i automatsko ispravljanje ili pružanje podrške operaterima pri odlučivanju o ispravljanju i poboljšanju aktivnosti u procesu od izdavanja radnog naloga do gotovog proizvoda. Te aktivnosti mogu biti unutaroperacijske i usredotočiti se na same strojeve ili opremu koja se nadzire i kontrolira, a isto tako mogu biti i međuoperacijske te pratiti proces od jedne operacije do druge. Omogućuje uvid u uska grla procesa te stvara potpunu sljedivost proizvodnje. Može uključivati mehanizme upozoravanja kako bi se osiguralo da su osobe u tvornici svjesne odstupanja procesa od prihvatljivih tolerancija. Omogućuje interakciju između inteligentne opreme i MES-a kroz funkcionalnost prikupljanja podataka.

9) Upravljanje održavanjem

Identificiranje potencijalnih problema, na temelju podataka, prije nego li se oni pojave. Praćenje i usmjeravanje aktivnosti održavanja opreme i planiranje periodičkog ili preventivnog održavanja kako bi se smanjila vremena zastoja i povećala efikasnost. Pohranjivanje prošlih događaja ili problema kao pomoć u dijagnosticiranju problema.

10) Praćenje i genealogija proizvoda

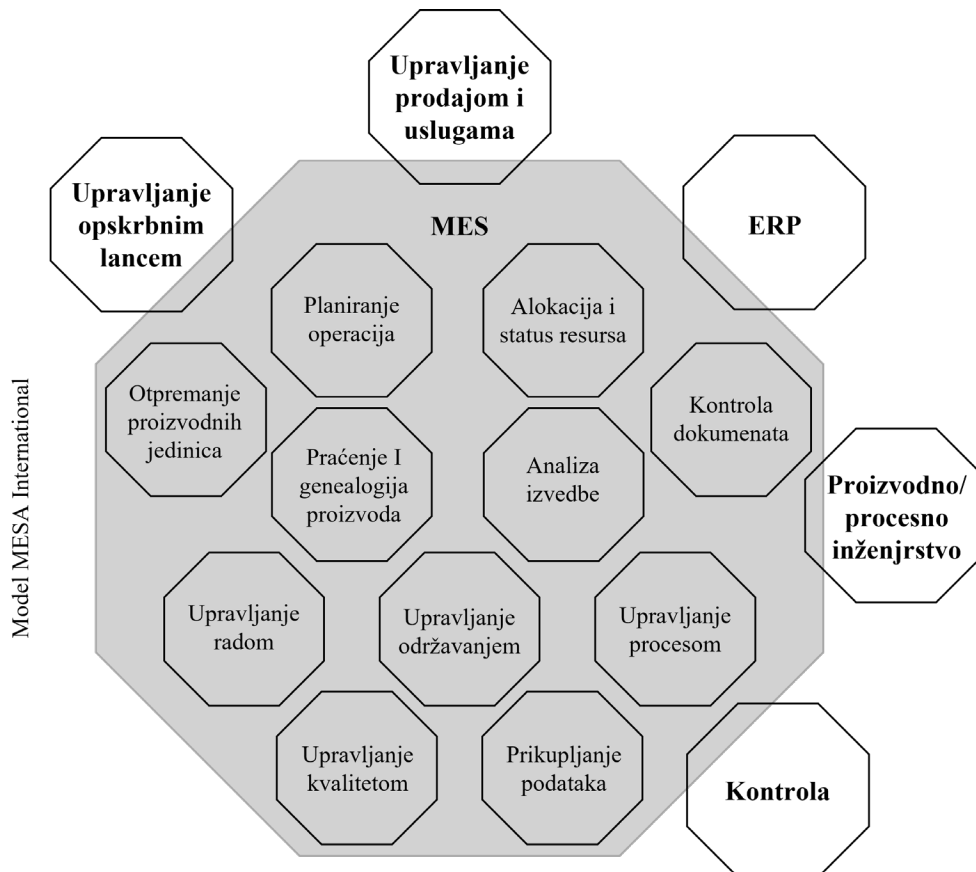
Uvid u status proizvoda u svakoj fazi proizvodnog procesa. To uključuje informacije o dobavljaču, materijalu, odgovornoj osobi, serijskom broju, nesukladnostima, doradama itd. Funkcija praćenja stvara povijesni zapis, koji omogućuje potpunu sljedivost svakog gotovog proizvoda i njegovih komponenti. To je osobito važno za proizvođače koji podliježu zakonskim regulativama.

11) Analiza izvedbe

Pružanje ažurnih izvješća o stvarnim rezultatima proizvodnih operacija i uspoređivanje s povijesnim i očekivanim poslovnim rezultatima kako bi se identificirale jakosti i slabosti procesa te poduzele potrebne radnje. Rezultati izvedbe uključuju mjerenja kao što su iskorištenost resursa, dostupnost resursa, vrijeme ciklusa jedinice proizvoda, ispunjenje vremenskih rokova, postignutu kvalitetu itd. Može uključivati statističku kontrolu procesa (SPC). Oslanja se na informacije prikupljene iz

različitih funkcija koje mjere radne parametre. Ovi se rezultati mogu pripremiti kao izvješće ili prezentirati *online* kao trenutačna procjena učinka.

Na donjem dijagramu prikazan je MESA-11 model funkcionalnosti u obliku saća (engl. *Honeycomb*) [Slika 1].



Slika 1. MESA-11 model ključnih funkcionalnosti [7]

2.3. MES u okviru ISA-95 standarda

Pri odabiru i implementaciji MES sustava i drugih povezanih sustava proizvodna poduzeća suočavaju se s problemom preklapanja funkcionalnosti među programskim rješenjima koje nude različiti dobavljači. [7]

Od prethodno nabrojanih 11 ključnih funkcionalnosti neke se izravno vežu uz procese, poput planiranja i kontrole kvalitete, dok su neke funkcije unakrsne, poput upravljanja resursima i sljedivosti. Poteškoća klasificiranja funkcionalnosti MES sustava dovodi do dva problema:

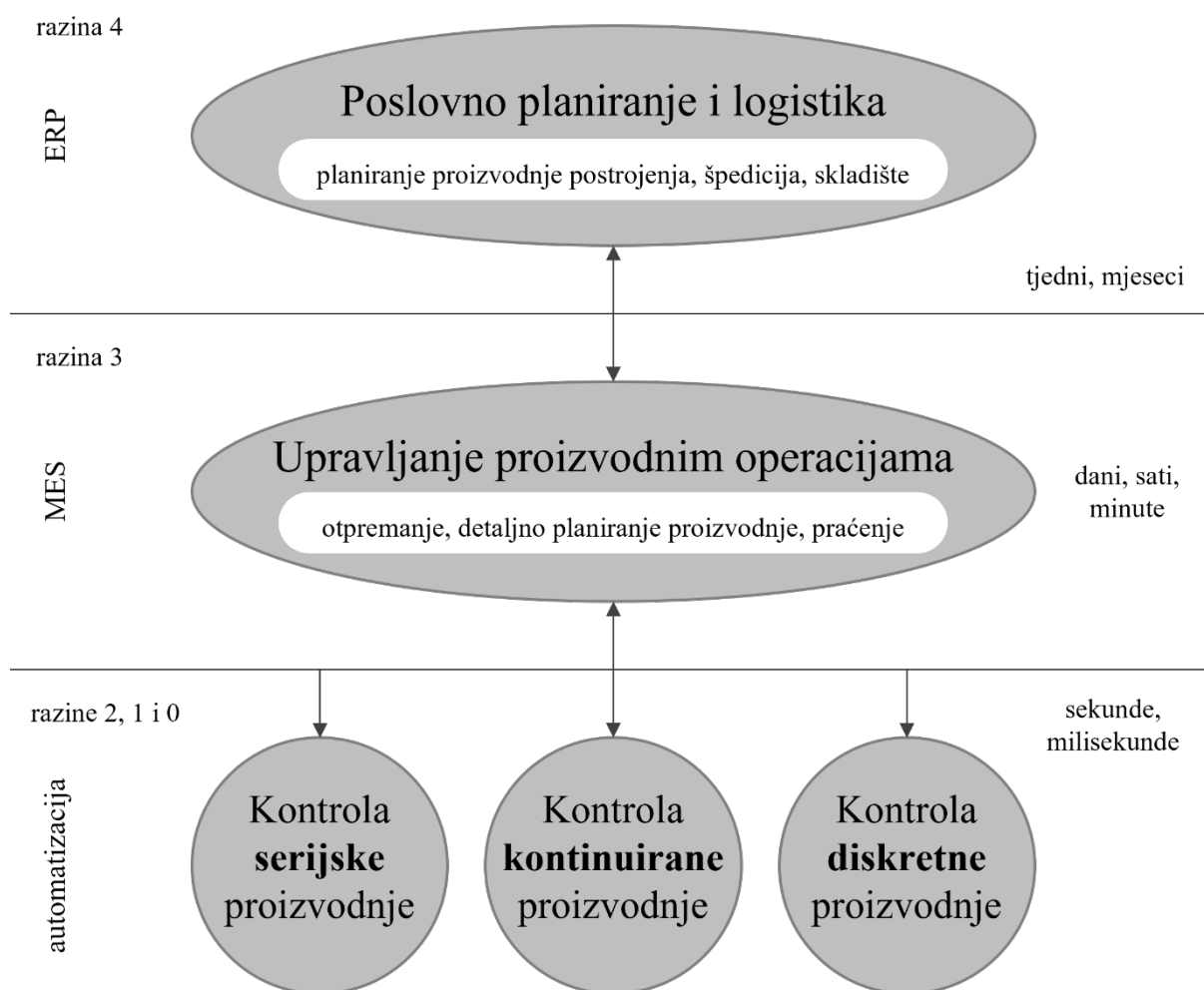
- 1) proizvodna poduzeća ne mogu jasno percipirati koncept MES-a
- 2) tendencija da se ERP-u pribroji sve što već nije definirano. [5]

Nisu sve funkcionalnosti MES sustava na istoj razini, stoga je bila potrebna standardizacija. Međunarodno društvo za automatizaciju, engleske skraćenice ISA (engl. *International Society of Automation*), neprofitna je organizacija koja definira standarde na području industrijske automatizacije. ISA je u cilju postizanja dosljednosti terminologije i informacijskog modela za definiranje i integraciju ERP sustava (na razini poslovanja) i sustava automatizacije (na razini proizvodnje) [2], kasnih 90-ih razvila ISA-95 standard naziva *Enterprise-Control System Integration* [7], [9].

ISA-95 omogućuje djelotvornu komunikaciju između sudionika, primjerice dobavljača i proizvođača, a uz to dobro definirani i dosljedni modeli umanjuju rizik od pogreške pri integraciji proizvodnih pogona s poslovnim sustavima.

ISA-95 definira hijerarhijski odnos između kontrolnih i poslovnih funkcija i dijeli ih na nekoliko razina tehnologije i poslovnih procesa. Pojednostavljeni model te hijerarhije MES sustave stavlja na treću razinu, između poslovnog planiranja i logistike i sustava kontrole procesa [9]:

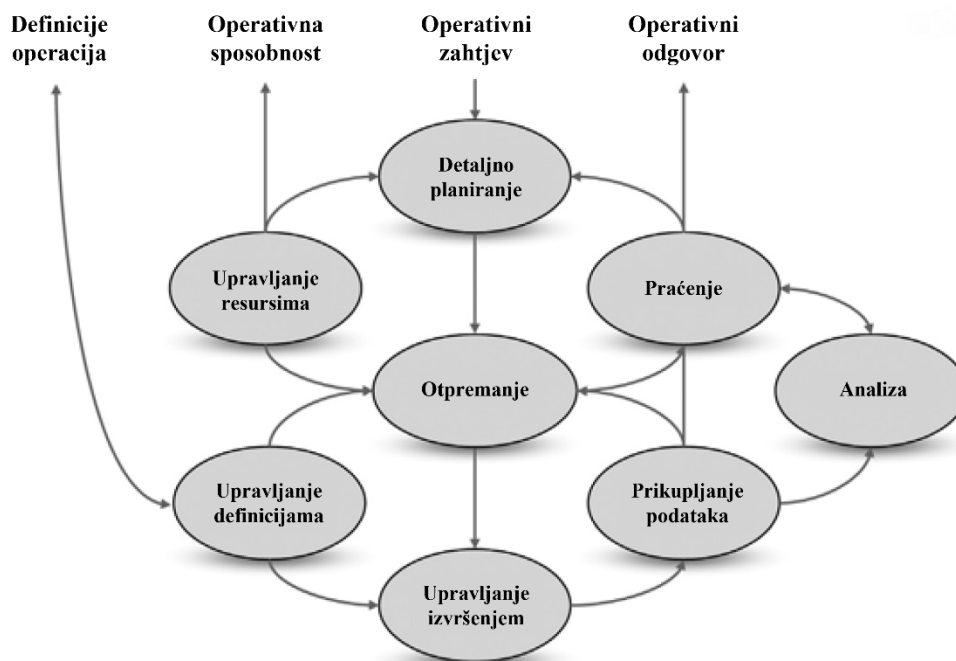
- **razina 4** – ERP: poslovno planiranje i logistika
- **razina 3** – MES: menadžment proizvodnih operacija
- **razina 2** – kontrolni sustavi procesa: kontrola serija
- **razina 1** – kontrolni sustavi procesa: kontinuirana kontrola
- **razina 0** – kontrolni sustavi procesa: diskretna kontrola.



Slika 2. MES okviru ISA-95 standarda [5], [7]

Prema hijerarhijskom modelu [Slika 2], razina 4 usredotočena je na dulji vremenski rok – tjedni, mjeseci. Na toj razini donose se odluke o narudžbi materijala, slanju faktura, dugoročnoj proizvodnji i rasporedu održavanja te o razvoju novih proizvoda. Razina 4 često se naziva i ERP slojem. S druge strane, razina 3 usredotočena je na nešto kraći vremenski rok – dani, sati, minute. Odluke koje se donose na toj razini imaju izravan utjecaj na efikasnost proizvodnog pogona, kvalitetu proizvoda, mjesta skladištenja materijala, dostupnost strojeva itd. Razina 3 često se naziva i MES slojem. Sve funkcionalnosti definirane MESA-11 modelom pripadaju razini 3, a razine 2, 1 i 0 usredotočuju se na sam proizvodni proces i čiji je vremenski okvir u minutama, sekundama i milisekundama. Razine 2, 1 i 0 prate se pomoću PLC-ova, SCADA-e i drugih kontrolnih sustava. [7]

Na dijagramu [Slika 3] je prikazan model općih aktivnosti upravljanja proizvodnim operacijama (engl. MOM – *Manufacturing Operations Management*) unutar razine 3.



Slika 3. ISA-95 model općih aktivnosti upravljanja proizvodnim operacijama [7]

2.4. Razvoj i integracija MES-a

Kako bi bili prilagodljivi i primjenjiviji potrebama poduzeća u koje se uvode, MES sustavi razvijaju se modularno. Na taj način, u slučaju da neko proizvodno poduzeće već koristi neka programska rješenja, nastoji se izbjeći preklapanje funkcionalnosti.

Pri razvoju i implementaciji MES sustava u proizvodna poduzeća potrebno je držati se nekoliko principa [8]:

- 1) razvijeni sustav mora biti jednostavan za korištenje, jednostavan za instalaciju, jednostavan za konfiguraciju i prilagodbu te jednostavan za upravljanje

- 2) potrebno je minimizirati broj serverskih računala koja su skupa, a čime se mogu napraviti značajne uštede
- 3) rješenja moraju biti funkcionalno neovisna kako bi se kupcima omogućila nadogradnja i dodavanje novih komponenata u vlastite sustave bez potrebe za nadogradnjom cijelog sustava
- 4) potrebno je koristiti industrijske standarde, poput ISA-95, pri definiranju sučelja među modulima
- 5) razvoj MES-a za različita okruženja – različita postrojenja/tvornice imaju različite potrebe u vidu mrežne infrastrukture, performansi, transporta i sigurnosnih zahtjeva.

Općenito se MES moduli mogu podijeliti u tri sloja [5]:

- **aplikacijski sloj klijent/poslužitelj** – sloj vidljiv korisnicima i sloj preko kojeg se mogu povezati drugi sustavi
- **sloj integracijskog okvira** – temelj arhitekture programskog rješenja koji omogućuje infrastrukturu za tok informacija među aplikacijama
- **sloj za pohranu/upravljanje podacima** – sloj koji pruža osnovne usluge aplikacijskom sloju i sloju integracijskog okvira (npr. mrežna komunikacija).

U današnjem proizvodnom okruženju, MES i ERP sustavi su komplementarni i na taj način omogućuju operativnu usklađenost i jasnoću kakvu niti jedan od njih ne bi samostalno mogao. Zajedno tvore integrirani ekosustav i pritom daju holistički pogled na financije, nabavu upravljanje opskrbnim lancem, logistiku itd. Time povećavaju agilnost poduzeća i pružaju bolje mogućnosti predviđanja svega – od prodaje, upravljanja proizvodnjom do iskorištenosti imovine. ERP sustavi pružaju podatke o tome koje proizvode treba proizvoditi, a MES sustavi integrirajući te podatke s onima iz pogona daju upute kako te proizvode proizvoditi efikasnije, uz što manje gubitaka i sa što većim profitom. [9]

3. MES SUSTAVI U OKVIRU INDUSTRIJE 4.0

3.1. Industrija 4.0

Nove tehnologije mijenjaju način na koji će funkcionirati i kako će se graditi tvornice u budućnosti. Svijet je do sada svjedočio trima industrijskim revolucijama koje su u potpunosti preobrazile proizvodne procese, time omogućivši veliki gospodarski razvoj, ali i značajne socioekonomske, i kulturološke promjene. Prva industrijska revolucija je izumom parnog stroja i uvođenjem mehanizacije u proizvodne procese zamijenila ručni rad. Druga industrijska revolucija je podjelom rada i otkrićem novih izvora energije (nafta, plin, struja), omogućila masovnu proizvodnju. Treća industrijska revolucija je razvojem elektronike i informacijskih tehnologija omogućila automatizaciju proizvodnje. Trenutačno svjedočimo Četvrtoj industrijskoj revoluciji, poznatoj pod nazivom Industrija 4.0, koja se temelji na kibernetičko-fizičkim sustavima (engl. CPS – *Cyber-Physical Systems*), odnosno na povezivanju suvremenih informacijsko-komunikacijskih tehnologija s tradicionalnom proizvodnjom.

Svaka od navedenih industrijskih revolucija obuhvaća uvođenje novih tehnologija što je pružilo velike prilike onima koji su to rano prepoznali i implementirali u vlastita poduzeća. No, s druge strane brojna poduzeća koja su prethodno vrlo uspješno vodila vlastita poslovanja, ali su propustila na vrijeme uvesti promjene, „preko noći“ su postala zastarjela. Stoga je iznimno važno prepoznati trendove i biti u koraku s novim tehnologijama jer je tržište izrazito kompetitivno i nemilosrdno.

Industrija 4.0 pogonjena digitalnom transformacijom i inteligentnom automatizacijom vodi proizvodnju u smjeru pametnih tvornica (engl. *Smart Factories*) i pametne proizvodnje (engl. *Smart Manufacturing*) koje poduzećima omogućuju visoku razinu autonomije u proizvodnim postrojenjima, visoku razinu prilagodljivosti na novonastale promjene, visoku fleksibilnost te mogućnost izrade digitalnih modela proizvodnih sustava unutar kojih se mogu izvoditi simulacije.

Pametne tvornice podrazumijevaju digitalizirana proizvodna postrojenja koja pomoću povezanih uređaja, strojeva i proizvodnih sustava kontinuirano prikupljaju i dijele podatke.

Razvojem informacijskih tehnologija i velikim napretkom procesorske moći današnjih računala omogućeno je prikupljanje i obrađivanje ogromne količine podataka.

Ključan element koji omogućuje takvu povezanost je internet stvari (engl. IoT – *Internet of Things*). Internet stvari čini mreža uređaja koji su opremljeni senzorima pomoću kojih se prikupljaju podaci u stvarnom vremenu, a što je temelj za razumijevanje bilo kojeg procesa. Ideja Industrije 4.0 je stvoriti decentraliziranu, autonomnu mrežu pametnih proizvoda i automatizirane opreme koji surađuju u pametnim lancima opskrbe. Pametne tvornice to postižu, već spomenutim, kibernetičko-fizičkim sustavima i internetom stvari te popratnim tehnologijama koje su neizostavni dio Industrije 4.0 kao što su: aditivna proizvodnja, računarstvo u oblacima (engl. *Cloud Computing*), mobilni uređaji, autonomni roboti, analitika velikih podataka (engl. *Big Data Analytics*) itd.

3.1.1. Osnovna načela Industrije 4.0

Kako bi proizvodnja iz pojedinačnih automatiziranih jedinica prešla u potpuno integrirana, automatizirana i kontinuirano optimizirana proizvodna okruženja potrebno je primijeniti osnovna načela Industrije 4.0 [11]:

- **interoperabilnost** – mogućnost mrežnog komuniciranja, razmjene podataka i koordiniranja aktivnosti između kibernetičko-fizičkih sustava, opreme i ljudi
- **virtualizacija** – stvaranje virtualnih modela sustava i procesa
- **decentralizacija** – paralelno i autonomno kontroliranje i donošenje odluka unutar pojedinih podsustava koji međusobno mrežno komuniciraju
- **rad u stvarnom vremenu** – mogućnost prikupljanja, obrađivanja i analiziranja podataka u stvarnom vremenu radi donošenja odluka
- **orijentiranost na usluge**
- **modularnost i rekonfigurabilnost** – sposobnost autonomnog prilagođavanja na temelju trenutnih uvjeta
- **horizontalna integracija** – integracija svih dijelova opskrbnog lanca – unutar organizacije, u operacijama na više lokacija i s trećim stranama (partnerima), u oba smjera

- **vertikalna integracija** – koordiniranost sustava u vertikalnom smjeru, od najniže razine automatske kontrole procesa, preko upravljanja proizvodnjom do upravljanja resursima poduzeća (ERP).

3.1.2. Struktura pametne tvornice

Način funkcioniranja pametnih tvornica može se svesti na tri temeljna područja, a to su [12]:

1) Prikupljanje podataka

Algoritmima umjetna inteligencije (engl. AI – *Artificial Intelligence*) i suvremenim tehnologijama baza podataka olakšano je prikupljanje, strukturiranje i upravljanje različitim skupovima podataka proizvodnom lancu. Strojevi opremljeni senzorima prikupljaju i šalju podatke u sustav putem industrijskog interneta stvari (engl. IIoT - *Industrial Internet of Things*), a potom sustavi pogonjeni umjetnom inteligencijom te podatke sistematiziraju.

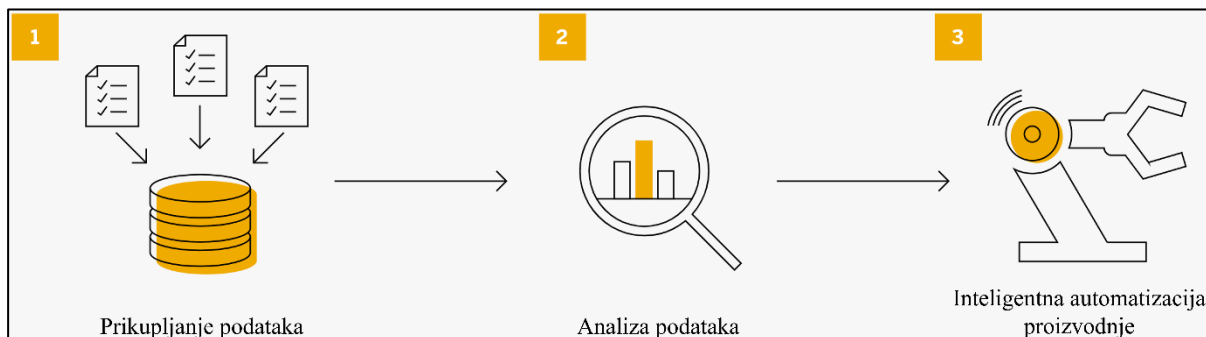
2) Analiza podataka

Kako bi se prethodno prikupljenim podacima dao smisao i kako bi se iz njih mogli izvesti zaključci o proizvodnom procesu koriste se inteligentna poslovna rješenja, odnosno metode napredne analitike i strojnog učenja. Skupovi podataka mogu se analizirati i usporediti što otvara brojne mogućnosti optimizacije procesa, od predviđanja potreba u opskrbnom lancu, predviđanja trošenja alata na strojevima do otkrivanja uzroka grešaka ili neefikasnosti na proizvodnoj liniji.

3) Inteligentna automatizacija tvornice

Nakon prikupljanja i analize podataka, uspostavlja se tok rada i šalju se naredbe strojevima i uređajima unutar sustava. Bilo da se radi o uređajima unutar proizvodnog postrojenja ili negdje dalje u logističkom, odnosno opskrbnom lancu tijekom rada i procesi se neprestano prate i samostalno optimiziraju. Primjerice, povećanjem potražnje za određenim proizvodom, strojevi se automatski alarmiraju i pojačava se proizvodnja određenog artikla.

[Slika 4] pojednostavljeno prikazuje prethodno opisane korake toka informacija u pametnoj tvornici.



Slika 4. Tok informacija u pametnoj tvornici [12]

3.1.3. Tehnologije Industrije 4.0

Tehnologije pametnih tvornica vrlo su agilne i porastom potrebe za digitalizacijom unutar poduzeća one omogućuju gotovo beskonačne mogućnosti za skaliranje, modificiranje i prilagodbu [12]. U nastavku su nabrojane tehnologije koje čine kostur proizvodnje u okvirima Četvrte industrijske revolucije.

1) Računarstvo u oblacima (engl. *Cloud Computing*)

Cloud tehnologija podrazumijeva dostupnost računalnih resursa putem interneta bilo da se radi o serverima, skladištenju podataka, bazama podataka, softveru i sl. Podaci prikupljeni pomoću senzora pohranjuju se i obrađuju u *cloudu*. *Cloud* povezanost na razini cijelog poduzeća osigurava da svaki dio poslovanja raspolaže podacima u stvarnom vremenu, čime je omogućen uvid u svu povezanu imovinu i sustave unutar opskrbnog lanca.

2) Umjetna inteligencija

Informacijski sustavi pogonjeni algoritmima umjetne inteligencije su brzi, snažni i fleksibilni u prikupljanju i analizi podataka temeljem koje se automatizirani procesi unutar pametne tvornice kontinuirano optimiziraju radi maksimalnog iskorištenja resursa i postizanja što isplativije i učinkovitije proizvodnje.

3) Strojno učenje

Prikupljanjem i analizom podataka te na temelju povijesnih podataka, pomoću strojnog učenja moguće je vršiti napredno prediktivno održavanje čime se pravovremenim upozorenjem omogućuje izbjegavanje kvarova ili zastoja sustava u budućnosti.

4) Veliki podaci (engl. *Big Data*)

Veliki skupovi podataka omogućuju prediktivnu i naprednu analitiku u pametnim tvornicama. Poduzeća su davno osvijestila stratešku vrijednost velikih podataka, no u nedostatku procesorske moći za njihovu obradu nisu bila u stanju iskoristiti ih. Digitalnom transformacijom opskrbnih lanaca i tvornica otvorene su brojne mogućnosti za optimizaciju proizvodnih procesa na temelju informacija dobivenih iz velikih podataka.

5) Industrijski internet stvari (IIoT)

Industrijski Internet stvari sastavljen je od mrežno povezanih uređaja i strojeva koji su opremljeni sensorima i jedinstvenim identifikatorima. Ti uređaji imaju mogućnost međusobnog komuniciranja, odnosno razmjenjivanja podataka. Nadalje, stariji analogni strojevi mogu se opremiti sensorima kako bi bili u mogućnosti komunicirati sa suvremenom opremom i kako bi ih se ubrzalo i učinilo efikasnijim.

6) Digitalni blizanci

Digitalni blizanci podrazumijevaju izradu virtualne, odnosno digitalne replike stroja, sustava ili procesa. Na taj način moguće je simulirati uvjete iz stvarnog svijeta i ispitivati krajnje granice sustava, konfigurirati ga na više načina i ispitati usklađenost s drugim sustavom ili sustavima, bez rizika od posljedica.

7) Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja, često zvana i 3D printanje omogućuje pametnim tvornicama inteligentnu automatizaciju proizvodnje prema trenutačnim potrebama tržišta, što je vrlo korisno kada dođe do poremećaja u opskrbnom lancu ili do nagle i iznenadne potražnje za proizvodom.

8) Virtualna (VR) i proširena stvarnost (AR)

Virtualna i proširena stvarnost korisnicima omogućuju proširiti svoja prirodna osjetila. Vrlo su pogodna za obuku zaposlenika na poslu. Primjerice, zaposlenik u proizvodnom pogonu može dobivati upute od stručnjaka koji se nalazi na potpuno drugoj lokaciji pritom imajući pregled pogona kao i sam zaposlenik. Obje ove tehnologije, u pametnim tvornicama, mogu operaterima pomoći u organiziraju proizvodnje, provođenju održavanja i popravaka opreme (npr. AR vizualna signalizacija dijela koji je potrebno zamijeniti).

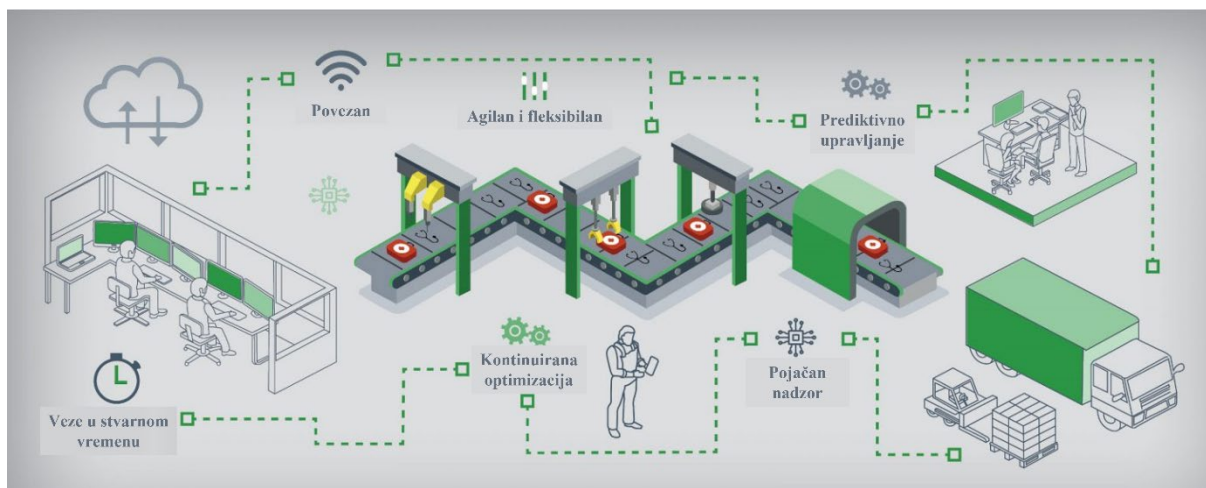
9) *Blockchain*

Blockchain tehnologija ima široke primjene u opskrbnom lancu, od „pametnih ugovora“ s dobavljačima koji isključuju potrebu za trećom stranom (potpuna transparentnost) do pružanja nepromjenjivog, trajnog digitalnog zapisa materijala, dijelova i proizvoda (poboljšana sljedivost). Nadalje, *blockchain* je pogodan za upravljanje pristupom imovini i strojevima u cijelom poslovanju – štiteći sigurnost sustava i točnosti zapisa pohranjenih u tim uređajima.

10) Moderne baze podataka

Baze podataka u stvarnom vremenu (engl. RTDB – *Real-time Database*) i moderni ERP sustavi čine „mozak“ Industrije 4.0, pametnih tvornica i inteligentnih opskrbnih lanaca. Moderne baze podataka mogu pružiti brzinu i odziv koji su potrebni današnjim poslovnim korisnicima, kao i mogućnost upravljanja složenim podacima i analitikom koje zahtijevaju moderni lanci opskrbe i pametne tvornice.

Pojednostavljeni shematski prikaz [Slika 5] cjelokupnog proizvodnog procesa u okviru pametne tvornice.



Slika 5. Shema pametne tvornice [13]

3.2. Uloge MES sustava u Industriji 4.0

U Industriji 4.0 teži se tome da proizvodna postrojenja postanu inteligentna, odnosno autonomna te da proizvodni procesi postanu što efikasniji i fleksibilniji. Informacija kao jedna od najvažnijih „sirovina“ modernog doba, ključna je za postizanje toga. S obzirom na to da su MES sustavi razvijeni kako bi isporučivali informacije o stvarnom stanju proizvodnog pogona, oni su jedan od ključnih pokretača Industrije 4.0.

Uloge MES sustava u kontekstu Industrije 4.0 [6]:

- 1) pozicioniranje u središte pametnog lanca opskrbe; koordinacija horizontalne integracije svih postrojenja i trgovačkih partnera
- 2) pomoć u daljnjoj vertikalnoj integraciji poslovnih procesa unutar ERP-a uključujući logistiku, inženjering, prodaju, kvalitetu, održavanje itd.
- 3) raspoređivanje i delegiranje zadataka na proizvodnoj liniji s obzirom na trenutačne kapacitete strojeva i trenutačan status proizvoda
- 4) implementiranje naprednih optimizacijskih algoritama radi kreiranja novih planova proizvodnje i održavanja u slučajevima pojave kvara
- 5) prikupljanje i pohranjivanje velikih podataka iz proizvodnih procesa radi kontrole kvalitete i prediktivnog održavanja

- 6) mjerenje ključnih pokazatelja uspješnosti (eng. KPI – *Key Performance Indicators*) proizvodnih procesa

Integracija umjetne inteligencije s MES-om jedna je od glavnih odrednica MES-a nove generacije. Alati umjetne inteligencije imaju mogućnost identificirati i razvrstati nelinearne i multivarijatne veze i uzorke u proizvodnom procesu koje ljudi ne mogu. Algoritmi AI-ja, poput strojnog učenja, mogu trenirati (učiti) na velikim skupovima prikupljenih podataka i na taj način otkriti uzorke u procesu u kojima se krije odgovor za rješavanje problema. Osim AI-ja, okosnica budućih MES sustava su i tehnologije proširene stvarnosti (AR) i digitalnih blizanaca (DT). DT predstavlja simulacijski model, odnosno egzaktnu kopiju fizičkog objekta u digitalnom svijetu i služi kao poveznica između inteligentnog sloja MES-a i stvarnog proizvodnog pogona. Dobivajući podatke od senzora raspoređenih po proizvodnom pogonu inteligentni sloj pomoću AI alata automatski nadzire i kontrolira stvarni pogon na temelju *inputa* od DT-a. Potom inteligentni sloj daje upute DT-u koje aktivnosti treba poduzeti u stvarnom pogonu. Nadalje, iako je krajnji cilj Industrije 4.0 razviti potpuno autonomne sustave, ljudi će i dalje imati važnu ulogu u proizvodnji. AR predstavlja sučelje preko kojeg će ljudi imati interakciju s digitalnim svijetom proizvodne linije. [6]

4. ANALIZA POSTOJEĆIH MES SUSTAVA

U ovom dijelu rada, prema literaturnom izvoru [6], sistematizirani su MES sustavi prema dva kriterija temeljem kojih je procijenjena njihova spremnost za Industriju 4.0, a to su:

- 1) sadrži li MES sustav funkcionalnosti koje bi trebao sadržavati
- 2) koliko je sposoban te zadatke izvršavati autonomno i inteligentno.

4.1. MES funkcionalnosti i razine inteligencije

MES funkcionalnosti odnose se na MESA-11 model objašnjen u poglavlju 2.2. Autori literaturnog izvora [6] u svom radu definiraju pet razina inteligencije počevši od one najmanje gdje jednostavna računalna rješenja pomažu u izvođenju zadataka efikasnije i optimalnije, do onih složenijih gdje su sustavi dovoljno inteligentni prilagođavati se različitim scenarijima u stvarnom vremenu.

Razine inteligencije [6]:

1) **Digitalizacija** – kompjuterizacija MES-a

Digitalizacija podrazumijeva dva segmenta: kompjuterizaciju i povezanost. Kompjuterizacija se odnosi na upotrebu informacijskih tehnologija radi unaprjeđenja proizvodnih praksi – primjerice stroj programiran za odrađivanje ponavljajućih radnji, a povezanost se odnosi na mrežno povezivanje, odnosno komunikaciju između takvih strojeva odakle se prikupljaju podaci u stvarnom vremenu i šalju u MES. Međutim na toj razini još uvijek nije postignuta potpuna integracija IT sustava i opreme.

2) **Vidljivost** – MES temeljen na senzorima

Vidljivost podrazumijeva prikupljanje i organiziranje podataka pomoću senzora raspoređenih po proizvodnom pogonu. Senzori mogu biti jednostavni s osnovnom funkcijom kontroliranja procesa (npr. senzor pokreta) ili nešto složeniji (npr. senzori temperature) koji mogu slati podatke MES-u i iz kojih MES može dobiti uvid u stanje procesa radi nadziranja proizvodnje, procjene efikasnosti i uočavanja izvora grešaka.

Uz senzore kontrole, vidljivost podrazumijeva i prijenos podataka između procesa, odnosno mogućnost praćenja i označavanja proizvoda pomoću identifikacijskih tehnologija kao što su barkod, RFID ili QR kod. Na taj način vidljiv je tok proizvoda, a informacije o proizvodu ažuriraju se u određenim stadijima proizvodnog procesa. Prikupljanjem velike količine podataka koje generiraju senzori omogućeno je snimanje cijelog proizvodnog procesa, od početka do kraja.

3) **Transparentnost** – dodavanje percepcije MES-u

Transparentnost podrazumijeva davanje jasnije slike snimljenog stanja. To obuhvaća pripremu i strukturiranje podataka za naprednu analizu i obradu. Iz organiziranog skupa podataka te iz povijesnih podataka upotrebom algoritama umjetne inteligencije mogu se izvući znanja o procesu.

Upotrebom pametnih senzora i AI-ja MES može dobiti jasniju percepciju i „razumijevanje“ proizvodnih pogona.

4) **Predviđanje** – korištenje metoda predviđanja u MES-u

Predviđanje podrazumijeva odgovor na pitanja o tome kakvo će biti stanje sustava u budućnosti i kako i kada će se ta promjena dogoditi. Drugim riječima, na ovoj razini MES bi trebao imati mogućnost predviđanja potrebe za održavanjem opreme u određenom trenutku u budućnosti.

5) **Prilagodljivost** – samooptimizacija MES-a

Na ovoj razini težnja je, pomoću podataka u stvarnom vremenu, donositi najbolje moguće odluke u različitim situacijama te postići mogućnost da sustav samog sebe optimizira. Takve odluke donose se trenutno, stoga MES mora biti sposoban provoditi ih u stvarnom vremenu. Prilagodljivost može obuhvaćati jednostavne dileme, ali i vrlo kompleksne situacije. Iz tog razloga MES bi trebao imati mogućnost optimiranja temeljem višekriterijalnog odlučivanja.

4.2. Usporedba MES sustava

Prikazana je usporedba [Tablica 1] funkcionalnosti prema MESA-11 modelu postojećih MES sustava: POMSnet Aquila, ABB MES, Siemens Opcenter, Proficy MES od GE Digitala, DelmiaWorks od 3DS-a i MES/MOM od Plexa.

Svi od navedenih softverskih rješenja postižu drugu razinu inteligencije – vidljivost. Prikupljajući podatke u stvarnom vremenu u cijelom proizvodnom pogonu, svako od rješenja ima mogućnost nadzora trenutačnog stanja proizvodnje. Neka od rješenja imaju funkcionalnost osnovne analize podataka te u nekim aspektima postižu treću razinu inteligencije – transparentnost. Daljnje razine inteligencije postojeći MES sustavi tek trebaju doseći. [6]

Tablica 1. Industrijska MES rješenja – funkcionalnosti [6]

Funkcionalnosti	MES					
	POMSnet	ABB MES	Siemens Opcenter	GE Digital Proficy	3DS DELMIAworks	PLEX
1) Alokacija i status resursa	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2) Planiranje operacija	✓	✓	✓	✓	✓	–
3) Otpremanje proizvodnih jedinica	✓	✓	✓	✓	–	✓
4) Kontrola dokumenata	✓	✓	✓	✓	✓	–
5) Prikupljanje podataka	✓	✓	✓	✓	✓	✓

6) Upravljanje radom	–	✓	✓	–	–	–
7) Upravljanje kvalitetom	✓	✓	✓	✓	✓	✓
8) Upravljanje procesom	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9) Upravljanje održavanjem	–	✓	✓	✓	–	–
10) Praćenje proizvoda	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11) Analiza performansi	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Donja tablica [Tablica 2] prikazuje postignutu razinu inteligencije postojećih industrijskih MES rješenja.

Tablica 2. Industrijska MES rješenja – razina inteligencije [6]

MES	Razina inteligencije
POMSnet	Vidljivost
ABB MES	Vidljivost
Siemens Opcenter	Transparentnost
GE Digital Proficy	Transparentnost
3DS DELMIAworks	Transparentnost
PLEX	Vidljivost

5. SUSTAV ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM – PAUK

5.1. Općenito o sustavu PAUK

PAUK je cloud sustav za upravljanje proizvodnjom u stvarnom vremenu koje je razvilo poduzeće Vanado d.o.o., osnovano 2012. godine sa sjedištem u Zagrebu. Poduzeće Vanado čine inženjeri strojarstva, inženjeri računarstva i ekonomski stručnjaci te uz razvoj programskih rješenja za pametno upravljanje proizvodnjom, provode i njihovu implementaciju u proizvodne pogone te vrše obuku zaposlenika kako bi pravilno mogli rukovati PAUK-om. Vanado je PAUK implementirao u brojna hrvatska poduzeća, što je rezultiralo: povećanjem kvalitete proizvoda za 22 %, smanjenjem papirologije za 61%, povećanjem produktivnosti za 20 %, te smanjenjem zastoja strojeva za 12 %. [14]

S obzirom na činjenicu da svako poduzeće ima specifične potrebe, poduzeće Vanado svoj softver prilagođava već postojećim sustavima i po potrebi razvija dodatne module.

Ime PAUK akronim je za Praćenje, analizu, uštedu i kontrolu. Sustav je podijeljen na nekoliko rješenja s pripadajućim modulima [14]:

- PAUK ERP – namijenjen računovodstvenom i finansijskom poslovanju poduzeća
 - **računi** – pregled i unos ulaznih računa, pregled izlaznih računa, poreznih knjiga, e računi
 - **imovina** – evidencija kratkotrajne i dugotrajne imovine
 - **banka** – izvodi, povezivanje ulaznih i izlaznih računa, kontiranje, nalozi
 - **plaće i naknade** – obračun plaće, ugovori, JOPPD, putni nalozi, evidencija radnog vremena
 - **knjiženje** – automatsko knjiženje, temeljnice, kartice, otvorene stavke
 - **blagajna** – blagajničko poslovanje
 - **proizvodnja** – u tijeku/završena

- PAUK MES – namijenjen cjelokupnom praćenju proizvodnje u stvarnom vremenu te povezivanju s radnim stanicama u proizvodnji i skladištima
 - **proizvodnja** – kalkulacije, radne stanice, radni nalozi, tehnološki postupci, planiranje proizvodnje, održavanje, analize rada, plan nabave
 - **osnovno** – baza artikala, šifarnik, partneri, katalogi, analize poslovanje, korisnici...
 - **komercijala** – upiti kupaca, ponude, narudžbe kupaca
 - **nabava** – upiti dobavljačima, narudžbe, interni zahtjevi za nabavu...
 - **robno-materijalno** – primke, međuskladišnice, kooperacije, skladište, inventura, otpremnice, računi
 - **prilagodba ispisa dokumenata**
 - **dodatne mogućnosti** – uređaji za praćenje rada strojeva u stvarnom vremenu, povezivanje s CAD programima, postojećim ERP-om.

- PAUK NRG – namijenjen praćenju potrošnje energenata i vode
 - **osnovno** – pregled potrošnje energije i vode u stvarnom vremenu
 - **analize i izvještaji** – analize potrošnje, dnevni/tjedni/mjesečni izvještaji
 - **alarmi** – automatsko slanje obavijesti u slučaju odstupanja od dozvoljenih vrijednosti
 - **dodatne mogućnosti** – ugradnja uređaja za praćenje potrošnje energije i vode, povezivanje s postojećim sustavom

- PAUK OS – obuhvaća cjelokupno poslovanje poduzeća
 - **osnovno** – baza artikala, šifarnik, partneri, katalogi, analize poslovanje, korisnici...
 - **komercijala** – upiti kupaca, ponude, narudžbe kupaca
 - **proizvodnja** – radni nalozi
 - **nabava** – upiti dobavljačima, narudžbe, interni zahtjevi za nabavu...
 - **robno-materijalno** – primke, međuskladišnice, kooperacije, skladište, inventura, otpremnice, računi
 - **prilagodba ispisa dokumenata**

Pogodnost ovog programskog rješenja je u tome što se sustavu pristupa putem internetskog pretraživača upisom pravilne URL adrese te nisu potrebne dodatne instalacije softvera na računalu. Time je pristup sustavu omogućen u bilo kojem trenutku, s bilo koje lokacije, naravno, uz uvjet mogućnosti spajanja na internet. To omogućuje konstantan nadzor proizvodnje te pravovremenu reakciju na novonastale probleme u proizvodnom procesu.

5.2. Laboratorij za proizvodni menadžment

Laboratorij za proizvodni menadžment, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB) opremljen je za rad u sustavu PAUK. U laboratoriju se nalazi glavno računalo putem kojeg se preko internetskog preglednika pristupa PAUK-u, a uz to laboratorij je opremljen i pisačem koji služi za ispis QR koda, skenerom koji očitava ispisani QR kod te još jednim računalom s ekranom osjetljivim na dodir koje simulira stvarnu radnu stanicu kakva se nalazi unutar proizvodnih pogona [Slika 6]. Radne stanice mrežno su povezane sa središnjim sustavom preko IIoT-a i na njima radnik dobiva radne upute, obavlja rad, ažurira stanje tijekom proizvodnje te po potrebi prijavljuje greške, zastoje ili kvarove.

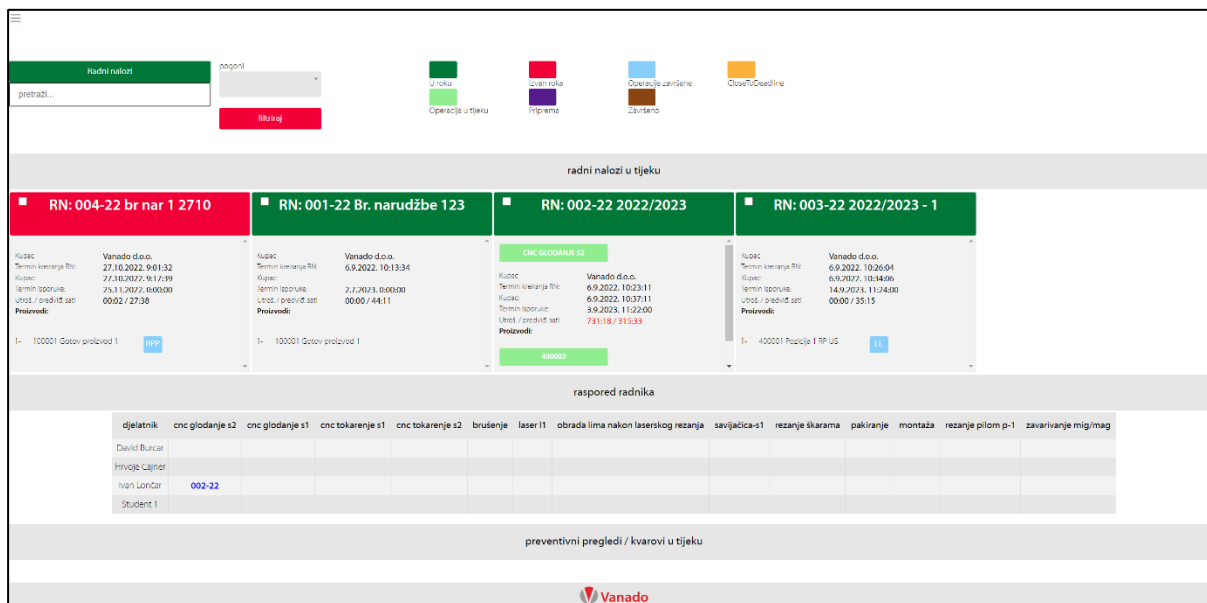


Slika 6. Laboratorij za proizvodni menadžment

5.3. Prikaz funkcionalnosti sustava PAUK

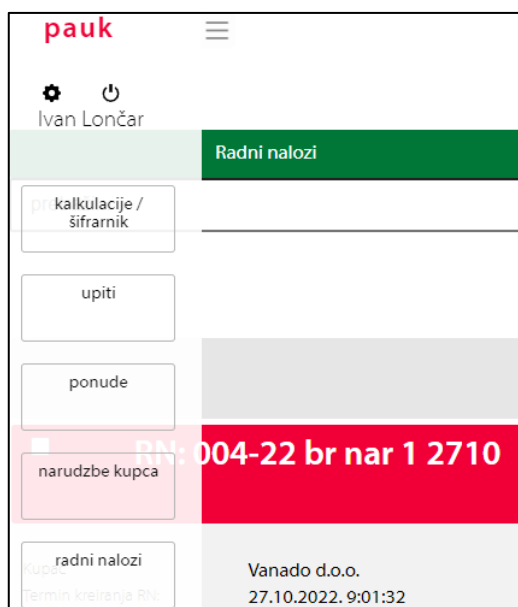
Kao što je već prethodno spomenuto, PAUK je *cloud* sustav za upravljanje proizvodnjom te mu se pristupa putem internetskog pretraživača. Upisom adrese „<https://fsb.vanado.hr>“ i nakon prijave u sustav s korisničkim imenom i lozinkom otvara se sučelje sustava na kojem je prikazan početni zaslom na kojem su vidljivi trenutačno aktivni radni nalozi, raspoređenost radnika po operacijama te trenutačni kvarovi (ako postoje) [Slika 7].

Status radnog naloga indiciran je pripadajućom bojom.



Slika 7. PAUK – početni zaslon

Odabirom izbornika u gornjem lijevom kutu [Slika 8] otvaraju se sve dostupne funkcije u PAUK-u od kojih su neke: šifrnarnik, narudžbe, radni nalozi, računi, planiranje proizvodnje, analiza rada, otpremnice itd.



Slika 8. PAUK – izbornik

Na primjeru gotovog proizvoda prikazat će se tijekom aktivnosti u sustavu PAUK. Odabirom kartice šifrnarnik otvara se forma u kojoj se definiraju materijali, proizvodi od dobavljača,

sklopovi, usluge koje poduzeće nudi itd. U podkartici gotovi proizvodi definirat će se vlastiti proizvod poduzeća [Slika 9].

r. broj	vrijeme izrade	kategorija	naziv	šifra proizvoda	index	broj komada	kalkulativna cijena[hrk/jm]	proizvodna cijena[hrk/jm]	jedinica	broj nacrti
1.	06.09.2022. 10:09	Gotovi proizvodi	Gotov proizvod 1	100001	1,00	1,00	4.169,81	0	[kom]	1987654321

Slika 9. PAUK – kreiranje gotovog proizvoda

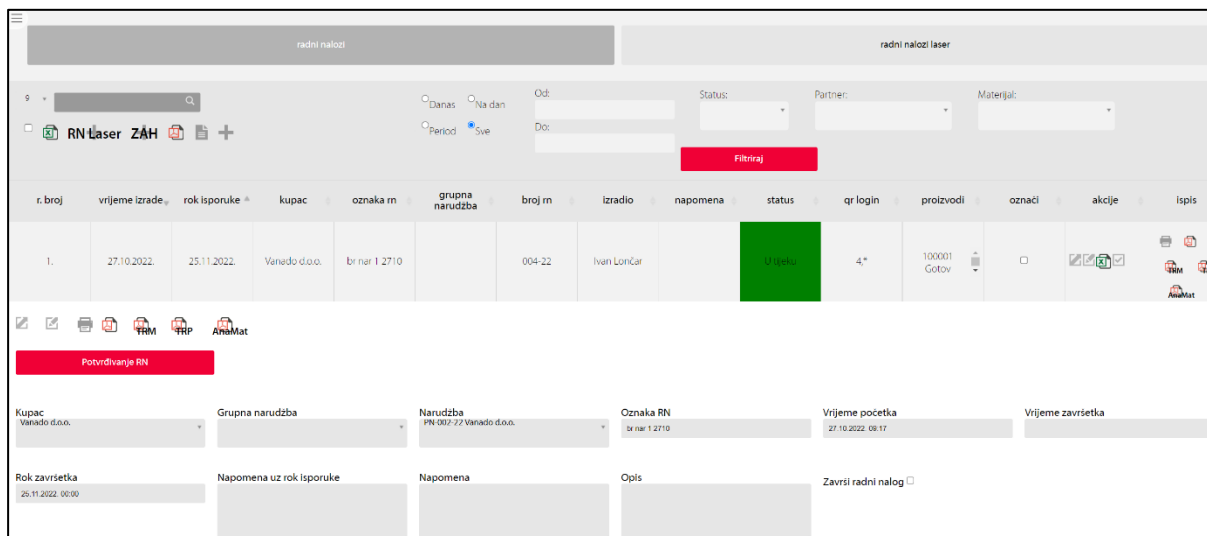
Kreirani proizvod sada postaje dostupan za odabir unutar kartice narudžbe kupca [Slika 10] gdje se definiraju daljnje specifikacije narudžbenice. U narudžbenici su vidljive informacije o broju narudžbe, o kupcu, naručenom artiklu (specifikacije, tehnološke operacije) itd.

r. broj	broj narudžbe	broj ponude	broj upita	kupac	šifra	vrijeme izrade	proizvodi	ukupna cijena bez popusta	popust	ukupna cijena sa popustom	ukupna cijena s popustom i pdv-om	valuta	akcije	ispis
1.	PN-002-22	PO-001-22		Vanado d.o.o.	1	27.10.2022.	100001 Gotov	7.339,47	0,00	7.339,47	9.174,34	HRK		

r. broj	artikl	klak. [1 piece]	kolicina	klak. [/piece]	marža [%]	prodajna cijena [/piece]	popust [%]	iznos [hrk]	porez	kolicina za isporuku	opis	rok isporuke	stanje
1	100001 / 10006855 Gotov proizvod 1 Gotovi proizvodi	4.130.8145	5	1.502.8145	-2.322647	1.487.803125	0	7.339.47	Bez oslobođenja				0


Slika 10. PAUK – kreiranje narudžbe

Kreirana narudžbenica postaje dostupna u kartici radni nalozi, nakon čega se kreira radni nalog. U kartici radni nalozi vidljivi su trenutačni radni nalozi, kao i njihov status [Slika 11].



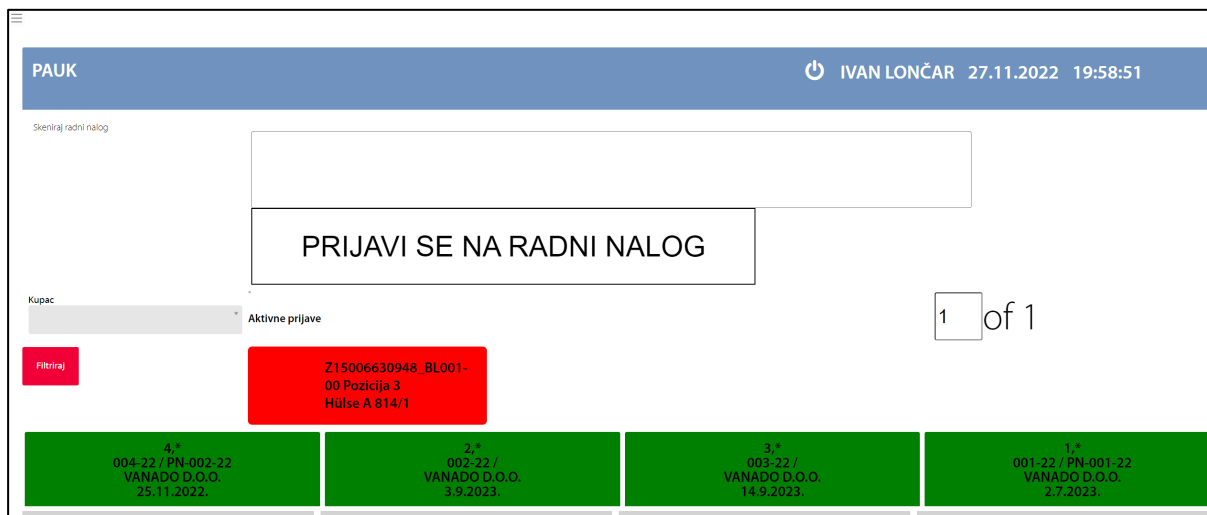
Slika 11. PAUK – kreiranje radnog naloga

Radi sljedivosti proizvodnje svaki radni nalog kao i nacrt (tehnička dokumentacija) označen je jedinstvenim je QR kodom, što je vidljivo na primjeru ispisanog radnog naloga [Slika 12].

Kupac:	Vanado d.o.o.		Br. Narudžbenice:		br nar 1 2710					
Oznaka RN:	RN 004-22									
Rok isporuke:	25.11.2022.	Izradio:	David Burcar	Spec. mat						
 4,23	Naziv:			Količina:						
	X SV NW 25 HL VA			5						
Br. nacrta:			Vanjska usluga:							
HS-ROV-00713-1, KM 36 VA										
R.b.	Šifra	Naziv materijala	Broj kom	Širina [mm]	Dužina [mm]	Površina / Dužina [m2 / mm]	Mjerna jedinica	Potrebna količina	Stanje skladišta	Lokacija
1	500006	Šeskant puni 41mm 1.4571	5		75	75	[kg]	4,2825	0	
R.b.	Operacija		Količina	Predviđeno vrijeme		Samokontrola / Potpis				
1	REZANJE PILOM			00:02:30						
2	CNC TOKARENJE			06:21:15						
3	PAKIRANJE			00:25:00						

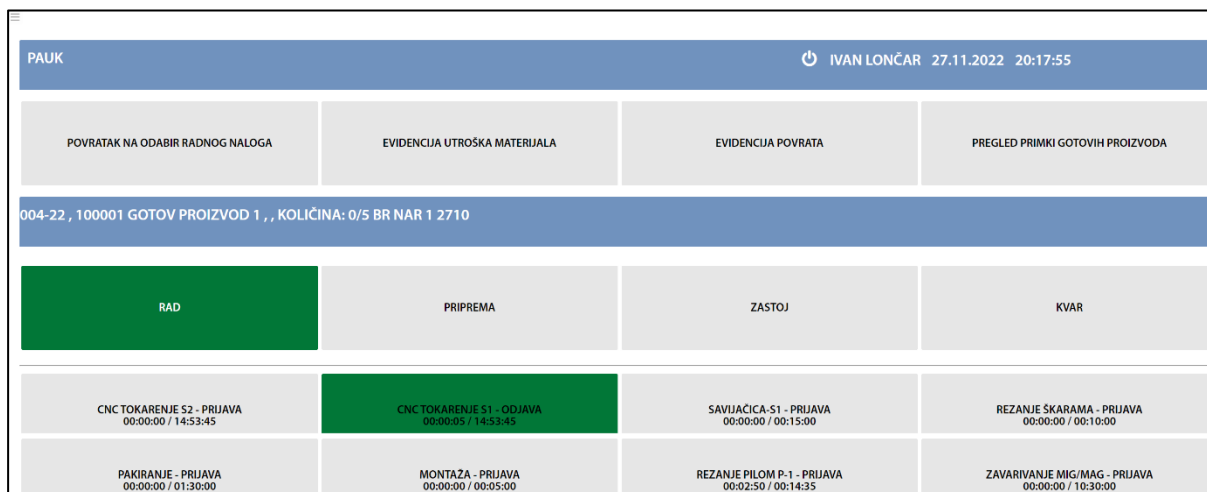
Slika 12. Primjer radnog naloga (ispis)

Nakon kreiranja radnog naloga, isti postaje dostupan u sučelju na radnoj stanici [Slika 13]. Na radnu stanicu radnik se prijavljuje RFID karticom ili unosom korisničkog imena i lozinke.



Slika 13. PAUK – radna stanica - sučelje

Nakon prijave u sustav odabire se radni nalog ili se skenira QR kod kako bi se učitao radni nalog. Time započinje rad operatera na radnoj stanici. U konkretnom slučaju radi se o glodanju [Slika 14]. Po završetku rada radnik odjavljuje aktivnu operaciju te se nakon toga proizvod šalje na iduću operaciju [Slika 15].

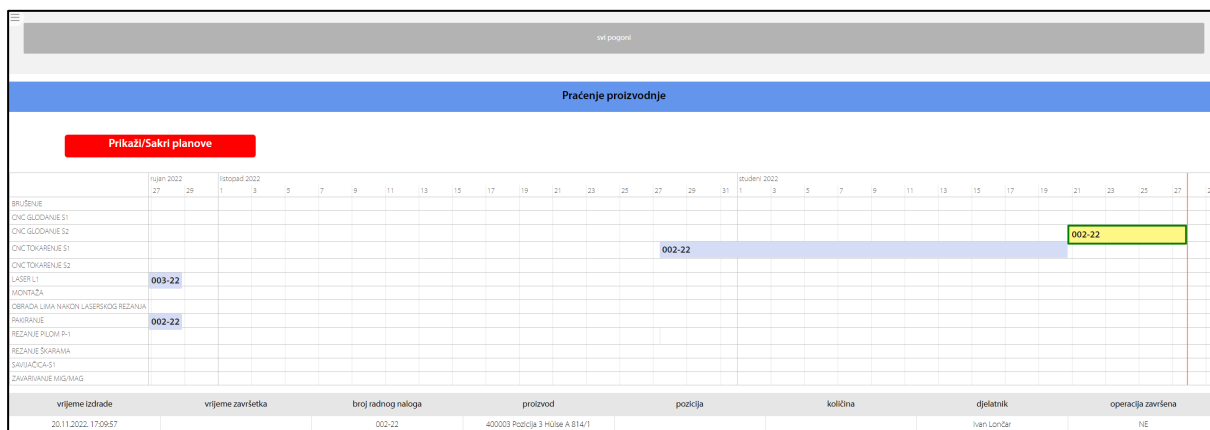


Slika 14. PAUK – radna stanica – aktivna operacija

ODJAVA - RN	Proizvod	Količina(KOM)	Skart	Sarža materijala	OZNACI SVE
100001 Gotov proizvod 1 odrađeno: 0/5 br nar 1 2710 Sjedeća operacija: ZAVARIVANJE MIG/MAG		0		Izaberi	<input type="checkbox"/> Završi operaciju <input type="checkbox"/> Završi označene pozicije
ODJAVA			ODUSTANI		

Slika 15. PAUK – radna stanica – odjava operacije

Na radnoj stanici, uz prijavu na pojedine operacije, postoje kartice za prijavu zastoja i kvarova [Slika 13]. Nadalje, unosom informacija na računalo radne stanice, ažuriraju se podaci u središnjem sustavu. Tako je u kartici „real-time“ proizvodnja tijekom operacija u proizvodnom pogonu prikazan Ganttovim dijagramom [Slika 16].



Slika 16. PAUK – praćenje proizvodnje

U kartici analiza rada moguće je vidjeti podatke vezane za radnike, proizvode, materijale ili vrijeme trajanja tehnoloških operacija [Slika 17]

Tehnološki postupci											
tehnološki postupak	pozicija / sklop	broj nacrta	trajanje - planirano [h]	trajanje - odrađeno [h]	priprema - planirano [h]	priprema - odrađeno [h]	količina - odrađeno	količina - planirano	zastoj [h]	>cijena - odrađeno [hrk]	>potrebno [hrk]
Svi			5000,00	1746,32	13,00,00	1127,40	130,00	270,00	04:10:12	0,00	0,00

Slika 17. PAUK – analiza rada – tehnološki postupci

Primjer izvještaja produktivnosti radnika u „xlsx“ formatu programskog paketa MS Excel [Slika 18]. U izvještaju su vidljivi ukupno radno vrijeme pojedinog radnika, ukupan broj obrađenih radnih naloga, efikasnost radnika, vrijeme zastoja i kvara stroja itd.

15. srpanj 2022.

PRAĆENJE PRODUKTIVNOSTI

Glodanje 3-osno - prvo stezanje

1 Radnik 1			2 Radnik 2			3 Radnik 3			4 Radnik 4			5 Radnik 5		
Polazak rada (h):	6:37		Polazak rada (h):	6:59		Polazak rada (h):	14:06		Polazak rada (h):	16:15		Polazak rada (h):	21:54	
Završetak rada (h):	15:55		Završetak rada (h):	16:40		Završetak rada (h):	15:00		Završetak rada (h):	21:19		Završetak rada (h):	22:54	
Ukupno radno (h):	09:19		Ukupno radno (h):	09:42		Ukupno radno (h):	00:55		Ukupno radno (h):	05:05		Ukupno radno (h):	01:01	
Ukupna proizvedena količina - R:	0		Ukupna proizvedena količina - R:	0		Ukupna proizvedena količina - R:	2		Ukupna proizvedena količina - R:	1		Ukupna proizvedena količina - R:	1	
Ukupna proizvedena količina - S:	0		Ukupna proizvedena količina - S:	0		Ukupna proizvedena količina - S:	0		Ukupna proizvedena količina - S:	0		Ukupna proizvedena količina - S:	0	
Ukupno broj BN:	1		Ukupno broj BN:	1		Ukupno broj BN:	1		Ukupno broj BN:	1		Ukupno broj BN:	1	
PRIPREMA STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		PRIPREMA STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		PRIPREMA STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		PRIPREMA STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		PRIPREMA STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00	
EFKATIVAN RAD - ukupno vrijeme (h):	09:19		EFKATIVAN RAD - ukupno vrijeme (h):	09:42		EFKATIVAN RAD - ukupno vrijeme (h):	00:55		EFKATIVAN RAD - ukupno vrijeme (h):	05:05		EFKATIVAN RAD - ukupno vrijeme (h):	01:01	
ZASTOJ STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		ZASTOJ STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		ZASTOJ STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		ZASTOJ STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		ZASTOJ STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00	
KVAR STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		KVAR STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		KVAR STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		KVAR STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		KVAR STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00	
Ukupno planirano vrijeme			Ukupno planirano vrijeme			Ukupno planirano vrijeme			Ukupno planirano vrijeme			Ukupno planirano vrijeme		
Efikasnost	0%		Efikasnost	5,154639%		Efikasnost	100%		Efikasnost	83,606557%		Efikasnost	344,262295%	
Ukupno broj BN	1		Ukupno broj BN	1		Ukupno broj BN	1		Ukupno broj BN	1		Ukupno broj BN	1	
Operacija u toku ukupno vrijeme (h):	09:19		Operacija u toku ukupno vrijeme (h):	09:42		Operacija u toku ukupno vrijeme (h):	00:55		Operacija u toku ukupno vrijeme (h):	05:05		Operacija u toku ukupno vrijeme (h):	01:01	
PROJEKCIJA BIZNA - ukupno vrijeme (h):	0,00		PROJEKCIJA BIZNA - ukupno vrijeme (h):	0,00		PROJEKCIJA BIZNA - ukupno vrijeme (h):	0,00		PROJEKCIJA BIZNA - ukupno vrijeme (h):	0,00		PROJEKCIJA BIZNA - ukupno vrijeme (h):	0,00	

Tokarenje CNC - drugo stezanje

1 Radnik 6			2 Radnik 7			3 Radnik 8			4 Radnik 9		
Polazak rada (h):	7:01		Polazak rada (h):	9:53		Polazak rada (h):	11:44		Polazak rada (h):	15:17	
Završetak rada (h):	14:57		Završetak rada (h):	10:29		Završetak rada (h):	14:40		Završetak rada (h):	22:51	
Ukupno radno (h):	07:57		Ukupno radno (h):	00:38		Ukupno radno (h):	02:57		Ukupno radno (h):	07:34	
Ukupna proizvedena količina - R:	108		Ukupna proizvedena količina - R:	5		Ukupna proizvedena količina - R:	103		Ukupna proizvedena količina - R:	80	
Ukupna proizvedena količina - S:	0		Ukupna proizvedena količina - S:	0		Ukupna proizvedena količina - S:	0		Ukupna proizvedena količina - S:	0	
Ukupno broj BN:	1		Ukupno broj BN:	1		Ukupno broj BN:	1		Ukupno broj BN:	1	
PRIPREMA STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		PRIPREMA STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		PRIPREMA STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		PRIPREMA STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00	
EFKATIVAN RAD - ukupno vrijeme (h):	07:57		EFKATIVAN RAD - ukupno vrijeme (h):	00:38		EFKATIVAN RAD - ukupno vrijeme (h):	02:57		EFKATIVAN RAD - ukupno vrijeme (h):	07:34	
ZASTOJ STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		ZASTOJ STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		ZASTOJ STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		ZASTOJ STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00	
KVAR STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		KVAR STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		KVAR STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00		KVAR STROJA - ukupno vrijeme (h):	00:00	
Ukupno planirano vrijeme			Ukupno planirano vrijeme			Ukupno planirano vrijeme			Ukupno planirano vrijeme		
Efikasnost			Efikasnost			Efikasnost			Efikasnost		
Ukupno broj BN	1		Ukupno broj BN	1		Ukupno broj BN	1		Ukupno broj BN	1	
Operacija u toku ukupno vrijeme (h):	07:57		Operacija u toku ukupno vrijeme (h):	00:38		Operacija u toku ukupno vrijeme (h):	02:57		Operacija u toku ukupno vrijeme (h):	07:34	
PROJEKCIJA BIZNA - ukupno vrijeme (h):	0,00		PROJEKCIJA BIZNA - ukupno vrijeme (h):	0,00		PROJEKCIJA BIZNA - ukupno vrijeme (h):	0,00		PROJEKCIJA BIZNA - ukupno vrijeme (h):	0,00	

Slika 18. Praćenje produktivnosti radnika (Excel)

5.4. Prijedlog unaprjeđenja funkcionalnosti sustava PAUK

Izuzevši gantogramski prikaz tijeka proizvodnje (raspored operacija i strojeva) i prikaz trenutnog statusa resursa, odnosno operacija nekom od predodređenih boja koje pokazuju je li nešto u tijeku, kasni, dostupno ili pak nedostupno, većina informacija unutar sustava PAUK prikazuje se tablično, što osobama koje nisu u potpunosti ovladale korištenjem sustava može djelovati zbunjujuće. To se naročito odražava pri analizi proizvodnje gdje bi prikaz podataka u formi dijagrama uvelike olakšao iščitavanje podataka, a posljedično i izvođenje zaključaka. Samim time ubrzao bi se proces uočavanja grešaka i pojave varijacija u proizvodnom procesu. Stoga, prijedlog potencijalnih unaprjeđenja funkcionalnosti sustava PAUK usredotočen je na vizualizaciju prikupljenih podataka. Pritom oslanjajući se na dva alata, a to su Pareto analiza i statistička kontrola procesa (SPC).

5.4.1. Pareto analiza

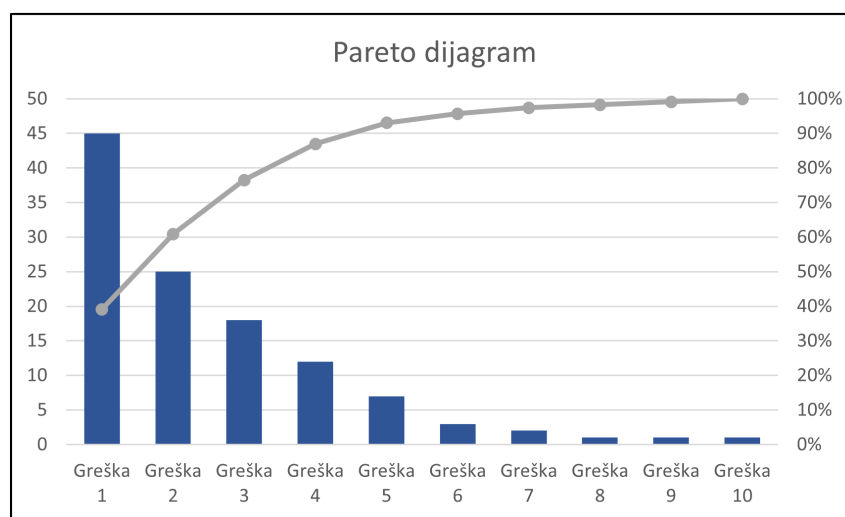
Pareto analiza neizostavan je alat kontrole kvalitete, vrlo pogodan za uočavanje najučestalijih grešaka u proizvodnji. Ona se temelji na Paretovom principu odnosno pravilu 80-20, koje govori kako, u slučaju velikog broja ishoda, 80 % posljedica dolazi od 20 % uzroka. Pareto analizom otkrivaju se problematična područja u proizvodnom procesu koja imaju najveći utjecaj na proizvodnju bilo da se radi o nesukladnim jedinicama, utrošenom vremenu ili troškovima. Pareto dijagram je stupičasti dijagram koji na apscisi prikazuje vrstu nesukladnosti, a na ordinati učestalost pojave te nesukladnosti. Dijagram sadrži i kumulativnu krivulju pomoću koje se lako određuje koje su nesukladnosti najzastupljenije i u kojem postotku.

Na primjeru proizvodnje, Pareto dijagramom mogu se prikazati kategorije nesukladnih jedinica pri čemu bi na apscisi bile definirane grupe grešaka na proizvodu. To mogu biti: nedovoljna kvaliteta površine materijala, pukotina na materijalu, nedovoljna tvrdoća materijala, srh, odstupanje dimenzija itd.

Zatim, za slučaj zastoja proizvodnje greške mogu biti: kvar stroja, izmjena alata na stroju, čekanje materijala, planirani zastoj itd.

Svaka nesukladna jedinica te svako zaustavljanje proizvodnje znači trošak za poduzeće. Pareto analiza donosi odluku na vrlo jednostavan način ukazuje na probleme na koje se treba usredotočiti i olakšava daljnji pristup njihovom rješavanju (otklanjanju).

Na ilustrativnom primjeru [Slika 19] lako je vidljivo kako 80 % grešaka čine greške 1, 2 i 3.



Slika 19. Primjer Pareto dijagrama

Nakon utvrđivanja najzastupljenijih grešaka potrebno je provesti dublju analizu kako bi se ustanovio uzrok njihova nastanka. Jedan od najčešće primjenjivanih alata za otkrivanje uzročno-posljedičnih veza su korelacijska i regresijska analiza. Korelacija je statistička mjera povezanosti dviju varijabli. Izražava se korelacijskim koeficijentom r koji može poprimiti vrijednosti od -1 do 1. Regresijskom analizom nastoji se utvrditi oblik krivulje koji najbolje opisuje povezane varijable, pri čemu je poznato koja je varijabla nezavisna (uzrok), a koja zavisna (posljedica).

5.4.2. Statistička kontrola procesa (SPC)

Statistička kontrola procesa podrazumijeva primjenu statističkih metoda u cilju mjerenja, kontrole i nadziranja proizvodnog procesa. Statističkom kontrolom procesa nastoji se rano uočiti izvore značajnih varijacija u procesu kako bi se spriječila proizvodnja nesukladnih jedinica i stvaranje dodatnog troška.

5.4.2.1. Kontrolne karte

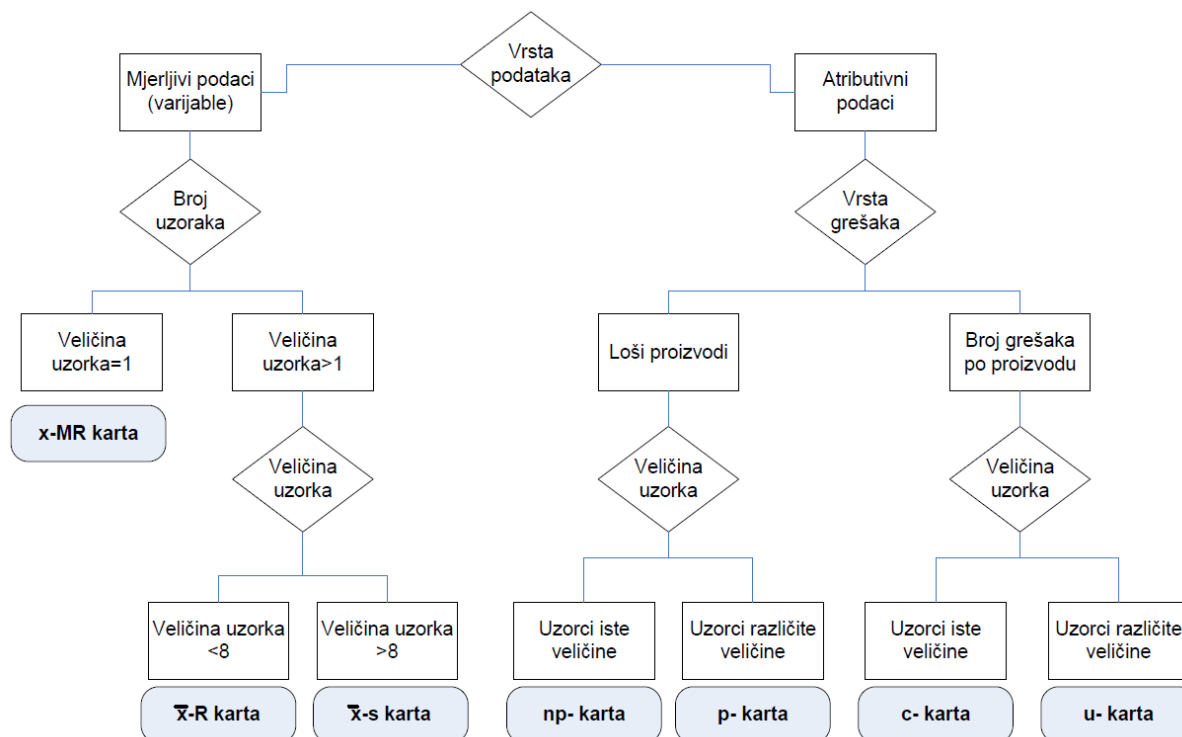
Najznačajniji alat statističke kontrole procesa su kontrolne karte koje je 1920-ih godina, kao zaposlenik *Bell Telephone Laboratories*, razvio Dr. Walter A. Shewhart. Kontrolne karte temeljni su pokazatelj mogućnosti poboljšavanja kvalitete procesa ili proizvoda [15]. Uzimajući, slučajnim odabirom, veći broj malih uzoraka iz procesa, pomoću kontrolnih karata nastoji se uočiti je li proces pod kontrolom. Uzroci varijacija u procesu mogu biti:

- 1) slučajni, procesu svojstveni, uzroci varijacija
- 2) posebni uzroci varijacija koji dolaze iz vanjskih izvora i koji upućuju na činjenicu da se proces nalazi izvan statističke kontrole.

Kada proces varira isključivo pod utjecajem procesu svojstvenih uzroka, to znači da je proces pod kontrolom.

Kontrolne karte dijele se u dvije skupine: one za mjerljive karakteristike (kontinuirane varijable) te one za atributivne karakteristike (diskretne varijable). Kontrolne karte za mjerljive karakteristike su: \bar{x} - MR karta (ili I - MR), \bar{x} - R karta, \bar{x} - s karta, $CuSum$ i $EWMA$. Kontrolne karte za atributivne karakteristike su: np karta, p karta, c karta i u karta. Matematička podloga za kontrolne karte za mjerljive karakteristike je normalna raspodjela, a za atributivne binomna i Poissonova raspodjela. [15] Izbor kontrolne karte prikazan je dijagramom [Slika 20].

Za praćenje proizvodnje u stvarnom vremenu pogodna je kontrolna karta individualnih vrijednosti x - MR , a za periodično praćenje kontrole pogodne su \bar{x} - R karta, \bar{x} - s karta ovisno o veličini uzoraka. Za praćenje proizvodnje u smislu zadovoljava li proizvod ili ne pogodna je p karta, dok je za mjerenje broja nesukladnosti po jedinici pogodna u karta itd.



Slika 20. Dijagram izbora kontrolne karte [15]

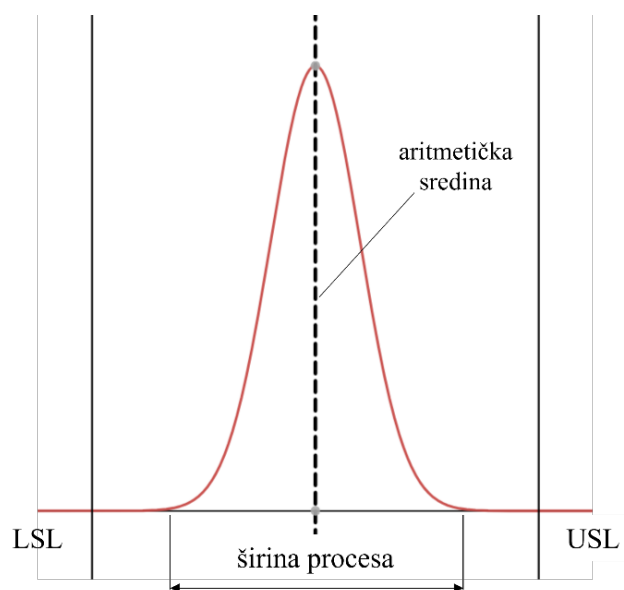
5.4.2.2. Procjena sposobnosti procesa

Proces je sposoban ako se raspon varijacije procesa (širina procesa) nalazi unutar tolerancijskog područja, odnosno unutar zahtijevanih granica specifikacije ($6\sigma \leq T$). Tolerancijsko područje određeno je gornjom (USL) i donjom granicom specifikacije (LSL), a raspon varijacije procesa određen je gornjom (UCL) i donjom (LCL) kontrolnom granicom koje su udaljene tri standardne devijacije (σ) u pozitivnom i negativnom smjeru od aritmetičke sredine uzorka (\bar{x}).

Za izračun sposobnosti procesa koriste se indeksi sposobnosti procesa C_p i C_{pk} . C_p je potencijalna sposobnost procesa i definira se kao omjer razlike gornje i donje granice specifikacije i širine procesa ($k\sigma$) (1). C_{pk} je demonstrirana izvrsnost procesa i definira se kao omjer udaljenosti aritmetičke sredine od najbliže granice specifikacije i udaljenosti od ruba procesa (2). C_{pk} pokazuje i koliko je proces centriran između granica specifikacije. Pri procjeni sposobnosti procesa podaci moraju biti normalno distribuirani i proces mora biti pod kontrolom.

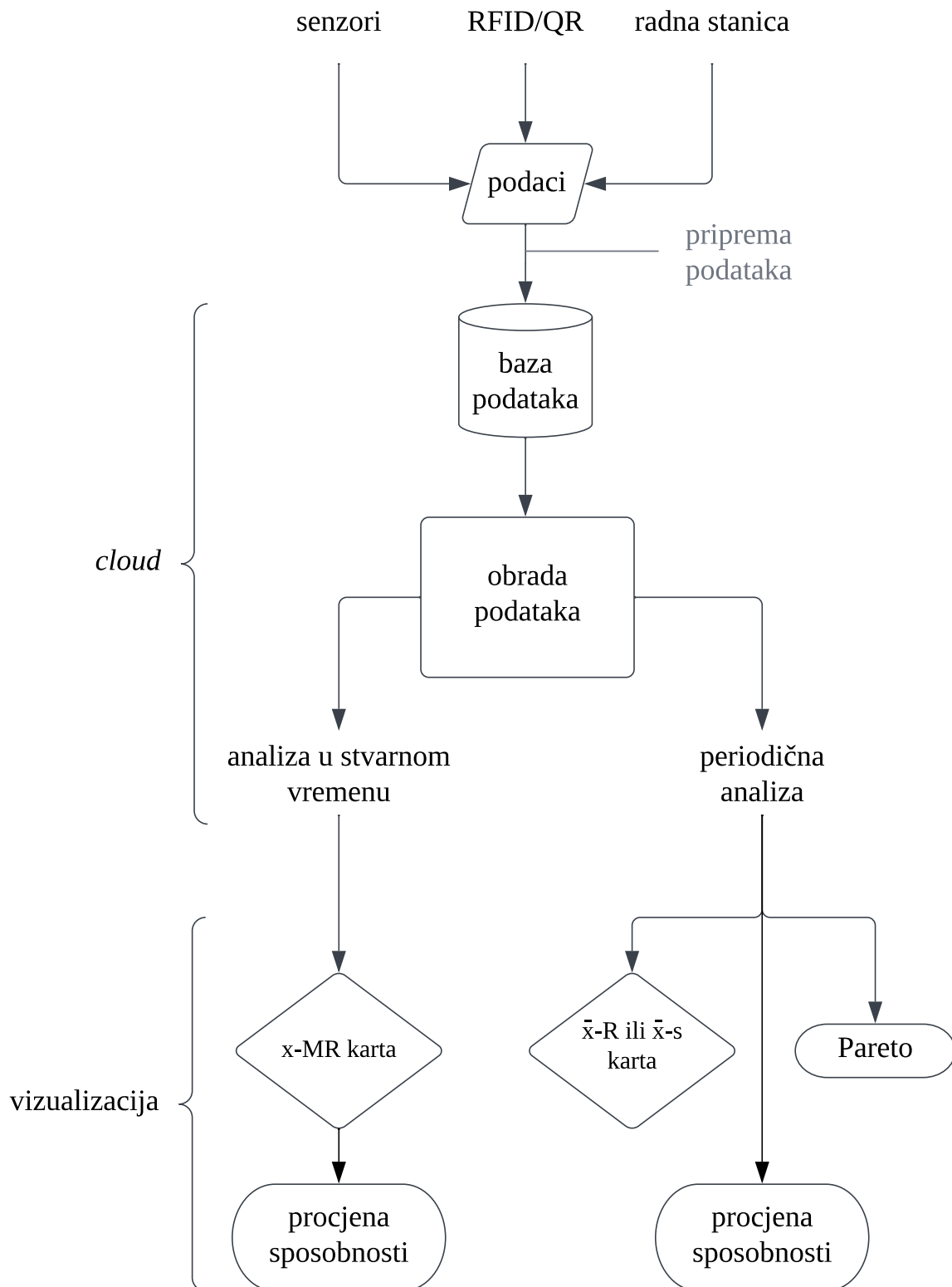
$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

$$C_{pk} = \min\left(\frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma}\right) \quad (2)$$



Slika 21. Dijagram normalne raspodjele unutar zahtijevanih granica specifikacija

5.4.3. Konceptualna razrada unaprjeđenja i simulirani primjeri primjene



Slika 22. Dijagram tijeka aktivnosti u analizi procesa

Proizvodne linije, odnosno strojevi i oprema u proizvodnom pogonu opremljeni su senzorima koji generirane podatke zapisuju u vlastitu memoriju te se automatski, putem interneta, šalju u središnji sustav. Po završetku tehnoloških operacija, operateri putem terminala na radnoj stanici unose podatke o broju obrađenih komada, nastalim nesukladnostima itd. Nadalje, svakom materijalu, sirovini, proizvodu, nacrtu proizvoda dodjeljuje se jedinstvena oznaka koju operater ili stroj skenira kako bi se u svakom trenutku moglo pratiti stanje pojedinog resursa. Prikupljeni podaci pohranjuju se u bazu podataka, šalju u MES sustav i pripremaju za analizu.

U stvarnom vremenu podaci se mijenjaju svake sekunde i iz tog razloga pogodna je x - MR karta. MR (engl. *moving range*) karta upotrebljava se u situacijama kada statistički uzorak nije moguć, odnosno kada je veličina uzorka $n=1$, stoga se uspoređuje trenutačno stanje s onim prethodnim. U nastavku su dane jednadžbe za izračun aritmetičke sredine za individualne vrijednosti mjerenja (3) i za raspon koji se mijenja (4) te jednadžbe za izračun kontrolnih granica za individualne vrijednosti mjerenja (5) i za vrijednosti MR -a koji se mijenja (6), (7).

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^k x_i}{k} \quad (3)$$

$$\overline{MR} = \frac{\sum_i^k |x_i - x_{i-1}|}{k - 1} \quad (4)$$

$$U_L CL = \bar{x} \pm E_2 \overline{MR} \quad (5)$$

$$UCL = D_4 \overline{MR} \quad (6)$$

$$LCL = D_3 \overline{MR} \quad (7)$$

Gdje je:

x_i	vrijednost u točki i
\bar{x}	aritmetička sredina uzorka

k	broj uzetih uzoraka
\overline{MR}	aritmetička sredina raspona koji se mijenja
E_2	konstanta x - MR kontrolne karte
D_3	konstanta x - MR kontrolne karte
D_4	konstanta x - MR kontrolne karte.

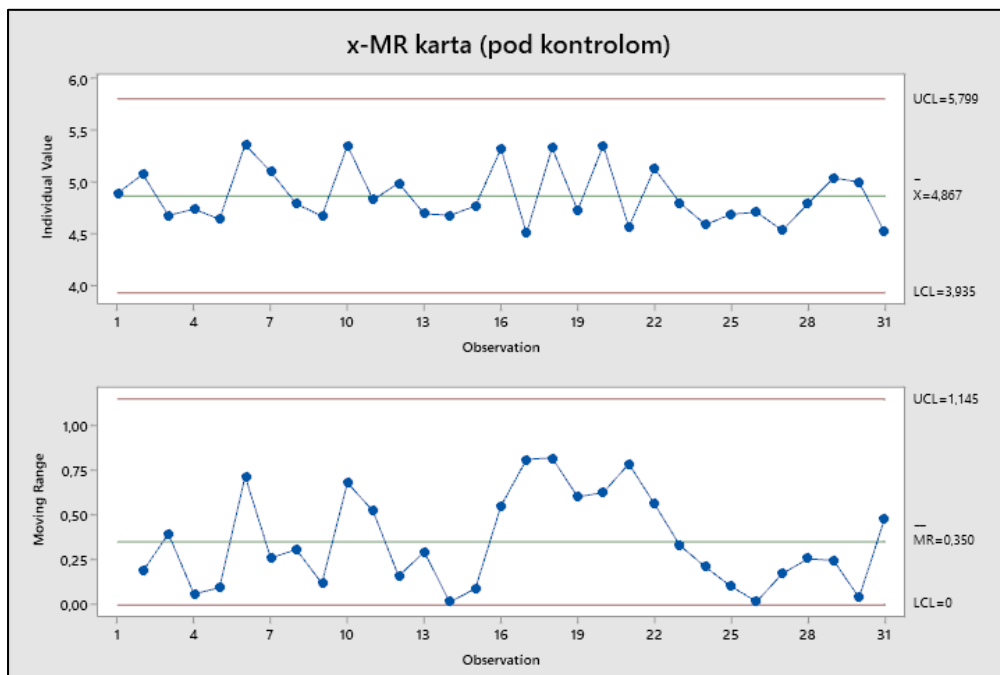
Vrijednosti konstanti za izračun prethodno napisanih dane su u nastavku [Tablica 3].

Tablica 3. Vrijednosti konstanti za x - MR kontrolne karte [15]

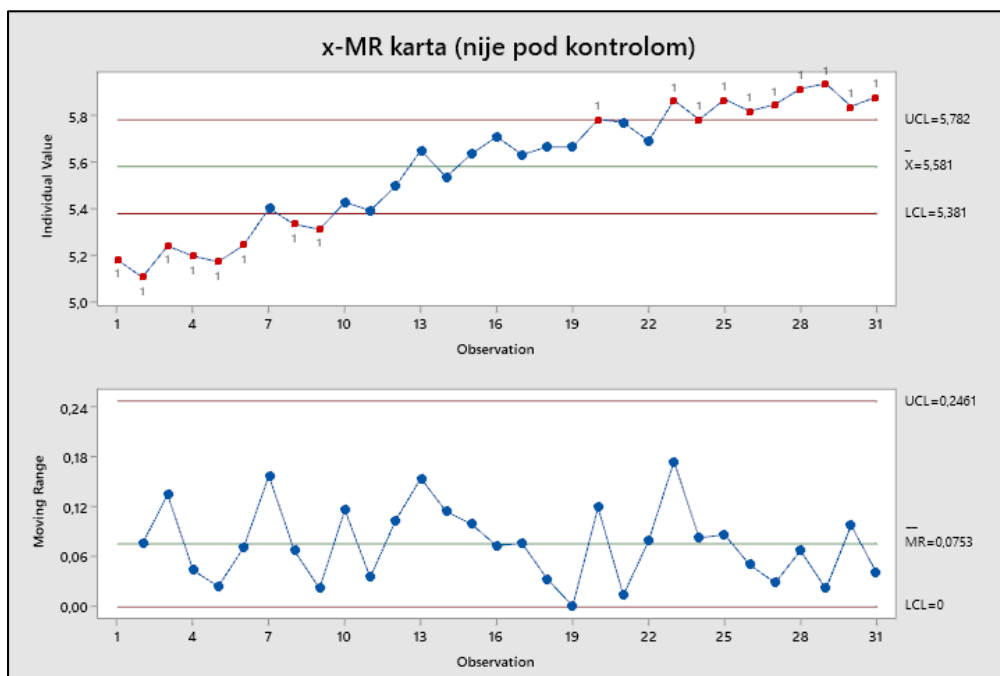
x - MR				
veličina uzorka	E_2	d_2	D_3	D_4
2	2,660	1,128	-	3,267
3	1,772	1,693	-	2,574
4	1,457	2,059	-	2,282
5	1,290	2,326	-	2,114
6	1,184	2,534	-	2,004
7	1,109	2,704	0,076	1,924
8	1,054	2,847	0,136	1,864
9	1,010	2,970	0,184	1,816
10	0,975	3,078	0,223	1,777

U nastavku su prikazana dva ilustrativna primjera procesa koji se odnosi na vremena trajanja tehnoloških operacija u minutama. [Slika 23] prikazuje proces koji je pod kontrolom (mjerene vrijednosti nalaze se unutar kontrolnih granica), dok [Slika 24] prikazuje proces koji nije pod kontrolom (mjerene vrijednosti izlaze iz okvira kontrolnih granica) i koji ima uzlazni trend. Primjerice, uzlazni trend može ukazivati na postepeno trošenje alata ili na umor operatera što rezultira sve duljim trajanjima operacija.

Sličan proračun provodio bi se i za ostale kontrolne karte spomenute u dijagramu [Slika 22].



Slika 23. Simulirani primjer x-MR karte procesa pod kontrolom

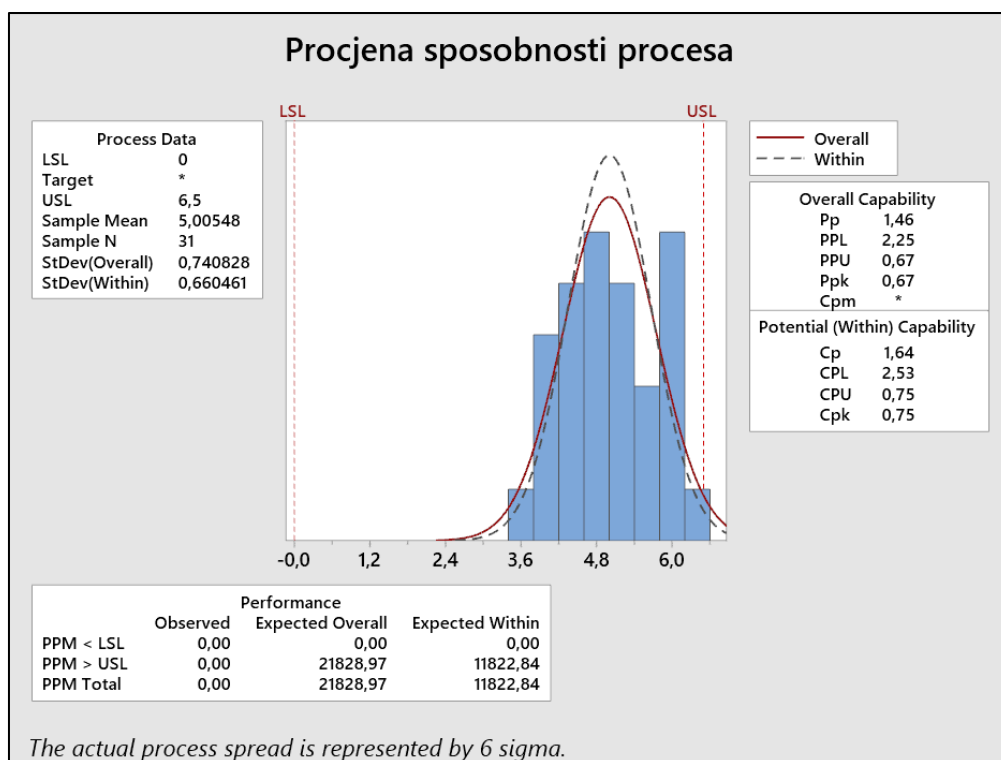


Slika 24. Simulirani primjer x-MR karte procesa koji nije pod kontrolom

Dalje slijedi ispitivanje sposobnosti procesa. Proračun C_p -a i C_{pk} -a provodi se prema jednadžbama (1) i (2). Ispitana je sposobnost prethodno prikazanog procesa [Slika 22].

Za procese u kojima se mjeri vrijeme trajanja aktivnosti (npr. vrijeme trajanja obrade odvajanjem čestica) donja granica specifikacije (LSL) se ne definira, odnosno iznosi 0 jer se teži tome da tok proizvoda bude čim brži kako bi se što prije isporučio kupcu, a gornja granica specifikacije (USL) određuje se prema potrebama kupaca, odnosno prema ciljanom vodećem vremenu određuje se trajanje ostalih operacija u procesu.

U konkretnom primjeru [Slika 25] gornja granica specifikacije izvođenja tehnološke operacije iznosi 6,5 min, a prema dijagramu je vidljivo kako proces malo prelazi tu granicu.

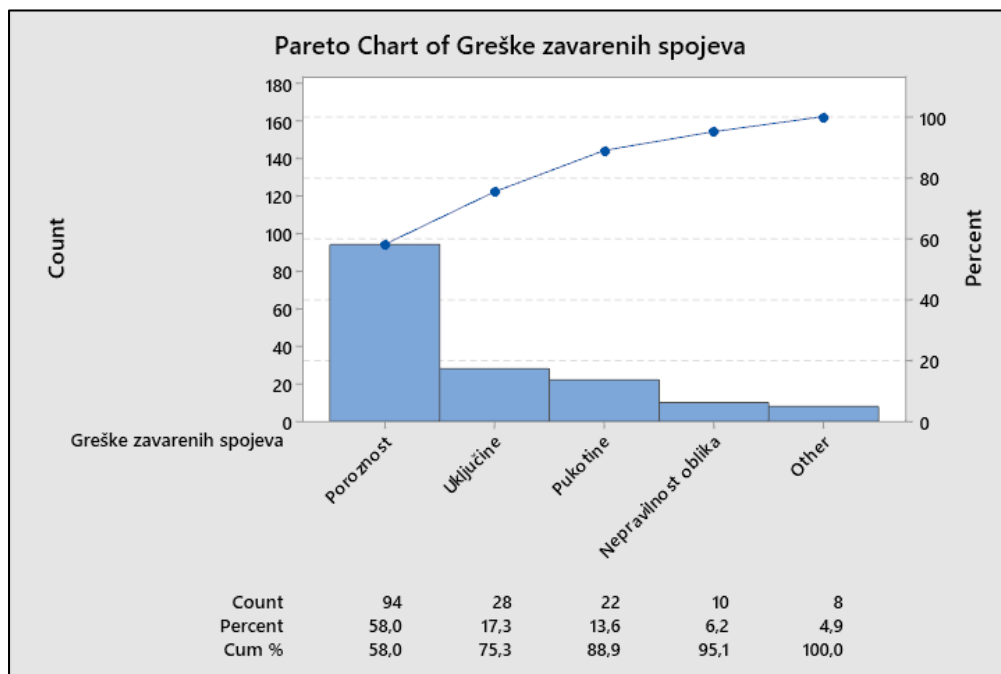


Slika 25. Simulirani primjer procjene sposobnosti procesa

Iz dijagrama [Slika 25] je vidljivo kako je proces sposoban – nalazi se unutar zahtijevanih granica specifikacija.

Nadalje, kao mogućnost unaprjeđenja predlaže se klasificiranje nesukladnosti, odnosno grešaka koje se javljaju u proizvodnom procesu te izrada Pareto dijagrama, što PAUK trenutačno nema kao mogućnost.

Uzimajući za primjer postupak zavarivanja, najčešće greške koje se pojavljuju kod zavarenih spojeva su: pukotine, poroznost, uključine, nedovoljno protaljivanje, nepravilnost oblika itd.



Slika 26. Simulirani primjer Pareto dijagrama za proces zavarivanja

Iz dijagrama [Slika 26] vrlo je lako uočljivo kako najveći broj nesukladnosti, čine greške poroznosti i uključina.

Prednosti predloženih rješenja, odnosno nadogradnji funkcionalnosti u odnosu na postojeće mogućnosti omogućuju lakše razumijevanje obrađenih podataka usredotočenost na prioritetne probleme u procesu te brže i jednostavnije uočavanje varijacija u procesu.

6. ZAKLJUČAK

Proizvodna postrojenja vrlo su kompleksni sustavi u kojem ljudi, materijali, strojevi, procesi, alati itd., moraju biti savršeno usklađeni kako bi proizvodnja bila učinkovita i kako se dragocjeni resursi ne bi potratili. Stoga su MES sustavi neizostavan dio proizvodnje kojim se nadzire, prati, kontrolira i dokumentira proizvodni proces, od početka do kraja. Povezujući sustave poslovnog planiranja i kontrolne sustave proizvodnje, donosiocima odluka daju uvid u trenutačno stanje i tako olakšavaju optimizaciju proizvodnih procesa. Svakodnevnim razvojem tehnologije i najavom Industrije 4.0 nameću se novi izazovi koji predstavljaju buduće standarde proizvodnje. U skladu s time proizvodna poduzeća moraju ih na vrijeme usvojiti kako bi ostala konkurentna na tržištu.

U ovom radu prikazane su ključne funkcionalnosti koje MES sustavi trebaju sadržavati te u skladu s čime treba razvijati MES sustave nove generacije. Analizirane su mogućnosti postojećih rješenja, kao i jednog domaće proizvodnje – PAUK-a. U cilju lakšeg razumijevanja podataka koje PAUK prikuplja i analizira, razrađen je koncept nadogradnje njegovih funkcionalnosti u vidu uvođenja alata koji na jednostavan način, vizualno ukazuju na ključne probleme u proizvodnji.

LITERATURA

- [1] B. Stewart, *MES for dummies (Plex Systems Inc.)*, 2nd Special Edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2022. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.plex.com/sites/default/files/2022-04/10297-Plex-MES-Dummies.pdf?tcid=1211>
- [2] H. Meyer, *Manufacturing Execution Systems: Optimal Design, Planning, and Deployment*. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [3] P. D. Urbina Coronado, R. Lynn, W. Louhichi, M. Parto, E. Wescoat, i T. Kurfess, „Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system“, *Journal of Manufacturing Systems*, sv. 48, str. 25–33, srp. 2018, doi: 10.1016/j.jmsy.2018.02.002.
- [4] J. Kletti, *Manufacturing Execution Systems – MES*. Berlin; London: Springer, 2007.
- [5] B. Saenz de Ugarte, A. Artiba, i R. Pellerin, „Manufacturing execution system – a literature review“, *Production Planning & Control*, sv. 20, izd. 6, str. 525–539, ruj. 2009, doi: 10.1080/09537280902938613.
- [6] A. Shojaeinasab i ostali, „Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review“, *Journal of Manufacturing Systems*, sv. 62, str. 503–522, sij. 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.01.004.
- [7] B. Scholten, *MES Guide for Executives: Why and How to Select, Implement, and Maintain a Manufacturing Execution System*. Research Triangle Park, NC: International Society of Automation, 2009.
- [8] B. R. Mehta i Y. J. Reddy, „Manufacturing execution systems“, u *Industrial Process Automation Systems*, Elsevier, 2015, str. 593–607. doi: 10.1016/B978-0-12-800939-0.00023-1.
- [9] „What is an MES (manufacturing execution system)?: SAP insights“, *SAP*. <https://www.sap.com/products/scm/execution-mes.html> (pristupljeno 10. listopada 2022.).
- [10] MESA, „White Paper Number 2: MES Functionalities & MRP to MES Data Flow Possibilities“. MESA International, 1997.
- [11] V. Kaczmarczyk i ostali, „Revisiting the Role of Manufacturing Execution Systems in Industry 4.0“, *IFAC-PapersOnLine*, sv. 55, izd. 4, str. 151–157, 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.06.025.

-
- [12] „What is a smart factory? | SAP Insights“, *SAP*. <https://www.sap.com/insights/what-is-a-smart-factory.html> (pristupljeno 01. studeni 2022.).
- [13] „The Essential Steps in Your Smart Factory Evolution“, *SL Controls*. <https://slcontrols.com/en/the-essential-steps-in-your-smart-factory-evolution/> (pristupljeno 01. studeni 2022.).
- [14] „Pametno upravljanje proizvodnjom | Vanado“, *vanado.hr*. <https://vanado.hr/> (pristupljeno 09. studeni 2022.).
- [15] G. Baršić, „Predavanja iz kolegija kontrola kvalitete“. FSB, 2019.

PRILOZI

- I. CD-R disk