

Analiza sustava upravljanja proizvodnjom

Hlopec, Robert

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:235:172526>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Robert Hlopec

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Cajner

Student:

Robert Hlopec

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svome mentoru, izv. prof. dr. sc. Hrvoju Cajneru na prenesenom znanju, razumijevanju i savjetima kojima mi je pomogao pri izradi ovog završnog rada.

Zahvaljujem se i svojim roditeljima, obitelji i prijateljima na neizmjerne podršci tijekom svih godina studija.

Ipak, posebnu zahvalu posvećujem svojim kolegicama Mariji i Luciji, bez kojih bi studiranje bilo znatno manje lijepo iskustvo, a polaganje najtežih kolegija, rekao bih, nemoguća misija.

Robert Hlopec



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Robert Hlopec**

JMBAG: **0035216075**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza sustava upravljanja proizvodnjom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of manufacturing execution system**

Opis zadatka:

Sustav za upravljanje proizvodnjom MES (eng. *Manufacturing execution system*) je ključan alat koji prati, upravlja i dokumentira aktivnosti u proizvodnom sustavu, a daje uvid u sve elemente proizvodnog procesa kao što su materijal, strojevi, osoblje, energija i sl. Sustav funkcionira u realnom vremenu i u svakom trenutku daje uvid u stanje proizvodnje. Time se osigurava temelj optimizacijskim procesima pa i eventualnim žurnim korekcijama parametara proizvodnje. MES sustav je sustav koji povezuje ERP sustav poduzeća i razine nadzora, kontrole i samog izvršenja proizvodnog plana (SCADA, PLC/SPC i SHOP FLOOR).

U radu je potrebno:

1. Dati sažetak postojećih sustava za upravljanje proizvodnjom
2. Opisati osnovne funkcionalnosti MES sustava
3. Analizirati i usporediti postojeće MES sustave koji se koriste u proizvodnim sustavima
4. Na primjeru linije za učenje (eng. *Learning factory*) simulirati i opisati mogućnosti konkretnog MES sustava.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predvideni datumi obrane:

30. 11. 2022.

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Čajner

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS GRAFIKONA	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM.....	2
3. SUSTAVI UPRAVLJANJA PROIZVODNJOM.....	4
3.1. Razine automatizacije proizvodnih procesa.....	5
3.2. Povijesni razvoj sustava upravljanja proizvodnjom.....	9
3.2.1. Prvi automatizacijski sustavi.....	9
3.2.2. Prvi integrirani sustavi	10
4. MODELI UPRAVLJANJA PROIZVODNJOM (MESA MODELI).....	12
4.1. MESA-11 model	12
4.2. c-MES model	15
4.3. Model strateških inicijativa	16
4.3.1. Proizvodna razina.....	17
4.3.2. Razina proizvodnih operacija.....	17
4.3.3. Razina upravljanja poslovnim operacijama	17
4.3.4. Razina strateških inicijativa	19
4.4. Model pametne proizvodnje.....	20
4.4.1. Životni ciklusi	20
4.4.2. Niti između životnih ciklusa	21
4.4.3. Prateće tehnologije.....	22
4.4.4. Osnovna načela pametne proizvodnje.....	22
5. IMPLEMENTACIJA SUSTAVA UPRAVLJANJA PROIZVODNJOM	23
5.1. Ciljevi implementacije	23
5.2. Ključni koraci pri implementaciji	24
5.3. Potencijalni problemi pri implementaciji.....	26
5.4. Odabir odgovarajućeg rješenja.....	27
5.4.1. Tipovi MES sustava.....	27
5.5. Trajanje procesa implementacije.....	30
5.6. Troškovi procesa implementacije	31
5.6.1. Povrat uložениh sredstava.....	32
5.7. Rezultati implementacije.....	33

6. ISTRAŽIVANJE TRŽIŠTA POSTOJEĆIH MES SUSTAVA.....	34
6.1. Najbolji MES sustavi prema portalu G2.com	34
6.1.1. G2 ocjenjivačka metodologija	35
6.2. Usporedba odabranih MES sustava	38
6.2.1. Usporedba prema tipu korištenog MES sustava	38
6.2.2. Usporedba prema veličini poduzeća	39
6.3. Trenutno stanje tržišta i projekcija budućih trendova	40
6.3.1. Vrijednost tržišta MES sustava	40
6.3.1.1. Složena godišnja stopa rasta (CAGR).....	41
6.3.2. Raspodjela tržišnih udjela MES sustava	42
7. MES SUSTAV ZA UPRAVLJANJE LINIJOM ZA UČENJE.....	44
7.1. Prozor za upravljanje proizvodnjom	44
7.2. Prozor za upravljanje narudžbama	45
7.3. Prozor za upravljanje kvalitetom	47
7.4. Prozor s glavnim podacima.....	49
8. ZAKLJUČAK.....	52
LITERATURA.....	53

POPIS SLIKA

Slika 1.	Upravljanje proizvodnjom kao dio poslovnog procesa [1]	2
Slika 2.	Prednosti učinkovitog upravljanja proizvodnjom [2].....	3
Slika 3.	Piramida automatizacije proizvodnog sustava [4].....	4
Slika 4.	Razina proizvodnje [7]	5
Slika 5.	Razina kontrole [7].....	6
Slika 6.	Usporedba nekadašnjih i današnjih sustava nadzora proizvodnje [6].....	7
Slika 7.	Razina nadzora [7].....	7
Slika 8.	Razina planiranja [7]	8
Slika 9.	Razina upravljanja [7]	8
Slika 10.	Sustavi upravljanja poduzećem u osamdesetim godinama 20. stoljeća [8].....	9
Slika 11.	Integrirani proizvodni sustavi [8]	11
Slika 12.	MESA-11 model [11]	12
Slika 13.	c-MES model [11]	15
Slika 14.	Model strateških inicijativa [11].....	16
Slika 15.	Naslovnica jednog od MESA vodiča za strateške inicijative [13]	19
Slika 16.	Model pametne proizvodnje [14]	20
Slika 17.	Osnovna načela pametne proizvodnje [15]	22
Slika 18.	Prvih 6 ključnih koraka pri implementaciji MES sustava [17]	24
Slika 19.	Preostalih 5 ključnih koraka pri implementaciji MES sustava [17]	25
Slika 20.	Potencijalni problemi pri implementaciji MES sustava [17]	26
Slika 21.	Grafički prikaz trajanja procesa implementacije MES sustava.....	30
Slika 22.	Sjedište portala G2 u Chicagu [20]	34
Slika 23.	Najbolji MES sustavi prema G2 ocjenjivačkoj metodologiji [21]	35
Slika 24.	Prozor za upravljanje proizvodnjom [27].....	44
Slika 25.	Prozor za upravljanje narudžbama [27].....	45
Slika 26.	Primjer označavanja narudžbe [27]	46
Slika 27.	Prozor za upravljanje kvalitetom [27]	47
Slika 28.	Izvještaj o broju proizvedenih i broju neispravnih dijelova [27]	48
Slika 29.	Izvještaj o vremenima proizvodnje [27].....	48
Slika 30.	Prozor s glavnim podacima [27].....	49
Slika 31.	Podaci o pojedinom koraku u planu izrade [27].....	50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Alati za izvršavanje poslovnih operacija [12]	18
Tablica 2. Prednosti i nedostaci fizičkih MES sustava [18]	28
Tablica 3. Prednosti i nedostaci MES sustava „u oblaku“ [18]	28
Tablica 4. Prednosti i nedostaci specijaliziranih MES sustava [18]	29
Tablica 5. Prednosti i nedostaci generičkih MES sustava [18]	29
Tablica 6. Ocjene vodećih proizvoda u kategoriji MES sustava [23]	37
Tablica 7. Ocjene proizvoda s visokom izvedbom u kategoriji MES sustava [23]	37
Tablica 8. Ocjene konkurentnih proizvoda u kategoriji MES sustava [23]	37
Tablica 9. Ocjene <i>niche</i> proizvoda u kategoriji MES sustava [23]	38

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Udjeli upotrebe <i>cloud</i> i fizičkih tipova odabranih MES sustava [24]	38
Grafikon 2. Udjeli implementacije odabranih MES sustava u različitim veličinama poduzeća [25]	39
Grafikon 3. Predviđano kretanje vrijednosti tržišta MES sustava za razdoblje od 2022. do 2032. godine [26].....	40
Grafikon 4. Udjeli pojedinih regionalnih tržišta MES sustava na cjelokupnom svjetskom tržištu [26]	42

POPIS KRATICA

Kratika	Puni naziv	Prijevod
AI	eng. <i>Artificial Intelligence</i>	Umjetna inteligencija
APM	eng. <i>Asset Performance Management</i>	Upravljanje učinkovitošću imovine
AR	eng. <i>Augmented Reality</i>	Proširena stvarnost
B2B	eng. <i>Business-to-Business</i>	Od poduzeća prema poduzeću
BI	eng. <i>Business Intelligence</i>	Poslovna inteligencija
CAD	eng. <i>Computer Aided Design</i>	Konstruiranje pomoću računala
CAGR	eng. <i>Compound Annual Growth Rate</i>	Složena godišnja stopa rasta
CAM	eng. <i>Computer Aided Manufacturing</i>	Proizvodnja podržana računalom
CAQ	eng. <i>Computer Aided Quality Assurance</i>	Računalom potpomognuti sustavi osiguravanja kvalitete
CIM	eng. <i>Computer Integrated Manufacturing</i>	Računalno integrirana proizvodnja
c-MES	eng. <i>Collaborative Manufacturing Execution System</i>	Suradnički sustav upravljanja proizvodnjom
CMMS	eng. <i>Computerized Maintenance Management System</i>	Računalni sustav upravljanja održavanjem
CRM	eng. <i>Customer Relationship Management</i>	Upravljanje odnosima s kupcima
DCS	eng. <i>Distributed Control System</i>	Distribuirani sustav upravljanja
DNC	eng. <i>Direct/Distributed Numerical Control</i>	Izravno numeričko upravljanje
EAM	eng. <i>Enterprise Asset Management</i>	Upravljanje imovinom poduzeća
EH&S	eng. <i>Environment, Health & Safety</i>	Zaštita okoliša i održavanje zdravlja i sigurnosti na radu
ERP	eng. <i>Enterprise Resource Planning</i>	Planiranje resursa poduzeća
HMI	eng. <i>Human-Machine Interface</i>	Sučelje čovjek-stroj
IIoT	eng. <i>The Industrial Internet of Things</i>	Industrijski Internet stvari
ISO	eng. <i>The International Organization for Standardization</i>	Međunarodna organizacija za normizaciju
KPI	eng. <i>Key Performance Indicator</i>	Ključni pokazatelj uspješnosti
MDA	eng. <i>Manufacturing Data Acquisition</i>	Prikupljanje podataka o strojevima
MDE	eng. <i>Manufacturing Development Engineering</i>	Sustav za razvoj proizvodnje
MES	eng. <i>Manufacturing Execution System</i>	Sustav upravljanja proizvodnjom/ Sustav izvršne proizvodnje
MESA	eng. <i>The Manufacturing Enterprise Solutions Association International</i>	Međunarodno udruženje rješenja za proizvodna poduzeća
ML	eng. <i>Machine Learning</i>	Strojno učenje

MRP	eng. <i>Material Resource Planning</i>	Sustav planiranja potreba za materijalima
OEE	eng. <i>Overall Equipment Effectiveness</i>	Ukupna učinkovitost opreme
PDA	eng. <i>Production Data Acquisition</i>	Prikupljanje podataka o proizvodnji
PLC	eng. <i>Programmable Logic Controller</i>	Programibilni logički kontroler
PLM	eng. <i>Product Lifecycle Management</i>	Upravljanje životnim ciklusom proizvoda
PPS	eng. <i>Production Planning and Scheduling</i>	Planiranje i raspoređivanje proizvodnje
RFID	eng. <i>Radio Frequency Identification</i>	Radiofrekvencijska identifikacija
ROI	eng. <i>Return on Investment</i>	Povrat investicije/Povrat uložениh sredstava
SCADA	eng. <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>	Sustav nadzora, kontrole i prikupljanja podataka
SCP	eng. <i>Supply Chain Planning</i>	Planiranje lanca opskrbe
SIS	eng. <i>Safety Instrumented System</i>	Sigurnosni instrumentirani sustav
SPC	eng. <i>Statistical Process Control</i>	Statistička kontrola procesa
SQC	eng. <i>Statistical Quality Control</i>	Statistička kontrola kvalitete
TMS	eng. <i>Transportation Management System</i>	Sustav upravljanja prijevozom
TQM	eng. <i>Total Quality Management</i>	Sveobuhvatno upravljanje kvalitetom
VR	eng. <i>Virtual Reality</i>	Virtualna stvarnost
WIP	eng. <i>Work in Process/Work in Progress</i>	Rad u tijeku
WMS	eng. <i>Warehouse Management System</i>	Sustav upravljanja skladištem

SAŽETAK

U ovom završnom radu provedena je analiza sustava upravljanja proizvodnjom. U uvodnom dijelu rada naglašena je važnost kvalitetnog upravljanja proizvodnjom te su ukratko opisane glavne zadaće MES sustava i definiran njihov položaj u piramidi automatizacije proizvodnog sustava. Kratak pregled povijesnog razvoja MES sustava daje uvid u to kako su se sustavi s vremenom nadograđivali i poboljšavali, a četiri detaljno opisana modela upravljanja proizvodnjom pružaju smjernice za maksimiziranje učinkovitosti poslovanja. Nakon toga, slijedi svojevrsni vodič kroz proces implementacije MES sustava u poduzeće, u kom su, između ostalog, navedeni ključni koraci i potencijalni problemi koji se mogu javiti, napravljena međusobna usporedba različitih tipova MES sustava te definirano što sve utječe na trajanje i troškove procesa. Potom su, na temelju istraživanja tržišta, navedeni najbolje ocijenjeni MES sustavi, prikazano trenutno stanje tržišta te dana projekcija budućih trendova. Na samom kraju rada, opisane su funkcionalnosti konkretnog MES sustava – FESTO MES4, koji se koristi za upravljanje linijom za učenje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Ključne riječi: upravljanje proizvodnjom, sustavi upravljanja proizvodnjom, MES, pametna proizvodnja

SUMMARY

In this bachelor's thesis, an analysis of the Manufacturing Execution System (MES) has been conducted. The introductory section emphasizes the importance of effective production management and provides a brief description of the main tasks of MES systems, defining their position within the hierarchy of the manufacturing automation system. A brief overview of the historical development of MES systems provides insight into how these systems have evolved and improved over time. Four detailed MESA models are described to provide guidance for maximizing business efficiency. After that, there is a sort of guide through the process of implementing the MES system in the company, in which, among other things, the key steps and potential challenges that may arise are listed. Additionally, a comparison of different types of MES systems is provided, and factors influencing the duration and costs of the implementation process are defined. Based on market research, the highest-rated MES systems are listed, the current state of the market is presented, and projections of future trends are given. At the very end of the thesis, the functionalities of the specific MES system - FESTO MES4, which is used to manage the learning factory at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb, are described.

Key words: production management, manufacturing execution systems, MES, smart manufacturing

1. UVOD

U suvremenom svijetu, u kojem se promjene odvijaju brže no ikada prije, jedan od najvećih izazova s kojim se susreću poduzeća jest uspostava efikasnog i prilagodljivog poslovnog i proizvodnog sustava, koji će na te promjene biti spreman pravovremeno odgovoriti i tako osigurati ostvarenje konkurentske prednosti na nikad brojnijem globalnom tržištu. Brzina promjena, globalna konkurencija i potreba za neprestanim prilagođavanjem postaju standardi suvremenog poslovanja, a tvrtke moraju brzo donositi ispravne poslovne odluke kako bi ostale konkurentne.

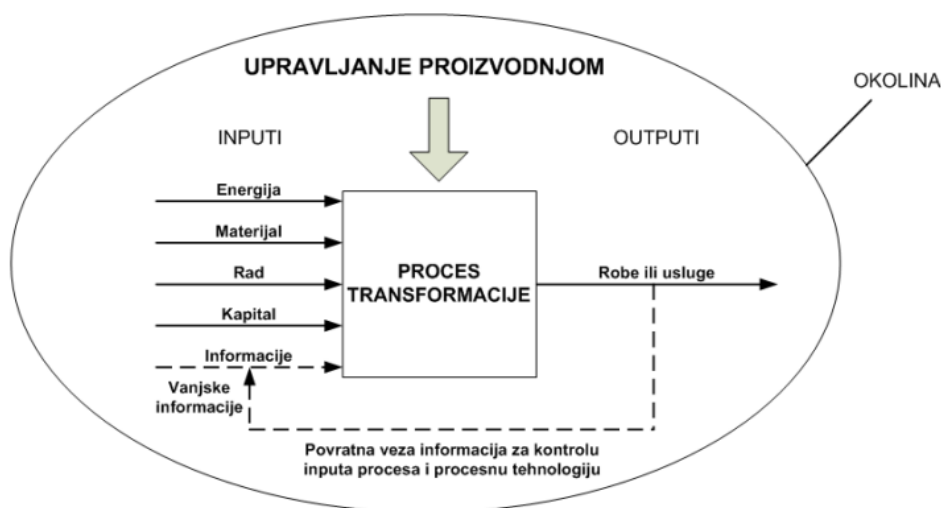
U tom kontekstu, ključ za uspjeh leži u sposobnosti donošenja ispravnih odluka temeljenih na pouzdanim i relevantnim informacijama. Za postizanje tog cilja, tvrtke razvijaju i implementiraju napredne integrirane informacijske sustave koji upravljaju svim aspektima proizvodnog lanca. Jedan od najboljih primjera takvih sustava su upravo sustavi upravljanja proizvodnjom.

Sustavi upravljanja proizvodnjom djeluju kao „vezivno tkivo“ između digitalnog i fizičkog svijeta proizvodnje. Oni olakšavaju koordinaciju, nadzor i kontrolu složenih proizvodnih operacija u proizvodnim poduzećima, pružajući donositeljima odluka ključne informacije u stvarnom vremenu. Kroz kontinuirano prikupljanje i analizu podataka iz različitih izvora, sustavi upravljanja proizvodnjom omogućuju tvrtkama donošenje ključnih poslovnih odluka, čineći proizvodnju agilnijom nego ikada prije.

U takvom dinamičkom okruženju, sustavi upravljanja proizvodnjom postaju ključan faktor koji pomaže tvrtkama da postignu najviše standarde kvalitete proizvoda i usklade se s najstrožim zahtjevima industrije. Njihova preciznost, efikasnost i prilagodljivost čine ih nezaobilaznim alatima za tvrtke koje žele izgraditi i očuvati povjerenje na tržištu.

2. UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM

Upravljanje proizvodnjom predstavlja jedan od najvažnijih elemenata poslovnog upravljanja, a uključuje planiranje, organiziranje, usmjeravanje i kontrolu svih aktivnosti kojima se inputi proizvodnje (sirovine, ljudski resursi i kapital) pretvaraju u njene outpute (gotove proizvode i usluge). Zadaća upravljanja proizvodnjom jest osigurati uspješnu provedbu proizvodne strategije poduzeća primjenom različitih tehnologija, s ciljem postizanja unaprijed postavljenih ciljeva poput troškova, kvalitete ili kapaciteta proizvodnje.

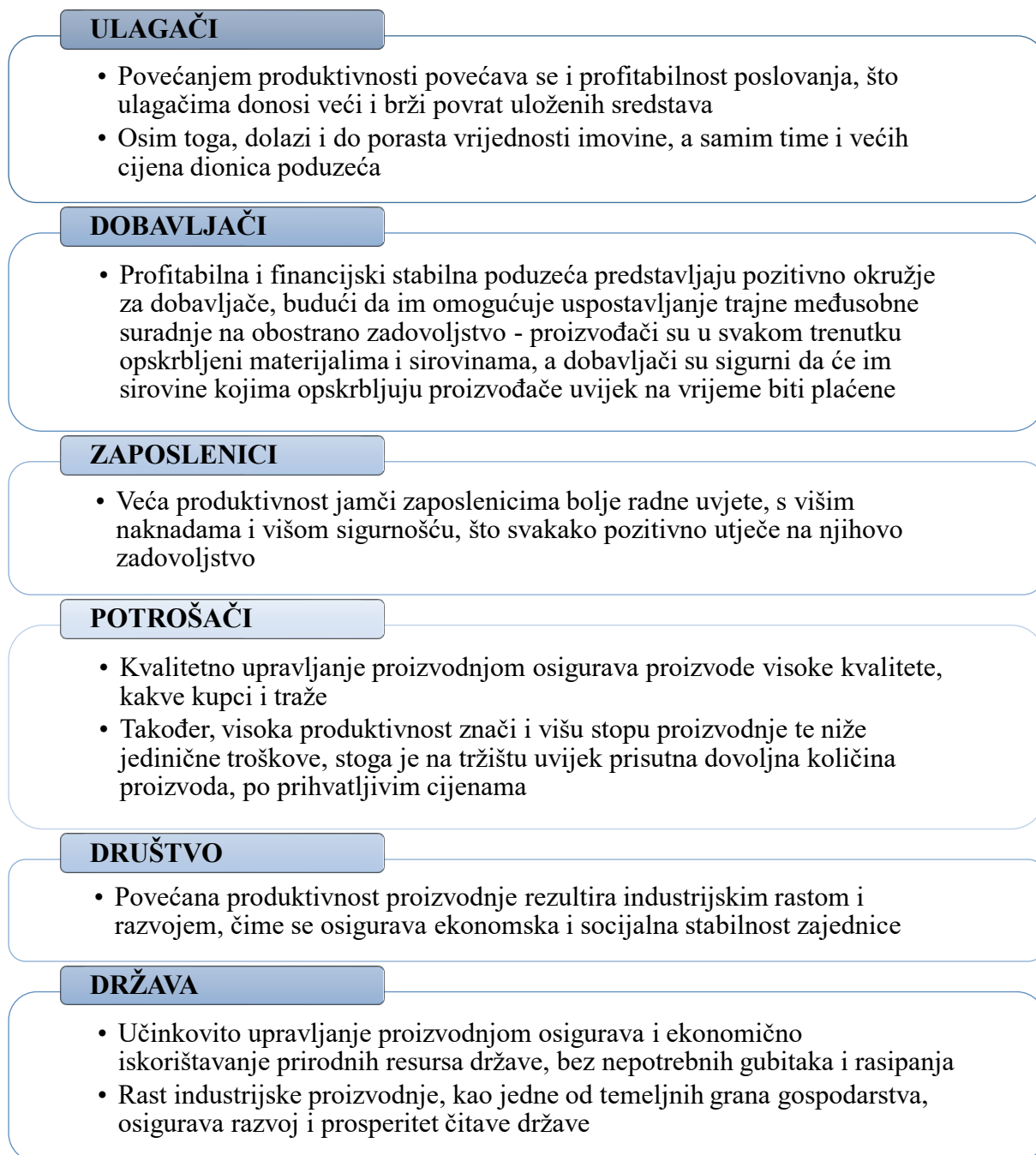


Slika 1. Upravljanje proizvodnjom kao dio poslovnog procesa [1]

Usklađivanje svih ključnih aspekata proizvodnje, kao zadaća upravljanja proizvodnjom, naziva se i **5M usklađivanjem**, budući da uključuje:

1. Radnu snagu (eng. *Men*)
2. Strojeve i opremu (eng. *Machines*)
3. Proizvodne procese (eng. *Methods*)
4. Materijale i sirovine (eng. *Materials*)
5. Novac (eng. *Money*)

Kvalitetno i učinkovito upravljanje proizvodnjom donosi brojne prednosti ne samo proizvođačima, već svima uključenima u proizvodni lanac – počevši od ulagača i dobavljača, preko zaposlenika, do potrošača, ali i društva i države u cjelini.



Slika 2. Prednosti učinkovitog upravljanja proizvodnjom [2]

No, da bi se sve prednosti navedene na Slici 2 i ostvarile, nužno je posjedovati i razvijati visokokvalitetne sustave upravljanja proizvodnjom.

3. SUSTAVI UPRAVLJANJA PROIZVODNOM

Sustavi upravljanja proizvodnjom, poznatiji pod akronimom MES, su sustavi koji se koriste u proizvodnim sustavima za nadzor i kontrolu proizvodnih procesa u pogonu. Primarna funkcija im je praćenje i dokumentiranje pretvorbe sirovina u gotove proizvode u stvarnom vremenu. Kako bi pružili relevantne i ažurne podatke o statusu proizvodnih aktivnosti, prikupljaju podatke iz različitih izvora, poput strojeva, senzora ili operatera. U upravljanju proizvodnim operacijama, MES sustavi služe kao „most“ između sustava planiranja i kontrole poduzeća – ERP sustava, i stvarnih proizvodnih operacija, što predstavlja i piramida automatizacije proizvodnog sustava, prikazana na Slici 3. [3]



Slika 3. Piramida automatizacije proizvodnog sustava [4]

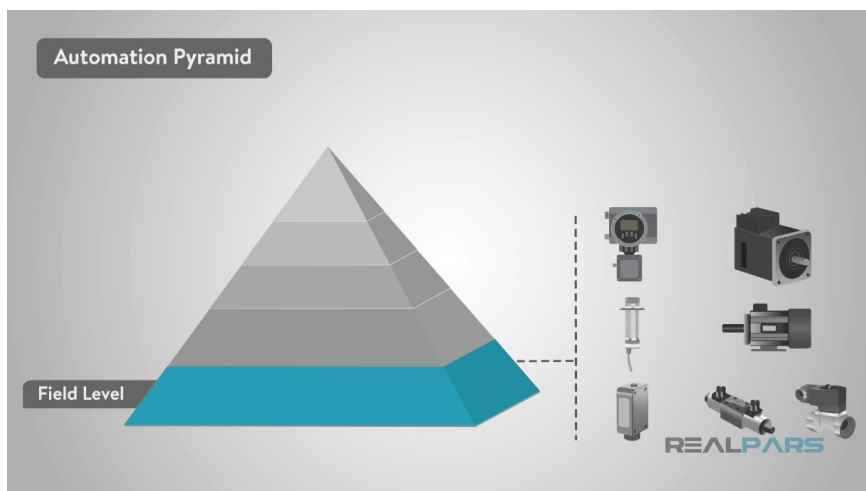
Nepostojanje sustava kao što je MES proizvodni proces čini svojevrsnom „crnom kutijom“, budući da su poznati samo ulazni i izlazni parametri proizvodnje, ali ne i način na koji su oni međusobno povezani, pa je nemoguće utvrditi primjerice učinkovitost, pojavu odstupanja ili troškove proizvodnog procesa. [5]

3.1. Razine automatizacije proizvodnih procesa

Prethodno prikazana piramida automatizacije predstavlja slikoviti prikaz integracije tehnologije u industriju, koji pruža strukturirani pristup projektiranju i implementaciji sustava automatizacije. Uobičajeno uključuje 5 međusobno povezanih tehnoloških razina koje su prisutne u industrijskim okruženjima:

1. Razina proizvodnje

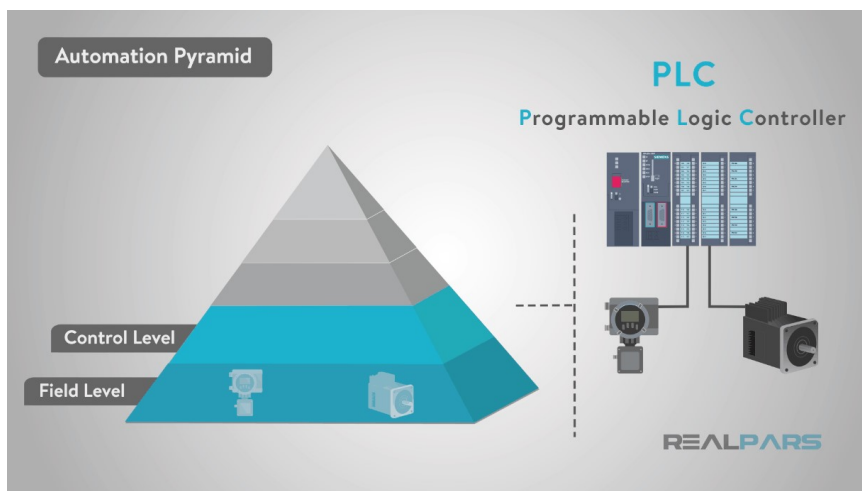
- Iako se nalazi na dnu piramide, ova razina automatizacije nije nužno prvi korak u automatizaciji proizvodnih procesa, već je čak štoviše razina koja sadrži najveću količinu podataka
- Na ovoj razini odvijaju se aktivnosti inženjeringa, instalacije, spajanja, konfiguracije i programiranja raznih mjernih instrumenata kao što su:
 - **Senzori i detektori**
 - **RFID i barkod čitači**
 - **Kamere i skeneri**
 - **Ventili i aktuatori s inteligentnim pozicionerima**
 - **Sustavi za vaganje i doziranje, itd.**
- Podaci prikupljeni ovim mjernim instrumentima mogu biti vrlo korisni pri analizi potrošnje električne energije, mjerenja ukupne učinkovitosti opreme (OEE) ili njenog prediktivnog održavanja [6]



Slika 4. Razina proizvodnje [7]

2. Razina kontrole

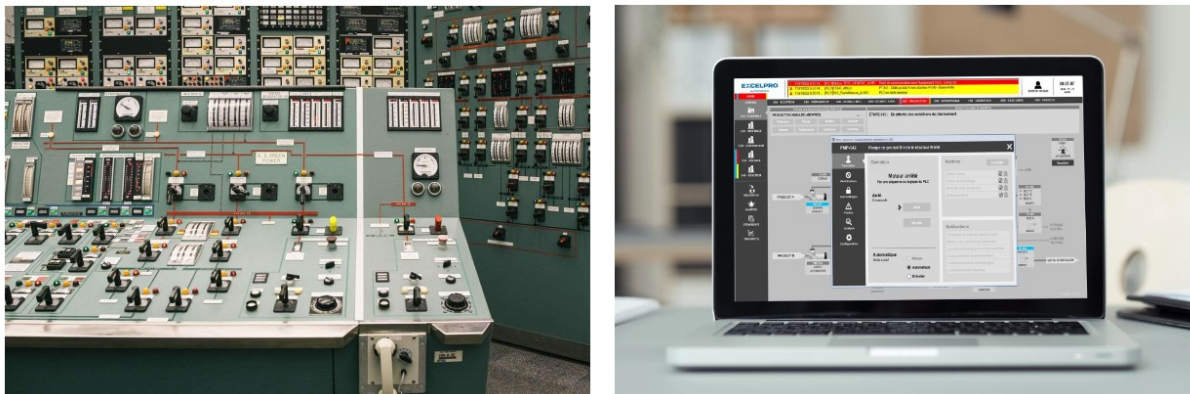
- Na ovoj razini koriste se različite vrste industrijskih računala, kao što su:
 - **Programibilni logički kontroleri (PLC)**
 - **Distribuirani sustavi upravljanja (DCS)**
 - **Sigurnosni instrumentirani sustavi (SIS)**
- Pomoću tih instrumenata prikupljaju se podaci s proizvodne razine te se kontekstualiziraju i prevode u smislene informacije, koje se šalju do iduće razine
- Razvoj kontrolnih sustava nužan je kako bi postrojenja zadržala konkurentnost, pa tako današnji industrijski kontroleri posjeduju i mogućnosti umjetne inteligencije, temeljene na neuronskim mrežama, za provedbu prediktivne analize [6]



Slika 5. Razina kontrole [7]

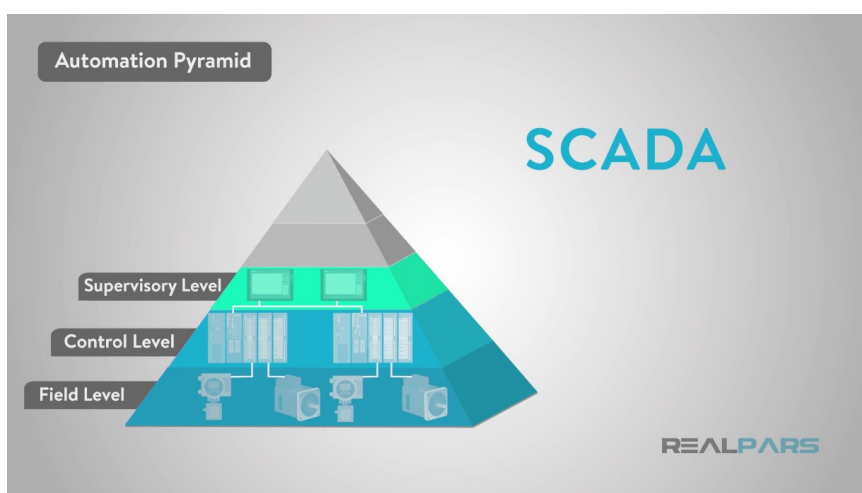
3. Razina nadzora

- Uključuje dvije vrste sustava:
 - **Sustave nadzora, kontrole i prikupljanja podataka (SCADA)**
 - **Sučelje čovjek-stroj (HMI)**
- Ti sustavi omogućuju nadzor i kontrolu čitavog postrojenja s bilo kojeg mjesta, pomoću računala ili mobilnog uređaja, te tako pružaju mnogo jednostavniji, brži i pregledniji uvid u praćenje proizvodnog procesa nego što je to bilo nekada [6]



Slika 6. Usporedba nekadašnjih i današnjih sustava nadzora proizvodnje [6]

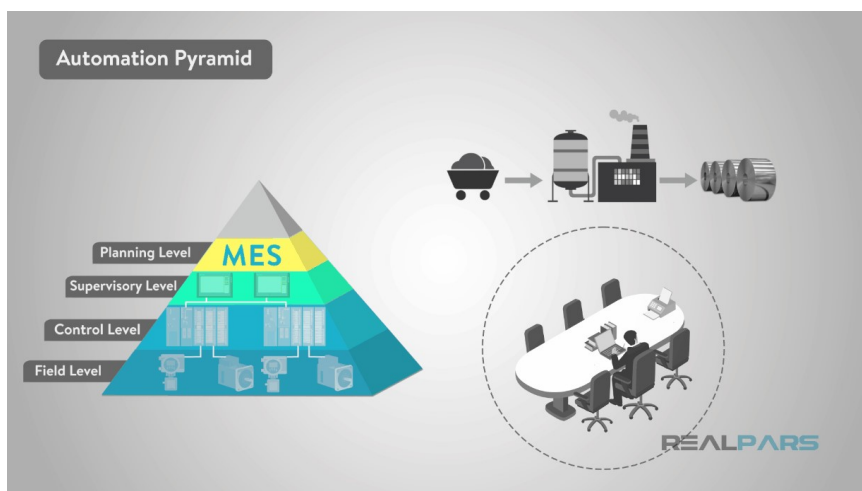
- Ogromne količine podataka koje se prikupljaju i arhiviraju omogućuju prikaz krivulja trendova te analizu i usporedbu povijesnih podataka s aktualnima [6]



Slika 7. Razina nadzora [7]

4. Razina planiranja

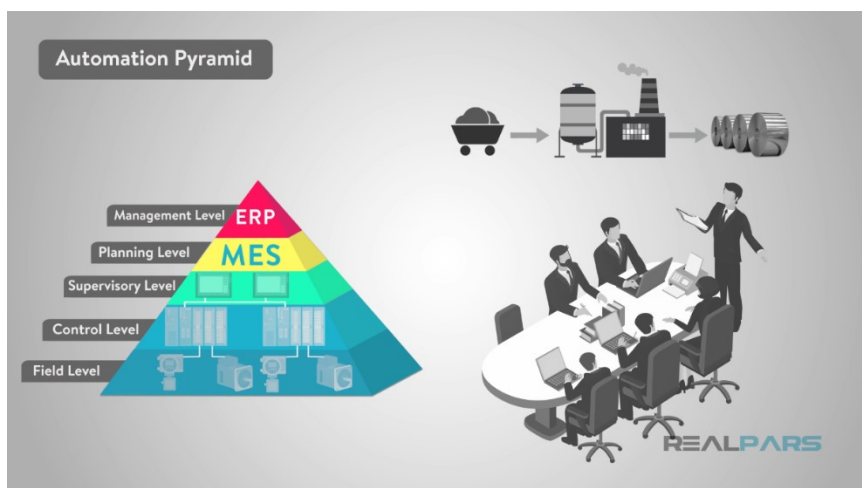
- Ova razina primarno se služi **sustavom izvršne proizvodnje (MES)**, koji, kao što je već ranije spomenuto, prati čitav proizvodni proces, od sirovina do gotovih proizvoda
- Na taj način omogućuje menadžmentu uvid u status proizvodnje u svakome trenutku, na temelju čega se onda donose poslovne odluke, poput primjerice prilagodbe narudžbe sirovina ili planova otpreme
- Korištenje **relacijskih baza podataka** umjesto mnoštva papirnatih obrazaca ili *Excel* i drugih sličnih tablica omogućuje digitalnu transformaciju malih i srednjih proizvodnih poduzeća [6]



Slika 8. Razina planiranja [7]

5. Razina upravljanja

- Na posljednjoj razini automatizacije koristi se sustav **planiranja resursa poduzeća (ERP)** koji, putem vertikalne integracije sa sustavima na nižim razinama, daje uvid u jasan pregled stanja operacija u stvarnom vremenu, kako bi pomogao u donošenju ključnih poslovnih odluka
- Odlikuje ga još nešto viša razina složenosti i sofisticiranosti od MES sustava, pa omogućuje vrhovnom menadžmentu nadzor svih razina poslovanja, od proizvodnje, prodaje, nabave, financija i mnogih drugih [7]

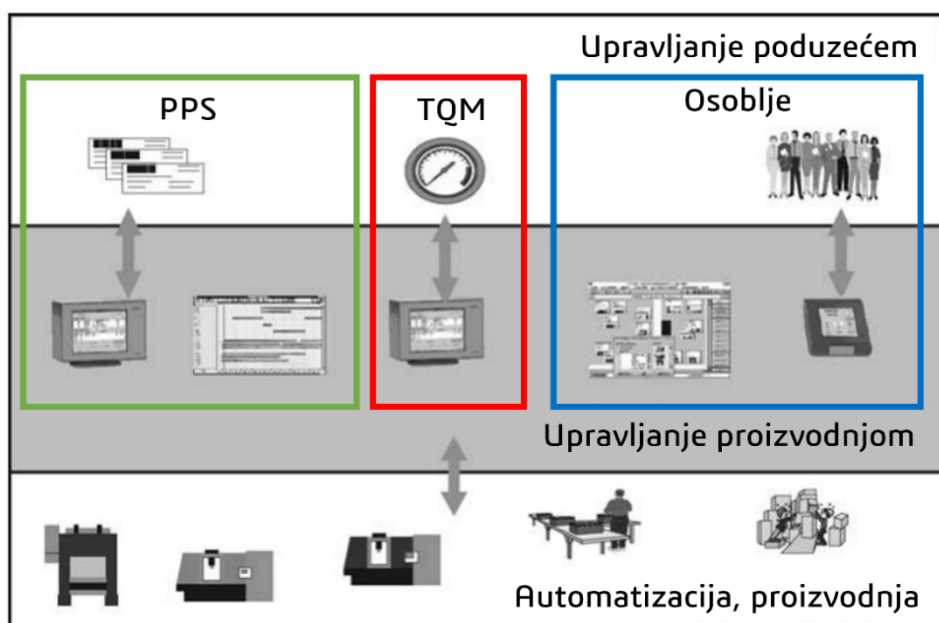


Slika 9. Razina upravljanja [7]

3.2. Povijesni razvoj sustava upravljanja proizvodnjom

3.2.1. Prvi automatizacijski sustavi

Korijeni razvoja koncepta MES sustava potječu iz sustava prikupljanja podataka korištenih u ranim osamdesetim godinama 20. stoljeća. Obilježje tadašnjih sustava bilo je to da je svaki odjel poduzeća bio opremljen vlastitim sustavom prikupljanja podataka, neovisnom o sustavima drugih odjela, jer se smatralo kako nema potrebe za njihovim povezivanjem budući da je svaki odjel imao svoje područje djelovanja. Primjer takvog sustava prikazan je na Slici 10.



Slika 10. Sustavi upravljanja poduzećem u osamdesetim godinama 20. stoljeća [8]

Istovremeno, razvili su se i prvi sustavi planiranja potreba za materijalima – **MRP**, koji su objedinjavali više sustava s različitim ulogama [9]:

- **Sustavi za prikupljanje podataka o proizvodnji i strojevima – PDA i MDA**
 - Upotreba programibilnih logičkih kontrolera – PLC omogućila je automatizaciju procesa prikupljanja podataka, što je rezultiralo bržim prijenosom i većom kvalitetom podataka
- **CAD sustavi**
 - Korištenje programa za računalno konstruiranje utjecalo je na ubrzanje izrade proizvoda, što je dovelo do povećanja produktivnosti čitavog proizvodnog procesa

➤ **Sustavi za računalom potpomognuto osiguravanje kvalitete – CAQ**

- Razvili su se kao odgovor na sve strože standarde kvalitete koji su postavljeni prilikom izrade proizvoda

Međutim, svi ovi sustavi i dalje su funkcionirali zasebno jedan od drugoga, stoga se i dalje težilo pronalasku jednog zajedničkog sustava koji bi povezivao sve zadatke poduzeća.

3.2.2. Prvi integrirani sustavi

Sredinom osamdesetih godina 20. stoljeća razvijen je prvi integrirani proizvodni sustav – **CIM**, koji podatke o proizvodnji, kvaliteti i osoblju nije smatrao u potpunosti neovisnima, već je među njima postojala određena razina interakcije. Iako je pristup kao takav bio dobro zamišljen, često je bio neprovediv zbog svoje složenosti, budući da tada dostupne tehnologije nisu bile dovoljno razvijene i standardizirane.

Početakom 1990-ih proizvođači sustava za prikupljanje podataka započeli su s nadogradnjom postojećih sustava, specijaliziranih samo za određenu grupu aktivnosti, dodavanjem značajki iz srodnih područja. Na taj način nastali su kombinirani sustavi koji su sadržavali manje zbirke međusobno povezanih podataka za različita područja poduzeća, iz kojih su se vremenom razvile 3 skupine sustava prikupljanja i evaluacije podataka, koje čine funkcionalnu osnovu i današnjih MES sustava [8]:

1. Skupina podataka vezana uz proizvodna pitanja

- Koristi sustave za prikupljanje podataka o proizvodnji (PDA), sustave za razvoj proizvodnje (MDE), sustave izravnog numeričkog upravljanja (DNC) te kontrolne stanice

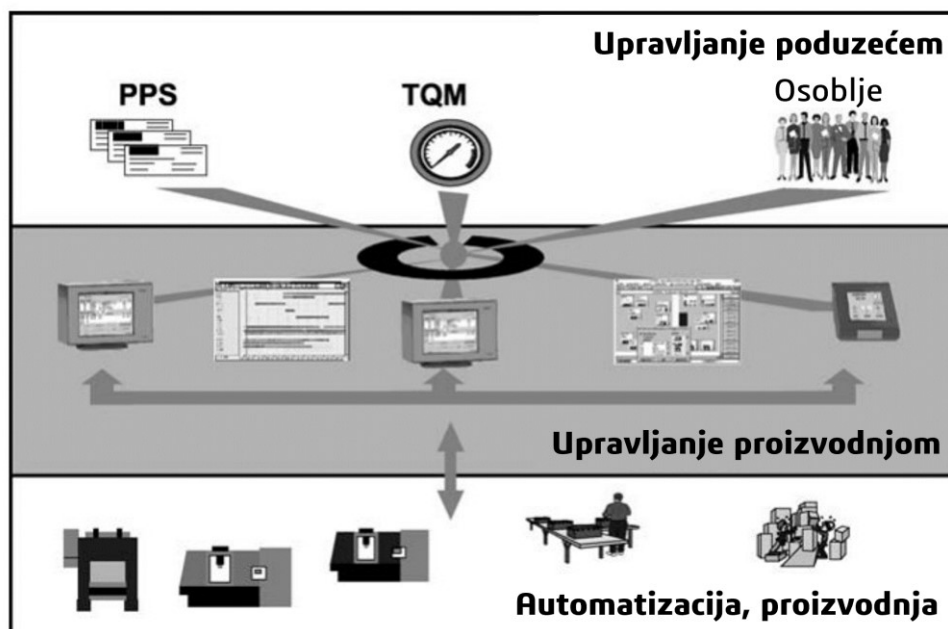
2. Skupina podataka vezana uz kadrovska pitanja

- Evidentira radno vrijeme i raspored osoblja, na temelju čega provodi kratkoročno planiranje potrebe za radnom snagom

3. Skupina podataka vezana uz pitanja osiguranja kvalitete

- Koristi računalom potpomognute sustave osiguravanja kvalitete (CAQ) te sustave kontrole izmjerenih podataka

Primjer jednog takvog sustava prikazan je na Slici 11.



Slika 11. Integrirani proizvodni sustavi [8]

Usporedbom sa Slikom 10 može se vidjeti kako su prethodno međusobno neovisni sustavi prikupljanja podataka o proizvodnji, kvaliteti i osoblju umreženi u jedinstvena sučelja, pomoću kojih se ostvaruje komunikacija između proizvodne i korporativne razine. To umrežavanje je svakako logično, jer da bi proizvodnja bila uspješna potrebno je odgovarajuće osoblje, zajedno s relevantnim podacima o ostvarenoj razini kvalitete.

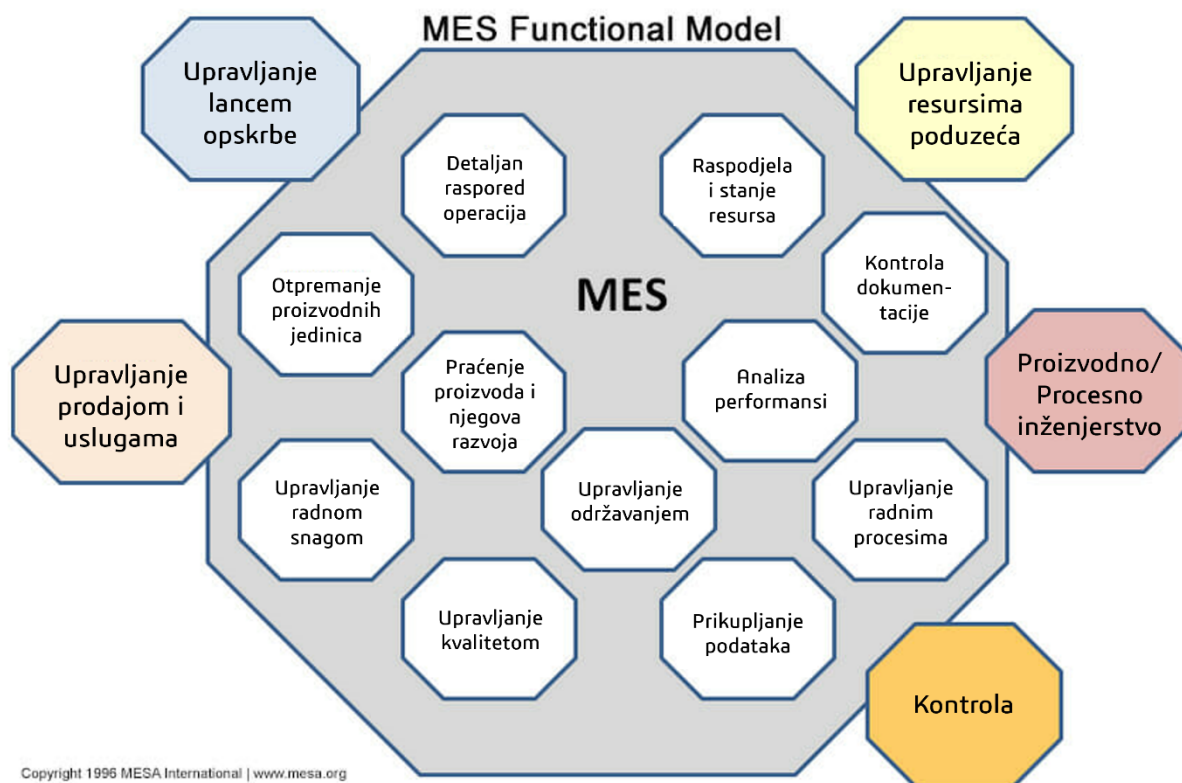
Ovako integrirani sustavi predstavljaju temelj proizvodnih operacija u skladu s **pravilom 6R**, koje kaže da: „Proizvod neće biti maksimalno ekonomski isplativ ukoliko nisu dostupni pravi resursi, u pravoj količini, na pravom mjestu, u pravo vrijeme, s pravom kvalitetom i pravim troškovima kroz čitav proizvodni proces“.

4. MODELI UPRAVLJANJA PROIZVODNOM (MESA MODELI)

1992. godine američka tvrtka AMR Research prvi puta je upotrijebila pojam MES, opisavši ga kao „dinamički informacijski sustav koji omogućuje učinkovito izvođenje proizvodnih operacija“ [10]. Iste godine osnovano je i Međunarodno udruženje rješenja za proizvodna poduzeća, poznatije pod akronimom MESA, s ciljem razvoja tržišne svijesti o važnosti implementacije integriranih sustava u proizvodnim poduzećima. Kako bi pomogli poduzećima maksimizirati učinkovitost, kroz godine su razvili nekoliko modela upravljanja proizvodnjom.

4.1. MESA-11 model

1996. godine objavljen je izvorni model „MESA-11“, kojim je definirano 11 osnovnih funkcija koje moraju zadovoljavati sustavi upravljanja proizvodnjom, kao i odnosi sa srodnim funkcionalnim područjima poduzeća: upravljanjem lancem opskrbe, upravljanjem prodajom i uslugama, upravljanjem resursima poduzeća, proizvodnim i procesnim inženjerstvom te kontrolnim postupcima.



Slika 12. MESA-11 model [11]

11 osnovnih funkcija su sljedeće [12]:

1. Raspodjela i stanje resursa

- MES sustav upravlja svim resursima poduzeća, pruža detaljan pregled njihovog stanja te osigurava pravilno podešavanje opreme

2. Detaljan raspored operacija

- MES sustav omogućuje raspored operacija na temelju prioriteta ili određenih karakteristika koje međusobno povezuju proizvodne jedinice (poput boje ili oblika), s ciljem minimiziranja vremena proizvodnje
- Osim toga, prepoznaje i eliminira operacije koje se međusobno preklapaju

3. Otpremanje proizvodnih jedinica

- Informacije o otpremi unutar MES sustava prikazuju se redoslijedom njihovog odvijanja i mijenjaju se u stvarnom vremenu u skladu s drugim događajima u proizvodnji
- Definirani su i korektivni postupci, kao i mogućnost kontrole količine rada – WIP, u bilo kojem trenutku

4. Kontrola dokumentacije

- MES sustav kontrolira cjelokupnu proizvodnu dokumentaciju – od radnih uputa, tehničkih crteža do operativnih postupaka i rasporeda smjena
- Također, uključuje i kontrolu propisanih ekoloških, zdravstvenih i sigurnosnih propisa, kao i ISO normi

5. Prikupljanje podataka

- MES sustav koristi se za prikupljanje i organizaciju podataka o radnim procesima, materijalima i operacijama izravno iz proizvodnog pogona, ručno ili korištenjem automatizirane opreme

6. Upravljanje radnom snagom

- MES sustav pruža uvid u dostupnost radne snage u realnom vremenu, na temelju čega se omogućuje njeno optimalno raspoređivanje unutar poduzeća

7. Upravljanje kvalitetom

- Na temelju prikupljenih podataka o proizvodnji osigurava se kontrola kvalitete proizvoda i identificiraju se potencijalni problemi koje je potrebno eliminirati te se definiraju korektivne radnje za slučaj ponavljanja problema
- U svrhu toga koriste se alati statističke kontrole procesa (SPC) i statističke kontrole kvalitete (SQC)

8. Upravljanje radnim procesima

- MES sustav nadzire proizvodnju i upravlja radnim procesima u skladu s planiranim i trenutnim opterećenjem sustava
- Ukoliko prepozna pogrešku u radu, automatski pokreće međuoperativne ili unutaroperativne aktivnosti s ciljem njenog otklanjanja

9. Upravljanje održavanjem

- MES sustav prati i usmjerava aktivnosti održavanja opreme i alata, kako bi se osigurala njihova dostupnost u svakom trenutku i omogućilo planiranje periodičnog ili preventivnog održavanja

10. Praćenje proizvoda i njegova razvoja

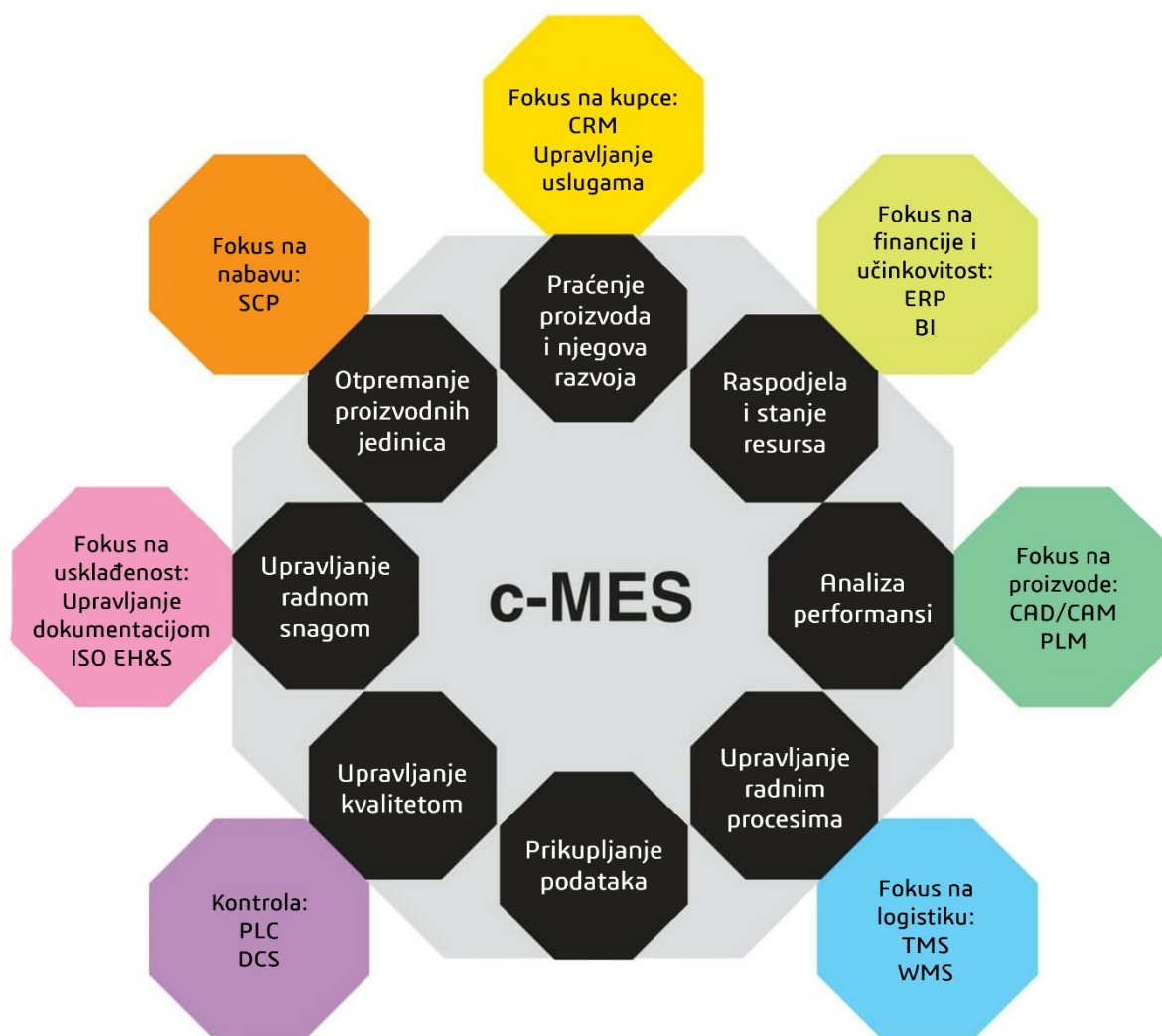
- MES sustav bilježi sve podatke povezane s proizvodnjom (poput informacija o dobavljačima, serijskih brojeva, trenutnih proizvodnih uvjeta ili izmjena na proizvodu) kroz cijeli proizvodni lanac, čime se osigurava sljedivost svake jedinice proizvoda

11. Analiza performansi

- MES sustav pruža ažurirana izvješća o kretanju proizvodnje, uspoređujući trenutačne rezultate s prijašnjim i očekivanim, što omogućava jednostavnu procjenu učinkovitosti proizvodnje i pravovremeno otkrivanje problema

4.2. c-MES model

Za razliku od prethodnog modela koji je bio usredotočen isključivo na proizvodne operacije, u „suradničkom modelu“ – c-MES, razvijenom 2004. godine, fokus je stavljen na interakciju osnovnih operativnih aktivnosti s poslovnim operacijama, s ciljem rješavanja problema povećane konkurencije, korištenjem eksternalizacije (eng. *outsourcinga*) te optimizacije opskrbnog lanca i imovine. Umjesto da tvrtke djeluju kao protivnici, ideja je da pronađu zajednička područja interesa te to iskoriste za dobivanje pravodobnijih i točnijih informacija iz više izvora, koje se zatim integriraju u zajednički sustav upravljanja proizvodnjom.



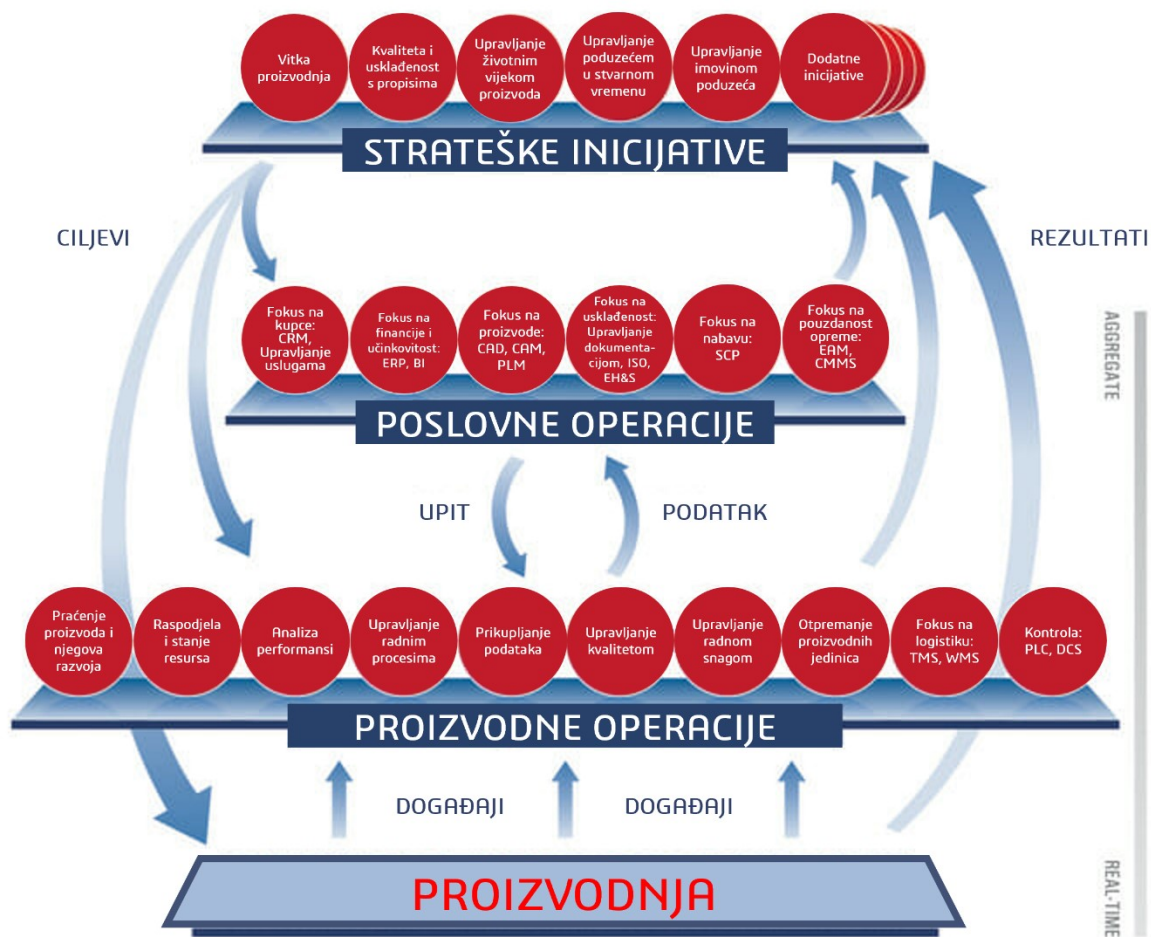
Slika 13. c-MES model [11]

Analizom Slike 13 može se uvidjeti kako c-MES sustavi kombiniraju ranije definirane osnovne funkcije sustava, koje se na „rubovima sustava“ povezuju s poslovnim operacijama usmjerenima za isključivo određeno područje djelovanja, kao što su nabava, logistika, financije ili kontrola.

Dijeljenje podataka među tvrtkama, osim tradicionalnim modelima komunikacije, ostvaruje se i korištenjem internetskih i web tehnologija, poput e-trgovine i B2B, što je omogućilo značajan porast brzine i točnosti komunikacije.

4.3. Model strateških inicijativa

Modelom strateških inicijativa, razvijenim 2008. godine, opisuje se interakcija između strategije te poslovnih i proizvodnih operacija unutar poduzeća. Kao što prikazuje Slika 14, događaji koji se odvijaju na proizvodnoj razini prenose se do razine proizvodnih operacija, gdje se zatim kontekstualiziraju i prenose dalje do razine poslovnih operacija u obliku podataka, kao odgovor na upite koji dolaze s više razine. Nadalje, na najvišoj razini poduzeća, razini strateških inicijativa, postavljaju se ciljevi za čitavo poduzeće, dok se s nižih razina ka njoj vraćaju izvještaji o postignutim rezultatima, prema kojima se zaključuje jesu li ciljevi ostvareni ili nisu.



Slika 14. Model strateških inicijativa [11]

4.3.1. Proizvodna razina

Proizvodna razina predstavlja fizičko okruženje postrojenja u kojem se odvijaju aktivnosti – proizvodni procesi, poput bušenja, taljenja, oblikovanja, zagrijavanja, hlađenja ili bojanja, koji pretvaraju ulazne materijale u novo stanje povećane vrijednosti. [12]

4.3.2. Razina proizvodnih operacija

Razina proizvodnih operacija uključuje aktivnosti slične izvornim funkcijama definiranim MESA-11 modelom, za čije su izvođenje potrebni alati, kao što su senzori, programibilni kontroleri i softverski sustavi, poput sustava za izvršavanje proizvodnje, sustava osiguravanja kvalitete, sustava upravljanja skladištem i logističkih sustava, sustava za raspoređivanje radne snage i brojnih drugih. Navedeni alati koriste se za definiranje, izvršavanje, prikupljanje, analizu, upravljanje i izvještavanje o aktivnostima koje se zbivaju na proizvodnoj razini. Raspon alata za upravljanje i generiranje informacija može biti vrlo raznolik, ovisno o potrebama svakog pojedinog poduzeća, te obično dolazi u velikom broju, od preko 50 i više različitih softverskih aplikacija. [12]

4.3.3. Razina upravljanja poslovnim operacijama

Razina upravljanja poslovnim operacijama uključuje informacijske sustave i alate, u čijem su fokusu planiranje proizvodnje i administrativna pitanja poduzeća. Odražava šire administrativne zahtjeve i interese, a ovisi o toku informacija s i ka razini proizvodnih operacija, kako bi se osigurali relevantni podaci potrebni za planiranje. Uključuje širok raspon različitih alata namijenjenih izvršavanju poslovnih operacija, koje se mogu klasificirati u različite skupine, ovisno o području kojem su usmjerene. [12]

Neki od uobičajenih alata prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Alati za izvršavanje poslovnih operacija [12]

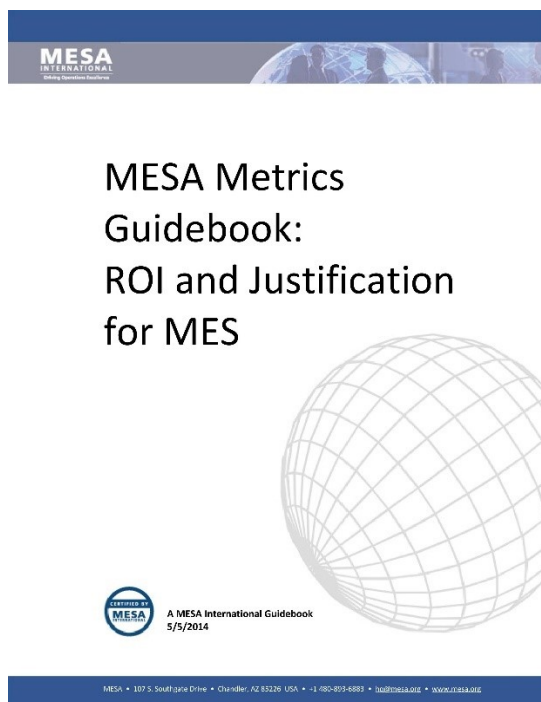
Poslovne operacije	Alati
S fokusom na kupce	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Upravljanje potrebama kupaca – CRM ▪ Upravljanje uslugama
S fokusom na financije	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planiranje resursa poduzeća – ERP ▪ Poslovna inteligencija – BI
S fokusom na proizvode	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oblikovanje pomoću računala – CAD ▪ Proizvodnja podržana računalom – CAM ▪ Upravljanje životnim ciklusom proizvoda – PLM
S fokusom na usklađenost	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Upravljanje dokumentacijom ▪ ISO norme ▪ Zaštita okoliša i održavanje zdravlja i sigurnosti na radu – EH&S
S fokusom na zalihe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nabava ▪ Planiranje lanca opskrbe – SCP
S fokusom na pouzdanost opreme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Upravljanje imovinom poduzeća – EAM ▪ Računalni sustav upravljanja održavanjem – CMMS

4.3.4. Razina strateških inicijativa

Strateške inicijative predstavljaju šire ciljeve poduzeća, za čije ostvarenje je nužno dobivanje informacija s nižih razina u stvarnom vremenu. Svako poduzeće može postaviti vlastitu stratešku inicijativu, ovisno o svojim afinitetima i potrebama, a MESA posebno naglašava važnost sljedećih 7 inicijativa:

1. Upravljanje imovinom – APM
2. Vitka (*lean*) proizvodnja
3. Upravljanje životnim ciklusom proizvoda
4. Kvaliteta i usklađenost s propisima
5. Poduzeće u stvarnom vremenu (eng. *Real-Time Enterprise*)
6. Mjerenje učinkovitosti proizvodnje
7. Povrat uložениh sredstava – ROI

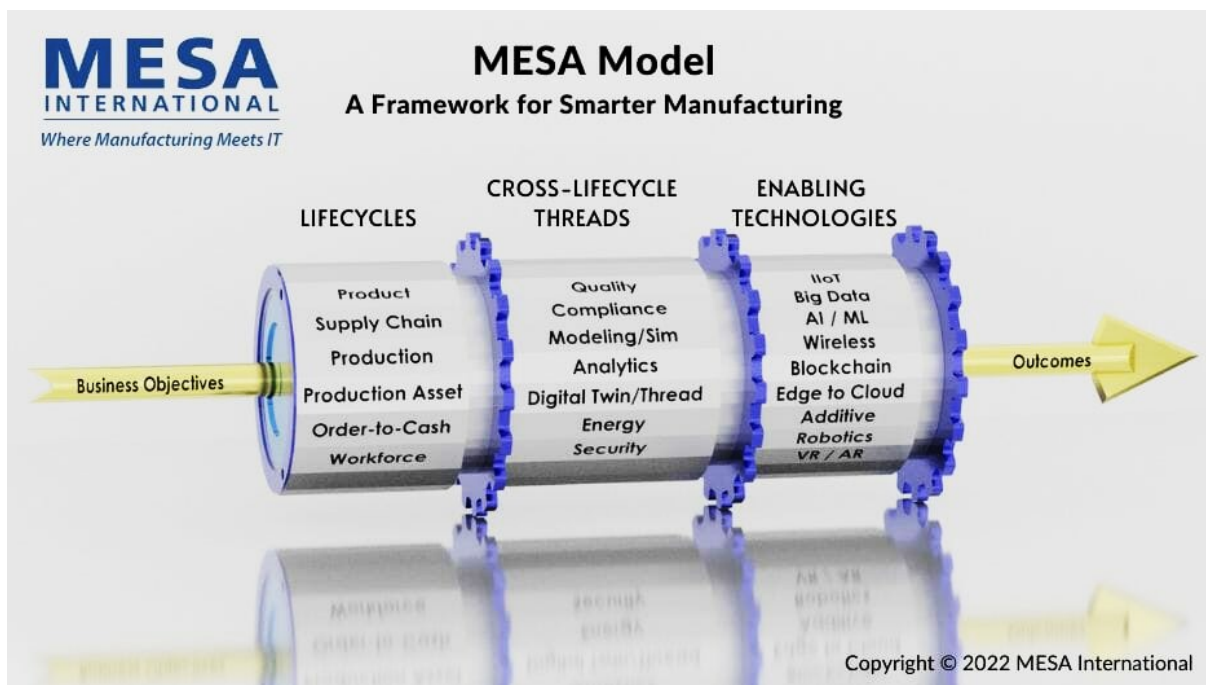
Za navedene strateške inicijative izdani su i detaljni vodiči sa smjernicama i praktičnim primjerima, koji bi trebali pomoći poduzećima u njihovoj uspješnoj provedbi.



Slika 15. Naslovnica jednog od MESA vodiča za strateške inicijative [13]

4.4. Model pametne proizvodnje

Najnoviji MESA model, *Smart Manufacturing*, tj. model pametne proizvodnje, predstavljen je 2022. godine, kako bi pomogao u definiranju sadašnjeg i budućeg okvira pametne proizvodnje. Razmatra koncepte koji su oduvijek bili dio proizvodnje, a poseban naglasak stavljen je na to kako su ti koncepti postali „pametni“, integriranjem srodnih funkcija i uključivanjem naprednih tehnologija u proces.



Slika 16. Model pametne proizvodnje [14]

Model, prikazan na Slici 16, predstavlja dinamičko okruženje u kojem životni ciklusi, niti između životnih ciklusa i prateće tehnologije, iako odvojeni kao zasebne uloge, zapravo djeluju simultano kako bi se omogućili postizanje postavljenih ciljeva poduzeća.

4.4.1. Životni ciklusi

Životni ciklusi predstavljaju poslovne procese i tokove vrijednosti u proizvodnji koje je potrebno optimizirati. Cilj pametne proizvodnje jest povećati povezanost i transparentnost u svim dimenzijama poslovanja, utječući na sve životne cikluse. U model su uključeni životni ciklusi primjenjivi u bilo kojem proizvodnom postrojenju, kao što su:

- **Životni ciklus proizvoda**
- **Životni ciklus proizvodnje**
- **Životni ciklus imovine**
- **Životni ciklus lanca opskrbe**
- **Životni ciklus radne snage**

Međutim, primjena navedenih životnih ciklusa može se razlikovati ovisno o vrsti industrije ili stupnju složenosti poduzeća, stoga su u modelu definirane zajedničke funkcije za svaki životni ciklus, zajedno s varijacijama specifičnima za pojedinu industriju. [14]

4.4.2. Niti između životnih ciklusa

Budući da se proizvodni procesi nerijetko isprepleću i protežu kroz više različitih životnih ciklusa, modelom su opisane niti kojima su ti životni ciklusi međusobno povezani, a koje pomažu u povezivanju njihovih funkcija, kako bi se postigli specifični ciljevi, poput:

- **Zahtijevane razine kvalitete**
- **Uskladenosti s propisima**
- **Smanjenja potrošnje energije**
- **Osiguravanja sigurnosti**
- **Analitike**

Osnovna zadaća niti jest osigurati da životni ciklusi djeluju kohezivno, a ne neovisno jedan o drugome. [14]

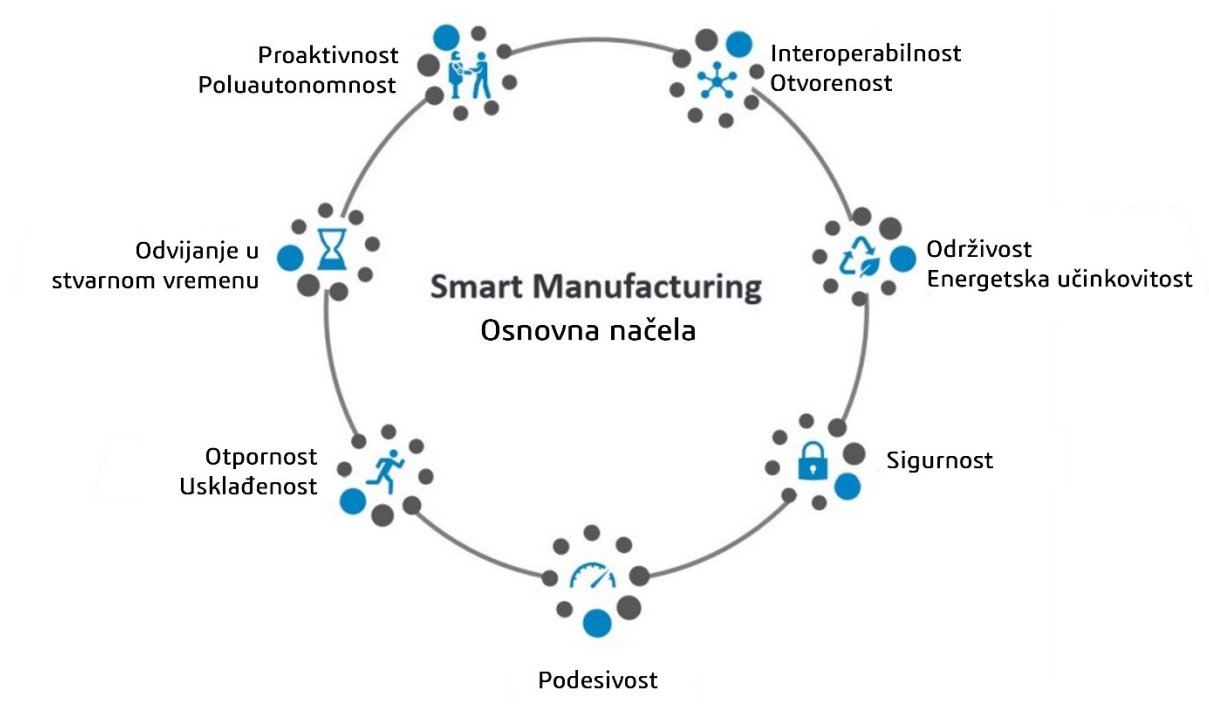
4.4.3. Prateće tehnologije

Neke od tehnologija koje su uključene u model, a omogućuju provođenje pametne proizvodnje su [14]:

- **Industrijski Internet stvari – IIoT**
- **Umjetna inteligencija i strojno učenje – AI/ML**
- **Virtualna i proširena stvarnost – VR/AR**
- **Aditivna proizvodnja**
- **Robotika**

4.4.4. Osnovna načela pametne proizvodnje

Implementacija 7 osnovnih načela pametne proizvodnje, navedenih niže na Slici 17, osigurava poduzećima ostvarivanje strateške prednosti na tržištu, u vidu povećane transparentnosti, brzine, agilnosti i inovativnosti.



Slika 17. Osnovna načela pametne proizvodnje [15]

5. IMPLEMENTACIJA SUSTAVA UPRAVLJANJA PROIZVODNOM

Implementacija MES sustava u poduzeće složen je proces koji zahtijeva mnogo vremena, promišljanja i ulaganja. Kako bi se razvio kvalitetan sustav koji će omogućiti najoptimalnije iskorištavanje resursa, prije samog procesa implementacije potrebno je najprije razmisliti o tome što se uopće želi postići uvođenjem MES sustava, a zatim provesti detaljnu analizu kojom će se ustanoviti:

- Koje procese treba unaprijediti?
- U kojim fazama proizvodnje učinkovitost nije zadovoljavajuća?
- Stvara li neki proizvodni proces više troškova nego dobiti?

Identifikacija navedenih problema u poduzeću znak je da su potrebne promjene, koje će omogućiti implementacija MES sustava. Pritom je izuzetno važno da provedena analiza prati čitav proizvodni proces, jer je samo na taj način moguće iskoristiti puni potencijal MES sustava, koji će omogućiti optimizaciju proizvodnje od samog početka do kraja.

5.1. Ciljevi implementacije

Razlozi uvođenja MES sustava razlikuju se, naravno, od poduzeća do poduzeća, ovisno o njihovim preferencijama, no neki ciljevi ipak se mogu smatrati standardnima. To su primjerice [16]:

- **Optimizacija cjelokupnog lanca opskrbe**
- **Poboljšanje kvalitete podataka za procjenu procesa i proizvoda**
- **Transparentnost kompletnog proizvodnog procesa**
- **Smanjenje troškova skladištenja materijala**
- **Smanjenje administrativnih poslova za održavanje proizvodne dokumentacije**
- **Smanjenje operativnih troškova**
- **Poboljšanje postupka donošenja odluka zahvaljujući jednostavnijem pristupu informacijama**

5.2. Ključni koraci pri implementaciji

Prilikom planiranja procesa implementacije MES sustava nužno je provesti korake koji će osigurati snažne temelje za budući projekt. Ti koraci uključuju:

Određivanje opsega projekta i zahtjeva korisnika

- Opsegom projekta definiraju se očekivanja implementacije i traženi rezultati, na temelju kojih se kreiraju potencijalna rješenja
- Ključno je isplanirati koji se točno procesi žele povezati i pratiti, te provjeriti dosjeduju li se potrebni sustavi povezivanja

Izgradnja internog projektnog tima

- Timovi se najčešće sastoje od manje skupine profesionalaca, upoznate s događajima i potrebama na proizvodnoj liniji, koji imaju ključnu ulogu u kontinuiranom donošenju odluka, kao i kontaktu s potencijalnim poslovnim suradnicima

Pronalazak poslovnih suradnika

- Postoje dvije mogućnosti:
 1. **Odabir ovlaštenog distributera**, koji nudi licencirana softverska rješenja po prihvatljivijim cijenama, no ne sudjeluje u daljnjem procesu implementacije
 2. **Odabir specijalizirane tvrtke**, koja pruža kompletnu korisničku podršku i sudjeluje u svim koracima implementacije, od početnog planiranja, preko izgradnje, pa sve do kreiranja cjelovitog sustava

Definiranje ciljeva

- Omogućava lakše praćenje željenih rezultata i učinkovito iskorištavanje procesa

Postavljanje rasporeda

- S obzirom na postavljene ciljeve, definiraju se vremenski okviri unutar kojih bi se trebale izvršiti ključne etape procesa
- Tako postavljene okviri olakšavaju praćenje napretka integracije, kao i pripremu za iduće korake

Konfiguracija MES aplikacije

- Ključan korak u koji su uključene sve najvažnije osobe u poduzeću: izvršni direktori, šefovi odjela i operativni menadžeri, koji u dogovoru sa suradnicima postavljaju inicijalno rješenje
- Na temelju dostupnih povratnih informacija, početno rješenje se testira, te po potrebi prilagođava ili nadograđuje

Slika 18. Prvih 6 ključnih koraka pri implementaciji MES sustava [17]

Testiranje pilot projekta

- Pilot projekt izuzetno je važan korak u implementaciji konačnog rješenja, budući da se na manjem uzorku mogu testirati sve značajke i funkcionalnosti sustava
- Na temelju dobivenih rezultata zaključuje se ide li projekt u dobrom smjeru ili ga je potrebno dodatno prilagoditi prema potrebama poduzeća

Revizija, prilagodba i iteracija početnih rješenja

- Provođi se nakon uspješnog pilot projekta, gdje se u suradnji s poslovnim partnerima ponovno razmatraju trendovi i očekivanja projekta, te se revidira kompatibilnost sustava s mogućnostima tima
- Ovaj korak je ključan kako bi se ispravno programirali svi metrički podaci i kako bi se osigurala integracija svih planiranih elemenata u sustavu

Osposobljavanje osoblja

- Nakon što je pilot projekt, zajedno s naknadnim izmjenama, dovršen, započinje se s obukom operatora i inženjera koji će sudjelovati u razvijanju sustava
- U tom procesu najvažnija je uloga voditelja tima, koji je uključen u sve operacije i usmjerava svo uključeno osoblje

Implementacija prvog rješenja

- Integracija konačnog softverskog rješenja uobičajeno se provodi postupno, na način da se najprije integrira na samo jednom od strojeva
- Na taj način osigurava se uspješnija integracija rješenja s čitavim timom, što znatno ubrzava implementaciju softvera i na preostale strojeve i opremu

Proširivanje rješenja

- Uspješna implementacija MES sustava u poduzeće rezultirat će brzim povratom uloženi sredstava (ROI), što će potaknuti tvrtku da nastavi s digitalnom transformacijom poduzeća i proširi rješenja i na druge proizvodne pogone

Slika 19. Preostalih 5 ključnih koraka pri implementaciji MES sustava [17]

5.3. Potencijalni problemi pri implementaciji

Iako procesu implementacije prethodi pomno promišljanje o ishodima projekta i svemu što on uključuje, u tijeku razvoja sustava ipak se mogu pojaviti potencijalni problemi, kao što su:

Kupovina softverskog rješenja prije pronalaska stručnog suradnika

- Iako se ponekad kupovina softverskog rješenja preko ovlaštenog distributera čini kao optimalna odluka s obzirom na niže troškove, to vrlo često u konačnici rezultira velikim dodatnim troškovima i kašnjenjima zbog neposjedovanja dovoljno stručnog kadra u vlastitom poduzeću
- Stoga je bolja odluka odabir specijalizirane tvrtke, čiji će iskusni stručnjaci pružiti sve potrebne informacije i upute za uspješniju implementaciju odabranog rješenja

Izostanak korisničke podrške

- Posjedovanje stručne korisničke podrške od ključnog je značaja kako bi se otklonile sve eventualne pogreške ili problemi koji se mogu javiti tijekom procesa implementacije

Prekomjerno prilagodavanje rješenja

- Svako poduzeće odabrat će rješenje koje najbolje odgovara njihovim zahtjevima, a potom ga po potrebi i dodatno prilagoditi, no ukoliko pretjeraju u tom procesu, može se dogoditi da sustav ne bude u stanju dovoljno brzo se prilagoditi promjenama i odgovoriti na probleme koji se mogu javiti

Nedostatak odgovarajuće osobe na ključnim pozicijama

- Izuzetno je bitno da se odgovorne osobe (voditelji), odabrani od strane poduzeća, postave na prave pozicije u pravo vrijeme
- Ukoliko se voditelji postave na pozicije za koje nisu u potpunosti kompetentni, donošenje ispravnih odluka može se znatno narušiti

Neprenošenje znanja unutar poduzeća

- Zadatak voditelja timova je, između ostaloga, i prijenos znanja i informacija, koje su prikupili u suradnji sa stručnim suradnicima, svima ostalima uključenima u projekt
- Kvalitetan prijenos znanja ključan je kako bi se osigurala što uspješnija upotreba cjelokupnog sustava i neovisnost o vanjskoj podršci, budući da je osoblje dovoljno educirano da samo otkloni nepredviđene probleme koji se mogu javiti u toku rada sustava

Slika 20. Potencijalni problemi pri implementaciji MES sustava [17]

5.4. Odabir odgovarajućeg rješenja

Na rastućem tržištu MES sustava sve je veći izbor softverskih rješenja na koja se poduzeća mogu odlučiti, a koja se mogu značajno razlikovati po dostupnim tehnologijama, alatima, količini prostora za pohranu, pristupačnosti, cijeni i brojnim drugim kriterijima. Kako bi se odabralo najoptimalnije rješenje nužno je:

1. **Poznavati vlastito poduzeće:** postojeće proizvodne kapacitete, postojeću razinu automatizacije, ograničenja postojeće informatičke infrastrukture, mogućnosti povezivanja postojećih strojeva
2. **Posjedovati kvalificirane profesionalce koji će osigurati uspješno vođenje procesa implementacije**
3. **Imati jasnu viziju digitalne transformacije:** imati definirane ciljeve, isplanirati potrebe, odrediti prioritete

5.4.1. Tipovi MES sustava

MES sustave moguće je kategorizirati na različite načine. Jedna od mogućih podjela je podjela prema **vrsti postavljanja**, prema kojoj se razlikuju:

- **Fizički MES sustavi (eng. *On-premise MES*)**
- **MES sustavi „u oblaku“ (eng. *Cloud-based MES*)**
- **Hibridni MES sustavi**

Fizički MES sustavi namijenjeni su prvenstveno poduzećima koja raspolažu izuzetno povjerljivim podacima, stoga im je bitno da su oni dostupni isključivo na jednome mjestu i ne prelaze okvire proizvodnog pogona.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci fizičkih MES sustava [18]

Prednosti	Nedostaci
Sigurniji pristup podacima	Skuplje proširivanje rješenja i održavanje sustava
Sposobnost upravljanja većom količinom podataka	Posebno postavljanje svake potrebne stanice
Veća prilagodljivost rješenja	Potreba za hardverskom IT podrškom
Potpuna kontrola privatnosti i sigurnosti	
Posjedovanje softvera	

S druge strane, **MES sustavi „u oblaku“** namijenjeni su poduzećima kojima je najvažnija mogućnost upravljanja i konfiguracije sustava s različitih lokacija.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci MES sustava „u oblaku“ [18]

Prednosti	Nedostaci
Brža konfiguracija i proširivanje rješenja	Potreba za <i>cloud</i> IT podrškom
Niži investicijski troškovi	Potreba za stalnom internetskom povezanošću
Pristup jednom sustavu s različitih platformi	Plaćanje pretplate za <i>cloud</i> usluge
Podrška za mješovite načine proizvodnje	
Mogućnost konfiguracije s više mjesta	
Automatsko ažuriranje sigurnosnih <i>firmware-a</i> i izrada sigurnosnih kopija	

Hibridni MES sustavi kombiniraju prednosti oba tipa sustava, pružajući fleksibilnost i jednostavnu mogućnost proširenja *cloud* sustava te sigurnost i kontrolu fizičkih sustava. Omogućuju tvrtkama individualnu prilagodbu njihovog MES rješenja, na način na odaberu koje će komponente zadržati unutar proizvodnog pogona, a koje će premjestiti na *cloud* servis.

Upravo ta prilagodljivost čini ih najčešće odabranim rješenjem, budući da zadovoljava sve potrebe današnjih proizvodnih poduzeća.

Osim prema vrsti postavljanja, MES sustave moguće je podijeliti i s obzirom na **specifičnost rješenja** koja pružaju, pa tako postoje:

- **Specijalizirani MES sustavi, namijenjeni točno određenoj vrsti industrije**
- **Generički MES sustavi**

Ključna razlika između ova dva tipa sustava je u tome što su **specijalizirani MES sustavi** dizajnirani tako da uglavnom sadrže predefinirane funkcionalnosti, koje su unaprijed usklađene s potrebama industrije, dok su **generički MES sustavi** univerzalni i zahtijevaju naknadnu prilagodbu kako bi se uskladili s konkretnim zahtjevima industrije.

Tablica 4. Prednosti i nedostaci specijaliziranih MES sustava [18]

Prednosti	Nedostaci
Brža implementacija	Manja fleksibilnost i agilnost
Unaprijed definirani KPI-ovi olakšavaju lakše praćenje i analizu postignutih rezultata	Ograničeno praćenje pojedinačnih procesa
Lakše zadovoljavanje postavljenih standarda industrije	Otežano proširivanje i prilagodba promjenjivim potrebama ili rastućem opsegu poslovanja

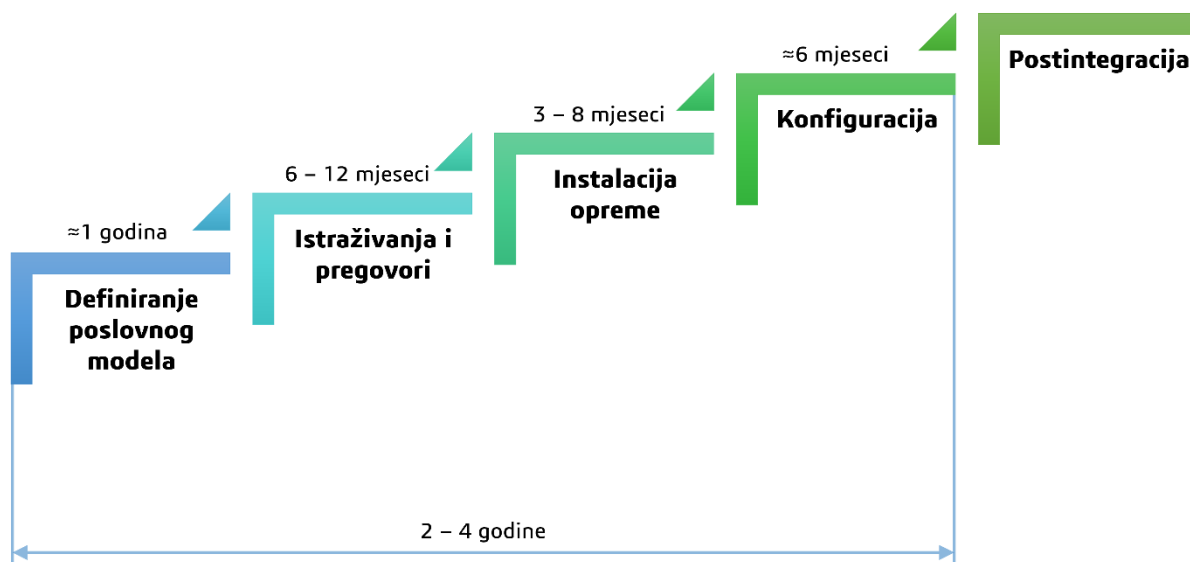
Tablica 5. Prednosti i nedostaci generičkih MES sustava [18]

Prednosti	Nedostaci
Veća fleksibilnost	Viši troškovi implementacije
Podrška za različite vrste proizvodnje	Duži proces implementacije
Širi raspon funkcionalnosti	Potreba za dodatnom konfiguracijom sustava, kako bi se prilagodili specifičnim zahtjevima poduzeća

5.5. Trajanje procesa implementacije

Proces implementacije MES sustav dugotrajan je proces, koji uobičajeno traje dvije do četiri godine, iako može biti i kraći, ali i dulji. Stvarno trajanje ovisi o brojnim faktorima, kao što je složenost projekta ili veličina poduzeća.

Tijekom tog procesa, svako poduzeće prolazi kroz nekoliko standardnih faza, koje su prikazane na Slici 21. [17]



Slika 21. Grafički prikaz trajanja procesa implementacije MES sustava

1. faza: Definiranje poslovnog modela

- Interna faza poduzeća u kojoj se postavljaju ciljevi projekta, definiraju specifične potrebe poduzeća i pronalaze odgovarajući poslovni suradnici
- Uobičajeno traje oko godinu dana

2. faza: Istraživanja i pregovori

- Faza u kojoj sudjeluju svi potencijalni vanjski suradnici, koji predstavljaju ponude s obzirom na specifičnosti projekta postavljene u prethodnoj fazi
- Uobičajeno traje 6 do 12 mjeseci

3. faza: Instalacija opreme

- Faza čije je trajanje najteže predvidjeti, budući da uvelike ovisi o stupnju složenosti potrebne opreme
- Također, u ovu fazu često je potrebno uključiti i specijalizirane IT stručnjake koji će osigurati pravilno postavljanje opreme, što može dodatno produžiti fazu
- Uobičajeno traje 3 do 8 mjeseci

4. faza: Konfiguracija

- Trajanje uveliko ovisi o pristupu implementaciji – ukoliko je odabran specijaliziran MES sustav, tada će proces prilagodbe biti kraći nego ako je odabran neki od generičkih MES sustava, kojeg će biti potrebno dodatno konfigurirati
- Uobičajeno traje oko 6 mjeseci, budući da se to smatra minimalnim periodom koji je potreban kako bi se rješenje u potpunosti integriralo unutar poduzeća

5. faza: Postintegracija

- Faza koja slijedi nakon uspješne implementacije odabranog sustava, a uključuje redovito (najčešće godišnje) održavanje opreme i ažuriranja softvera

5.6. Troškovi procesa implementacije

Ukupnu cijenu implementacije MES sustava vrlo je teško predvidjeti, budući da može značajno varirati ovisno o različitim čimbenicima, poput složenosti sustava, veličine organizacije ili specifičnih zahtjeva proizvodnih procesa. Ipak, moguće je definirati nekoliko glavnih kategorija troškova koje utječu na konačnu cijenu:

1. Troškovi licenciranja

- Ovisi o broju korisnika te traženim modulima i funkcionalnostima

2. Troškovi integracije

- Uključuje troškove nabave potrebne opreme te konfiguracije odabranog softverskog rješenja
- Uglavnom su uključeni u cijenu ugovorenog implementacijskog paketa

3. Troškovi obuke

- Uveliko variraju ovisno o broju osoba uključenih u projekt i o složenosti samog sustava
- Iako mogu biti vrlo visoki, proces obuke nužan je kako bi čitav tim bio sposoban učinkovito koristiti MES sustav, čime se osigurava potpuna interna autonomija i kontrola nad sustavom, što dugoročno utječe na smanjenje troškova

4. Troškovi održavanja

- Uključuju kontinuiranu podršku i ažuriranja potrebna za kvalitetno funkcioniranje sustava
- Najčešće su sklapaju ugovori o periodičkom (uglavnom godišnjem) održavanju

5. Troškovi dodatne prilagodbe sustava

- Ukoliko implementacija odabranog MES sustava zahtijeva velike prilagodbe kako bi se ispunile specifične poslovne potrebe, tada i ovi troškovi čine značajan udio u ukupnim troškovima

6. Troškovi prijenosa podataka

- Javljaju se prilikom prelaska s postojećih sustava upravljanja proizvodnjom na novi MES sustav
- Uključuju uzimanje podataka iz postojećih sustava te njihovu transformaciju i učitavanje u novi sustav

5.6.1. Povrat uložениh sredstava

Prema podacima američke tvrtke *ScienceSoft*, koja se bavi uslugama informatičkog savjetovanja i razvoja softvera, trošak implementacije MES sustava u srednje velika poduzeća iznosi između 375 000 i 600 000 američkih dolara, dok se kod velikih poduzeća kreće između 750 000 i 1 200 000 američkih dolara, a ovisi o svim prethodno nabrojenim faktorima.

Također, navode i vrijednost očekivanog povrata uložениh sredstava od 400% u prve 3 godine implementacije rješenja. [19]

Povrat uložениh sredstava (ROI) pokazatelj je uspješnosti poslovanja, koji se koristi za izračun profitabilnosti uložene investicije. Definira se kao omjer neto dobiti i troška ulaganja, prema priloženoj formuli (1):

$$ROI = \frac{\text{Neto dobit}}{\text{Trošak ulaganja}} = \frac{\text{Ukupna ostvarena dobit} - \text{Trošak ulaganja}}{\text{Trošak ulaganja}} \quad (1)$$

Jasno je kako bilo koji pozitivan iznos ROI označava isplativost investicije, stoga se 400%-na vrijednost povrata ulaganja u MES sustave može smatrati izvrsnom.

5.7. Rezultati implementacije

Istraživanje ranije spomenute tvrtke *ScienceSoft* pokazalo je sljedeće rezultate implementacije MES sustava [19]:

- **Povećanje ukupne učinkovitosti opreme za 15%** zahvaljujući praćenju i analizi podataka o proizvodnji u stvarnom vremenu, što pomaže u pronalasku područja za poboljšanje
- **Povećanje dostupnosti opreme za 20-30%** zahvaljujući učinkovitoj analizi performansi opreme, otkrivanju problema u performansama te planiranju aktivnosti održavanja
- **Smanjenje troškova proizvodnje za 10%** zahvaljujući pravilnom planiranju procesa i maksimalnom iskorištavanju opreme
- **Povećanje kvalitete proizvodnje za 10-20%** zahvaljujući brzom otkrivanju odstupanja u proizvodima i proizvodnim procesima te planiranju potrebnih promjena za rješavanje problema
- **Smanjenje vremena proizvodnog ciklusa za 45%** zahvaljujući temeljitom planiranju proizvodnih procesa i korištenju automatiziranih sustava

6. ISTRAŽIVANJE TRŽIŠTA POSTOJEĆIH MES SUSTAVA

6.1. Najbolji MES sustavi prema portalu G2.com

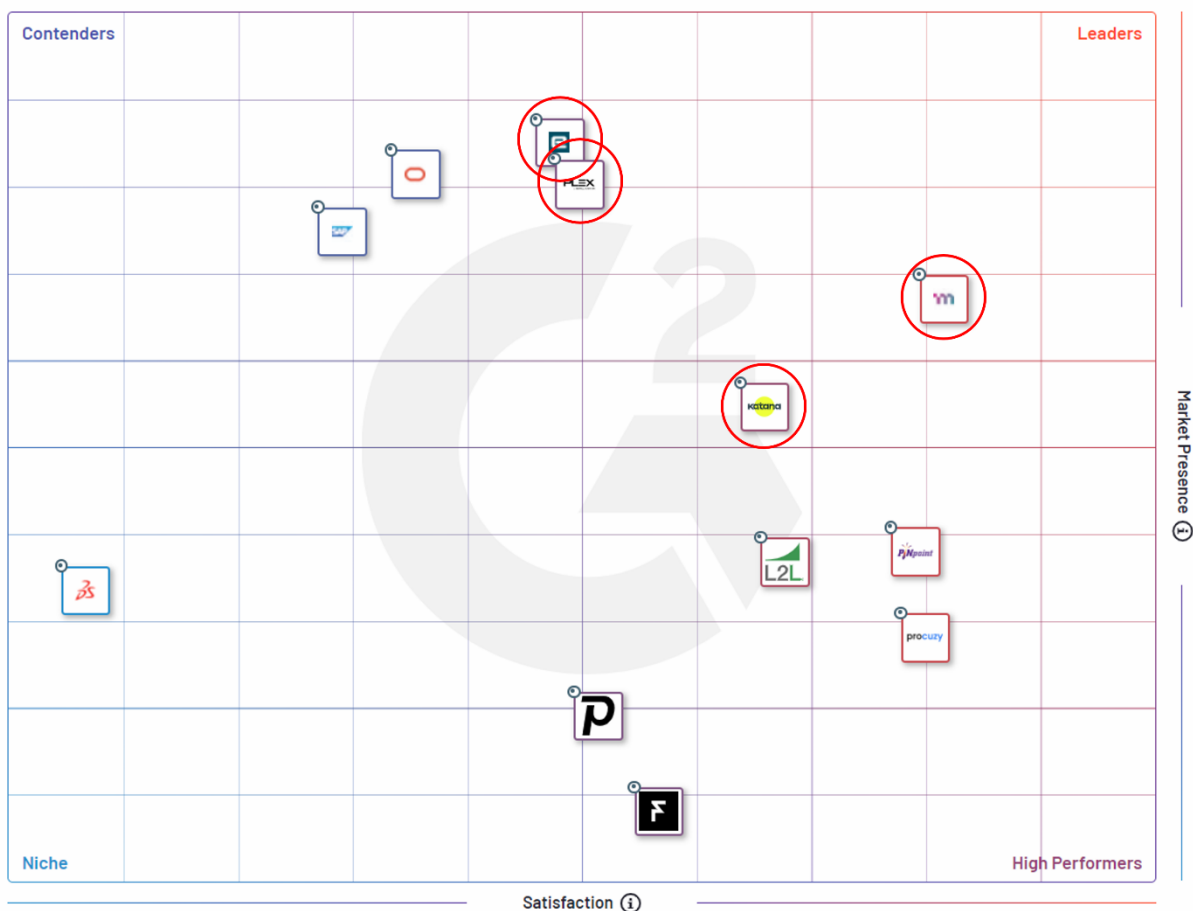
Prvi dio istraživanja tržišta proveden je na temelju podataka dostupnih na portalu G2.com – američkoj internetskoj platformi, utemeljenoj 2012. godine u Chicagu, kao rješenje za sve brže promjene u tehnologiji koje tradicionalni analitički model više nije mogao pratiti. Petorica perspektivnih poduzetnika (Godard Abel, Tim Handorf, Mike Wheeler, Matt Gorniak i Mark Myers) udružila su svoja znanja kako bi pokrenuli portal namijenjen pronalasku odgovarajućeg industrijskog softvera, koji danas sadrži preko 145 000 različitih proizvoda i usluga, i broji preko 80 milijuna korisnika godišnje.



Slika 22. Sjedište portala G2 u Chicagu [20]

Portal funkcionira tako da putem *crowdsourcinga* prikuplja recenzije korisnika o softverima koji se nalaze u njegovoj bazi, što pomaže drugim korisnicima u donošenju odluka o korištenju ili kupnji nekog od softvera. Kako bi se osigurala relevantnost prikupljenih recenzija, G2 zahtijeva od korisnika registraciju putem *LinkedIn* profila, kao potvrdu njihova identiteta. Na taj način sprječava se recenziranje vlastitih, ali i zlonamjerno recenziranje konkurentskih proizvoda. Također, uz napisanu recenziju potrebno je priložiti i snimku zaslona u svrhu verifikacije korištenog proizvoda, a sve prikupljene recenzije naknadno se još pregledavaju ručno, kako bi se uklonili neprimjereni i suvišni komentari.

Na temelju prikupljenih recenzija, algoritam za obradu podataka u stvarnom vremenu ocjenjuje proizvode i prodavatelje prema razini zadovoljstva i prisutnosti na tržištu, a potom se na osnovi dodijeljenih ocjena kreiraju izvješća, u formi mreža (*gridova*) s 4 kvadranta, koje omogućuju lakšu procjenu i odabir softverskih rješenja potencijalnim kupcima. Portal objavljuje nova izvješća kvartalno, kako bi se osigurala što veća relevantnost podataka na iznimno promjenjivom tržištu. Najrecentnija dostupna mreža, za ljetno 2023. godine, prikazana je na Slici 23.



Slika 23. Najbolji MES sustavi prema G2 ocjenjivačkoj metodologiji [21]

6.1.1. G2 ocjenjivačka metodologija

U izvješću za ljetno 2023. godine uključeni su svi sustavi upravljanja proizvodnjom koji su prikupili minimalno 10 recenzija do 23. svibnja 2023., a rangirani su prema **razini zadovoljstva korisnika** (na temelju korisničkih recenzija) i **prisutnosti na tržištu** (na temelju tržišnog udjela, veličine prodavatelja i društvenog utjecaja) u 4 pripadajuće kategorije [22]:

1. kategorija: Vodeći proizvodi (eng. *Leaders*)

- Proizvodi koji su visoko ocijenjeni od strane korisnika i imaju značajnu prisutnost na tržištu
- Ovdje trenutno pripadaju sljedeći softveri: *Epicor Kinetic, MasterControl Manufacturing Excellence, Katana Cloud Manufacturing, Plex Smart Manufacturing Platform*

2. kategorija: Proizvodi s visokom izvedbom (eng. *High Performers*)

- Proizvodi koji imaju visoke ocjene zadovoljstva korisnika, ali značajno nižu tržišnu prisutnost u usporedbi s drugim proizvodima iz iste kategorije
- Ovdje trenutno pripadaju sljedeći softveri: *PINpoint MES, L2L Smart Manufacturing Platform, Prodsmart*

3. kategorija: Konkurentni proizvodi (eng. *Contenders*)

- Proizvodi koji imaju relativno niske ocjene zadovoljstva korisnika, ali značajnu prisutnost na tržištu
- Ovdje trenutno pripadaju sljedeći softveri: *SAP Manufacturing Execution, JD Edwards EnterpriseOne Manufacturing and Engineering*

4. kategorija: Niche proizvodi

- Proizvodi s relativno niskim ocjenama zadovoljstva korisnika i niskom tržišnom prisutnošću
- Ovdje trenutno pripadaju sljedeći softveri: *FactoryFour, IQMS MES*

Na temelju algoritmom strukturiranih ocjena na skali od 1 do 100, formira se ukupna G2 ocjena za svako softversko rješenje, koja se računa kao aritmetička sredina ocjene zadovoljstva korisnika i ocjene tržišne prisutnosti, zaokružena na nižu cjelobrojnu vrijednost. Pripadajuće ocjene za svaki od softvera uključenih u izvješće prikazane su u tablicama koje slijede.

Tablica 6. Ocjene vodećih proizvoda u kategoriji MES sustava [23]

	Broj recenzija	Razina zadovoljstva	Prisutnost na tržištu	G2 ocjena
Epicor Kinetic	40	58	94	76
MasterControl Manufacturing Excellence	34	81	62	71
Katana Cloud Manufacturing	22	66	53	59
Plex Smart Manufacturing Platform	25	52	61	57

Tablica 7. Ocjene proizvoda s visokom izvedbom u kategoriji MES sustava [23]

	Broj recenzija	Razina zadovoljstva	Prisutnost na tržištu	G2 ocjena
PINpoint MES	27	85	33	59 *
L2L Smart Manufacturing Platform	16	65	26	45
Prodsmart	14	54	13	33

* Iako je softver *PINpoint MES* ocijenjen jednakom ukupnom ocjenom (ocjenom 59) kao i *Katana Cloud Manufacturing*, pa čak i višom od softvera *Plex Smart Manufacturing Platform*, koji je ostvario ukupno 57 bodova, ipak nije uvršten u kategoriju vodećih proizvoda zbog značajno niže ocjene tržišne prisutnosti.

Tablica 8. Ocjene konkurentnih proizvoda u kategoriji MES sustava [23]

	Broj recenzija	Razina zadovoljstva	Prisutnost na tržištu	G2 ocjena
SAP Manufacturing Execution	12	28	81	55
JD Edwards EnterpriseOne Manufacturing and Engineering	10	37	72	54

Tablica 9. Ocjene *niche* proizvoda u kategoriji MES sustava [23]

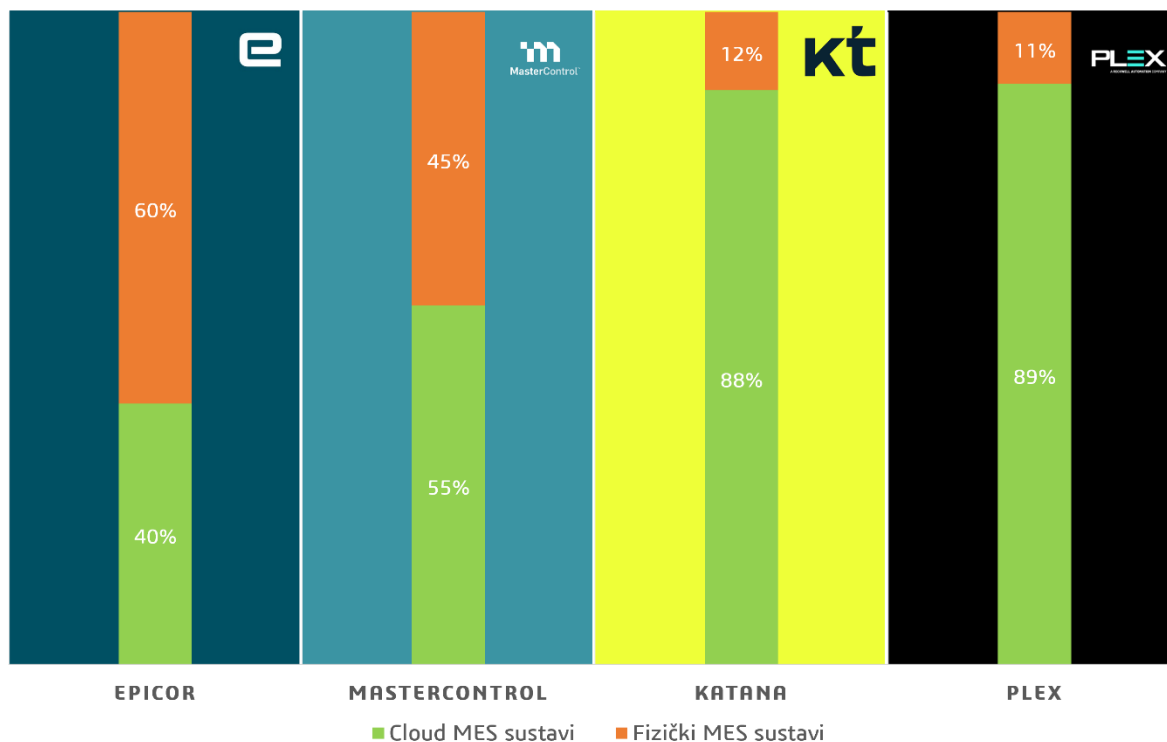
	Broj recenzija	Razina zadovoljstva	Prisutnost na tržištu	G2 ocjena
FactoryFour	10	49	7	28
IQMS MES	12	2	27	14

6.2. Usporedba odabranih MES sustava

Usporedba MES sustava provedena je isključivo na 4 najbolje ocijenjena MES sustava, na temelju dvaju kriterija:

1. Na temelju tipa MES sustava koje koriste poduzeća
2. Na temelju veličine poduzeća

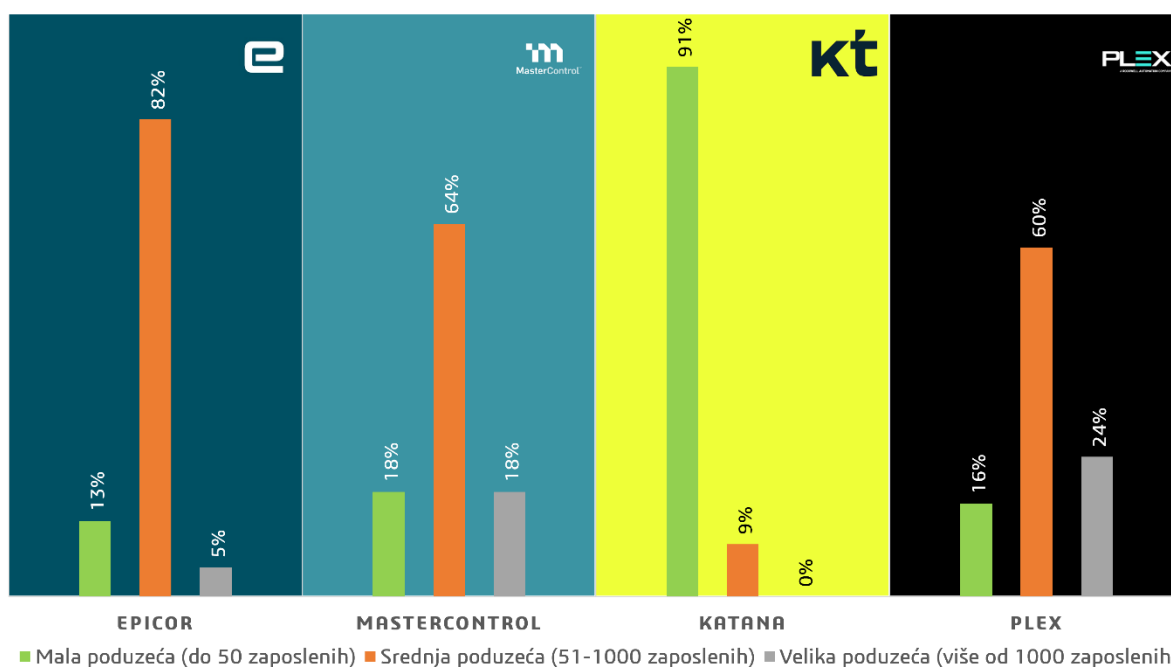
6.2.1. Usporedba prema tipu korištenog MES sustava



Grafikon 1. Udjeli upotrebe *cloud* i fizičkih tipova odabranih MES sustava [24]

Pri prvom kriteriju usporedbe, analiziralo se koji tip odabranih MES sustava koriste poduzeća koja su ih implementirala u svoje poslovanje. Iz Grafikona 1 vidljivo je kako su sustavi upravljanja proizvodnjom proizvođača *Katana* i *Plex* korišteni gotovo isključivo kao MES sustavi „u oblaku“, dok je *Epicor* više korišten u fizičkom okruženju. Kod *MasterControla* raspodjela je prilično ujednačena, uz tek nešto veću upotrebu *cloud* tipa sustava.

6.2.2. Usporedba prema veličini poduzeća



Grafikon 2. Udjeli implementacije odabranih MES sustava u različitim veličinama poduzeća [25]

Pri drugom kriteriju usporedbe, promatrala se veličina poduzeća koja su implementirala odabrane MES sustave. S obzirom na veličinu, poduzeća su podijeljena u 3 kategorije:

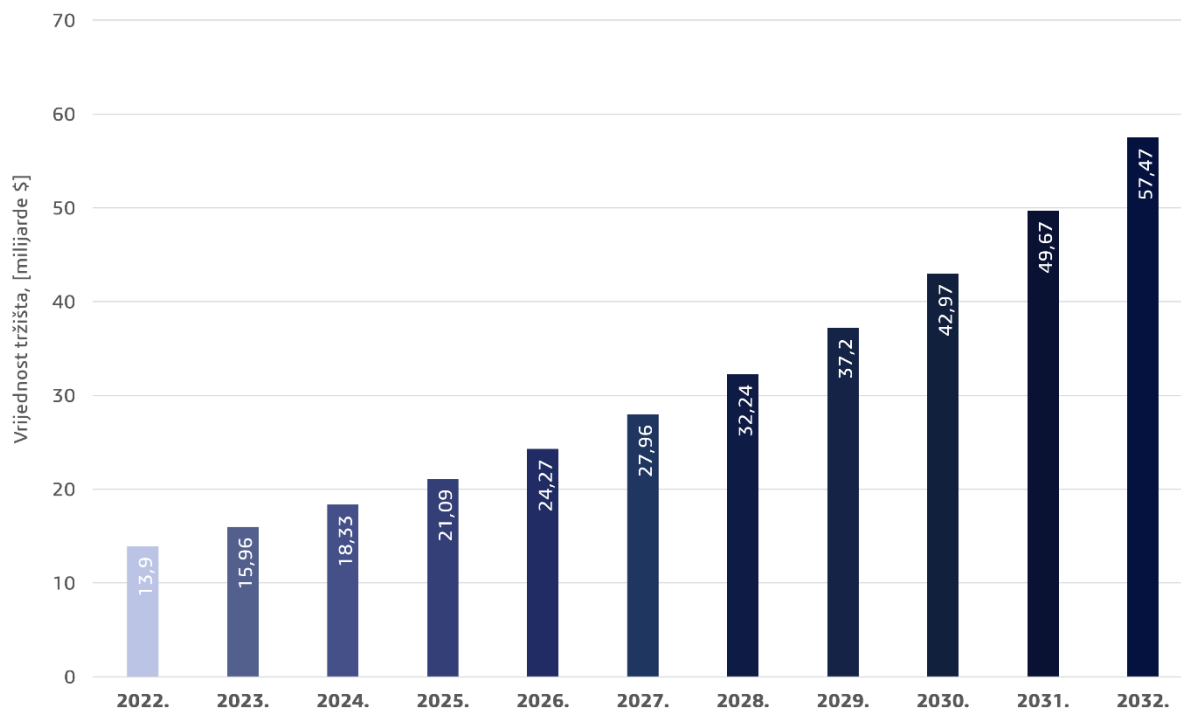
- **Mala poduzeća** – s do 50 zaposlenika
- **Srednje velika poduzeća** – s 51 do 1000 zaposlenika
- **Velika poduzeća** – s više od 1000 zaposlenika

Kao što se može vidjeti na Grafikonu 2, MES sustavi proizvođača *Epicor*, *MasterControl* i *Plex* korišteni su najviše u srednje velikim poduzećima, a značajno manje u malim i velikim poduzećima (*Epicor* nešto više u malim, a *Plex* nešto više u velikim). S druge strane, MES sustav *Katana* primarno je biran kao rješenje za mala poduzeća, odabralo ga je i nekoliko srednje velikih poduzeća, dok ga velika poduzeća nisu uopće koristila.

6.3. Trenutno stanje tržišta i projekcija budućih trendova

U drugom dijelu istraživanja tržišta fokus je stavljen na usporedbu sadašnjeg stanja tržišta i predviđenih očekivanja u idućih 10 godina.

6.3.1. Vrijednost tržišta MES sustava



Grafikon 3. Predviđano kretanje vrijednosti tržišta MES sustava za razdoblje od 2022. do 2032. godine [26]

Trenutna vrijednost globalnog tržišta MES sustava procjenjuje se na otprilike 15,96 milijardi američkih dolara, a kroz 10-godišnji period očekuje se da će se ta vrijednost gotovo učetverostručiti i iznositi otprilike 57,47 milijardi američkih dolara.

Na tako značajan porast vrijednosti utječe nekoliko ključnih faktora [26]:

- **Mogućnost praćenja podataka o stanju proizvodnje u stvarnom vremenu**
 - Pravovremeni podaci omogućuju proizvođačima smanjiti troškove zaliha, povećati učinkovitost proizvodnje, identificirati i eliminirati rizike te prilagoditi proizvodnju potrebama tržišta
- **Kontrola aktivnosti izvan proizvodne linije**
 - Mogućnost upravljanja proizvodnjom „na daljinu“ putem *cloud* sustava značajno je utjecala na porast implementacije MES sustava u posljednje 3 godine, budući da su brojne tvrtke morale promijeniti način svog poslovanja kako bi spriječile zastoje u proizvodnji
- **Smanjenje potrošnje energije i otpada**
 - Značajan rast cijena energenata, kao i sve stroži standardi i viši troškovi gospodarenja i zbrinjavanja otpada, potaknuli su mnoga poduzeća na uvođenje automatiziranih sustava
- **Povećanje brzine i kvalitete proizvodnje**
 - Važnost brže proizvodnje i povezanih lanaca opskrbe posebno se ističe u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji, kako bi se namirile sve veće potrebe rastućeg stanovništva
- **Niži troškovi implementacije**
 - Niži troškovi implementacije osigurat će prvenstveno povećanje upotrebe MES softvera u sektoru malih i srednje velikih poduzeća koja su svjesna njihovih benefita, ali im trenutno predstavljaju prevelike financijske izdatke

6.3.1.1. Složena godišnja stopa rasta (CAGR)

Složena godišnja stopa rasta još je jedan pokazatelj uspješnosti poslovanja, kojim se iskazuje stopa povrata ulaganja u određenom vremenskom razdoblju, izražena u godišnjem postotnom iznosu. CAGR u obzir uzima 3 parametra: početnu vrijednost ulaganja, krajnju vrijednost ulaganja i vremensko razdoblje (izraženo u godinama), a izračunava se prema formuli (2):

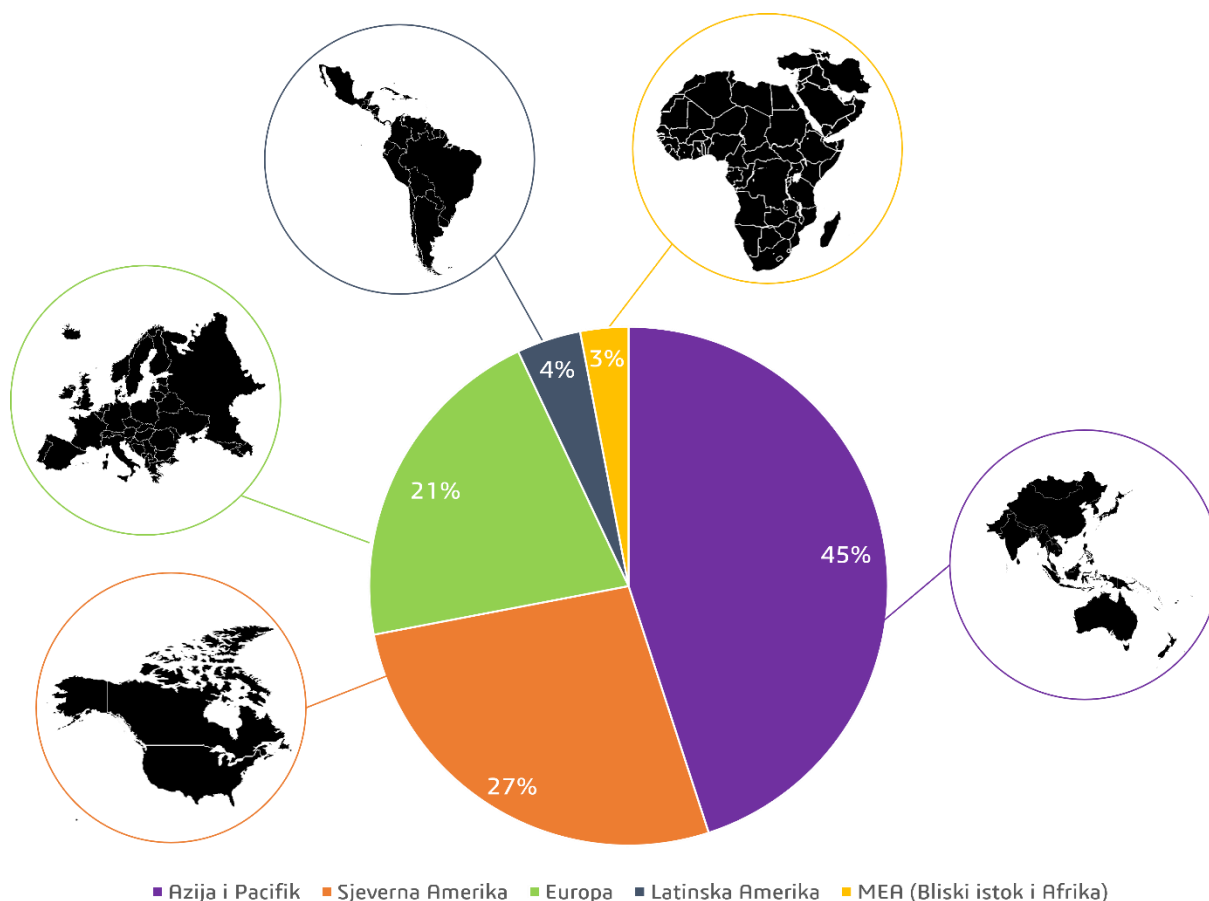
$$CAGR = \left[\left(\frac{\text{Konačna vrijednost ulaganja}}{\text{Početna vrijednost ulaganja}} \right)^{\frac{1}{\text{Broj godina}}} - 1 \right] \times 100\% \quad (2)$$

Analogno tome, na temelju podataka iz Grafikona 3, može se izračunati složena godišnja stopa rasta vrijednosti tržišta MES sustava:

$$CAGR = \left[\left(\frac{57,47}{13,96} \right)^{\frac{1}{10}} - 1 \right] \times 100\% = 15,25\% \quad (3)$$

Valja naglasiti kako se posebno visoka složena godišnja stopa rasta očekuje za hibridne tipove sustava, u sektoru nafte i plina, zbog rastuće važnosti praćenja stvarnih podataka o operacijama u naftnim i plinskim poljima. [26]

6.3.2. Raspodjela tržišnih udjela MES sustava



Grafikon 4. Udjeli pojedinih regionalnih tržišta MES sustava na cjelokupnom svjetskom tržištu [26]

Geografski gledano, na globalnom tržištu MES sustava izdvaja se 5 karakterističnih regija:

1. **Tržište Azije i Pacifika**, koje uključuje područje istočne i jugoistočne Azije te Australije i Oceanije
2. **Sjevernoameričko tržište**, koje uključuje SAD i Kanadu
3. **Europsko tržište**
4. **Latinoameričko tržište**, koja uključuje područje Srednje i Južne Amerike
5. **Tržište Bliskog istoka i Afrike**

Iz Grafikona 4 vidljivo je kako gotovo polovicu globalnog tržišta MES sustava čini tržište Azije i Pacifika, što je sasvim razumljivo budući da je to područje najveće industrijske proizvodnje u svijetu. Udio ovog tržišta će u budućnosti još dodatno rasti, jer su Kina i Indija, kao dvije najbrže rastuće svjetske ekonomije, u stalnoj potrazi za rješenjima koja će im omogućiti što bržu i masovniju proizvodnju.

S udjelom od 27%, drugo najznačajnije tržište je tržište Sjeverne Amerike, što je također razumljivo, budući da su tamo sjedišta nekih od najznačajnijih proizvođača MES sustava, kao što su *General Electric*, *Oracle* i *Rockwell Automation*. Snažna ekonomska razvijenost ovih zemalja omogućuje im znatna ulaganja u razvoj novih naprednih rješenja i tehnologija, stoga će njihov utjecaj na globalnom tržištu i dalje zasigurno rasti.

Nakon sjevernoameričkog, slijedi europsko tržište s udjelom od 21%, kojem ponajviše pridonose 3 najsnažnije ekonomije: Njemačka, Ujedinjeno Kraljevstvo i Francuska, gdje su sjedišta najvećih kompanija, poput *SAP-a*, *Siemensa* i *Dassault Systèmes*. Međutim, ukoliko se ne započne s mnogo značajnijim ulaganjima u industrijsku proizvodnju i u ostatku Europe, taj udio bi se u budućnosti mogao prilično smanjiti.

Najmanje, gotovo zanemarive, udjele u svjetskim okvirima imaju latinoameričko tržište te tržište Bliskog istoka i Afrike. Ipak, uzme li se u obzir da se najveći iznos CAGR-a očekuje u sektoru proizvodnje nafte i plina, značaj bliskoistočnog tržišta bi u predstojećim godinama mogao značajno porasti.

7. MES SUSTAV ZA UPRAVLJANJE LINIJOM ZA UČENJE

U završnom dijelu rada opisane su mogućnosti konkretnog MES sustava – FESTO MES4, koji se koristi za upravljanje linijom za učenje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Budući da je linija za učenje tijekom pisanja ovog rada bila zauzeta drugim ispitivanjima, simulacija proizvodnog procesa nije provedena, pa je u nastavku dan samo pregled funkcionalnosti FESTO MES4 sustava, prema priručniku za rukovanje sustavom kojeg proizvođač nudi.

Upravljanje programom odvija se putem 4 glavna prozora [27]:

1. **Prozor za upravljanje proizvodnjom** – omogućuje praćenje trenutnog stanja proizvodnje
2. **Prozor za upravljanje narudžbama** – omogućuje stvaranje novih narudžbi te praćenje već stvorenih i aktivnih narudžbi
3. **Prozor za upravljanje kvalitetom** – daje uvid u pregled izvješća o učinkovitosti radnih stanica i izvršenih narudžbi
4. **Prozor s glavnim podacima** – omogućuje dodavanje, konfiguriranje ili uklanjanje dijelova, radnih procesa i radnih stanica

7.1. Prozor za upravljanje proizvodnjom

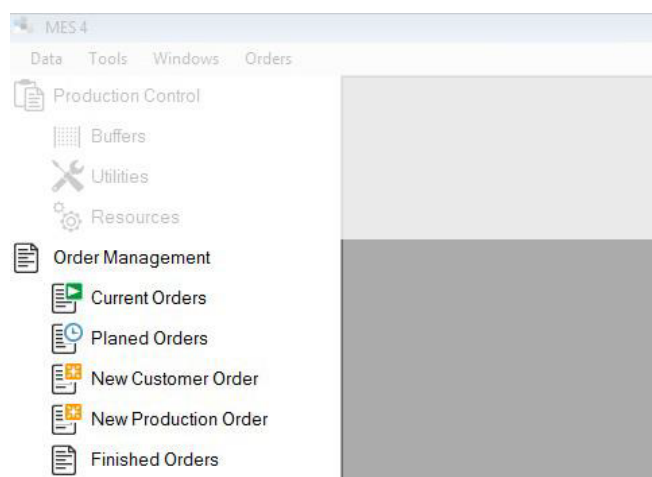


Slika 24. Prozor za upravljanje proizvodnjom [27]

Unutar prozora za upravljanje proizvodnjom nalaze se 3 potprozora:

- **Potprozor za upravljanje skladišnim jedinicama svake radne stanice**
 - Pruža uvid u sve dijelove koji su skladište na pojedinoj radnoj stanici, zajedno s njihovim osnovnim podacima, poput broja, opisa i fotografije dijela ili broja narudžbi za navedeni dio
 - Omogućuje promjenu rasporeda dijelova unutar skladišne jedinice ili uklanjanje pojedinih dijelova
- **Potprozor za upravljanje skladišnim elementima**
 - Omogućuje opremanje ili pražnjenje svakog pojedinog skladišnog elemenata
 - Kako bi se povećala preglednost, skladišni elementi sortirani su prema vrsti kojoj pripadaju, pa tako postoje odvojeni popisi paleta, kutija, spremnika, itd.
- **Potprozor za upravljanje radnim stanicama**
 - Omogućuje praćenje stanja na svakoj radnoj stanici
 - Radne stanice definirane su pripadajućom fotografijom, identifikacijskim brojem, nazivom i IP adresom, a sustav pruža informacije o tome jesu li stanice u automatskom ili ručnom načinu rada, jesu li trenutno zauzete, ima li grešaka na njima te jesu li povezane s MES serverom

7.2. Prozor za upravljanje narudžbama

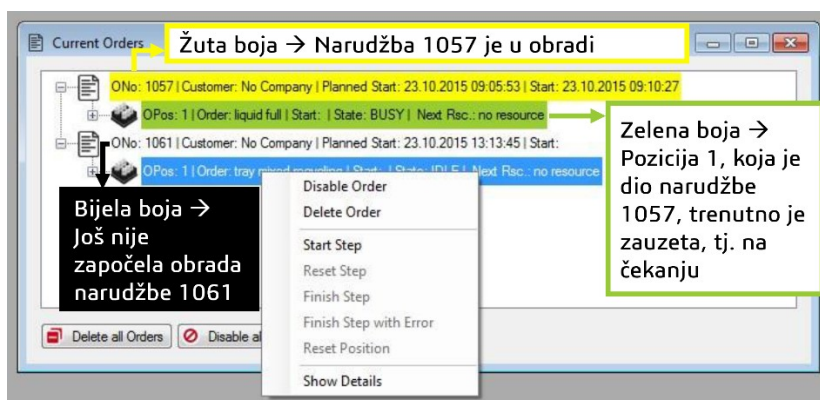


Slika 25. Prozor za upravljanje narudžbama [27]

Unutar ovog prozora nalazi se ukupno 5 dodatnih potprozora:

➤ **Potprozor za upravljanje trenutnim narudžbama**

- Prikazuje trenutno stanje svake narudžbe i sadrži najvažnije podatke o narudžbi: broj narudžbe, naručitelja te planirani i stvarni početak proizvodnje
- Osim toga, pruža informacije i o svakoj stavki koja je uključena u narudžbu, kao što su: redni broj i vrijeme početka proizvodnje stavke te njen trenutni status (PEND = na čekanju, IDLE = neaktivno, BUSY = zauzeto, ERROR = pogreška)
- Kako bi se osigurala preglednost narudžbi, narudžbe su označene različitim bojama:
 - Bijela boja → Nije se još započelo s obradom narudžbe
 - Plava boja → Narudžba je obrađena
 - Žuta boja → Narudžba je u obradi
 - Zelena boja → Narudžba je zauzeta

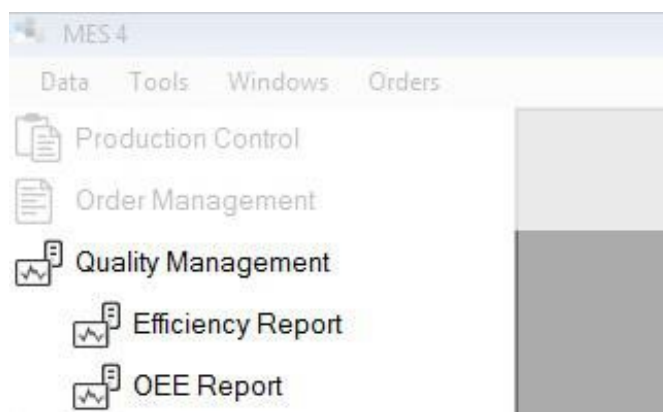


Slika 26. Primjer označavanja narudžbe [27]

- Svaku narudžbu moguće je otkazati, pa je kasnije po potrebi ponovno pokrenuti, ili je trajno obrisati, zajedno sa svim pripadajućim stavkama
- Također, moguće je otvoriti i plan izrade svake pozicije (svake stavke narudžbe), koji između ostaloga sadrži: redni broj koraka, naziv i opis operacije te planirana i stvarna vremena početka i završetka operacije

- **Potprozor za upravljanje planiranim narudžbama**
 - Prikazuje stanje planiranih narudžbi
 - Svaku planiranu narudžbu moguće je odobriti, kako bi započeo proizvodni postupak, ili je izbrisati, zajedno sa stavkama koje sadrži
 - Moguće je promijeniti i planirano vrijeme početka bilo koje narudžbe, prema kojem će sustav automatski izračunati novo vrijeme završetka
- **Potprozor za upravljanje novim narudžbama**
 - Kreiraju se nove narudžbe, ovisno o željama postojećeg ili novog kupca
 - Unutar ovog potprozora moguće je dodavati ili brisati stavke narudžbe, promijeniti vrijeme početka, a sadrži i popis svih proizvoda, zajedno s pripadajućim dijelovima i njihovim količinama
- **Potprozor za upravljanje novim proizvodnim nalogima**
 - Kreiraju se novi radni nalozi, s novim ili već proizvedenim dijelovima
 - Kao i kod prethodnog potprozora, moguće je dodavati ili brisati stavke narudžbe te mijenjati vrijeme početka, kao i pristupiti popisu svih dijelova potrebnih za proizvodnju
- **Potprozor za upravljanje dovršenim narudžbama**

7.3. Prozor za upravljanje kvalitetom

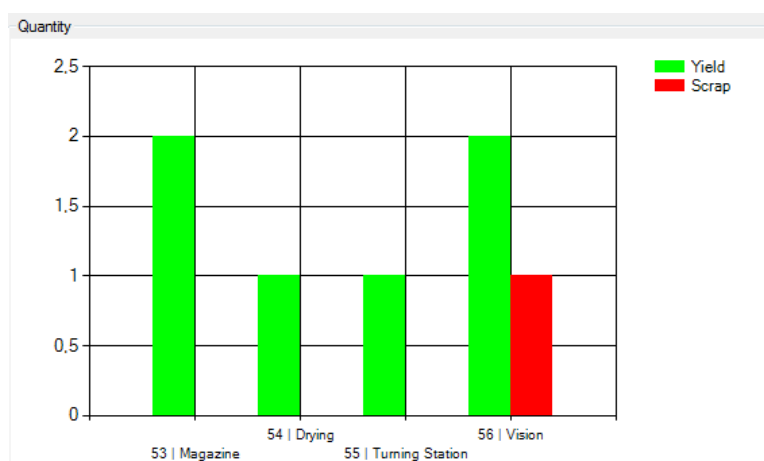


Slika 27. Prozor za upravljanje kvalitetom [27]

Ovaj prozor sadrži 2 potprozora:

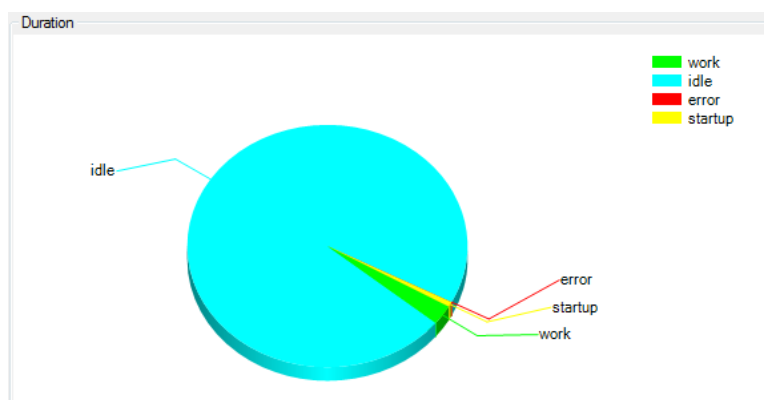
➤ **Potprozor s izvještajem o učinkovitosti**

- Daje izvještaj o učinkovitosti svake radne stanice tijekom određenog vremenskog razdoblja, što pomaže u optimizaciji procesa proizvodnje
- Sadrži podatke o: broju proizvedenih i neispravnih dijelova, vremenu koje je radna stanica provela u automatskom i ručnom načinu rada, komadnom i pripremnom vremenu te vremenu koje je proteklo dok su se otklonile pogreške na radnoj stanici
- Izvještaj je moguće prikazati kao:
 - Stupčasti dijagram, koji prikazuje ukupan broj proizvedenih te broj neispravnih dijelova na svakoj radnoj stanici



Slika 28. Izvještaj o broju proizvedenih i broju neispravnih dijelova [27]

- Kružni dijagram, koji prikazuje udjele svakog tipa vremena u ukupnom vremenu proizvodnje



Slika 29. Izvještaj o vremenima proizvodnje [27]

➤ **Potprozor s izvještajem o ukupnoj učinkovitosti opreme (OEE)**

- Daje izvještaj o učinkovitosti čitavog postrojenja za svaku radnu stanicu
- Pri računanju OEE-a u obzir uzima 3 parametra: dostupnost, učinkovitost i kvalitetu, pri čemu je:

$$Dostupnost = \frac{Vrijeme\ u\ automatskom\ načinu\ rada}{Ukupno\ vrijeme\ proizvodnje} \quad (4)$$

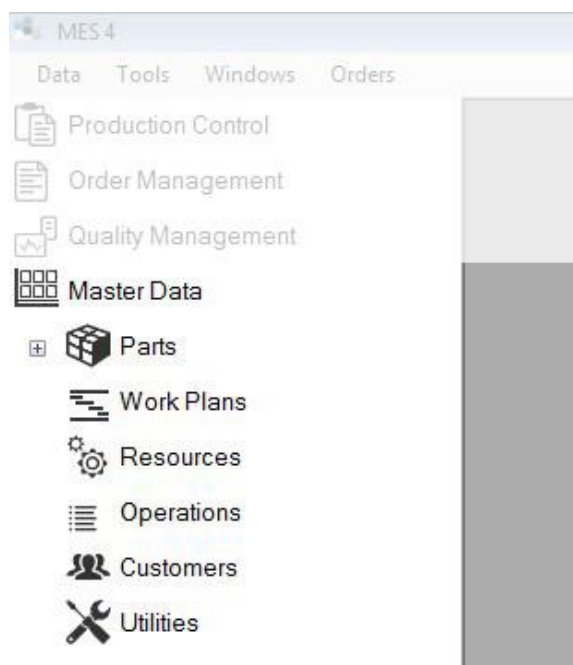
$$Učinkovitost = \frac{Planirano\ vrijeme\ proizvodnje}{Stvarno\ vrijeme\ proizvodnje} \quad (5)$$

$$Kvaliteta = \frac{Broj\ ispravnih\ dijelova}{Broj\ neispravnih\ dijelova} \quad (6)$$

- OEE je jednak umnošku tih triju parametara:

$$OEE = Dostupnost * Učinkovitost * Kvaliteta \quad (7)$$

7.4. Prozor s glavnim podacima



Slika 30. Prozor s glavnim podacima [27]

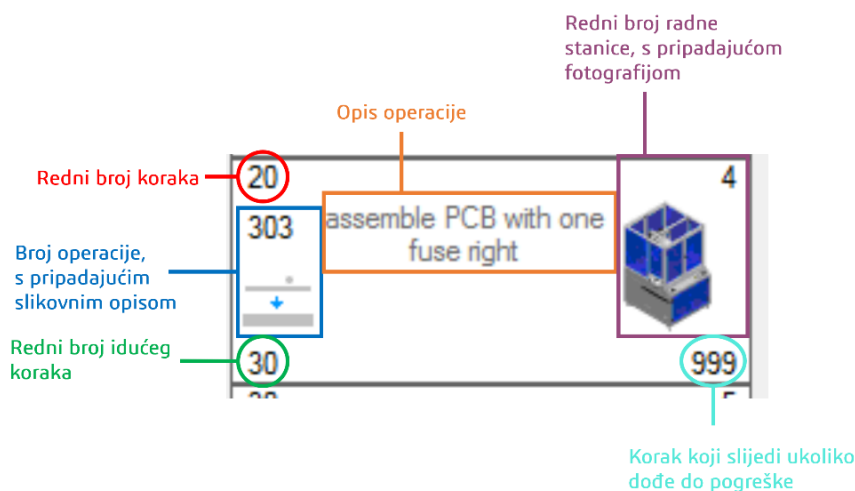
Unutar posljednjeg prozora nalazi se još 6 potprozora:

➤ **Potprozor s podacima o dijelovima**

- Omogućuje dodavanje novih te promjenu ili uklanjanje postojećih dijelova
- Kako bi se povećala preglednost, dijelovi su grupirani u različite skupine, kao što su: naručeni i neobrađeni dijelovi, proizvodni dijelovi, palete, kutije, itd.
- U ovom potprozoru provodi se postupak planiranja potreba za materijalima – definiraju se razine sigurnosnih zaliha i minimalne serije proizvodnje
- Također, pruža uvid i u plan izrade s popisom svih potrebnih dijelova, koji može, ali i ne mora biti jednak popisu definiranom prilikom kreiranja nove narudžbe

➤ **Potprozor s podacima o planovima izrade**

- Omogućuje dodavanje, pregled te izmjenu ili uklanjanje planova izrade, ali i svakog pojedinog koraka unutar plana
- Svaki korak sadrži sljedeće podatke:



Slika 31. Podaci o pojedinom koraku u planu izrade [27]

➤ **Potprozor s podacima o radnim stanicama**

- Omogućuje dodavanje novih radnih stanica ili izmjenu postojećih
- Sadrži 3 skupine podataka: podatke o samoj radnoj stanici, podatke o mogućnostima skladištenja te podatke o operacijama
- Također, omogućuje i dodavanje ili modifikaciju operacija i skladišnih jedinica

➤ **Potprozor s podacima o operacijama**

- Omogućuje pregled svih operacija te dodavanje ili izmjenu postojećih operacija
- Operacije su raspoređene u dvije skupine:
 - Operacije koje se izvode na radnim stanicama
 - Interne operacije, koje su isključivo zadaci MES sustava
- U ovom potprozoru moguća je i izmjena parametara proizvodnje, kao što su minimalna i maksimalna vrijednost parametra ili vrsta parametra

➤ **Potprozor s podacima o kupcima**

- Omogućuje dodavanje, izmjenu ili brisanje kupaca

➤ **Potprozor s podacima o skladišnim elementima**

- Omogućuje pregled i modifikaciju skladišnih elemenata

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je predstaviti različite funkcionalnosti sustava upravljanja proizvodnjom i naglasiti važnost posjedovanja jednog takvog sustava, koji će značajno unaprijediti čitav proizvodni proces. Njegova fleksibilnost i skalabilnost čini ga primjenjivim u doista svakoj vrsti industrije, što je potvrđeno i istraživanjem, kojim je ustanovljeno kako se u narednih 10 godina očekuje gotovo učtverostručenje ukupne vrijednosti svjetskog tržišta. Taj trend pokazuje kako su proizvođači svjesni svih benefita koje im implementacija MES sustava donosi te ih žele što prije usvojiti i u svome poduzeću, no trenutno najveći kamen spoticanja u tom procesu predstavlja sama cijena implementacije, koja je još uvijek prilično visoka, osobito za manja poduzeća. Ipak, porastom popularnosti ovih sustava i povećanjem broja dostupnih rješenja, cijene bi se vremenom trebale smanjiti i učiniti ih široko dostupnima.

Istraživanja su također pokazala kako su se manja poduzeća, koja već posjeduju sustave, uglavnom odlučivala za *cloud* tipove sustava, čemu ponajprije pridonosi ipak značajno niža cijena implementacije. S druge strane, velike korporacije su i dalje sklonije fizičkim tipovima sustava, budući da raspolažu ogromnim količinama povjerljivih podataka, pa im presudni kriterij ipak predstavlja sigurnost. Međutim, sve češće odluka pada na treći tip sustava – hibridne sustave, koji im i dalje pružaju određenu dozu povjerljivosti, zajedno s mogućnošću upravljanja sustavom na daljinu, što je u neizvjesnim vremenima, koja su obilježila zadnje godine, često bio jedini mogući način da se osigura nesmetano odvijanje proizvodnje.

Za kraj, može se reći kako sustavi upravljanja proizvodnjom često predstavljaju ključnu razliku između prosječnosti i izvrsnosti u svijetu proizvodnje, potičući inovacije, efikasnost i konkurentske prednosti, koje su neophodne za uspjeh u današnjem dinamičnom poslovnom okruženju.

LITERATURA

- [1] Schroeder, R. G.: *Upravljanje proizvodnjom – Odlučivanje u funkciji proizvodnje*, MATE d.o.o., Zagreb, 1999.
- [2] <https://www.yourarticlelibrary.com/project-management/6-major-advantages-of-production-management/26122> (28.8.2023.)
- [3] <https://www.ibm.com/topics/mes-system> (29.8.2023.)
- [4] <https://forcam.com/en/mes-importance-and-benefits-manufacturing-execution-system/> (29.8.2023.)
- [5] <https://www.qualitasinformatica.com/mes-software-mes-manufacturing-execution-system/> (29.8.2023.)
- [6] <https://excelpro.ca/en/news/the-automation-pyramid-isa-95> (31.8.2023.)
- [7] <https://realpars.com/automation-pyramid/> (31.8.2023.)
- [8] Kletti, J.: *Manufacturing Execution System – MES*, Springer, Berlin, 2007.
- [9] Meyer, H., Fuchs, F., Thiel, K.: *Manufacturing Execution Systems: Optimal Design, Planning and Deployment*, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2009.
- [10] <https://www.aptean.com/en-NZ/insights/blog/what-is-mes> (4.9.2023.)
- [11] <https://mesa.org/topics-resources/mesa-model/history-of-the-mesa-model/> (4.9.2023.)
- [12] McClellan, M., Weaver, D.: *MESA Model Evolution*, MESA International, 2011.
- [13] Dyck, J., Fraser, J., Frede, J., Gatti, A., Lichon, S., Riley, D., Ruby, J., White, L.: *MESA Metrics Guidebook: ROI and Justification for MES*, MESA International, 2014.
- [14] <https://mesa.org/topics-resources/mesa-model/> (6.9.2023.)
- [15] Leiva, C.: *First principles of smart manufacturing*, Journal of Advanced Manufacturing and Processing, 2022.
- [16] Govindaraju, R., Putra K.: *A methodology for Manufacturing Execution Systems (MES) implementation*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016.
- [17] <https://www.ptdigital.com/mes-implementation-complete-guide#types-of-implementation-project> (12.9.2023.)
- [18] <https://www.ptdigital.com/manufacturing-execution-system-complete-guide> (11.9.2023.)
- [19] <https://www.scnsoft.com/manufacturing/execution-system> (12.9.2023.)
- [20] <https://company.g2.com/about> (12.9.2023.)
- [21] <https://www.g2.com/categories/manufacturing-execution-system#grid> (12.9.2023.)

-
- [22] <https://www.g2.com/reports/fe186957-862f-4a09-9b52-770422185e64/preview?tab=grid> (12.9.2023.)
- [23] <https://www.g2.com/reports/fe186957-862f-4a09-9b52-770422185e64/preview?tab=scores> (13.9.2023.)
- [24] <https://www.g2.com/reports/fe186957-862f-4a09-9b52-770422185e64/preview?tab=data-implementation> (13.9.2023.)
- [25] https://www.g2.com/reports/fe186957-862f-4a09-9b52-770422185e64/preview?tab=data-customer_segment (13.9.2023.)
- [26] <https://www.precedenceresearch.com/manufacturing-execution-systems-market> (14.9.2023.)
- [27] Schober, Weiss, Wascher: *MES4 Manual*, Festo Didactic SE, 2019.