

Studija slučaja implementacije tehnologija industrije 4.0 u srednje veliko proizvodno poduzeće

Alvir, Karla

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Economics and Business / Sveučilište u Zagrebu, Ekonomski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:148:880085>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported/Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 3.0](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-23**



Repository / Repozitorij:

[REPEFZG - Digital Repository - Faculty of Economics & Business Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu

Ekonomski fakultet

Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij

Poslovna ekonomija – smjer Menadžerska informatika

**STUDIJA SLUČAJA IMPLEMENTACIJE TEHNOLOGIJA
INDUSTRIJE 4.0 U SREDNJE VELIKO PROIZVODNO
PODUZEĆE**

Diplomski rad

Karla Alvir

Zagreb, rujan 2024.

Sveučilište u Zagrebu

Ekonomski fakultet

Integrirani preddiplomski i diplomski sveučilišni studij

Poslovna ekonomija – smjer Menadžerska informatika

**STUDIJA SLUČAJA IMPLEMENTACIJE TEHNOLOGIJA
INDUSTRIJE 4.0 U SREDNJE VELIKO PROIZVODNO
PODUZEĆE**

**CASE STUDY OF THE IMPLEMENTATION OF INDUSTRY
4.0 TECHNOLOGIES IN A MEDIUM-SIZED
MANUFACTURING COMPANY**

Diplomski rad

Studentica: Karla Alvir

JMBAG studenta: 0117223906

Mentorica: dr. sc. Dalia Suša Vugec

Zagreb, rujan 2024.

SAŽETAK

Industrija 4.0 je pojam koji se zadnjih godina proteže kroz sve sfere društva. Sanjarenja o tehnologijama koje sve čine umjesto čovjeka prisutna su od pojave znanstvene fantastike. Jesu li te tehnologije zaista toliko uznapredovale pokazat će sljedeći reci. Pojam Industrije 4.0 prvi put je spomenut u Hamburgu 1980-ih. Označava četvrtu industrijsku revoluciju koju donose tehnologije poput umjetne inteligencije, strojnog učenja, obrade velikih podataka ili Interneta stvari. Razvijene su kako bi čovjeka lišile ga nepotrebnih ponavljajućih zadataka. Tehnologije su primjenjive u svim granama gospodarstva, pitanje je kako mogu pomoći. Ovaj rad se bavi primjenom tih tehnologija u proizvodnji. Tržište proizvoda bilježi enormne promjene. Interes kupca više nije u masovno proizvedenoj robi već u personaliziranom proizvodu. Brzina promjena je velika stoga se od proizvodnje očekuje visoka razina fleksibilnosti i spremnosti na promjene. Sustavi za izvršenje proizvodnje nude poduzećima mogućnost praćenja proizvodnih procesa u stvarnom vremenu. Integracijom tehnologija umjetne inteligencije i strojnog učenja predikcije postaju vrlo precizne, a Internet stvari omogućuje praćenje i automatizaciju procesa. Prednosti implementacije pokazale su se u studiji slučaja na proizvodnom poduzeću XY koje se bavi proizvodnjom robe od stiropora. Uz pomoć stručnjaka su implementirali senzore koji prate produktivnost rada i potrošnju energenata te stvorili vitku proizvodnju. Poduzeće sad radi kalkulacije troškova na razini jedne proizvedene jedinice, za razliku od dotadašnjeg načina agregiranih brojki na razini pogona koje su se u prosjeku raspoređivale po volumenu proizvoda. Osim troškova, omogućeno je praćenje proizvodnje povoljnijih energenata. Rekonstrukcija s implementiranim novim tehnologijama je poduzeću donijela višu razinu produktivnosti koja im donosi konkurentske prednosti.

Ključne riječi: Industrija 4.0, vitka proizvodnja, sustavi izvršenja proizvodnje, Internet stvari, efikasnost, konkurentnost, veliki podaci

SUMMARY

Industry 4.0 is a term that has, in recent years, extended across all spheres of society. The dreams of technologies doing everything instead of humans have been present since the emergence of science fiction. Whether these technologies have truly advanced will be shown in the following lines. The term Industry 4.0 was first mentioned in Hamburg in the 1980s. It signifies the fourth industrial revolution brought about by technologies like artificial intelligence, machine learning, big data processing, or the Internet of Things. They were developed to relieve humans from unnecessary, repetitive tasks. These technologies are applicable in all sectors of the economy, and the question is how they can help. This thesis deals with the application of these technologies in manufacturing. The product market is experiencing enormous changes. Consumer interest is no longer in mass-produced goods but in personalized products. The speed of change is rapid, so manufacturing is expected to have a high level of flexibility and readiness for change. Manufacturing execution systems offer companies the ability to track production processes in real-time. By integrating artificial intelligence and machine learning technologies, predictions become very precise, and the Internet of Things enables process monitoring and automation. The advantages of implementation were shown in a case study of the XY manufacturing company, which produces styrofoam products. With the help of experts, they implemented sensors to monitor productivity and energy consumption, creating lean production. The company now calculates costs per produced unit instead of aggregating figures at the plant level, which were averaged across product volume. In addition to costs, they now track the use of more cost-effective energy sources. The reconstruction with newly implemented technologies has brought the company higher productivity, giving them a competitive edge.

Keywords: Industry 4.0, lean manufacturing, manufacturing execution systems, Internet of Things, efficiency, competitiveness, big data

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog izvora te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

(vlastoručni potpis studenta)

(mjesto i datum)

STATEMENT ON THE ACADEMIC INTEGRITY

I hereby declare and confirm by my signature that the final thesis is the sole result of my own work based on my research and relies on the published literature, as shown in the listed notes and bibliography.

I declare that no part of the thesis has been written in an unauthorized manner, i.e., it is not transcribed from the non-cited work, and that no part of the thesis infringes any of the copyrights.

I also declare that no part of the thesis has been used for any other work in any other higher education, scientific or educational institution.

(personal signature of the student)

(place and date)

SADRŽAJ

1	UVOD	1
1.1	Predmet i cilj rada.....	1
1.2	Izvori podataka i metode prikupljanja	2
1.3	Sadržaj i struktura rada	2
2	INDUSTRIJA 4.0.....	3
2.1	Pojmovno određenje Industrije 4.0.....	4
2.1.1	Veliki podaci.....	5
2.1.2	Autonomni roboti	5
2.1.3	Simulacija.....	6
2.1.4	Horizontalna i vertikalna integracija sustava	7
2.1.5	Internet stvari.....	8
2.1.6	Računarstvo u oblaku	8
2.1.7	Aditivna proizvodnja.....	9
2.1.8	Proširena stvarnost	10
2.1.9	Kibernetička sigurnost.....	10
2.1.10	Umjetna inteligencija	11
2.1.11	Dva smjera razvoja Industrije 4.0	14
2.2	Promjene uzrokovane Industrijom 4.0.....	15
2.2.1	Konkurentska prednost.....	15
2.2.2	Fleksibilnost	16
2.2.3	Automatizacija procesa	16
2.3	Digitalna transformacija i Industrija 4.0 u proizvodnji	18
3	IMPLEMENTACIJA TEHNOLOGIJA INDUSTRIJE 4.0 U PROIZVODNE PROCESE ...	21
3.1	Kontrola i praćenje proizvodnog procesa	21
3.2	Tehnologije Industrije 4.0 u proizvodnji	23
3.3	Automatska analiza efikasnosti	25

3.4	Optimizacija.....	28
3.5	Sustavi izvršenja proizvodnje.....	31
4	STUDIJA SLUČAJA IMPLEMENTACIJE INDUSTRIJE 4.0 U SREDNJE VELIKO PROIZVODNO PODUZEĆE	34
4.1	Opis poduzeća.....	34
4.2	Implementirane tehnologije.....	35
4.3	Proces implementacije.....	38
4.4	Efekti implementacije na proizvodne procese i poslovanje	40
4.5	Analiza rezultata i diskusija.....	47
5	ZAKLJUČAK.....	51
	Literatura.....	53
	Popis slika	58
	Popis tablica	59
	Popis grafikona.....	60
	Životopis.....	61

Svetom Josipu.

1 UVOD

U ovom diplomskom radu obrađena je tema Industrije 4.0 te koje je prednosti i izazove donijela za proizvodna poduzeća. Tradicionalni način proizvodnje postaje neadekvatan s obzirom na konstantnu pojavu novih i pametnijih tehnologija te je potrebno kretati se ukorak s tehnologijom kako bi se zadržale konkurentske prednosti. Industrija 4.0. donosi tehnologije poput umjetne inteligencije, Internet stvari, računarstva u oblaku i sl. u sva poduzeća neovisno o veličini. Mala i srednja poduzeća osobito se susreću s izazovima prilagodbe na nove trendove, a oni se moraju usvojiti kako bi poduzeće nastavilo rasti i bilo održivo.

Empirijski dio rada temelji se na kvalitativnom istraživanju koje obuhvaća studiju slučaja implementacije Industrije 4.0 u odabrano srednje veliko proizvodno poduzeće. Kroz navedenu studiju slučaja moguće je vidjeti sve korake implementacije te njene rezultate. Studija slučaja pruža dublji uvid te omogućava analizu svih prednosti i mana jer se analiza vršila u stvarnom poslovnom okruženju, dok je sve potkrijepljeno teorijskim istraživanjem. S obzirom na to, u radu je prikazan konkretan primjer najbolje prakse te smjernice za slična poduzeća. Nada autora je da će ovaj rad moći poslužiti sličnim poduzećima kao priručnik za implementaciju raznih tehnologija koje Industrija 4.0 nudi za proizvodnju te da će kroz teorijski dio imati priliku upoznati se s vrstama i obilježjima tehnoloških rješenja, a kroz empirijski dio rada vidjeti i efekte implementacije u proizvodnoj liniji te na temelju toga procijeniti vlastitu potrebu za moderniziranjem pogona.

1.1 Predmet i cilj rada

Predmet rada jest studija slučaja implementacije tehnologija industrije 4.0 u srednje veliko proizvodno poduzeće kroz analizu prijašnjeg stanja, korake implementacije novih tehnologija, analizu stanja nakon implementacije te iskustva i prednosti koje je poduzeće imalo kroz proces. Sve je pokrepljeno teorijskom bazom s kojom se uspoređuje stvarna praksa u poduzeću.

Prvi cilj rada je napraviti pregled literature te time stvoriti teorijsku bazu u kojoj su kroz stavove i istraživanja stručnjaka dokazane najbolje prakse u području Industrije 4.0 te prednosti uvođenja novih tehnologija u proizvodne procese kao i izazove koji se na tom putu javljaju. Sljedeći cilj je na temelju dostupnih podataka iz poduzeća na kojem se radi studija slučaja napraviti analizu stvarnih efekata na proizvodnju nakon uvođenja tehnologija Industrije 4.0, konkretno u ovom slučaju sustava za upravljanje proizvodnjom.

1.2 Izvori podataka i metode prikupljanja

Izvori podataka koji se koriste u radu su stručna literatura poput znanstvenih članaka i priručnika vezanih uz temu rada te primarni podaci prikupljeni intervjuima odgovornih osoba u promatranom poduzeću te pružatelju informacijsko komunikacijskih tehnologija. Osim kroz intervju, podaci su prikupljeni osobnim radom autora u proizvodnoj liniji poduzeća te analizom proizvodnog procesa uživo.

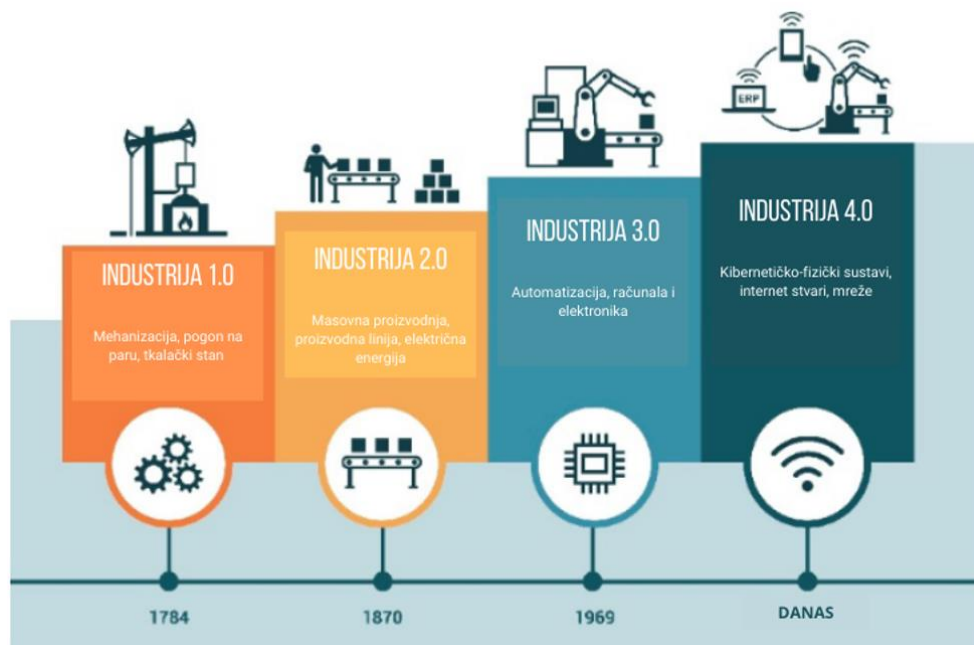
1.3 Sadržaj i struktura rada

Rad se sastoji od 5 poglavlja, od kojih je prvo uvodno poglavlje u kojem se predstavljaju predmet i cilj rada, izvori i metode prikupljanja podataka te sadržaj i struktura rada. U drugom poglavlju pod nazivom Industrija 4.0 obrađuje se teorijski pojam Industrije 4.0, kakve je promjene uzrokovala svojom pojavom te se uspoređuju granice i preklapanja digitalne transformacije koja predstavlja treću industrijsku revoluciju s četvrtom koja je tema ovoga rada. Treće poglavlje pod nazivom Implementacija tehnologija Industrije 4.0 u proizvodne procese donosi teorijski pregled tehnologija koje su prilagođene proizvodnji te najbolje prakse njihove implementacije u pogone. U četvrtom poglavlju vrši se studija slučaja na promatranom proizvodnom poduzeću koje je implementiralo rješenja Industrije 4.0 te se empirijski dokazuju i raspravljaju efekti njegove primjene na proizvodnju. Zaključno peto poglavlje sadrži pregled najvažnijih saznanja iz istraživanja i prikazuje stav autora temeljen na pregledu teorije i iskustvu iz prakse.

2 INDUSTRIJA 4.0.

Povijest čovječanstva bogata je inovacijama. Od pojave kotača prije više od 4.000 godina preko pluga i tiskare iz srednjeg vijeka sve do danas aktualnih pametnih uređaja, ljudi su pokazali sklonost povećavanju efikasnosti i olakšavanju života. Prvi kotač i pojavu vodenog mlina dijeli gotovo 3.500 godina, vodeni mlin i agrarnu revoluciju dijeli gotovo 2.000 godina. Agrarna revolucija, koja je riješila problem gladi i efikasnosti u poljoprivredi, događala se gotovo u isto vrijeme kao i prva industrijska revolucija s pojavom prvog parnog stroja kojeg je usavršio James Watt 1765. godine. Od tog povijesnog trenutka, tehnološki napredak se penje po rastućoj stopi. Drugu industrijsku revoluciju donijela je električna energija te otkrivanje nafte u drugoj polovici 19. stoljeća. Treću industrijsku revoluciju obilježava prelazak s analogne tehnologije na digitalnu krajem prošlog stoljeća. U dva stoljeća koja dijele pojavu prvog parnog stroja i Interneta svijet se u potpunosti promijenio. Manufakturnu proizvodnju zamijenila je masovna, a pisma su zamijenili e-mailovi. Starije generacije koje svjedoče monumentalnim promjenama u svim sferama vjerojatno se pitaju postoji li još prostora za revolucije. Svijet odgovara sa čvrstim i pomalo sanjarskim - da. Iako su dosadašnje industrijske revolucije imenovali povjesničari ex-post, ta tradicija je prekinuta pojavom pojma Industrije 4.0. koji je nastao zbog potrebe definiranja budućih očekivanja u industriji te njenih tehnologija čija se masovna implementacija nestrpljivo iščekuje. Na slici 1 može se vidjeti kratki povijesni pregled razvoja industrije.

Slika 1 Povijesni pregled razvoja industrije



Izvor: Kovacs et al. (2019.)

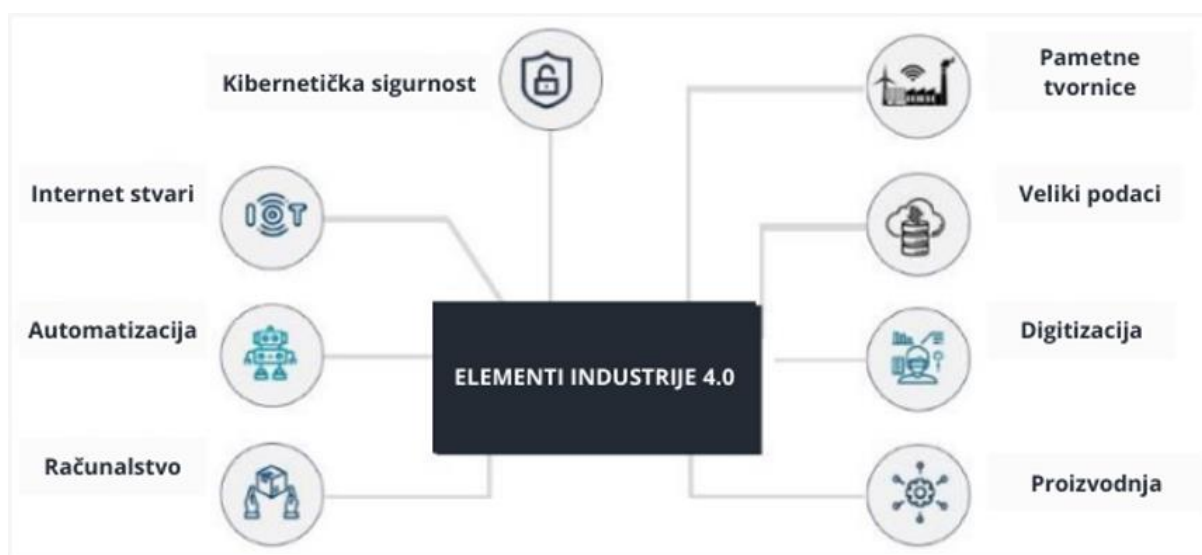
2.1 Pojmovno određenje Industrije 4.0

Pojam Industrije 4.0 prvi put se službeno javlja 2011. godine na *Hanover Fair*-u gdje ga predstavlja radna skupina po nalogu Istraživačkog saveza Njemačkog Ministarstva Obrazovanja i Istraživanja (*Bundesministerium für Bildung und Forschung*). Oni ga definiraju u svom finalnom izvještaju na dva načina: kao ime za novu revoluciju koju donose informacijske i komunikacijske tehnologije (engl. *Information and communication technologies*, ICT) i kao strateški plan kojeg je Njemačka namijenila za jačanje svoje konkurentne prednosti u proizvodnji putem automatizacije integracijom informacijskih tehnologija. Njemačka u isti pojam spaja ICT i konkurentnu prednost, tako i u praksi oni idu ruku pod ruku. Bez tih tehnologija nema prednosti, a prednost se može ostvariti inovacijom u efikasnosti koja omogućuje diverzifikaciju na tržištu. Budući da se radi o relativno novim tehnologijama, njihova primjena nužno vodi do povećane efikasnosti ukoliko je pravovremeno i na pravi način implementirana u postojeći sustav.

Pojam je, dakle, prisutan, no definicija Industrije 4.0 još uvijek lebdi u zraku. Budući da je pojam vezan za budućnost, a nju teško možemo definirati i najboljim modelom za predviđanja, univerzalna i općeprihvaćena definicija ne postoji. Ono oko čega se svi slažu jest da je četvrta po redu industrijska revolucija. U kontekstu automatizacije proizvodnog procesa Industrija 4.0 može se definirati kao „integracija Interneta i proizvodnih procesa uz pomoć manjih senzora i umjetne inteligencije primijenjene na strojeve“ (Carvalho i Cazarini, 2020, str. 13) ili „bit koncepcije Industrije 4.0 je uvođenje mrežno povezanih inteligentnih sustava, koji ostvaruju samoregulirajuću proizvodnju: ljudi, strojevi, alati i proizvodi međusobno će neprekidno komunicirati“ (Kovács et al., 2018) što predstavlja nukleus ovog rada.

Definicija revolucije kaže da je to nagla i temeljita promjena, što je vidljivo i u korištenju riječi koji dolazi iz latinskog pojma *revolutio* koji znači okretanje. Stoga, ako se nešto naziva revolucijom, onda to mora biti disruptivno. Sintagma koja se usko veže iz Industriju 4.0 jest disruptivne tehnologije. Svojom su pojavom u temelju promijenile tijekom razvoja industrije, a njihove potpune prednosti moći će se mjeriti tek u budućnosti. Slika 2 prikazuje neke od tehnologija koje su sastavni dio Industrije 4.0.

Slika 2 Elementi industrije 4.0



Izvor: Achouch et al. (2022)

Prema autorici Gizem Erboz postoji devet tehnologija koje predstavljaju stupove Industrije 4.0: veliki podaci (engl. *big data*), autonomni roboti, simulacija, horizontalna i vertikalna integracija sustava, Internet stvari (engl. *Internet of Things* - IoT), tehnologija oblaka (engl. *cloud computing*), aditivna proizvodnja, proširena stvarnost (engl. *Augmented reality* - AR) i kibernetička sigurnost (engl. *cyber security*) (Erboz, 2017, str 762).

2.1.1 Veliki podaci

Veliki podaci predstavljaju ogromne količine podataka koje se generiraju i prikupljaju iz različitih izvora. Okarakterizirani su s takozvana 3V-a: veliki obujam (engl. *volume*) koji se mjeri u terabajtima, raznolikost (engl. *variety*) što govori o tipu i formatu podataka te brzina (engl. *velocity*) prikupljanja podataka koja se odvija u nekim slučajevima u stvarnom vremenu. Nakon njihove analize subjekt donosi odluke te nadzire, mjeri i upravlja poslovnim procesima. Takva analiza i korištenje podataka korisniku donosi konkurentske prednosti koje posljedično dovode do većih prihoda i rasta poduzeća. Veliki podaci se mogu koristiti kao alat u svrhu rješavanja problema s postojećim resursima. Druga upotreba je stvaranje industrije podataka te softverima za upravljanje podacima. Također, podaci se mogu koristiti kao strategija za izgradnju novih poslovnih modela.

2.1.2 Autonomni roboti

Nadasve je zanimljivo živjeti u vrijeme kad se filmovi znanstvene fantastike polako ostvaruju. Od snimanja prvog nastavka Ratova Zvijezda gdje su se pojavili obožavani droidi C-3PO i R2D2 je prošlo gotovo pola stoljeća, a promatrajući vrijeme u kojem su nastali kao plod mašte

Georgea Lucasa, ostaje pitanje je li on znao nešto što njegovi suvremenici nisu. Roboti u proizvodnji možda nisu nalik limenim likovima iz poznate franšize, ali imaju mnogo toga zajedničkog. Prvi se u proizvodnji javljaju već u šezdesetim godinama prošlog stoljeća kad je nastala velika potreba za automatizacijom. Ono što je novo jest autonomija robota koja se postiže primjenom ICT tehnologije i umjetne inteligencije. Koncept pametne tvornice (engl. *smart factory*) podrazumijeva veliku upotrebu rješenja koja uključuju robote gdje ljudi imaju ulogu nadzora strojeva, a s njima komuniciraju na zajedničkoj jeziku. Kako bi se to postiglo, u robote je ugrađen velik broj senzora, kako ljudi, za razliku od robota prve generacije, ne bi morali biti odvojeni fizičkim barijerama od strojeva zbog rizika od ozljeda. Osim sigurnosnih razloga, nedostatak predstavlja i činjenica da se svaki robot morao programirati za određeni zadatak. Po primjeni novih tehnologija dobivena je mogućnost obavljanja više zadataka te je omogućeno reprogramiranje. U okruženju proizvodnog pogona postoji više strojeva te je za potrebe tvornica sa više robota razvijen sustav više agenata (engl. *multi agent system* - MAS) u kojem agenti (strojevi) prepoznaju signale iz svoje okoline i na njih reagiraju (Ernst i Louette, 2024). Implementacija autonomnih robota u proizvodnju dovodi do visoke razine automatizacije i proizvodnje gdje ljudi imaju ulogu nadzora. Samim time podiže se razina efikasnosti u proizvodnji.

2.1.3 Simulacija

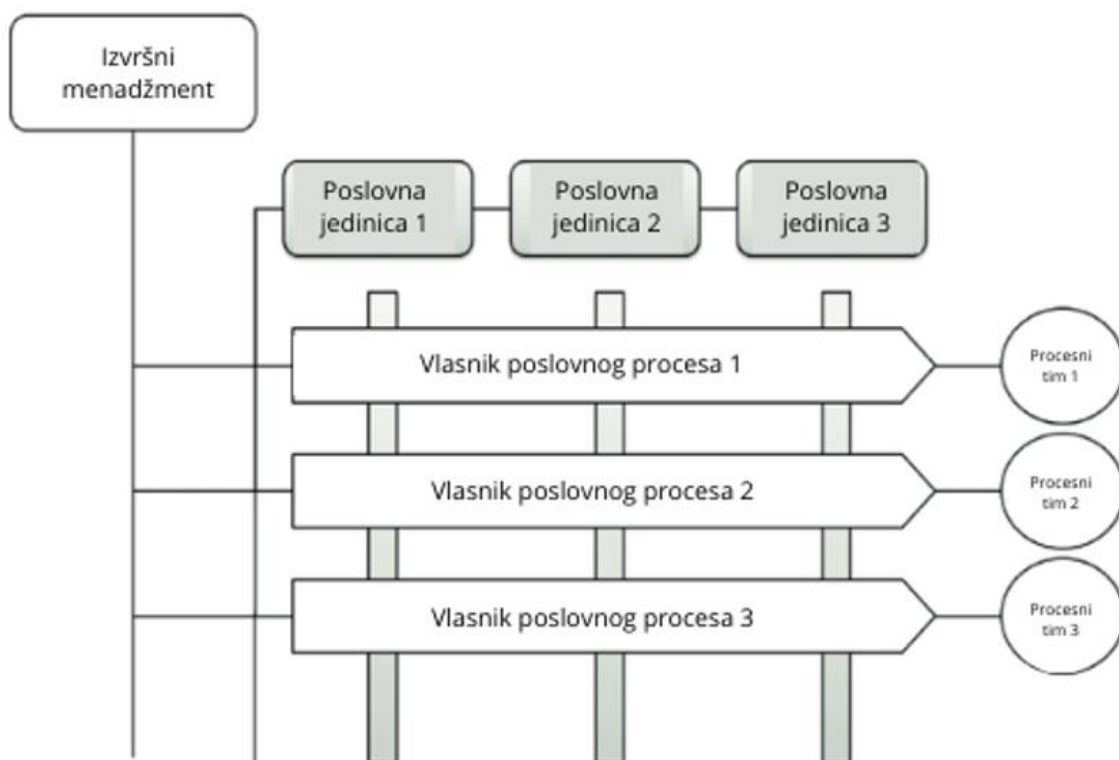
Proizvodni procesi su često vrlo komplicirani i teško je predvidjeti učinke na promjene u sustavu. Kako bi ipak dobili sliku sustava i njegovog funkcioniranja koriste se simulacije. Definicija kaže da su simulacije „eksperimentalna metoda zasnovana na računalnom modeliranju stanja sustava predstavljenog odgovarajućim varijablama u svrhu dobivanja informacija neophodnih za njegovo razumijevanje i analizu“ (Topčić, 2020, str. 5). Iz perspektive menadžera koji upravlja procesom, važno je imati informacije o tijeku, efikasnosti, potencijalnim problemima i prostoru za implementaciju. Simulacije omogućuju virtualni prikaz cijelog toka proizvodnje uključujući sve agente i njihove akcije. Budući da oponašaju stvarni sustav, modeli predviđaju kvarove na strojevima te se lakše rade planovi održavanja. Također, prepoznaju neefikasne dijelove procesa koje valja optimizirati. Ukoliko postoji potreba za uvođenjem novih strojeva ili tehnologije, u simulaciji se vidi koliko je taj potez adekvatan i ekonomičan te smanjuje rizik od neuspjeha u implementaciji. Lanac nabave je ključan za neprekinutu proizvodnju svakog proizvodnog poduzeća, a simuliranjem istoga nalazi se efikasnije gospodarenje zalihama i predviđanje rizika u lancu opskrbe. Prednosti koje nose

simulacije su vrlo korisne za poduzeća. Služeći se njima modeliraju i testiraju scenarije bez stvarnih posljedica, a informacije koje one pružaju mogu biti ključne za buduće poslovanje.

2.1.4 Horizontalna i vertikalna integracija sustava

Tradicionalno su organizacije podijeljene na poslovne funkcije, a time svaka funkcija raspolaže svojim informacijskim sustavom koji je nerijetko potpuno odvojen od drugih funkcija unutar iste organizacije. Posljedica tog zastarjelog sustava je vrlo spor tok informacija što vodi do kašnjenja i nepotpunosti informacija ključnih za donošenje odluka u tržišnom okruženju koje je postalo vrlo dinamično i nepredvidivo. Kako bi organizacija ostala konkurentna potreban je jedinstven i sveobuhvatan sustav u kojem su sve funkcije povezane i gdje tok podataka i informacija nije prekinut barijerama te teče kroz cijeli proces kako bi poslovne transakcije bile obavljene što brže i učinkovitije. Horizontalna integracija obuhvaća sve funkcije i olakšava komunikaciju među njima, dok vertikalna integracija povezuje različite razine unutar funkcija. Vrlo važan aspekt integracije je da bolja komunikacija unutar organizacije dovodi do veće agilnosti pa nastavno raste prilagodljivost tržištu i veća efikasnost. Na slici 3 vidljiva je vizualizacija vertikalne i horizontalne integracije.

Slika 3 Horizontalna i vertikalna integracija



Izvor: Jochem, et al. (2013)

2.1.5 Internet stvari

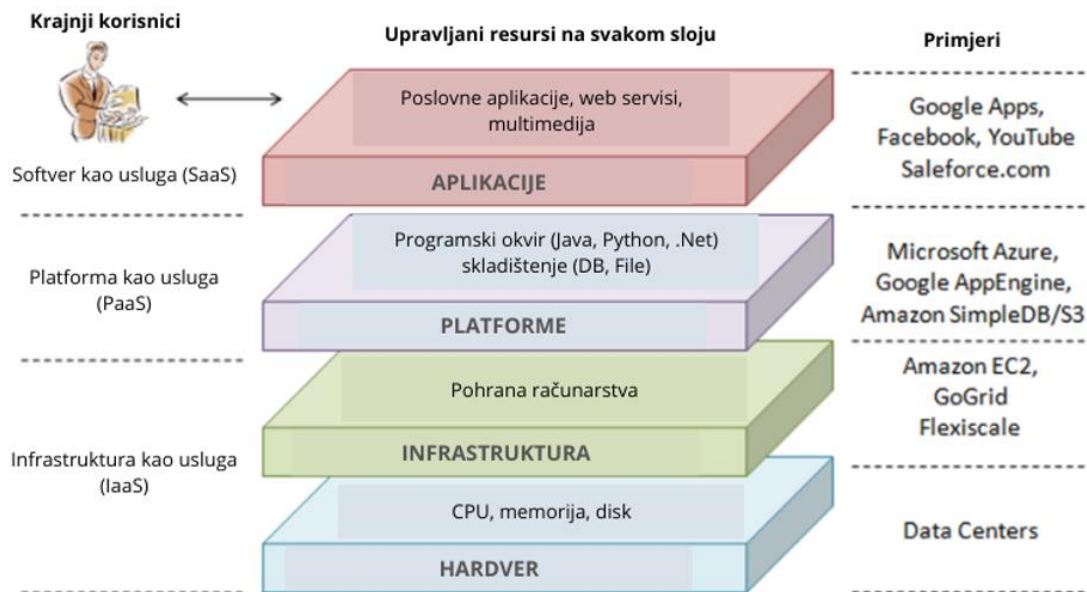
Često se u posljednje vrijeme može čuti da je tehnologija pokvarila nogomet, referirajući se na VAR (engl. *video assistant referee*). VAR predstavlja izvrstan primjer povezivanja video tehnologije i komunikacijskih sustava koji pružaju podršku sudcu u donošenju odluke o spornim golovima i sličnim situacijama za vrijeme utakmice. Uz pomoć strateški postavljenih kamera po stadionu te analize snimki softverskim rješenjem za prepoznavanje i analizu akcija te opreme koju koriste, suci imaju mogućnost iskoristiti preciznu tehnologiju kako bi donijeli pravednu odluku. Mišljenja publike variraju, no najveća zamjerka je predugo zaustavljanje igre i potencijalno razočarenje poništavanjem gola nakon slavlja što je isti postignut. U poslovnim organizacijama IoT ima nešto zahvalniju ulogu. Prema definiciji, Internet stvari je „sustav u kojem bi objekti u fizičkom svijetu mogli biti povezani s Internetom pomoću senzora“ (Rose et al., 2015, str. 1). Iz perspektive privatnog korisnika jedan od primjera je sustav pametnog doma (engl. *smart home systems*) koji povezuju razne kućanske uređaje te olakšavaju pokretanje aparata, putem intuitivnog korisničkog sučelja. Korištenje senzora nije nova tehnologija, niti povezivanje uređaja putem Interneta, ono što osvježava IoT i stavlja ga ponovno na mapu poželjnih novih tehnologija jest putem prikupljenih i analiziranih podataka pomaže u automatizaciji i unaprjeđenju upravljanja poslovnim procesima. „Ugradnjom primopredajnika (engl. *transceiver*) kratkog dometa u široku lepezu dodatnih naprava i svakodnevnih predmeta, omogućujući nove oblike komunikacije između ljudi i uređaja te uređaja međusobno, IoT dodaje novu dimenziju svijetu informacija i komunikacija“ (Bandyopadhyay i Sen, 2011, str. 49) a detaljnije o poslovnoj primjeni u sljedećim poglavljima.

2.1.6 Računarstvo u oblaku

Kako samo ime ove tehnologije kaže, ona se nalazi u zraku, neopipljiva je, ali bez nje moderna organizacija ne može normalno funkcionirati. Ideja oblaka u smislu mogućnosti pohrane koja će se nuditi kao usluga seže još u šezdesete godine dvadesetog stoljeća, a sa svijetom ju je podijelio John McCarthy. Pojam oblaka službeno se pojavio se tri desetljeća kasnije, a popularizirao ga je CEO Google-a Eric Schmidt 2006. godine kad je riječ oblak povezo s novim poslovnim modelom pružanja usluga putem Interneta (Regalado, 2011, str 1). NIST-ova (engl. *The National Institute of Standards and Technology*) definicija kaže da je računarstvo u oblaku „model koji omogućava praktični pristup mreži na zahtjev u zajednički skup konfigurabilnih računalnih resursa (npr. mreže, poslužitelji, pohrana, aplikacije i usluge) koji se mogu brzo osigurati i pustiti uz minimalan napor upravljanja ili interakciju pružatelja usluga“. Njegova arhitektura u sebi sadrži nekoliko slojeva: hardverski sloj, infrastrukturni sloj,

sloj platforme i aplikacijski sloj. Svaki od njih je međusobno povezan, ali slabijim vezama kako bi se omogućilo da se slojevi razvijaju neovisno jedan o drugome. Nastavno na arhitekturu, oblak nudi različite usluge: infrastrukturu kao uslugu (engl. *infrastructure as a service*, IaaS), platformu kao uslugu (engl. *platform as a service*, PaaS) te softver kao uslugu (engl. *software as a service*, SaaS). Prikaz slojeva oblaka može se vidjeti na slici 4.

Slika 4 Slojevi oblaka



Izvor: Marston et al. (2011)

Glavna podjela oblaka vrši se na javni, privatni i hibridni, a posljednji je najzastupljeniji jer uzima najbolje od prva dva: nema troškova infrastrukture (npr. farme poslužitelja) kao kod javnog, dok je sigurnost podataka i kontrola kao kod privatnog. Ono što ovu tehnologiju čini toliko privlačnom jest činjenica da je u mogućnosti na zahtjev (engl. *on-demand*) primiti i puštati resurse.

2.1.7 Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja je koncept koji se vrlo brzo razvija i ulazi u sve masivnije korištenje, a sve zahvaljujući Charlesu Hullu koji je izumio prvi 3D pisac 1988. godine koji je radio na principu stvrdnjavanja polimera ultra-ljubičastom zrakom lasera (Gokhare, et al., 2017, str. 953). Danas uz 3D ispisivanje u aditivnu proizvodnju spadaju i brzo prototipiranje (engl. *rapid prototyping*, RP), slojevita proizvodnja (engl. *layered manufacturing*, LM) i čvrsto prostoručno konstruiranje (engl. *solid free-form fabrication*, SFF). Ideja jest da se trodimenzionalni oblici kreiraju slaganjem x-y slojeva koordinatnog sustava jednog na drugi kako bi dobili z, odnosno treću dimenziju. Tehnički crtež na temelju kojeg pisac izrađuje proizvod kreira se putem

računalno potpomognutog dizajna (engl. *computer-aided design*, CAD). U suštini, aditivna tehnologija omogućava korisnicima da putem Interneta od bilo kud sudjeluju u kreiranju dizajna proizvoda putem CAD-a. Time se odnos kupca i proizvođača zauvijek mijenja. Osim kreiranja prototipa, primjena je raznolika, od medicinskih pomagala u području protetike, preko automobilske industrije koja lagane dijelove do primjene u umjetnosti. „Preciznost samih strojeva aditivne tehnologije je postala toliko sofisticirana da je proces kreiranja modela u CAD-u veća prepreka nego mogućnost proizvodnje modela“ (Bandyopadhyay i Bose, 2019, str 1). Sve to dovodi do zaključka da će uskoro biti moguće u povijesno minimalnom vremenu dizajnirati i proizvesti proizvod.

2.1.8 Proširena stvarnost

Proizvođač namještaja IKEA napravio je malu revoluciju u uređenju interijera puštanjem u korištenje aplikacije IKEA Place za korisnike iPhone-a. Koristeći kameru uređaja za snimanje prostora iskoristili su tehnologiju proširene stvarnosti kako bi svojim kupcima omogućili što realniji prikaz proizvoda u stvarnom prostoru prije obavljene kupovine i dostave. No to je samo jedna od primjena AR-a. Osim u marketinške svrhe kao u prethodnom slučaju, AR je moguće koristiti kao pomoćnu tehnologiju u servisima i održavanju te u dizajnu i razvoju proizvoda. Princip na kojem počiva jest spajanje stvarnog okruženja s digitalnim kako bi korisnik dobio integrirano iskustvo u stvarnom vremenu. Kako bi se to postiglo nužno je precizno koordinirati virtualne objekte s onim fizičkim te pratiti kretanje korisnika. Kalibracija i prilagodba parametara su stoga imperativ kako bi proširena stvarnost ispravno funkcionirala. Dakle, AR „obuhvaća tehnologiju koja omogućuje korisnicima da dožive fizički svijet obogaćen dodatnim digitalnim informacijama ili elementima“ (Craig, 2013, str. 2). Očekivati je onda od te tehnologije širenje u različite sektore i integraciju s drugim tehnologijama kao što je umjetna inteligencija.

2.1.9 Kibernetička sigurnost

Doba visoke digitalizacije i informatizacije u kojem su podaci važan resurs ne samo za napredak već i za normalno funkcioniranje donosi i svoje rizike. Nove tehnologije koje počivaju na ICT-u izložene su visokoj razini kibernetičkih napada. Važno je naglasiti da u današnjem svijetu nije pitanje hoće li se neki oblik zlonamjernog kibernetičkog napada dogoditi nego kada će se dogoditi. Najčešće vrste napada su: *phishing*¹, *malware*², pokušaji hakiranja, društveni

¹ Prijevara u kojoj se šalju elektroničke poruke krivotvorenog sadržaja kako bi izgledali kao poruka neke institucije, a šalju se s ciljem da se prikupe osjetljivi i povjerljivi podaci.

² Zlonamjerni softveri kreirani da nanesu štetu informacijskom sustavu

inženjering, gubitak mobilnih uređaja, napadi od strane zaposlenika, *SQL injection*³, *man-in-the-middle*⁴ napadi. Kako bi se zaštitili od potencijalnih napada, važno je razraditi strategiju obrane i zaštite da bi se rizici u poslovanju sveli na minimum. „Sigurnost informacijskih sustava ostvaruje se osmišljavanjem i provedbom mjera zaštite (informatičkih kontrola) koje se ugrađuju u mehanizme funkcioniranja informacijskih sustava, omogućuju njegovo neometano funkcioniranje i ublažavaju ili smanjuju informatičke rizike“ (Spremić, 2020, str. 38). Vrste kontrola kojima se vrši zaštita te njihova podjela su (Spremić, 2020, str. 38):

- objekt kontrole: opće i aplikacijske kontrole,
- način provođenja: preventivne, detektivne i korektivne, i
- hijerarhijska pozicija: korporativne, upravljačke i operativne.

Kako bi se rizici što više smanjili potrebno je fokusirati se na preventivne kontrole kojima se sprječavaju proboji u sustav, a ne na korektivne koje se primjenjuju kad se proboj u informacijski sustav već dogodio. Koje kontrole organizacija primjenjuje i koliko su one učinkovite analizira se revizijom informacijskih sustava. Svjesnost o kibernetičkoj sigurnosti se s vremenom povećava jer su štete koje takvi napadi mogu uzrokovati vrlo velike, a svakoj organizaciji je u interesu da zaštiti svoje osjetljive informacije, nakon toga i financije koje mogu biti pogođene zaustavljanjem rada sustava te na kraju i povjerenje svojih klijenata (Ghelani, 2022).

2.1.10 Umjetna inteligencija

Spominjati Industriju 4.0, a ne dotaknuti se umjetne inteligencije (engl. *artificial intelligence*, AI) bilo bi nezamislivo. Pojava ChatGPT-a kao prve besplatne platforme za korištenje umjetne inteligencije u formi „dopisivanja“, uzdrmala je sve sfere društva. Prva besplatna inačica AI *chatbot-a* u javnost je izašla 2022. godine te je odmah okupirala pažnju oduševljenih korisnika koji su svoja iskustva dijelili na društvenim mrežama (Wu et al., 2023.). U prva dva mjeseca od pojave ChatGPT prikupio je 100 milijuna aktivnih mjesečnih korisnika (Wu et al., 2023). Toliku pažnju dobio je zahvaljujući svojim brzim i detaljnim odgovorima koje daje na pitanja bilo koje teme. Jedna od popularnijih sposobnosti koja za neke predstavlja ogromnu prednost, a za druge problem jest korištenje AI za kreiranje pisanih radova za potrebe škole ili studija. Dapače, to je primarna funkcija koju koriste školarci i studenti. No, prosvjetitelji nisu prepustili stvar slučaju te je ubrzo razvijen softver za prepoznavanje strojno generiranih tekstova. Naslovi u medijima

³ Manipulacija upita prema bazi podataka s ciljem čitanja, modificiranja i brisanja podataka iz baze

⁴ Napad u kojem se napadač pozicionira između dvije strane koje komuniciraju kako bi prisluškivao ili manipulirao komunikacijom

bili su poprilično dramatični, a korisnici ga koriste za praktične stvari poput naprednog pretraživača, dok ima i onih koji stvaraju teorije zavjere tražeći nedosljednosti u odgovorima umjetne inteligencije. Iako svakoj novini na svijetu treba pristupiti s dozom opreza, ipak umjetna inteligencija ima mnoge prednosti, kao što je vidljivo na slici 5 niže u njenom odgovoru na pitanje trebamo li je se bojati.

Slika 5 Slika zaslona razgovora s umjetnom inteligencijom



Izvor: Izrada autora

Strah je prirodna čovjekova reakcija na nepoznato, a lijek mu je upoznavanje s materijom i shvaćanje biti stvari koje se boji. Bit umjetne inteligencije leži u slijedećem citatu. Visoka stručna skupina za umjetnu inteligenciju Europske Komisije (engl. *High-lever expert group on artificial intelligence*, AI HLEG) definira AI sustave kao „softversko (možda i hardversko) rješenje koje su dizajnirali ljudi koji, s obzirom na složeni cilj, djeluju u fizičkoj ili digitalnoj dimenziji percipirajući svoju okolinu kroz prikupljanje podataka, tumačenje prikupljenih strukturiranih ili nestrukturiranih podataka, promišljanje znanja ili obrađuje informacije izvedene iz tih podataka i odlučuje o najboljim radnjama koje treba poduzeti kako bi se postigao zadani cilj. AI sustavi mogu koristiti simbolička pravila ili naučiti numerički model, a mogu i prilagoditi svoje ponašanje analizirajući kako na okoliš utječu njihovi prethodni postupci“ (AI HLEG, 2019, str. 1). Dakle, AI daje strojevima i računalima mogućnost da odrađuju zadatke za koje je potrebna ljudska inteligencija. Uspoređujući ljudsku i umjetnu inteligenciju, važna

sličnost je u neuronskim mrežama koje kod AI oponašaju one biološke u ljudskom mozgu, ali je iza umjetnih neurona niz sustava algoritama. Neuroni su povezani u mreže te svaki obrađuje ulazne podatke te ih šalje sljedećem neuronu, a mreže se nalaze u slojevima. Ulazni sloj (engl. *input layer*) je prvi sloj neuronske mreže te on prima podatke. Sljedeći su skriveni slojevi (engl. *hidden layers*) koji obrađuju podatke koji su ušli u sustav. Zadnji sloj je izlazni (engl. *output layer*), a on generira izlazne podatke na temelju analiziranih unutarnjih podataka (Flasinski, 2016). Kako bi što bolje imitirala ljudsku inteligenciju, AI koristi više vrsta tehnologija (Flasinski, 2016):

1. strojno učenje (engl. *machine learning*, ML) – tehnika kojom se pomoću algoritama daje mogućnost računalima da uče iz prikupljenih podataka te prepoznaju uzorke pomoću kojih donose odluke bez dodatnog programiranja,
2. genetski algoritmi (engl. *genetic algorithms*) – heuristički algoritmi za pretraživanje koji imitiraju kromosome za pronalaženje najboljeg rješenja,
3. obrada prirodnog jezika (engl. *natural language processing*, NLP) – služi za analizu, generiranje i razumijevanje ljudskog jezika,
4. računalni vid (engl. *computer vision*) – mogućnost da računalo analizira nestrukturirane podatke poput slika i videozapisa te unutar njih prepoznaje objekte,
5. algoritmi odlučivanja (engl. *decision making algorithms*) – pomoću njih računalo može donositi odluke na temelju analize podataka po zadanim kriterijima,
6. Podržano učenje (engl. *reinforcement learning*) – grana strojnog učenja u kojoj se razvija algoritam koji uči donositi odluke na temelju reakcija iz okoline koja mu daje signale nagrade (negativne i pozitivne).

Primjena AI je raznolika, od medicine do sporta, a u kontekstu proizvodnje ona može biti ugrađena u strojeve te u softverske robote kako bi doprinijela automatizaciji i većoj efikasnosti pogona. Prediktivno održavanje (engl. *predictive maintenance*) je jedan od načina primjene u kojoj umjetna inteligencija analizira podatke prikupljene sensorima te predviđa potencijalne kvarove prije nego dođe do njih. To omogućuje poduzećima da se unaprijed pripreme te maksimalno skrate vrijeme van rada zbog kvarova. Osim kvarova, analizom podataka umjetna inteligencija može optimizirati proizvodni proces te istaknuti korake u proizvodnji koji ne dodaju vrijednost. Računalni vid se može primijeniti u svrhu prepoznavanja grešaka na proizvodu te time kontrolirati kvalitetu proizvoda. Primjenom AI u sklopu RPA dobiva se softverski robot koji je u mogućnosti rješavati zadatke brže i točnije od ljudi, a time se pospješuje efikasnost.

Prednosti umjetne inteligencije su zaista revolucionarne i monumentalne, no ipak postoje problemi koje konstantni tehnološki napredak još nije uspio riješiti. Jedan od etičkih problema AI jest pristranost. Iako inteligentna i sposobna donositi odluke AI je ipak stvorena od ruke čovjeka koji u svojoj biti nije objektivan. Podaci na temelju kojih donosi odluke mogu biti namjerno nepotpuni što dovodi do diskriminacije. Ako je sustav pristran te zbog toga AI donese neadekvatnu odluku te se na temelju nje promijeni tok poslovanja koji nema pozitivne posljedice, tko snosi odgovornost? To je još jedno etičko pitanje na koje nije poznat jednoznačan odgovor. Upravo zbog toga te zbog dubokog i kompleksnog sklopa neuronskih mreža koje su naoko nestručne osobe neshvatljive dovodi do nepovjerenja prema sustavu zbog nedostatka transparentnosti. Podaci, koji su gorivo umjetne inteligencije, mogu biti osjetljivi a ova tehnologija može biti iskorištena za zloupotrebu i manipulaciju ukoliko ne postoje dovoljno jake mjere sigurnosti koje bi mogle zaštititi sigurnost podataka (Hagendorff, 2020). Na svakom korisniku je da odluči je li primjena umjetne inteligencije vrijedna ovih rizika s obzirom na prednosti koje donosi, a vrijeme će pokazati hoće li se kroz nekoliko sljedećih desetljeća autonomni roboti oplemenjeni umjetnom inteligencijom okrenuti protiv čovječanstva.

2.1.11 Dva smjera razvoja Industrije 4.0

Prepoznato je da se Industrija 4.0 razvija u dva različita smjera. S jedne strane postoji ogromna potražnja za primjenom tehnologija što donosi velike promjene u poduzeća. Okidači za promjene dolaze iz svih sfera društva. Jedan od okidača potražnje jest potreba za kraćim periodom razvoja proizvoda zbog brzih promjena na tržištu. Osim toga zadnjih godina dominira tržište kupaca za razliku od dosadašnjeg slučaja kad je prodavatelj postavljao uvjete kupnje pa to dovodi do visoke individualizacije za zahtjev. Nastavno na to, poduzećima je potrebna veća fleksibilnost koju omogućuju nove tehnologije, a kako bi je postigli okreću se decentralizaciji i odmicanju od tradicionalne organizacijske hijerarhije. Ono što je najvažnije za normalan rad je učinkovito raspolaganje resursima na ekonomičan, ali i ekološki prihvatljiviji.

S druge strane postoji tehnološki pritisak kroz veću potrebu za visokom razinom mehanizacije i automatizacije kao što su autonomni pogoni. Digitalizacija i umrežavanje proizvodnje donosi potpuno digitalna okruženja u proizvodnji. Minijaturizacija se javlja u kontekstu potrebe da uređaji budu što manji i da što manje mjesta zauzimaju. Sve to dovodi do rješenja kao što su pametne tvornice opremljene senzorima i autonomnim sustavima gdje ljudi isključivo vrše nadzor nad strojevima.

2.2 Promjene uzrokovane Industrijom 4.0

Cilj koncepta Industrije 4.0 jest stvoriti pametne tvornice u kojima će se proizvodnja optimizirati što posljedično dovodi do rasta produktivnosti. Tržište se mijenja i kupac određuje uvjete poslovanja, a time se prodavač mora prilagoditi njegovim potrebama, a drugi cilj je ostvariti proizvodnju usmjerenu na kupca (engl. *customer-oriented production*) koja je fleksibilnija i efikasnija od dosadašnje koja je bila usmjerena na masovnu proizvodnju, također brza prilagodba potrebama tržišta donosi veću efektivnost. Automatizacija, kao još jedan od ciljeva ovog koncepta, predstavlja put prema većoj efikasnosti, a ona se postiže maksimalnim mogućim iskorištavanjem ljudskih i strojnih resursa. Budući da su efikasnost, fleksibilnost i efektivnost ključne riječi svakog znanstvenog spomena Industrije 4.0, očekivano je cilj smanjenje troškova i gubitaka. Ostvarivanje ovih ciljeva dovodi do novih poslovnih modela i prilika na globalnom tržištu. Promjene do kojih primjena Industrije 4,0 dovodi su automatizacija procesa, povećana digitalizacija, fleksibilnost u proizvodnji, povezanost i integracija i upravljanje podacima te analitika istih. „Transformacija je promjena koja postupnim procesom dolazi u željenu fazu. Promjene nastaju reagiranjem na utjecaje iz vanjskog i unutarnjeg okruženja koji mogu usmjeravati promjene u skladu s organizacijskim ciljevima“ (Kreitner i Kinicki, 2014) Nakon implementacije, promjene koje su zabilježene opisane su u nastavku.

2.2.1 Konkurentska prednost

Konkurentske prednosti su karakteristike koje proizvod čine poželjnijim od konkurenata na tržištu, a poduzeću donose superiornost nad drugim proizvođačima. Kako bi se prednosti ostvarile poduzeće bi trebalo imati razvijenu konkurentsku strategiju a ona je „napor da se nađe konkurentska pozicija u industriji, glavnoj areni u kojoj se odvija natjecanje“ (Natalia i Ellitan, 2019, str. 12). Promjena u vidu prednosti koju donosi implementacija Industrije 4.0 jest povećana efikasnost koja se dobiva optimiziranjem proizvodnih procesa te smanjivanjem gubitaka i povećavanjem produktivnosti. Obradom Velikih podataka, nekad i u stvarnom vremenu te primjenom analitičkih alata omogućeno je brže donošenje odluka što poduzeća čini prilagodljivijim brzim promjenama na tržištu. Primjetno je i povećanje kvalitete proizvoda primjenom novih tehnologija jer su one preciznije, a simulacijom je moguće predvidjeti probleme u proizvodnji prije nego li se započne masovna izrada. Fleksibilnost je još jedna od prednosti koju donosi implementacija Industrije 4.0 jer se ostvaruje mogućnost brze prilagodbe potrebama tržišta.

2.2.2 Fleksibilnost

Konkurentsku prednost poduzeća predstavljaju različiti čimbenici poput imovine, tehnologije, resursa, visokokvalificiranih zaposlenika, ali na prvom mjestu fleksibilnost (Benešova et al. 2019). Uzrok potrebi za fleksibilnosti proizvodnje jest nestabilno tržište proizvoda vrlo kratkog životnog vijeka te nagle promjene u potražnji istih. „Fleksibilnost proizvodnje poboljšava sposobnost poduzeća da pravodobno reagira na zahtjeve kupca i poveća produktivnost proizvodnog procesa bez prekomjernih troškova i trošenja prevelike količine resursa“ (Fragapane et al., 2022, str. 126). Kako bi se to postiglo, u organizaciji je potrebno stvoriti fleksibilnost rada, a definira se kao „broj i heterogenost zadataka koje radnik može obavljati i sposobnost da mijenja radnu snagu unutar poduzeća“ (Mendes i Machado, 2015, str. 5). Prema tome, vještine zaposlenika izravno utječu na fleksibilnost proizvodnje novih proizvoda, njihove količine te time utječu i na uspješnost poslovanja (Enrique et al., 2021).

Fleksibilnost proizvodnje određena je i transformacijom tradicionalnog načina proizvodnje korištenjem novih tehnologija poput računarstva u oblaku, simulacije i automatizacije. Osim novih tehnologija, proizvodna linija bi trebala biti modularna, odnosno potrebno ju je dizajnirati na način da ju je moguće brzo prilagoditi i izmijeniti za izradu novog proizvoda. Agilni procesi stvaraju okruženje u kojem je moguće ubrzati proizvodnju te se lakše prilagoditi tržištu. Metodologije kojima se postiže agilnost su:

- Vitka proizvodnja (engl. *lean manufacturing*) – pristup upravljanju proizvodnji kojom se eliminiraju gubici i nepotrebne aktivnosti kako bi se povećala efikasnost, smanjili troškovi i poboljšala kvaliteta proizvoda
- *Just-in-time* (JIT) proizvodnja – pristup u kojem se resursi poput sirovina i materijala potrebnih za izradu proizvoda osiguravaju u pravo vrijeme i u potrebnoj količini što smanjuje zalihe i troškove skladištenja

Skalabilnost je epitet kojeg se često rabi u opisivanju modernih procesa. U prevedenom, skalabilna proizvodnja ima mogućnost proširivanja i smanjivanja procesa prema potrebi ovisno o obujmu poslovanja ili zahtjevima tržišta. „Kroz povezivost Industrije 4.0, automatizaciju, brzu razmjernost informacija i analitiku može se dostići nova razina fleksibilnosti i novi pristupi planiranju i kontroli novo projektiranih proizvodnih sustava“ (Fragapane et al., 2020)

2.2.3 Automatizacija procesa

Automatizacija procesa podrazumijeva primjenu pametnih strojeva i sustava koji su u mogućnosti međusobno komunicirati i dijeliti podatke te donositi samostalne odluke.

Komunikacija između strojeva (engl. *machine to machine*, M2M) ostvaruje se postavljanjem senzora i aktuatora⁵ čime se postiže bolja koordinacija i sinkronizacija u proizvodnom procesu. Pametni strojevi sposobni su i za samodijagnostiku i samopopravak. Pomoću sustava za dijagnostiku koji detektiraju probleme i kvarove u stvarnom vremenu, skraćuju vrijeme popravka te neaktivnosti u pogonu. Osim što rade dijagnozu u slučaju kvarova, prediktivnim modelima mogu predvidjeti iste što pomaže u učinkovitijem održavanju pogona te smanjuje moguće rizike u proizvodnji. Optimizacija performansi, koju sami obavljaju, snižava troškove te povećava kvalitetu proizvoda. Velika su očekivanja glede promjene u proizvodnji u kontekstu Industrije 4.0, a pametni strojevi su fleksibilni i prilagodljivi te se na njima lako mijenjaju postavke i serije proizvodnje.

Roboti u Industriji 4.0 znače visoku razinu automatizacije. Jednostavni i ponavljajući zadaci bez velikih odstupanja i iznimki idealni su za zamjenu ljudskog za robotski rad. Prednosti te zamjene su veća preciznost i neprekinuti rad. Ljudska radna snaga se u tom slučaju može više fokusirati na zahtjevnije zadatke bez gubljenja vremena na one rutinske. Time se smanjuju troškovi u proizvodnji te se povećava efikasnost i produktivnost. U kontekstu sigurnosti na radu za ljude, roboti mogu preuzeti one teške i opasne zadatke, a u kontekstu rada čovjeka i robota, potrebno je implementirati u sustav visoku razinu sigurnosti koju omogućuju senzori na strojevima koji prepoznaju čovjekovu poziciju u odnosu na stroj.

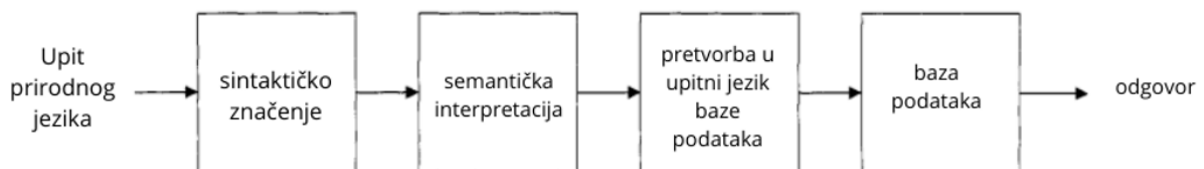
U slučaju pametnih strojeva i robota, njihova inteligencija se oslanja na senzore. „Senzori mogu prikupiti podatke te ih analizirati za učinkovito donošenje odluka, a samooptimizacija je moguća za automatizaciju u proizvodnim linijama“ (Javaid et al., 2021, str. 2). Mogu mjeriti različite parametre: temperatura, tlak, vibracije, zvuk, vlagu i sl. Ovisno na koje podražaje reagiraju, skupljaju podatke, detektiraju anomalije u stvarnom vremenu, a time i optimiziraju održavanje. Proaktivnost u upravljanju koja se dobiva implementacijom senzora u sustav je ključna odlika Industrije 4.0.

Robotska automatizacija procesa (engl. *robotic process automation*, RPA) preuzima repetitivne zadatke iz poslovnih procesa te ih obavlja učinkovitije i brže od ljudi. „Developer postavlja pravila i varijable zadatka, a oni uključuju radnje kao što su prijave u aplikacije, kopiranje i lijepljenje podataka, otvaranje elektroničke pošte, ispunjavanje obrazaca i sl.“ (Riberio et al., 2021). Ovo softversko rješenje pomaže ljudima u rješavanju rutinskih zadataka na koje uvjetno rečeno gube vrijeme te povećava efikasnost ljudskog kapitala dozvoljavajući da fokus bude na

⁵ Naprava pomoću koje se pokretni dio stroja dovodi u željenu poziciju nakon upravljačkog signala

stručnim znanjima u rješavanju zahtjevnijih problema u poslovanju. Potpomognuta umjetnom inteligencijom (engl. *artificial intelligence*, AI), RPA obogaćuje za naprednu analizu podataka koji se prikupljaju putem RPA, također AI može analizirati nelinearne podatke poput slika i daje joj kognitivne sposobnosti kako bi mogla razumjeti kompleksne informacije. Ta kombinacija tehnologija može donositi automatizirane odluke na temeljene na prikupljenim podacima i uvjetima iz okoline. Budući da je ljudima lakše komunicirati prirodnim jezikom⁶, AI omogućuje da RPA razumije i interpretira ljudski jezik što je korisno kad softverski robot mora komunicirati s korisnicima. Slika 6 prikazuje kako izgleda obrada upita u prirodnom jeziku kako bi odgovor bio točan.

Slika 6 NL sustav upita baze podataka



Izvor: Allen (2003)

Kako bi bio što efikasniji, robot mora učiti i prilagođavati se uvjetima okoline u kojoj radi, a zahvaljujući strojnom učenju (engl. *machine learning*, ML) u tome uspijeva. Kombinacija RPA i AI je za poslovanje osvježanje i rasterećenje zaposlenika te pruža mogućnost za efikasnijim radom.

2.3 Digitalna transformacija i Industrija 4.0 u proizvodnji

Digitalna transformacija (engl. *digital transformation*) se usko veže uz Industriju 4.0. Definira se kao: „promjene u načinu rada, ulogama i poslovnoj ponudi uzrokovane usvajanjem digitalnih tehnologija u organizaciji ili u radnom okruženju organizacije“ (Parviainen et al., 2017). Promjena koje ona donosi na procesnoj razini je racionaliziranje ručnog rada digitalnim alatima, dok se na organizacijskoj razini odbacuju zastarjeli modeli te se nude nove usluge. Poslovna razina se bavi promjenama uloga te lanaca vrijednosti te se na razini društva, odnosno kulture unutar organizacije, događaju promjene u načinu razmišljanja te izvođenja zadataka. Prema Tohanean et al. (2018), digitalizacija i promjene u organizaciji blisko surađuju. Zaposlenici se organiziraju u projekte timove za razliku od dosadašnjeg rada u poslovnim funkcijama, odmiču se od starih ponavljajućih zadataka te ulažu više energije u nove projekte. Odmicanje od „stare organizacije posla“ primjetan je i odmak od uhodane regulacije te razmišljanja u okviru jednog

⁶ Govorni jezik kojim se služe ljudi, a kojeg strojevi ne mogu razumjeti.

odjela, odnosno, zaposlenici postaju multifunkcionalni. Jedna od najvećih promjena koju je donijela digitalna transformacija u organizaciju jest omogućavanje rada iz bilo kojeg kutka Zemlje, dokle god je dostupna stabilna internetska veza. Putem platformi i modernih komunikacijskih tehnologija ljudi rade i surađuju u isto vrijeme.

Takvo funkcioniranje organizacije omogućuju tehnologije velikih podataka, računarstva u oblaku te robotike. Osim tehnologija, potrebno je promijeniti i strateško razmišljanje o organizaciji. Menadžeri bi trebali prilagoditi svoje vodstvo prema novim tehnologijama. MIT-ev Sloan Management Review u suradnji s Deloitte-ovim University Press-om u trećoj godišnjoj studiji digitalnog poslovanja iz 2017. godine otkrivaju 5 pristupa digitalizaciji koji mogu pomoći lakšim promjenama u organizaciji. (Kane et al., 2017. str. 7):

1. korjenite promjene u pristupu organizacije i razvoja radne snage – potrebno je kreirati krosfunkcionalne timove čiji će se način razmišljanja razvijati u smjeru inovacija;
2. dugoročno planiranje – kako bi ciljevi organizacije bili u skladu s razvojem novih tehnologija, potrebno je proširiti horizont i strategiju uskladiti s planovima dužim od 5 godina;
3. podignuti male eksperimente čiji je utjecaj velik na poslovanje na razinu poduzeća – prepoznavanje projekta za vrijeme eksperimentiranja i osiguravanje sredstava za razvoj kako bi zadržali ambicioznost, zaposlenicima budi želju za ostajanjem unutar organizacije;
4. talent menadžment – talentirani zaposlenici su skloni mijenjati radno mjesto i okolinu ukoliko ne vide prostor za napredak. U tom slučaju bitno je zadržati svoje talente i privući talente izvan organizacije;
5. poticati vodstvo s vizijom za razvoj digitalne strategije – ključno je za organizaciju koja želi postići digitalnu zrelost da njihovo vodstvo razvija digitalne vizije te strategijom dolazi do tih ciljeva te osigurava sredstva za ostvarenje.

Pojam digitalne zrelosti se usko veže uz digitalnu transformaciju, prema autoricama Aslanovoj i Kulichikini (2020), to je primjerena reakcija poduzeća na promjene u digitalnoj sferi, implementacija digitalnih postignuća u poslovni proces, kao i razvoj digitalnih kompetencija zaposlenika. Zrelost se dijeli na tri grupe (Berghaus i Back, 2016. str. 11):

- rana digitalizacija,
- digitalizacija u razvoju i
- razvijena digitalizacija.

Organizacije u fazi rane digitalizacije karakterizira korištenje osnovnih digitalnih alata poput elektroničke pošte, internetskih stranica te poslovnih aplikacija namijenjenih određenoj funkciji unutar poduzeća te nisu povezane u jedinstven sustav. Analitika podataka se obavlja u jednostavnim oblicima poput kreiranja izvještaja, a kapaciteti za dublje analize su vrlo ograničeni. Operativni i visoko ponavljajući zadaci se odvijaju ručno. Prepoznat je i sporiji tempo promjena unutar organizacije zbog nesvjesnosti o dobrobiti primjene novih tehnologija.

Digitalizacija u razvoju je faza u kojoj su poduzeća stvorila temelje digitalizacije u obliku komunikacije i upravljanja dokumentima. Postepeno uvode automatizirane dijelove procesa te su sklone novim ulaganjima u digitalne tehnologije zbog razvijene svijesti o važnosti primjene takvih tehnologija u poslovanje te o prednostima koje one donose. Digitalne tehnologije koriste kako bi poboljšali iskustva s klijentima, a time i ubrzavaju tempo promjena unutar organizacije.

Konačna faza digitalizacije jest ostvarenje zrelosti. Poduzeća su u toj fazi potpuno integrirana s digitalnim tehnologijama kao što su računarstvo u oblaku, veliki podaci, Internet stvari, umjetna inteligencija i sl. U kulturi organizacije prisutne su inovacije te sklonost agilnosti i upošljavanju talenata iz radne snage dopuštajući im da rastu kroz eksperimentiranje te potičući njihove ambicije. Prate trendove na tržištu te su okrenuta svojim klijentima i personalizaciji proizvoda i usluga. Proizvodi su izvanredne kvalitete zbog primjene preciznih i efikasnih tehnologija i automatizacije. Prepoznatljivi su po vodstvu i konkurentskim prednostima te su se sposobni brzo prilagoditi novim uvjetima poslovanja.

U načelu digitalna transformacija zaista jest transformacija jer prodire u sve pore organizacije u koju se implementira te zahtjeva korjenitu promjenu u stavu i načinu razmišljanja svih sudionika procesa, a njene dobrobiti za poduzeće su mjerljive u povećanju efikasnosti i konkurentskim prednostima koje ona donosi.

Zaključno s digitalnom transformacijom koja obuhvaća sve koncepte novih tehnologija Industrije 4.0, rezultati implementacije svega spomenutog u ovom poglavlju donose velike promjene. Fizički sustavi se u potpunosti digitaliziraju. Klijenti, čije se potrebe mijenjaju te koji traže unikatne proizvode u manjim količinama, postaju zadovoljni jer je njihova potražnja namirena. Centralizirane organizacije odbacuju tradicionalnu kontrolu i nadzor te se okreću decentraliziranom modelu (Arnold et al., 2016). Proizvodni pogoni postaju samoregulatorni i samooptimizirajući, a produktivnost rada strojeva i ljudi raste. Nastavak ulaganja u istraživanje i razvoj organizacijama pruža jedinu sigurnost u zadržavanju svojeg mjesta pod trenutno jarkim suncem tržišta.

3 IMPLEMENTACIJA TEHNOLOGIJA INDUSTRIJE 4.0 U PROIZVODNE PROCESSE

U tradicionalnom načinu organizacije poslovanja, funkcija istraživanja i razvoja je bila odgovorna za inovacije. Kad se govori o suvremenom poduzeću koje implementira najnovije tehnologije inovacija postaje tema svake funkcije i pore organizacije. Također je prepoznato da IT odjel ne može biti sam odgovoran za digitalizaciju već cijelo poduzeće mora prihvatiti novi način poslovanja. Širenje tih koncepata kroz organizaciju i sve sudionike njenih procesa dovodi do promjena iz temelja koje donosi Industrija 4.0. Kako bi implementacija bila što uspješnija važno je razviti digitalnu strategiju koja će omogućiti jasne korake u postizanju ciljeva. Moderna organizacija donosi odluke na svim razinama na temelju valjanih i pravovremenih podataka. Kako bi se oni prikupili poželjno je korištenje senzora koji omogućuju praćenje performansi i stanja procesa u stvarnom vremenu te daju realnu sliku proizvodnje. Proizvodni proces mora biti jedinstven i povezan, a to znači da će komunikacija između različitih etapa procesa biti neprekinuta. Jednostavni i repetitivni poslovi zagušuju modernog zaposlenika i oduzimaju mu vrijeme za obavljanje konstruktivnih i korisnijih poslova te je takve zadatke potrebno automatizirati i osloboditi zaposlenika kako bi mogao usavršavati svoje vještine i znanje prema potreba procesa jer je kvalitetna radna snaga i bazen talenata u modernoj organizaciji vrlo bitan dio strategije. Sigurnost i zaštita podataka koji donose prednosti na tržištu je vrlo važan aspekt Industrije 4.0 jer su kibernetičke prijetnje sve veće i naprednije iz dana u dan. Industrija 4.0 u kontekstu proizvodnje te njena implementacija postaju prioritet dionika tržišta koji žele prednost. Kako bi ju ostvarili potrebno je temeljito planiranje i ulaganje, a cijela organizacija sa svim svojim sudionicima treba uložiti veliki trud te kao prioritet postaviti razvoj inovacija, konstantno učenje i prilagođavanje potrebama danas vrlo dinamičnog tržišta.

3.1 Kontrola i praćenje proizvodnog procesa

Proizvodni procesi i njihova efikasnost u literaturi spominju se još od doba Henryja Forda te njegove revolucionarne pokretne trake. Više od stoljeća kasnije proizvodne linije zadržale su skelet Fordove revolucije, ali sada imaju još sjajnije komponente. Sav taj napredak posljedica je pomnog nadziranja i praćenja procesa te prepoznavanjem potreba tržišta. Kontrola i praćenje procesa daje uvid u proizvodnju kroz prikupljene podatke. U kontekstu Industrije 4.0 novina u ovom području jest pametna statistička kontrola procesa (engl. *smart statistical process control*, SSPC). „U usporedbi sa statističkom kontrolom procesa (engl. *statistical process control*, SPC) koja je prisutna u proizvodnji već neko vrijeme, SSPC nudi automatizirano prikupljanje podataka kroz IoT tehnologiju u stvarnom vremenu te je u potpunosti integriran u proizvodni

ekosustav. Uz pomoć algoritama strojnog učenja i AI kontrolni parametri mogu se prilagoditi promjenjivim uvjetima procesa te uključuju mogućnost predviđanja.“ (Goecks et al., 2024, str. 2). SSPC obuhvaća, osim već navedenih tehnologija Industrije 4.0, i obradu velikih podataka te kibernetičko-fizičke sustave (engl. *cyber-physical systems*, CPS) o čemu će biti više rečeno u sljedećim poglavljima. Implementacijom SSPC-a proizvodni proces postaje jasnije prikazan i otvara se mogućnost predviđanja kvarova prije nego oni počnu utjecati na kvalitetu krajnjeg proizvoda, osim predviđanja kvarova moguće je poboljšati performanse strojeva. Pomoću vizualizacije statističkih podataka moguće je vidjeti anomalije u proizvodnji poput uskih grla u proizvodnji. Ovaj tip tehnologije je vrlo koristan poduzeću u nadzoru procesa, no treba imati na umu da je potrebna ogromna količina kvalitetnih i čistih podataka na kojem bi algoritam mogao učiti da bi postigao visoku preciznost predviđanja, a samo pripremanje podataka iz pogona iziskuje intenzivan rad stručnjaka.

Kad se govori o kontroli procesa u proizvodnji, nužno je spomenuti SCADA-u odnosno računalni sustav za nadzor, mjerenje i upravljanje industrijskim sustavima (engl. *supervisory control and data acquisition*). Prisutna je još od pedesetih godina prošlog stoljeća kad je sustav bio u potpunosti analogan (SCADA, b.d.). Njena primjena u proizvodnji jest za nadzor i kontrolu industrijskih procesa. Ona prikuplja podatke, obrađuje ih i prikazuje u realnom vremenu kako bi korisnik mogao učinkovito upravljati procesom (Daneels i Salter, 1999). Jedna od komponenti SCADA sustava jest sučelje čovjeka i stroja (engl. *human – machine interface*, HMI) koje omogućuje korisniku da komunicira sa sustavom kroz grafičke prikaze koji prikazuju trenutno stanje u proizvodnji. Važne fizičke komponente u SCADA-i su programabilni logički kontroler (engl. *programmable logic controller*, PLC) i daljinska terminalna jedinica (engl. *remote terminal unit*, RTU) (Fillatre et al., 2017, str. 28). To su uređaji koji prikupljaju podatke sa senzora i izvršavaju kontrolne zapovijedi za aktuator. Komunikacijska infrastruktura je komponenta kojom putuju podaci od uređaja do centralnog nadzornog servera u kojem se prikupljeni podaci obrađuju i koji omogućuje centralizirani nadzor cijelog sustava. Pomoću tog sustava korisnik nadzire strojeve te dobiva cjelokupnu sliku pogona u realnom vremenu te kontrolira rad strojeva na daljinu. U slučaju da sustav prepozna problem, aktivira se alarm koji korisnika obavještava o kritičnom događaju. Sukladno vremenu u kojem djeluje SCADA se prilagođava i implementira nove tehnologije Industrije 4.0 pa tako koristi analizu velikih podataka te računarstvo u oblaku za pohranu. Velik utjecaj na napredak SCADA-e imala je pojava IoT-a, pa su tako senzori povezani sa sustavom za bolji prikaz stvarnog stanja. Strojno učenje i umjetnu inteligenciju sustav koristi kako bi na temelju

povijesnih podataka mogao predvidjeti buduće vrijednosti. Rubno računalstvo (engl. *edge computing*) je još jedna novina koju je SCADA uvela. Ono omogućuje obradu podataka bliže izvoru, umjesto da se šalju centralni poslužitelj što povećava brzinu analize koja je ključna za donošenje kvalitetnih i pravovremenih odluka. Njena primjena u proizvodnji jest u automatizaciji procesa poput upravljanja robotskim rukama na proizvodnoj liniji. Kontrola kvalitete se vrši analizom podataka prikupljenih putem senzora, a osim kvalitete moguće je pratiti i potrošnju energenata te efikasnost identificirajući energetske neefikasne operacije i eliminacijom istih. Alarmi unutar sustava učinkovito upozoravaju na izvanredne situacije u pogonu kao što je curenje plina ili vode te se iz centralne kontrolne sobe nadgleda cjelokupna proizvodnja te se od tamo može brzo reagirati na bilo kakav tip kvara. Posljedica koju poduzeće može očekivati nakon primjene sustava u proizvodnju jesu povećana efikasnost, smanjenje grešaka u proizvodnji, povećanje fleksibilnosti i kvalitete proizvoda. Rizici primjene ove tehnologije leže u izloženosti kibernetičkim napadima od kojih se organizacija nužno mora zaštititi metodama kibernetičke sigurnosti. Također, valja napomenuti da ovi sustavi traže visoke financijske uloge, te je nužno održavati i nadograđivati sustav kako bi bio prikladan za korištenje u doba vrlo velikih i čestih promjena.

3.2 Tehnologije Industrije 4.0 u proizvodnji

U ekonomskoj su teoriji minimizacija inputa ili troškova i maksimizacija outputa ili profita vrlo poznati pojmovi. U doba visoke kompetitivnosti, masovne prilagodbe i globalizacije ta dva pojma sve više dobivaju na važnosti. Proizvodno poduzeće koje želi zadržati ili želi tek osvojiti svoje mjesto pod suncem na vrlo promjenjivom tržištu treba biti fleksibilno i agilno. U postizanju ta dva epiteta, organizaciji na raspolaganju stoje tehnologije Industrije 4.0, a kad se govori o proizvodnji konkretno, koktel tehnologija spomenutih u prethodnim poglavljima za uspjeh kombiniraju rješenja poput kibernetičko-fizičkih sustava (engl. *cyber-physical system*, CPS).

Prema definiciji CPS-i su „automatizirani sustavi koji omogućuju povezivanje operacija iz fizičke stvarnosti s računalnom i komunikacijskom infrastrukturom“ (Jazdi, 2014, str. 1). njihova funkcija u proizvodnji jest da povežu fizičke komponente poput strojeva s onim kibernetičkim poput softvera kako bi se strojevima moglo upravljati te ih nadzirati putem računala te postići što veću razinu automatizacije koja donosi preciznu i brzu proizvodnju. Pomoću senzora prikupljaju se podaci iz pogona ovisno o njihovoj vrsti kao što je mjerenje temperature, tlaka, sile ili položaja. Prikupljeni podaci nakon tumačenja korisniku daju informaciju o stanju u pogonu te performansama. Aktuatori su naprave koje izvršavaju iz

kontrolnog sustava poput otvaranja i zatvaranja ventila, pokretanja motora, određivanja položaja komponente i slično. Ovisno o potrebama linije aktuatori mogu biti električni, hidraulični, pneumatski ili termoaktuatori. Komunikaciju među njima omogućuje već spomenuti kontrolni sustav. Oni prikupljaju podatke iz senzora te ih analiziraju pomoću algoritama kao što je adaptivna kontrola kako bi se detektiralo trenutno stanje u pogonu. Na osnovu te analize sustav donosi odluke o akcijama koje bi trebalo poduzeti u svrhu dovođenja pogona u željeno stanje i potom šalju zapovijedi aktuatorima. Sustavi mogu biti otvoreni i zatvoreni ovisno o tome koliko su zadaci zahtjevni. Otvoreni sustavi izvršavaju jednostavne akcije koje su unaprijed definirane bez povratnih informacija iz sustava kao što je otvaranje ventila za koje obično nisu potrebne korekcije u realnom vremenu. Zatvoreni sustavi služe u svrhu izvršavanja zahtjevnijih zadataka gdje je potrebna prilagodba sustava prema stanju u stvarnom vremenu. Kako bi senzori, aktuatori i kontrolni sustav nesmetano komunicirali potrebno ih je povezati s komunikacijskom mrežom. Ona služi kao medij za prijenos podataka i omogućuje sinkronizaciju različitih dijelova sustava u kompletan koordiniran sustav. Mreža mora biti pouzdana i sigurna kako bi podaci koji njome putuju bili zaštićeni od eventualnih kibernetičkih napada. Komunikacijske mreže mogu biti žičane poput ethernet koji je vrlo siguran i brz način prijenosa podataka, a mogu biti i bežične putem wi-fi tehnologije koja pruža nešto veću fleksibilnost. CPS se može obogatiti AI-om i ML-om pa se obrada podataka i izvršenje naredbi može dodatno optimizirati i automatizirati. No, kao i sa svakom novom tehnologijom, potrebna je visoka razina opreza. U ovom slučaju senzori mogu prikupljati vrlo osjetljive podatke o proizvodnji koji imaju visoku vrijednost za proizvođača, kao i za one koji djeluju van granica zakona. Sigurnost mreže predstavlja imperativ, stoga je potrebno veliko ulaganje u zaštitu sustava od potencijalnih prijetnji.

U slučaju velikih proizvodnih linija promjene i prilagodba mogu predstavljati velik izazov. Kako bi se rizici implementacije novih linija ili novog proizvoda što više umanjili razvijena je tehnologija digitalnog blizanca (engl. *digital twin*), a definicija kaže da je to „digitalna informacijska konstrukcija koja opisuje fizički sustav kreirana kao entitet za sebe te povezana s fizičkim sustavom. Digitalni prikaz optimalno treba uključivati sve informacije vezane za sustav koje su prikupljene temeljitom inspekcijom u stvarnom svijetu.“ (Kritzinger, W., et al., 2018., str. 1016-1017) On predstavlja zrcalni prikaz stvarnog sustava u kojem je moguće pratiti performanse procesa u stvarnom vremenu pomoću senzora koji prikupljaju podatke iz pogona. Budući da su sirovi podaci golom oku nepregledni, pomoću blizanca se oni mogu lako vizualizirati te modelirati i naposljetku približiti korisniku. U slučaju potrebe za uvođenjem

promjena u proces pomoću ove tehnologije lako je napraviti simulaciju te vidjeti kako će promjena utjecati na stvarni proces bez da se proizvodnja zaustavlja što konačno smanjuje troškove uvođenja promjena bilo da se radi o novom proizvodu ili novom stroju u pogonu. Menadžment ima mogućnost testiranja posljedica novih odluka prije konačne implementacije te analizu prednosti koju donosi odluka smanjujući rizik od neuspjeha. Budući da je digitalni blizanac, ako je kvalitetno izrađen, gotovo identična kopija fizičkog sustava. Pomoću njega se mogu predvidjeti kvarovi u pogonu te se planiranjem održavanja opreme može spriječiti eventualan dulji zastoj u proizvodnji. Blizanac također omogućuje testiranje novih proizvoda prije izrade fizičkog prototipa te praćenje životnog ciklusa proizvoda, a prikupljeni podaci mogu se koristiti za daljnje istraživanje i razvoj. U kontroli i nadzoru procesa digitalni blizanac ima ključnu ulogu upravo zbog tehnologije simulacije koja služi kao pogled u budućnost te daje korisniku u ruke moćno oruđe pomoću kojeg gotovo magično eliminira rizike u proizvodnji. Iako zvuči vrlo obećavajuće, ova tehnologija je vrlo skupa i potrebno je konstantno i temeljito održavanje kako bi sustav ostao precizan što je vrlo radno intenzivno i zahtjevno.

Kontrola i praćenje proizvodnih procesa predstavlja ključan zadatak u današnjem manufakturnom okruženju. Budući da poduzeća danas rade uvjetima neizvjesnosti i velikih promjena te se potreba za masovnom proizvodnjom smanjuje, a raste potreba za individualiziranim i personaliziranim proizvodima manjih serija, pogoni moraju biti spremni na česte i velike promjene. Praćenjem procesa te njegovom optimizacijom postiže se proizvodnja konkurentnog proizvoda koji sa svojim smanjenim troškovima i povećanom kvalitetom omogućuje veću dobit. Kontrolom se dobiva proces koji funkcionira s minimalnim greškama i odstupanjima od standarda te proizvodnja teče bez velikih zastoja. Sve to poduzeću donosi konkurentne prednosti te je njegov nastup na tržištu stabilan i održiv čak i u ovim neizvjesnim vremenima.

3.3 Automatska analiza efikasnosti

Efikasnost je pojam koji se intenzivno veže uz Industriju 4.0. U uvjetima brzih i naglih promjena sa zahtjevima tržišta koji su ponekad, čini se, nerealni poduzeća su prisiljena raditi punom parom kako bi im udovoljili i zadržali svoju poziciju. Efikasnost u proizvodnji je nužna kako bi proizvođači trošili samo onoliko inputa koliko je potrebno da bi output bio brzo i kvalitetno izrađen. U proizvodnji je vrlo bitan rad strojeva, odnosno opreme i njene performanse, a kako bi to prikazali egzaktno, razvijena je metrika kojom se mjeri efikasnost. Automatska analiza efikasnosti (engl. *overall equipment efficiency*, OEE) je pojam koji je nastao osamdesetih godina prošlog stoljeća. Prvotno se vezao kao pomoćni alat za metodologiju

potpunog proizvodnog održavanja (engl. *total productive maintenance*, TPM) čija je svrha „proaktivno održavanje opreme kako bi se povećala produktivnost strojeva koja uključuje sve dionike procesa proizvodnje u prevenciji i predviđanju ponašanja opreme“ (Hansen, 2001, str 1). OEE je služila za kvantificiranje efikasnosti strojeva, odnosno pomoću nje se lakše uviđaju gubici u procesu koje je potrebno eliminirati. Budući da se njezina korisnost u procjeni efikasnosti pokazala vrlo visokom i bitnom za poduzeća, ova metrika je postala samostalan alat koji se kasnije razvio u više modela ovisno o potrebama organizacije. OEE naglašava tri pojma: efikasnost, efektivnost i produktivnost (Hansen, 2001). Efikasnost je određena vremenom, novcem i energijom - odnosno resursima uložanima u proizvodnju (Koch, b.d. a). Ukoliko proizvodnja troši najmanju moguću količinu resursa za izradu kvalitetnog proizvoda, onda se može reći da je proizvodnja efikasna. Efektivnost stavlja u odnos proizvod koji može biti proizveden uz date uvijete i proizvod koji je zapravo proizveden (Koch, b.d. a). Produktivnost predstavlja rezultat efikasnosti i efektivnosti, odnosno ona govori koliko je proizvoda dobiveno za uloženi trud, a veća produktivnost se postiže minimiziranjem truda uz zadržavanje količine proizvoda ili njegovo maksimiziranje (Koch, b.d. a). U osnovnom modelu OEE-a postoje 3 komponente: dostupnost, performanse i kvaliteta i prikazuju se matematičkom formulom (Koch, b.d. b) :

$$\text{OEE} = \text{dostupnost} \times \text{performanse} \times \text{kvaliteta}.$$

Dostupnost predstavlja vrijeme koje je oprema zaista u funkciji u odnosu na planirano vrijeme aktivnosti. Planirano radno vrijeme predstavlja vrijeme smjene stroja u kojoj je predviđeno da stroj radi bez stajanja, dok radno vrijeme predstavlja onu stvarnu vremensku vrijednost u kojoj je stroj radio izuzev stajanja zbog kvara, čepa u proizvodnoj liniji ili promjene alata. Izračun se prikazuje slijedećom formulom (Koch, b.d. b):

$$\text{Dostupnost} = \frac{\text{Radno vrijeme}}{\text{planirano radno vrijeme}}.$$

Za razliku od OEE ukupna efektivna izvedba opreme (engl. *total effective equipment performance*, TEEP), koja je također dio standarda OEE uzima u obzir ukupno dostupno vrijeme, odnosno 24 sata u danu i 7 dana u tjednu, dok ukupna radna učinkovitost (engl. *overall operating efficiency*, OOE) uzima u obzir vrijeme van rasporeda kao što su praznici ili vrijeme rezervirano za istraživanje i razvoj na stroju. Postoji još jedna inačica OEE-a, to je OEE usamljenik, a on se računa samo za jedan izolirani stroj koji ne ovisi o proizvodnoj liniji i nije u vezi s ostalim strojevima pa u računanju dostupnosti jednadžba ne uključuje izgubljeno vrijeme zbog zastoja u proizvodnoj liniji.

Performanse stroja govore o tome koliko on brzo radi u odnosu na svoju maksimalnu brzinu. Stvarni output predstavlja stvarnu brzinu u kojoj su uključene manje stanke i smanjena brzina dok je teorijski output umnožak teorijske brzine i radnog vremena stroja. Izračun je prikazan formulom u nastavku (Koch, b.d. b):

$$\text{Performanse} = \text{stvarni output} / \text{teorijski maksimalni output}.$$

Kvaliteta prikazuje omjer ispravnih proizvoda s ukupnom proizvedenom količinom uključujući i one s bilo kakvim defektom, a prikazuje se formulom (Koch, b.d. b):

$$\text{Kvaliteta} = \text{ispravan output} / \text{ukupan output}$$

Koristeći ovu formulu OEE Akademija je došla do izračuna koji kaže da je prosječan stroj u prosječnoj tvornici u aktivnom radu 35% do 40% OEE-a, iako prosječna uprava smatra da je u pogonu 80% OEE-a (Koch, b.d. c). To u prevedenom znači da stroj gubi 60 do 65% svog kapaciteta zbog stajanja stroja, rada sporijeg od maksimuma ili proizvodnje neispravnih proizvoda (Koch, b.d. c). U ovoj statistici leži korisnost metrike OEE. Ona ukazuje na izvor gubitaka bilo da se radi o izgubljenom vremenu dok je stroj u kvaru ili u redovitom održavanju, izgubljenoj brzini proizvodnje zbog neiskorištavanja maksimalnog potencijala opreme ili većoj količini proizvedenog škarta. Svaka komponenta OEE-a ukazuje na važne dijelove proizvodnje koji posljedično utječu na oportunitetne troškove poduzeća.

Menadžment od OEE-a može očekivati pomoć u donošenju informiranih odluka. Analizirajući formulu može se jasno vidjeti u kojem dijelu proizvodnje postoje problemi na temelju podataka prikupljenih IoT-om te ih nakon identifikacije korigirati. Na temelju izračuna moguće je pronaći prostor za veću efikasnost u proizvodnoj liniji i prioritizirati aktivnosti koje imaju najveći utjecaj na nju. Uspoređujući izračune kroz vrijeme moguće je pratiti napredak u proizvodnji na temelju stvarne statistike potpomognute obradom velikih podataka bez korištenja nepreciznih procjena na temelju proizvodne hale, posljedično to dovodi do preciznijih planova za buduću proizvodnju, a time i budući ciljevi postaju dostižniji i realniji. Eliminiranjem gubitaka u proizvodnji povećava se efikasnost i smanjuju se operativni troškovi uzrokovani zastojsima, dok se poboljšanjem performansi i kvalitete povećava proizvedena količina dok se udio nekvalitetnog proizvoda smanjuje. Sveukupno OEE organizaciji donosi detaljan uvid u ponašanje opreme koja je važan dio proizvodnog procesa.

3.4 Optimizacija

Prema Hrvatskom jezičnom portalu glagolska imenica optimiranje znači „postupak kojim se pri projektiranju ili planiranju (u ekonomiji, tehničkim i prirodnim znanostima) ostvaruje (određuje) najbolji mogući izbor ekonomskih i/ili tehničkih veličina na temelju prethodno određenih kriterija; optimizacija“ (Hrvatski jezični portal, b.d.). jednostavnije rečeno, optimizirati neki sustav znači ostvariti najveći uspjeh unutar danih uvjeta. U kontekstu Industrije 4.0 proizvodnju je potrebno optimizirati do one mjere do koje su svi troškovi minimizirani, a kvaliteta i kvantiteta proizvoda ostaje ista ili postaje veća. Ona donosi konkurentniji i učinkovitiji proizvod što sudioniku tržišta donosi prednost nad drugim proizvođačima, a postiže se minimizacijom ili maksimizacijom određenih funkcija cilja poput profita, troškova, vremena ili resursa.

Kako bi optimizacija procesa bila uspješna potrebno je proći kroz osnovne korake optimizacije. U prvom koraku potrebno je definirati problem kojeg je potrebno optimizirati (Diwekar, 2020, str. 3), potom je potrebno razviti model, bilo da se radi o simulaciji ili matematičkom modelu koji će egzaktno prikazati problem (Banks, 1998, str. 31). Nakon toga potrebno je odabrati prikladan model ili algoritam koji može riješiti problem. Primjenom odabranog modela na problem se uviđa koje je rješenje optimalno te se nakon testiranja evaluiraju dobiveni rezultati i uspoređuju s postavljenim ciljevima optimizacije. Ukoliko model zadovoljava postavljene kriterije, on se implementira te se konstantno prate rezultati kako bi se u budućnosti poboljšanja odvijala kontinuirano.

U proizvodnom poduzeću moguće je optimizirati raspored proizvodnje metodom linearnog programiranja ili genetičkim algoritmima kako bi se skratili proizvodni ciklusi. Uz konveksne optimizacijske metode ostvaruje se maksimalna efikasnost uz minimalan rad tako što se optimizira iskorištenost resursa. Hibridnim optimizacijskim algoritmima postiže se smanjenje zaliha i troškovi nabave se minimiziraju. Prediktivnim održavanjem uz pomoć senzora i strojnog učenja moguće je optimizirati strojeve u pogonu izbjegavajući zastoj u proizvodnji uzrokovan kvarom predviđajući kvar i reagirajući na njega prije nego li se on dogodi. Potrošnja energenata nema utjecaj samo na troškove, već i na održivost proizvodnje u ekološkom smislu, stoga je optimizacija potrošnje energenata imperativ svim poduzećima, a može se realizirati implementacijom kvantno inspiriranih evolucijskih algoritama. Inteligentne optimizacijske strategije mogu utjecati na rast efikasnosti na operativnoj razini. Navedene metode detaljnije su objašnjene u tekstu koji slijedi.

Jedna od najpopularnijih i najjednostavnijih optimizacijskih metoda jest linearno programiranje. Formulacija problema se temelji na funkciji cilja koja je matematički linearni izraz kojeg je potrebno minimizirati ili maksimizirati (Sakarovitch, 2013), a u slučaju proizvodnje to može biti minimizacija troškova ili maksimizacija profita. Nakon definiranja funkcije cilja koja sadrži koeficijente i varijable odlučivanja te svoja ograničenja koja definiraju periode u kojima se skup rješenja može nalaziti slijedi grafička metoda. Njome se u slučaju problema s dvije varijable vizualizira funkcija cilja s njenim ograničenjima te se tako identificira optimalno rješenje. Simplex metodom se kreće po rubovima skupa rješenja te se tamo traži optimalno rješenje (Dantzig, 2002). Dvojnomo metodom se putem dualnog problema koji je povezan s izvornim problemom traži rješenje (Dantzig, 2002). Naposljetku metodom algoritma unutarnjih točaka umjesto po rubu, rješenje se traži unutar skupa (Dantzig, 2002). Ovisno o tome koje rješenje najbolje za postavljeni problem, ono se primjenjuje. Metoda je vrlo korisna za povećanje produktivnosti ili smanjenje troškova određenih dijelova proizvodnje.

Genetički algoritmi predstavljaju stohastičku metodu te imitiraju prirodne procese evolucije (Bajpai i Kumar, 2010). Proizvodnja je vrlo kompleksan sustav koji zahtjeva vrlo složena rješenja, a genetički algoritmi omogućuju optimizaciju toliko složenih procesa. Rješenje se kodira na način da se kod slaže kao niz gena, odnosno kromosoma te su obično u binarnom obliku (Bajpai i Kumar, 2010). Potom se stvara populacija koja predstavlja skup kodiranih kromosoma, potom algoritam nasumično inicijalizira populaciju. Funkcijom fitnesa se mjeri adekvatnost svakog kromosoma u odnosu na postavljene ciljeve optimizacije te je li to rješenje dovoljno dobro za definirani problem. Selekcijom se biraju kromosomi s najvišim vrijednostima fitnesa kako bi se kasnije reproducirali. Reprodukcijska se vrši krosingom (engl. *crossover*), a u tom procesu selektirana dva kromosoma roditelja razmjenjuju dijelove te tako stvorili potomke (Umbarkar i Sheth, 2015). Mutacijom gena mogu se dobiti rješenja koja prvotno nisu bila dobivena krosingom, a kreiraju se nasumičnim promjenama gena s ciljem da se stvori diverzifikacija gena (Schmitt, 2001). S dobivenim rješenjima se ne staje nego se proces krosinga, selekcije i mutacije ponavlja dok se ne dođe do zadovoljavajućeg rješenja. Genetički algoritmi u proizvodnji se mogu koristiti kao pomoć za dizajn proizvodnih linija koje minimiziraju vrijeme proizvodnje i maksimiziraju iskorištenost resursa u procesu.

U konveksnoj optimizaciji su, za razliku od linearne metode, funkcija cilja i njena ograničenja konveksne funkcije (Bertsekas, 2009). U tom slučaju je linija između dvije točke na grafu funkcije uvijek viša ili jednaka vrijednosti funkcije. U konveksnoj optimizaciji problem je minimizacija i maksimizacija funkcije cilja. Budući da su sve funkcije konveksne, lokalni

minimumi predstavljaju i globalne te se time eliminira problem lokalnih minimuma (Bertsekas, 2009). Konveksni optimizacijski problemi se mogu riješiti putem više vrsta algoritama. Prva od njih je gradijentna metoda u slučaju da funkcija nema ograničenja, dok se Newtonova metoda koristi za ubrzavanje konvergencije gradijente metode (Cambini i Martein, 2008). Ukoliko ima ograničenja koristi se metoda unutarnjih točaka. Konveksna metoda je vrlo korisna jer nudi rješenje globalnog optimuma, ali problem nastaje kad je proces kojeg je potrebno optimizirati opširan i kompliciran pa je za izračun potrebna enormno velika računalna snaga.

Hibridni optimizacijski algoritmi kombiniraju više metoda optimizacije kako bi se postigle bolje performanse modela korištenjem njihovih prednosti i nadoknađivanjem nedostataka samostalnih modela (El-Mihoub et al., 2006). U takvim modelima se često koriste višestupanjski pristupi u kojima jedna metoda optimizira globalno, dok druga optimizira lokalno pretraživanje. Oni su vrlo fleksibilni i mogu se prilagoditi specifičnim vrstama i veličinama problema, ali istovremeno zahtijevaju vrlo visoku preciznost u postavljanju parametara te vrlo velike računalne resurse. Jedan od primjera jest kombinacija linearnih i heurističkih algoritama za optimiziranje korištenja resursa.

Kvantno inspirirani evolucijski algoritmi su napredne optimizacijske metode koje koriste kvantno računarstvo u kombinaciji s tradicionalnim evolucijskim algoritmima. Za unaprjeđenje pretraživanja i optimizacije koriste kvantnu mehaniku (Nowotniak, 2010). Jedan dio toga je superpozicija koja omogućuje istovremeno istraživanje i reprezentiranje više rješenja. Qubit reprezentacija umjesto binarnih koristi kvantne bitove za reprezentaciju rješenja (Nowotniak, 2010). Kvantna zapetljanost kvantnim bitovima omogućuje međusobnu korelaciju pa poboljšava pretraživanje i smanjuje broj potrebnih iteracija za pronalazak optimalnog rješenja. Kvantne operacije se koriste za ažuriranje kvantnih bitova putem kvantnog krosinga i mutacije te time ubrzavaju konvergenciju prema optimalnom rješenju problema. Primjena kvantnih algoritama se vrši u nekoliko koraka. Proces započinje inicijalizacijom u kojoj se generiraju populacije rješenja putem kvantnih bitova, a svaki kromosom, odnosno, rješenje je prikazano nizom qubita (Nowotniak, 2010). Potom se funkcijom fitnesa evaluira kvaliteta svakog rješenja. Najbolji kromosomi se podvrgavaju krosingu gdje se dijelovi svakog kombiniraju za reprodukciju potomaka, potom se kvantnom mutacijom kromosomi nasumično mijenjaju kako bi se dobilo na raznolikosti populacije. Ažuriranjem populacije mijenjaju se stara rješenja novim potomcima, te se konvergencijom ponavljaju koraci evaluacije, kvantnih operacija (krosing i mutacija) i ažuriranja dok se ne dođe do optimalnog rješenja problema. Kvantno inspirirani evolucijski algoritmi su se pokazali visokofleksibilnima zbog svoje mogućnosti

istovremenog pretraživanja više rješenja, no treba uzeti u obzir da je to zahtjevna tehnologija u kontekstu korištenja resursa i opreme te je sama implementacija vrlo složena.

Inteligentne optimizacijske strategije koriste nove tehnologije poput umjetne inteligencije i strojnog učenja kako bi poboljšale optimizacijske procese. Sustav uči iz podataka, predviđa buduće događaje i prilagođava se volatilnim uvjetima u stvarnom vremenu (Li et al. 2021.). Ova strategija se primjenjuje u nekoliko etapa. Prvo je potrebno prikupiti podatke o proizvodnji putem senzora. Potom ih je potrebno analizirati korištenjem algoritama strojnog učenja. Nakon toga slijedi optimizacija primjenom algoritama umjetne inteligencije koji na temelju analize podataka nude optimalno rješenje. Nakon testiranja rješenje slijedi implementacija i konstantno praćenje performansi i prilagodba parametara stvarnom sustavu (Mohammadi i Sheikholeslam, 2023). U kontekstu donošenja odluka, inteligentne tehnologije su u mogućnosti donijeti bolje odluke brže od ljudi temeljeći ih na povijesnim podacima i preciznim modelima za predviđanja. No kako bi oni zaista bili precizni treba imati na umu da podaci moraju biti kvalitetni i čisti što traži visoku involviranost u održavanje sustava i redovito ažuriranje podataka.

Svaka prikazana metoda u cilju ima povećanje efikasnosti proizvodnje, bilo kroz minimizaciju troškova ili maksimizaciju iskorištenosti resursa, a sve to dovodi do postizanja boljih rezultata poduzeća u zadovoljavanju potreba tržišta što na kraju dovodi do povećanja dobiti i sigurnosti poslovanja (Krushnan et al.,2023). Osim ekonomskog pogleda, optimizirana proizvodnja smanjuje i utjecaj na okoliš budući da se resursi troše efikasno i s minimalnim gubicima.

3.5 Sustavi izvršenja proizvodnje

Sustav izvršenja proizvodnje (engl. *manufacturing execution system*, MES) je aplikacija unutar informacijskog sustava koja služi kao spona između informacijskog sustava i sustava za planiranje resursa poduzeća (engl. *enterprise resource planning*, ERP) te on predstavlja kanal putem kojeg se vrši optimizacija proizvodnog procesa u stvarnom vremenu. Njegove glavne zadaće su nadzor, praćenje, bilježenje i kontrola procesa u proizvodnji. Ima nekoliko karakteristika pomoću kojih izvršava te zadaće. Jedna od njih je prikupljanje podataka u stvarnom vremenu iz pogona pomoću senzora i IoT tehnologije, specifično industrijskog IoT-a koji povezuje strojeve na Internet i omogućuje centralizirano upravljanje pogonom na daljinu. Prikupljeni podaci se putem senzora prikupljaju i obrađuju pomoću softverskih aplikacija za analizu i vizualizaciju podataka u stvarnom vremenu koja služi kao važan resurs za donošenje odluka od operativne do strateške razine. Na operativnoj prepoznaje obrasce i predviđa kvarove koji se mogu spriječiti preventivnim održavanjem i time smanjiti vrijeme potencijalnih zastoja te time povećati efikasnost. U strateškom kontekstu podaci se mogu koristiti za izračun ključnih

pokazatelje poslovanja (engl. *key performance indicator*, KPI) poput OEE-a te za prepoznavanje uskih grla u proizvodnji. Slijedeća karakteristika MES-a jest praćenje proizvodnje, odnosno praćenje rada u tijeku (engl. *work in progress*, WIP) od utrošenih sirovina i energenata do gotovog proizvoda, time omogućuje praćenje statusa narudžbi po fazama proizvodnje. Unutar praćenja MES upravlja i resursima te omogućuje njihovu efikasnu alokaciju što posljedično dovodi do povećanja učinkovitosti procesa. Nadzor i kontrola u stvarnom vremenu unutar MES-a utječu na kvalitetu proizvoda jer ukazuje na sva odstupanja van tolerancije i omogućuje da korektivne radnje budu izvršene na vrijeme prije fizičkog pregleda kvalitete robe na kraju proizvodnog procesa. Kroz taj proces potrebno je dokumentirati određene radnje poput izdatnice koju skladištar izdaje prilikom zaduženja sirovine koja je potrebna za proizvodnju te deklaracija proizvoda na kraju procesa. MES usklađuje i kontrolira svu dokumentaciju koju je potrebno izdati kroz proces. Ovisno o postavljenim KPI-evima sustav može pratiti produktivnost radne snage kroz, na primjer, broj proizvedenih jedinica te je u mogućnosti generirati izvještaje o produktivnosti. Osim toga, MES može izraditi raspored radnika po zadacima ovisno o njihovim kvalifikacijama pa time stvara učinkovite rasporede smjena. U obzir uzima i planirane godišnje odmore te neplanirana odsustva poput bolovanja, i na temelju njih stvara rasporede s ravnomjerno raspoređenom radnom snagom kako bi proizvodnja tekla u efikasnom kontinuitetu.

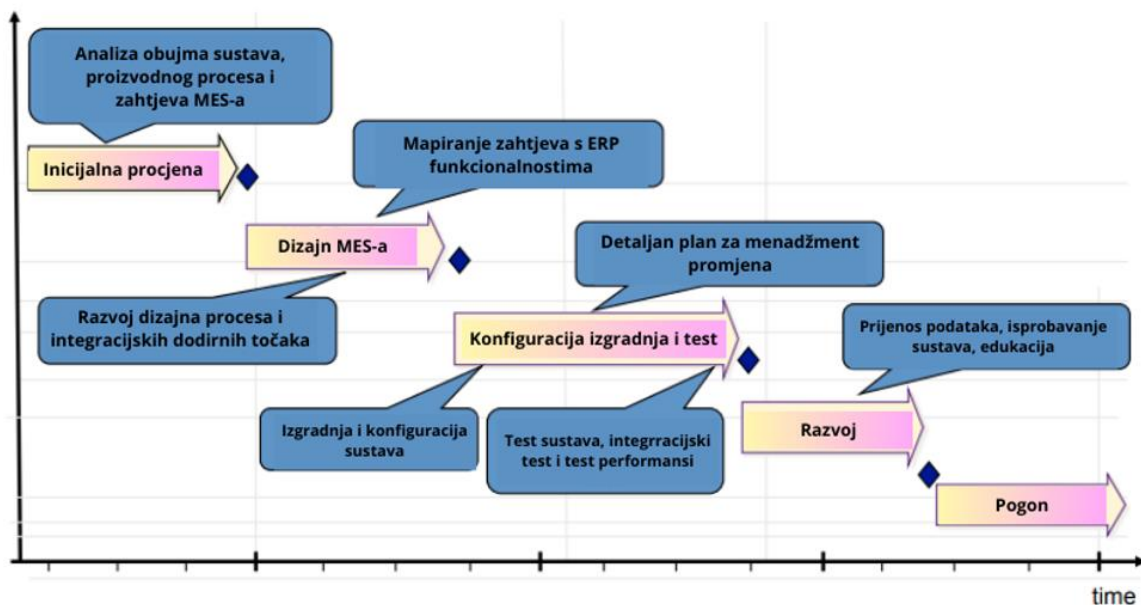
Kako bi MES funkcionirao precizno i u svim maksimalnom kapacitetu, potrebno je poštovati metodu implementacije koja osigurava da se sustav kreira sa svim karakteristikama koje su poduzeću potrebne da bi optimiziralo svoju proizvodnju. Autori Govindaraju i Putra u svom članku predlažu pet koraka implementacije: „početna procjena, dizajn, konfiguracija/izgradnja i testiranje, uvođenje i rad“ (Govindaraju & Putra, 2016, str. 4). Vremenska lenta s koracima implementacije može se vidjeti na slici 7.

U početnoj procjeni predviđene su dvije aktivnosti. Prva je određivanje opsega implementacije prema metodologiji ISA-95⁷ standarda u kojoj je potrebno odrediti hijerarhiju sustava i jasne granice između različitih razina. Druga aktivnost je analiza funkcionalnih zahtjeva za MES koje se prikazuje raznim UML dijagramima poput dijagrama slučaja uporabe (engl. *use-case diagram*). Sljedeći korak je dizajn MES-a koji također ima dvije aktivnosti. Prvi se izrađuje generički dizajn koji ma dva dijela: generički funkcionalni model i generički dijagram međudjelovanja (engl. *sequence diagram*). U funkcionalnom modelu identificiraju se glavne

⁷ ISA-95 je međunarodni standard koji daje definiciju i metodologiju implementacije poslovnih i proizvodnih sustava, a razvilo ga je Međunarodno društvo za automatizaciju (engl. International Society of Automation, ISA)

proizvodne operacije, dok se u dijagramu slučaja uporabe prikazuje redosljed aktivnosti u procesu. Slijedeća aktivnost je izrada specifičnog dizajna u kojem se izrađuju specifični funkcionalni model u kojem se modificira generički za specifične potrebe poduzeća, te se tako korigira generički dijagram međudjelovanja kako bi došli do specifičnog dijagrama. Treći korak je konfiguracija, izgradnja i testiranje u kojoj se razvija MES aplikacija sa potrebnim specifikacijama i modulima, potom se obavlja migracija podataka te se na kraju sustav prolazi kroz testiranje koje obuhvaća *unit* test, integracijski test i test performansi. Nakon uspješno provedenih testova slijedi četvrti korak implementacije – uvođenje. Tad se izvršavaju završni radovi na aplikaciji, otklanjaju se problemi identificirani za vrijeme testiranja i provode se edukacije korisnika sustava. Posljednji korak implementacije je rad u kojem se sustav pušta u korištenje i pruža se pomoć novim korisnicima u navigaciji te se radi posljednja revizija kvalitete proizvoda.

Slika 7 Koraci implementacije MES-a



Izvor: Govindaraju i Putra (2016)

Prema riječima MESA International (engl. Manufacturing Enterprise Solution association, MESA), korisnici MES-a zabilježili su prednosti poput smanjenog vremena proizvodnje, povećanja kvalitete proizvoda i prediktivnog održavanja iako prednosti nisu opipljive u kontekstu vidljivosti na povratu na investiciju (ROI). MES u poduzeće donosi veliku transparentnost i fleksibilnost u proizvodnji što osvjetljuje gubitke u procesu i olakšava njihovu eliminaciju. Prema autorima Mantravadi et al. (2019), taj sustav igra glavnu ulogu na putu poduzeća prema Industriji 4.0 te ostvarivanju ciljeva.

4 STUDIJA SLUČAJA IMPLEMENTACIJE INDUSTRIJE 4.0 U SREDNJE VELIKO PROIZVODNO PODUZEĆE

U prethodnim poglavljima Industrija 4.0 obrađena je u teorijskom kontekstu. Njen utjecaj na proizvodno poduzeće bit će prikazan u narednom poglavlju kroz studiju slučaja srednje velikog proizvodnog poduzeća koje je implementiralo tehnologije Industrije 4.0 u svoju proizvodnu liniju. Informanti poduzeća XY te pružatelja usluge YZ dali su detaljan uvid u proizvodne procese i procese implementacije u intervjuu temeljem kojeg je napravljena studija. Osim kroz razgovor, autorica je imala privilegiju obići proizvodni pogon te kroz rad na strojevima prikupiti podatke za analizu.

4.1 Opis poduzeća

Promatrano poduzeće XY⁸ bavi se izradom proizvoda od stiropora za toplinsku izolaciju u graditeljstvu i ambalažu od stiropora što predstavlja osnovnu djelatnost, dok je sporedna djelatnost prodaja trgovačke robe koja je komplementarna s vlastitim proizvodima poput materijala za izradu fasade. Pravni oblik organizacije je društvo ograničene odgovornosti (d.o.o.) s temeljnim kapitalom od oko 1 000 000 eura te je aktivno od 1992. godine. Prema podjeli Zakona o računovodstvu, poduzeće je srednje veliko s blizu 100 zaposlenih u 2023. godini i godišnjim prihodom blizu 25 milijuna eura u istoj godini, od toga je neto dobit više od pola milijuna eura. Pokazatelju uspješnosti poslovanja EBIT⁹ u 2023. godini iznosi blizu 700.000,00 eura, dok EBITDA¹⁰ iznosi blizu 3 milijuna eura. Velika ulaganja u modernizaciju pogona kreću u 2019. godini, a 2020. započinje proces automatizacije.

Poduzeće ima dvije proizvodne linije. Glavna podjela proizvoda je na 5 kategorija:

- građevinarstvo,
- kontejneri za presadnice,
- 3D reklame,
- EPS ambalaža i
- kašete za ribe.

⁸ Promatrano poduzeće se zbog anonimnosti i poslovne tajne u ovom radu naziva „XY“

⁹ EBIT (engl. earnings before interest and taxes) je pokazatelj uspješnosti poslovanja koji mjeri profitabilnost osnovnih poslovnih aktivnosti prije umanjena za kamate i poreze. Računa se kao razlika prihoda i operativnih troškova

¹⁰ EBITDA (engl. earnings before interest, taxes, depreciation and amortization) je financijski pokazatelj za procjenu operativne profitabilnosti poduzeća. Računa se kao prihodi umanjeni za operativne troškove i uvećani za deprecijaciju i amortizaciju

U kategoriji građevinarskog materijala se nalaze ploče od ekspaniranog polistirena (EPS) za termoizolaciju u raznim veličinama, materijali za fasadu, dekoracijska fasadna štukatura različitih dizajna i veličina, obrada ploča od ekstrudiranog polistirena (XPS) za termoizolaciju u više debljina te stiroporne granule različitih promjera koje se koriste za izradu lakih betona, žbuka ili ispuna za namještaj. Kontejneri za presadnice se proizvode u raznim veličinama i oblicima rupa dok na jednoj ploči varira broj rupa, ovisno o potrebi biljke. 3D reklame izrađuju se po narudžbi i specifikacijama naručitelja u raznim dimenzijama. EPS ambalaža proizvodi se ovisno o potrebama proizvoda koji treba biti položen u nju, tako se personalizira materijal, oblik i svojstva materijala poput otpornosti na promjene tlaka ili na udarce. Kašete za ribe su specifičan proizvod zbog kvarljivosti same ribe, a EPS ima dokazano najbolja svojstva izolacije topline što je ključno za ovakav proizvod. Osim toga važno je napomenuti da ovakav tip proizvoda zahtjeva posebne uvjete proizvodnje i skladištenja budući da se radi o ambalaži za hranu koja se izrađuje u 18 različitih tipova. Budući da se radi o relativno jeftinom materijalu za koji cijena prijevoza lako može biti veća od cijene samog proizvoda u prijevoznom sredstvu, ovo poduzeće osim svojih patentiranih proizvoda proizvodi po licenci i recepturi proizvode i za druge kompanije iz Europe.

Proizvodne linije podijeljene su na građevinsku i ambalažnu. Za potrebe istraživanja u ovom radu fokus će biti na građevinskoj proizvodnoj liniji gdje će se analizirati proizvodnja EPS ploča različitih debljina u narednim poglavljima.

4.2 Implementirane tehnologije

Proces automatizacije u poduzeću XY započeo je rekonstrukcijom proizvodnih linija i nabavkom nove opreme u 2019. godini. Za vrijeme nabave planiralo se korištenje tehnologija Industrije 4.0 pa su se već pri odabiru dodatne opreme birale opcije s IoT rješenjima. Unutar strojeva bilo je moguće ugraditi senzore koji prate potrošnju energenata, a u ovom slučaju to su električna energija, komprimirani zrak i vodena para. Osim strojeva rekonstruirana je kotlovnica čiji rad se prati kroz SCADA sustav, konkretno prati se potrošnja energenata poput električne energije, lož ulja i plina te potrošnja vode i proizvodnja permeata. Također, proizvodnja komprimiranog zraka ima svoj sustav za praćenje proizvodnje. Električna energija je vrlo skup energent, stoga je poduzeće za potrebe smanjivanja troškova ugradilo solarne panele pomoću kojih dio električne energije proizvode sami. Praćenje proizvodnje na njima se vrši putem sustava Solar Log.

Važnost toplinske energije u proizvodnji stiropora je na vrlo visokoj razini zbog specifičnosti proizvoda. Naime, unutar granula stiropora se nalazi plin pentan koji je u tekućem stanju već

pri temperaturama nižim od 36 Celzijevih stupnjeva. Da bi se poluproizvod poput granula ili velikih EPS blokova mogli dalje obrađivati potrebno je da odleže kako bi većina plina isparila. Ukoliko se ne čeka, poluproizvod se pri rezanju može zapaliti ili mijenjati svoje dimenzije jer isparavanje plina uzrokuje određeni postotak skupljanja. U zimskim danima kad temperatura zraka padne ispod 26 stupnjeva celzijusa potreban je duži period odležavanja poluproizvoda prije daljnje obrade, čak i do 10 dana. U ljetnim mjesecima on se skraćuje na čak i do dva - tri dana. Tako velika razlika utječe na troškove skladištenja i čuvanja zarobljenog kapitala u poluproizvodu. Taj problem potaknuo je vodstvo poduzeća da nađu rješenje za skraćivanje zimskog proizvodnog procesa. Nova skladišta su sad grijana i to otpadnom toplinskom energijom iz pogona budući da je za proizvodnju stiropora jedan od najvažnijih energenata vodena para. Implementacijom visoko energetske učinkovitog povratnog sustava topline poduzeće je uvelike smanjilo troškove grijanja i skladištenja poluproizvoda te riješilo problem zarobljenog kapitala u poluproizvodu.

Budući da unutar poduzeća postoji više odvojenih sustava, poput ERP-a i SCADA-e bilo je teško sve te podatke objediniti kako bi se mogli ispravno tumačiti i na temelju njih donositi odluke. Tu, kao kruna na dosadašnju rekonstrukciju pogona, dolazi MES. Motiv za implementiranje ove tehnologije bio je u povećanju produktivnosti, optimizaciji procesa, poboljšanju kvalitete proizvoda te mogućnosti praćenja i kontrole procesa i performansi.

Unutar MES-a spojeni su IoT uređaji koji mjere potrošnju energenata u stvarnom vremenu pa se tako stanje u kotlovnici može jasno vizualizirati, kao i stanje na solarnim panelima. Osim na razini proizvođača energenata, poduzeće sad može pratiti potrošnju energenata u stvarnom vremenu na svakom stroju.

Još jedan važan dio MES-a za poduzeće je bilo prediktivno održavanje opreme. Prije ovog sustava održavanje se obavljalo na temelju preporuka proizvođača opreme koji je osigurao raspored servisnih aktivnosti temeljen na uprosječenom korištenju stroja koji je pod 70 do 80% opterećenja. Takav raspored aktivnosti bio je podijeljen na tjedne, mjesečne, kvartalne i godišnje servise kao bi stroj radio optimalno. Sada se održavanje vrši na način da se prati potrošnja energenata po stroju. Poznati su gabariti unutar kojih stroj radi normalno poput potrošnje električne energije po satu iznosi 5 kwh ili mu je potrošnja zraka u minuti 10 kubičnih metara, ukoliko stroj počne trošiti više energenata nego li je to predviđeno znači da postoji problem u opremi koja se korigira prije nego li stroj potroši više od predviđenog što uzrokuje rast troškova. Jedan od takvih problema u poduzeću XY je potrošnja zraka. Zbog visokih vibracija se spojevi cijevi troše i postoji mogućnost da zrak curi, no bez senzora koji prati

potrošnju unutar MES-a to nije moguće pratiti jer zrak nema niti boje niti mirisa, a zvuk curenja je nemoguće čuti jer je u proizvodnoj hali u normalnim uvjetima oko 80 decibela buke uzrokovane radom strojeva. Jedini način da se curenje primijeti jest pomoću senzora koji bilježe potrošnju, a to je vrlo važno jer je komprimirani zrak vrlo skup energent. Taj problem se vrlo jasno može vidjeti kad stroj ne radi i senzori bilježe nultu potrošnju električne energije, ali potrošnja zraka konstantno postoji zabilježena u MES-u. Osim toga, u uputama proizvođača opreme predviđene su zamjene određenih dijelova stroja poput ležajeva ili filtera unutar određenog vremenskog perioda, što nema previše smisla u praksi jer se može dogoditi da je stroj stajao na primjer dva tjedna i filter je čist, ali softver to ne zna i operatoru šalje signal da ga je potrebno zamijeniti. Time se stvara nepotreban trošak bacanja ispravnih dijelova i vremena rada zaposlenika koji je mogao raditi u proizvodnji, ali je vrijeme izgubio nepotrebnim servisiranjem stroja. Takvi scenariji se sprječavaju praćenjem opterećenja stroja kroz MES te reagiranjem pri pojavi anomalija u prikupljenim podacima s IoT-a.

Kontakt iz poduzeća XY naglašava važnost kibernetičke sigurnosti temeljenih na vlastitom iskustvu hakerskog napada. Naime u 2019. godini poduzeće je putem phishing e-maila napala hakerska skupina iz Rusije te je kriptirala sve podatke o poslovanju i zablokirala kompletne sustave unutar poduzeća. E-mail je došao od jednog poslovnog partnera koji je također pretrpio napad od iste skupine ranije, a u njemu je bila poveznica čijim se otvaranjem haker uspio uvući u sustav. Proveo je neprimijećen preko mjesec dana u sustavu prateći sve procese i izvjesnu subotu između 2 i 4 sata ujutro napao sustav i kompletno ga zablokirao. Svi podaci poduzeća su bili kriptirani i iznudom su pokušali doći do financijskih sredstava u formi bitcoina u zamjenu za ključ koji će dešifrirati podatke. Unatoč dnevnim sigurnosnim kopijama zadnja upotrebljiva verzija bila je stara mjesec dana. Podaci su se potom ručno vraćali u sustav pomoću fizičke dokumentacije o poslovanju. Nakon što je ta hakerska skupina uhvaćena svi oštećeni su dobili ključeve za dešifriranje pa su se podaci natrag vratili u sustav. Nakon toga poduzeće je odlučilo uložiti dodatno u kibernetičku sigurnost. Započeli su s filterima na e-mailu koji filtriraju veći dio sumnjive pošte, potom su počeli izvoditi češće edukacije zaposlenika o opasnostima i vrstama kibernetičkih napada, jer kako sugovornik tvrdi „sustav je jak koliko je jaka njegova najslabija karika“, s dodatnim zadatkom da svaki iole sumnjivi mail šalju odgovornoj osobi za ICT koja na temelju znanja i iskustva procjenjuje je li pošta opasna. Podatke su zaštitili enkripcijom, a ključ za dekodiranje podataka imaju samo odgovorne osobe. Sigurnosne kopije se vrše svaki dan automatizmom, jednom dnevno se podaci šalju i na drugu odvojenu lokaciju, a jednom mjesečno se radi kopiranje van mreže koje zahtjeva najviše

vremena ali je najsigurnije jer se kompletan sustav kopira na mjesto koje je u potpunosti fizički i mrežno izolirano. Srećom u napadu nije bilo financijske štete i podaci nisu nepovratno izgubljeni, ali je na dva mjeseca poslovanje bilo izrazito otežano. Upravo zbog ovog iskustva niti jedan dio proizvodnje nije spojen na Internet a MES je u potpunosti odvojen od lokalne mreže.

4.3 Proces implementacije

Poduzeće XY odlučilo je implementirati MES sustav nakon što je pružatelj usluge YZ ponudio takvo rješenje. Kako bi proces implementacije bio detaljno objašnjen, obavljen je intervju s developerskim timom koji je razvio odgovarajuće rješenje za potrebe poduzeća XY. Osoba odgovorna za komunikaciju s poduzećem je naglasila da je svoj proizvod nudila XY-u upravo zbog specifičnosti same proizvodnje kojeg poznaje zbog dugogodišnjeg iskustva u području implementacije MES-a u razne vrste proizvodnih poduzeća. Naime radi se o sirovini i proizvodu na čiju kvalitetu direktno utječu tlak zraka i vlaga u zraku te je to proizvod s relativno niskom marginom, stoga je preciznost u izračunu ključna kako se ne bi ostvarili financijski gubici. Sugovornik također ukazuje na razliku u pristupu klijenata MES-u sada i unatrag nekoliko godina, gdje je prije par godina klijentima MES bio nepoznanica koju je trebalo detaljno objasniti, dok se danas povećao broj ljudi koji u početku razgovora ipak otprilike znaju o čemu se radi zahvaljujući inicijativama EU koje promiču digitalizaciju i automatizaciju.

Nakon prvotne ponude usluge MES-a, pružatelj usluge YZ započinje proces razvoja kreiranjem dokumenta koji se zove funkcijska specifikacija. Prva verzija ovog dokumenta kreira se nakon prve radionice s poduzećem na kojoj su okupljeni svi tehnolozi sa znanjem o proizvodnim procesima čiji je zadatak što detaljnije prepričati proizvodne procese od trenutka kad sirovina uđe u skladište do trenutka kad se gotovi proizvod ne uskladišti. Agenti YZ-a detaljno bilježe procese i stvarno stanje u tvornici te se već u ovoj fazi raspravlja o rješenjima i ciljevima koja MES može ponuditi i o funkcionalnim zahtjevima sustava. Za srednje i male pogone ne izrađuju se UML dijagrami, ali za potrebe projektne dokumentacije postoje tlocrti proizvodnih linija. Kontakt iz YZ-a naglašava da su u početku radili grešku time što nisu uvijek izrađivali funkcijsku specifikaciju, no danas odbijaju surađivati s klijentom koji ne želi napraviti specifikaciju upravo zato što je to dokument koji obuhvaća sve specifične zahtjeve koje klijent ima prema sustavu te ono daje odgovore na pitanja što i kako. Radionice se provode tri do četiri puta, ovisno o potrebi dok se funkcijske specifikacije ne ispolira do te mjere da klijent više nema ispravke. Više radionica je potrebno kako bi se svaka verzija specifikacije prezentirala klijentu, a vrlo često se dogodi da u razgovoru ljudi zaborave neke dijelove procesa pa primijete

njihovu odsutnost u dokumentu tek kad vide cijelu liniju crno na bijelo. Osobito se kroz naredne radionice radi na iznimkama u proizvodnji koje zahtijevaju dodatno bilježenje procesa za potrebe razvoja sustava. U posljednjoj radionici prije implementacije, klijentu se prikazuje softversko rješenje i kako ono radi i što se u njemu događa. Prije same implementacije klijentu se šalje upitnik o sustavima koji već postoje u poduzeću, u slučaju XY to je bio ERP koji se gotovo i nije koristio, ali je važno jer ga je potrebno integrirati u MES kao i sve ostale sustave koji postoje. Traže se podaci o sustavu, pružatelju usluge i kontakt podacima odgovorne osobe kako bi sve bilo spremno za integraciju koja će se vršiti. Implementacija se izvodi u dva toka, a prvi je softverski dio koji je izrađen prema metodologiji ISA-95, iako su kroz godine razvili vlastitu metodologiju izrade softvera ipak se na originalnu metodologiju oslanjaju za procese u poslovnu logiku. Softver se ne gradi ispočetka, nego je on univerzalno rješenje za svakog klijenta, s modulima za svaku vrstu proizvodnje te klijent može postaviti parametre i KPI-eve kako on želi. Ono što se personalizira u softveru je integracijski sloj, odnosno kao što je već spomenuto, na temelju upitnika, sve pružatelje drugih sustava unutar poduzeća se mora kontaktirati u dobiti pristup. Potrebno je ispitati i koje vrste sučelja ili podataka sustav podržava.

Nakon što su se svi zahtjevi definirali kreće se s implementacijom sustava. Ona se vrši u dva tijeka paralelno. Prvi tijek je prilagodba softvera. U ovom dijelu se vrši integracija softvera s postojećim sustavima za koje su prikupljeni podaci u upitniku. Developer tvrdi da je to jedan od najzahtjevnijih zadataka jer je potrebno prikupiti sve dozvole za pristup. Osobito se situacija komplicira ako je riječ o sustavima koje održavaju vanjski suradnici poduzeća. Također, uređuje se okolina za klijenta. U slučaju malih i srednjih poduzeća postavljaju se rješenja u obliku računarstva u oblaku, dok veliki klijenti ili već imaju izgrađene podatkovne centre, ili se oni za njih izgrađuju. U slučaju poduzeća XY koristi se prostor u podatkovnom centru Hrvatskog Telekomu. Paralelno se radi i na drugom toku koji je vezan za hardverske komponente. Za vrijeme kreiranja funkcijske specifikacije napravljeni su tlocrti proizvodnih linija u koje su ucertana definirana mjesta predviđena za novu opremu. Na temelju te dokumentacije se vrše radovi u tvornici. Bitno je naglasiti da je klijent dužan osigurati infrastrukturu za postavljanje poput mreže i električnog napajanja zbog poznavanja arhitekture hale i mogućih priključaka, ali oprema mora biti potpuno odvojena od ostatka mreže kako bi se spriječili tehnički problemi. U opremu koja se postavlja spada server na koji će biti spojena sva računala, računala za operatere, televizori i senzori. Računala za operatere, koje pružatelj zove *operate review*, nalaze se pored svakog stroja u pogonu te služe kao digitalni menadžer operacija koji je zamišljen kao sučelje koje radnika navodi kroz rad i navigira ga kroz proizvodni proces. Brine se je li ispunio

sva kontrolne liste i kontrolira odrađene korake potrebne za proizvodnju. Ova računala se proizvode po narudžbi, a za to vrijeme se u pogonu postavljaju senzori i spajaju u sustav postojeći. U slučaju senzora koji mjere potrošnju energenata, pružatelj zahtjeva od klijenta da nađe izvođača koji je za to specijaliziran budući da se radi o vrlo specifičnim uređajima. U slučaju XY to su vodena para, struja i zrak. Svaki se senzor spaja na računalo te se sva oprema spaja u elektro ormare. Kad je sva oprema spojena sustav kreće u rad te ga se testira. Obično se s klijentom dogovara koja će linija biti model linija koju će se prvo spojiti na MES i na kojoj će se vidjeti radi li sustav ispravno i kako bi tehnolozi vidjeli sustav u radu kad im se objašnjavaju sve specifikacije i funkcionalnosti te verificiraju sve dijelove procesa dok se paralelno radi na ostalim linijama. Spajanjem MES-a s ERP-om provjerava se teku li radni nalozi regularno i bez poteškoća. Ukoliko postoje neke nepravilnosti, one se ispravljaju, a radnicima se pružaju edukacije i podrška u korištenju sustava. Budući da niti jedan sustav nije savršen uvijek se ostavlja mogućnost ručnog unosa naloga u sustav kako ne bi patio proizvodni proces zbog malfunkcije opreme. Proces implementacije traje oko godinu dana i sugovornik naglašava važnost menadžmenta promjena u tom periodu, jer se radi o kompleksnim promjenama unutar proizvodnje. Sve završava kada se ispune svi zahtjevi iz specifikacije, a onda slijedi održavanje. Klijent i pružatelj usluge potpisuju ugovor o održavanju sustava gdje se jasno definira što je čija dužnost. Pružatelj je uvijek odgovoran za softver kojeg ne prodaje nego ga daje na korištenje uz licenciju te za računala, dok je za senzore i ostalu opremu odgovoran klijent. Definira se i vrijeme ažuriranja sustava koje se obično vrši u nedjelju u noći dok za velike korisnike to može biti po dogovoru budući da imaju svoje podatkovne centre. Održavanje softvera samo i isključivo može raditi pružatelj, dok za hardverski dio potiču klijente da daju održavanje nekom drugom vanjskom suradniku. Takav odnos klijenta i pružatelja zapravo nikad ne prestaje. Pružatelj će s vlastitim rastom nuditi nove proizvode klijentu, dok će klijent sa svojim rastom u sustav uvoditi nove proizvode i linije.

4.4 Efekti implementacije na proizvodne procese i poslovanje

Prije nego li bude analiziran utjecaj implementacije MES-a u proizvodnju, potrebno je definirati kako proizvodni proces izgleda. Zabilježen je tijekom posjeta tvornici za potrebe ovog istraživanja. Promatrani proizvod na čijoj je izradi rađena analiza je ploča od ekspaniranog polistirena. Proces započinje kuhanjem sirovine, odnosno polistirena u formi sitnih zrnaca unutar kojih je pohranjen plin pentan. Pri zagrijavanju u ekspanderu, zrnca se šire i do 10 puta u odnosu na originalnu veličinu i nastaju granule stiropora. Ovisno o željenoj veličini granula podešava se vrijeme i temperatura pare u ekspanderu kako bi se dobio željeni intermedijarni

proizvod. Nakon što su granule ekspandirale, potrebno ih je pohraniti u silose kako bi u odležavanju poprimile sva svojstva koja su potrebna za daljnju obradu. Ovisno o vrsti proizvoda vrijeme ležanja granula varira i ono je dio recepture poduzeća za izradu daljnjih proizvoda. Nakon što je sirovina spremna za obradu, cijevima se iz silosa dovodi do blok kalupa u kojem će se proizvesti ploča. Prije pokretanja ciklusa proizvodnje stroj je potrebno zagrijati. Blok kalup ima nekoliko važnih komponenti:

- komora za punjenje – u njoj se granule ravnomjerno raspoređuju u kalup,
- parni sustav – putem njega para ulazi u kalup uzrokujući dodatno širenje granula te njihovu ljepljivost kako bi se formirale u ploču,
- ploče kalupa – one su pomične čime se određuje treća dimenzija proizvoda, odnosno kalup je po dužini dugačak 500 mm, po visini 1000 mm, a širina je pomična ovisno o potrebi,
- sustav za hlađenje – pomoću njega se ploče hlade prije nego što ih se izvadi iz kalupa
- sustav za vađenje ploča – njime se ploče vade iz kalupa i slažu u manji skladišni prostor prije završetka serije.

Stroj je u potpunosti automatiziran, od dovođenja sirovine do odlaganja proizvoda u skladišni prostor. Proizvodnja je podijeljena na cikluse, a u jednom se izrađuju 3 ploče u 3 kalupa u stroju. Nakon što završi ploče se vade iz skladišnog prostora i ručno se pakiraju. Ovisno o narudžbi, ciklusi se ponavljaju dok se ne dođe do željenog broja ploča zadanih dimenzija. Kad se skladišni prostor popuni ploče se vizualno pregledavaju kako bi se utvrdile eventualne nepravilnosti, potom se ručno pakiraju i voze u skladište. Glavni resursi za izradu ploča su sirovina, vodena para električna energija i komprimirani zrak.

Promatrani proces započinje paljenjem stroja i zagrijavanjem. U ovom koraku operator stroja otvara radni nalog u MES-u i prilagođava parametre recepturi za izradu EPS ploča. Ovaj dio procesa traje 2 minute, dok samo zagrijavanje stroja traje kao što je i planirano 25 sekundi. Potrošeni energenti za zagrijavanje:

- električna energija: 0,56 kw/h
- vodena para: 15,2 kg
- komprimirani zrak: 6,92 m³

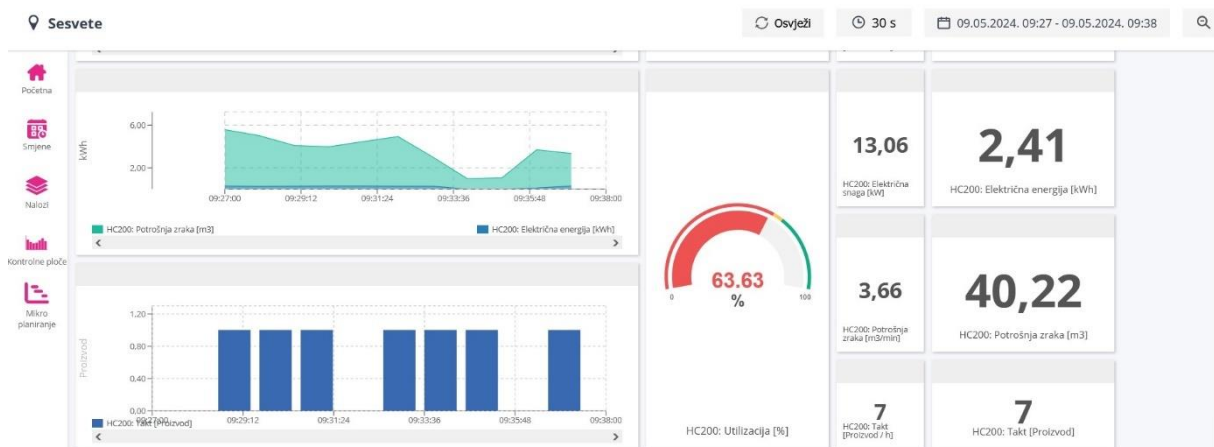
Proizvodnja započinje izradom proizvoda A dimenzija 500 mm * 1000 mm * 50 mm (d*v*š). Planirana količina proizvoda je 15, što predstavlja 5 ciklusa u kojima se proizvode 3 ploče.

Zbog poznavanja stroja, operator povećava potreban broj ciklusa na 7, jer očekuje u prva dva ciklusa proizvod lošije kvalitete koji će se odbaciti u škart, a takvih je proizvoda u ovoj seriji bilo ukupno 3 iz prvog ciklusa. Ukupno vrijeme za seriju od 7 ciklusa izrade proizvoda A iznosi 9 minuta i 15 sekundi, a proizvedena je ukupno 21 ploča, odnosno $0,525\text{m}^3$ proizvoda, od čega je $0,45\text{m}^3$ proizvoda ispravne kvalitete. U toj seriji potrošnja energenata iznosi:

- električna energija: 2 kw/h,
- vodena para: 69,329 kg i
- komprimirani zrak: $40,22\text{m}^3$.

Na slici 8 je ekranski prikaz sučelja MES-a na kojem je vidljiva potrošnja energenata za izradu 21 proizvoda A.

Slika 8 Ekranski prikaz korisničkog sučelja MES-a za proizvod A



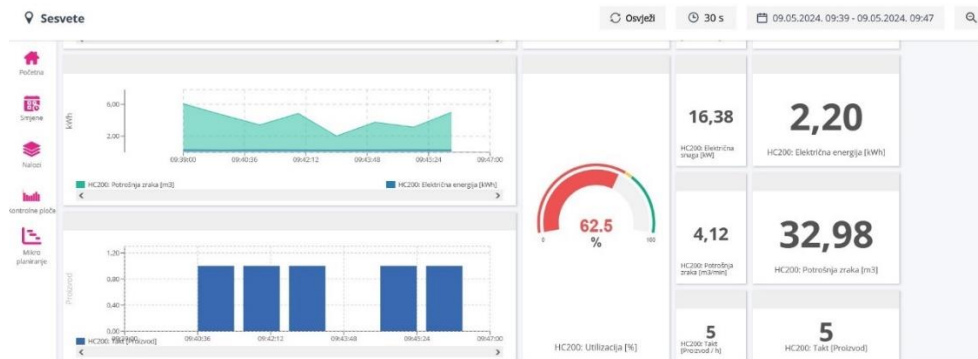
Izvor: MES sustav poduzeća XY (2024)

Proizvod B je EPS ploča dimenzija 500 mm * 1000 mm * 80 mm (d*v*š). Nova serija započinje kalibriranjem stroja u trajanju od 37 sekundi. Potom započinje proizvodnja u 5 ciklusa, a u svakom se proizvodi 3 ploče, dakle ukupna količina proizvoda B proizvedenih u 5 ciklusa iznosi 15 ploča, odnosno $0,04\text{m}^3$ proizvoda te su svi zadovoljavajuće kvalitete i nema škarta. Vrijeme potrebno za 5 ciklusa iznosi 6 minuta i 35 sekundi. Potrošeni energenti u ovoj seriji iznose:

- električna energija: 2,2 kw/h,
- vodena para: 67,721 kg i
- komprimirani zrak: $32,98\text{m}^3$.

Na slici 9 je ekranski prikaz sučelja MES na kojem je vidljiva potrošnja električne energije i zraka za izradu 15 komada proizvoda B.

Slika 9 Ekranski prikaz korisničkog sučelja MES-a za proizvod B



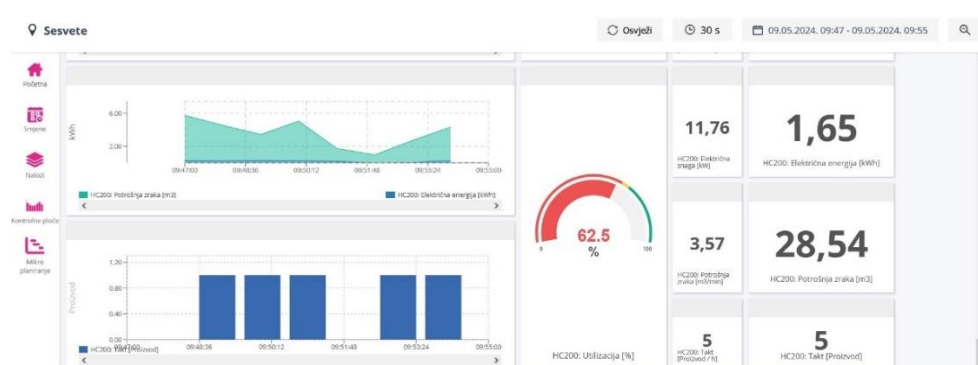
Izvor: MES sustav poduzeća XY (2024)

Proizvod C je EPS ploča dimenzija 500 mm * 1000 mm * 100 mm(d*v*s). U ovoj seriji kalibriranje traje 15 sekundi te nakon namještanja kalupa počinje proizvodnja u 5 ciklusa po 3 komada, dakle proizvedeno je ukupno 15 komada ploča, izraženo volumenom 0,75 m³. Svi komadi su ispravne kvalitete stoga nema škarta. Ukupno vrijeme za izradu 15 ploča iznosi 6 minuta i 51 sekunda. Potrošnja energenata za proizvodnju proizvoda C iznosi:

- električna energija: 1,65 kw/h,
- vodena para: 67,771 kg i
- komprimirani zrak: 28,54 m³.

Na slici 10 vidljiv je zaslon sučelja MES-a u kojem se na grafičkim prikazima vidi potrošnja električne energije i komprimiranog zraka.

Slika 10 Ekranski prikaz korisničkog sučelja za proizvod C



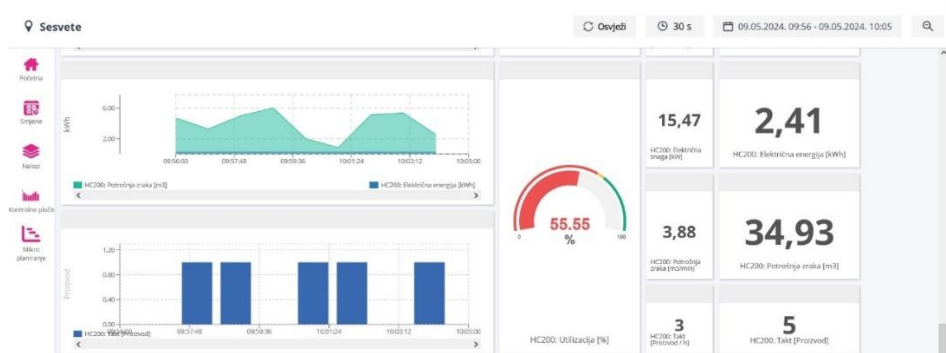
Izvor: MES sustav poduzeća XY (2024)

Proizvod D je EPS ploča dimenzija 500 mm *1000 mm * 120 mm (d*v*š). Stroj je kalibriran za nove dimenzije u 35 sekundi. Nakon toga je krenula proizvodnja proizvoda D u 5 ciklusa po 3 komada. Time je dobivena ukupna količina od 15 ploča ili 0,9 m³ proizvoda, od toga su sve ploče bile ispravne i nije bilo škarta. Serija je trajala 7 minuta i 3 sekunde, a potrošnja energenata iznosi:

- električna energija: 2,16 kw/h,
- vodena para: 68,051 kg i
- komprimirani zrak: 30,21 m³.

Na slici 11 vidljiv je ekranski prikaz sučelja MES-a na kojem je vidljiva potrošnja električne energije i zraka za seriju proizvodnje proizvoda D.

Slika 11 Ekranski prikaz korisničkog sučelja za proizvod D



Izvor: MES sustav poduzeća XY (2024)

Proizvod E je EPS ploča dimenzija 500 mm * 1000 mm * 150 mm (d*v*š). Kalibriranje stroja u ovoj seriji trajalo je 31 sekundu, potom je stroj krenuo proizvoditi u 5 serija po 3 komada ploča. Ukupan broj ploča iznosi 15, odnosno izraženo u metrima kubičnim 1,125 m³. Peta serija također nije imala škarta i sve su ploče bile unutar zadanih gabarita kvalitete. Vrijeme potrebno za izradu svih pet ciklusa iznosi 7 minuta i 29 sekundi, a utrošak energenata iznosi:

- električna energija: 1,73 kw/h,
- vodena para: 69,011 kg i
- komprimirani zrak: 23,62 m³.

Na slici 12 je vidljiv ekranski prikaz potrošnje električne energije i zraka u proizvodnji 15 ploča proizvoda E.

Slika 12 Ekranski prikaz korisničkog sučelja MES-a za proizvod E



Izvor: MES sustav poduzeća XY (2024)

Budući da poduzeće troškove računa na razini metra kubičnog proizvoda, podaci o utrošku energenata bit će svedeni na jedan metar kubični svakog proizvoda, a izračun će biti prikazan samo za proizvod A.

Za jedan metar kubični proizvoda A električne energije utrošeno je:

$$2 \text{ kWh}/0,45 \text{ m}^3 = 4,444 \text{ kWh}/\text{m}^3.$$

Za jedan metar kubični proizvoda A vodene pare je utrošeno:

$$69,392 \text{ kg}/0,45 \text{ m}^3 = 154,204 \text{ kg}/\text{m}^3.$$

Za jedan metar kubični proizvoda A komprimiranog zraka je utrošeno:

$$32,1 \text{ m}^3/0,45 \text{ m}^3 = 71,333 \text{ m}^3/\text{m}^3.$$

U tablici 1 prikazani su svi preračunati iznosi potrošnje energenata za sve proizvode čiji je volumen izražen u metrima kubičnim.

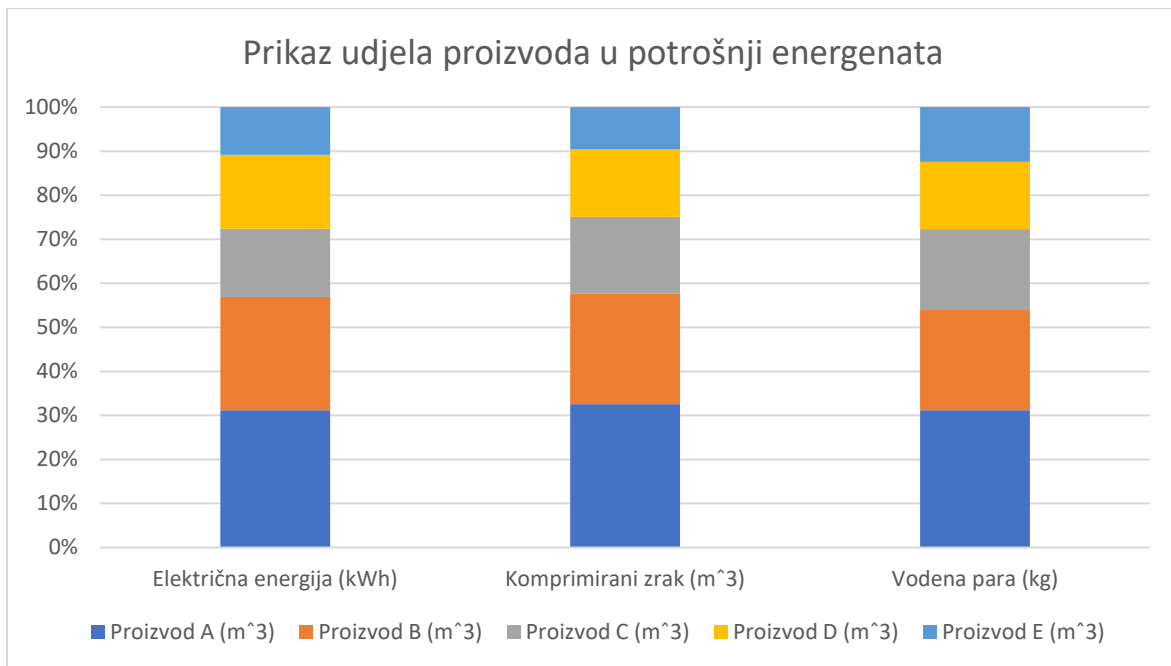
Tablica 1 Prikaz utroška energenata po metru kubnom proizvoda

	Električna energija (kWh)	Komprimirani zrak (m ³)	Vodena para (kg)
Proizvod A (m ³)	4,444	71,333	154,204
Proizvod B (m ³)	3,667	54,967	112,868
Proizvod C (m ³)	2,2	38,053	90,961
Proizvod D (m ³)	2,4	33,567	75,612
Proizvod E (m ³)	1,538	20,996	61,343

Izvor: Izrada autora (2024)

Grafikon 1 pokazuje udio potrošnje energenata po proizvodu u odnosu na ukupnu potrošnju. Tako je vidljivo da proizvodi A i B od ukupno 5 proizvoda troše blizu 60% u slučaju sva tri energenta. U tabličnom prikazu vidljivo je da se s povećanjem debljine EPS ploče smanjuje potrošnja energenata. Drastična razlika se vidi u potrošnji energenata između proizvoda B i C iako se radi o razlici od samo 3 cm u debljini ploče, a s povećanjem njene debljine rastu i tehnička svojstva poput termoizolacije, zvučne izolacije i otpornost na oštećenja.

Grafikon 1 Grafički prikaz udjela proizvoda u potrošnji energenata



Izvor: Izrada autora (2024)

Također valja naglasiti da s rastom debljine ploče raste i njena prodajna cijena, no zbog zaštite identiteta poduzeća nije moguće objaviti točnu cijenu svakog proizvoda. Iako se ne smije zanemariti značajnost troška sirovine u proizvodnji jer on raste s rastom debljine ploče, ipak se njome može manipulirati ekonomijom obujma jer se granule stiropora koriste i za ostale proizvode koje poduzeće izrađuje. Na temelju analize podataka prikupljenih u radu na strojevima može se zaključiti da su proizvodi A i B po potrošnji energenata neisplativi osobito jer prodajna cijena, nakon što su na troškove dodani marža i PDV, raste s rastom debljine ploče, što uzrokuje smanjenje marže na proizvodima koji troše više energenata. Poduzeće bi stoga trebalo razmotriti ukidanje proizvodnje ploča tanjih od 100 mm ili optimizirati proizvodnju kako bi se smanjila konzumacija energenata pri proizvodnji tanjih ploča. U razgovoru s

predstavnikom poduzeća XY problem neisplativosti ovih proizvoda dijelom je riješen uvođenjem solarnih panela, čime su smanjeni troškovi električne energije te visoko energetske učinkovite kotlovnice koja proizvodi vodenu paru čime su također smanjeni troškovi energenata. Savjet poduzeću bi u tom slučaju bio proizvoditi EPS ploče tanje od 10 cm u vrijeme kad električnu energiju u pogonu osiguravaju solarni paneli i kad kotlovnica radi na jeftiniji energent.

4.5 Analiza rezultata i diskusija

Prije implementacije MES-a poduzeće XY je trošak proizvoda izračunavalo na razini cijelog proizvodnog pogona, uključujući sve resurse poput električne energije, vodene pare i zraka. Potrošnja zraka se mjerila preko kompresora, struja i voda brojilom. Navedeni način je problematičan jer se troškovi ravnomjerno raspoređuju, što uzrokuje nerealno kreiranje cijena proizvoda pri čemu se neki precjenjuju, a neki podcjenjuju. U nastavku poglavlja bit će detaljnije prikazan taj problem.

Na proizvodnoj liniji u kojoj se nalazi promatrani stroj iz prethodnog poglavlja nalaze se još tri stroja koja rade na sličnom principu, ali su kod njih kalupi fiksni i za mijenjanje oblika ili dimenzija proizvoda potrebno je stroj zaustaviti na nekoliko sati kako bi se alat zamijenio. Prije uvođenja MES-a poduzeće je otprilike znalo da neki proizvodi troše više energenata od prosjeka no nisu imali način da preciziraju te brojke. Način na koji su dodjeljivali troškove pojedinim proizvodima jest da su na određenoj vremenskoj bazi kao što je jedan radni dan računali volumen proizvedenih dobara u metrima kubnim te očitali potrošnju energenata u tom vremenskom periodu potom raspodijelili uprosječenu vrijednost po metru kubnom na sve proizvode. Problem takvog izračuna prikazan je niže u tabličnom prikazu gdje je prema podacima iz prethodnog poglavlja izračunat prosjek potrošnje po kubičnom metru ploča svih debljina, a izračun kojim je dobiven prosjek je prikazan u sljedećim recima.

Za svaki energent izračunata je aritmetička sredina potrošnje po kubičnom metru koristeći podatke iz tablice 2. Izračun je prikazan samo za potrošnju električne energije.

Prosječna potrošnja električne energije= $(4,444+3,667+2,2+2,4+1,538)/5=14,249/5=2,8498$
kWh/m³

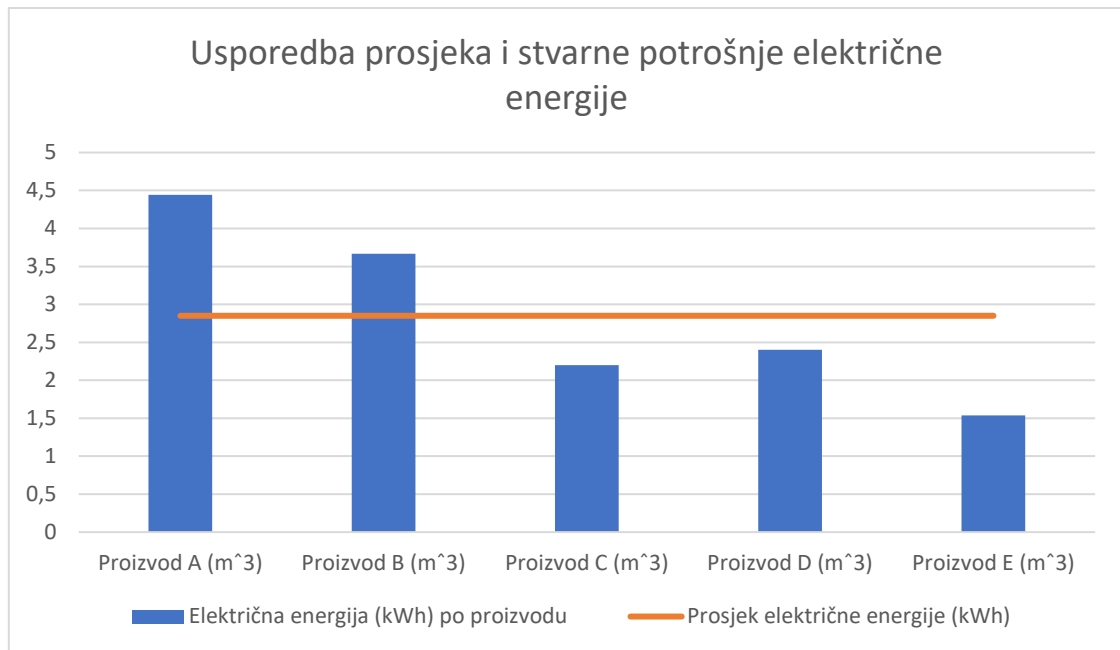
Tablica 2 Prikaz potrošnje energenata uprosječenih vrijednosti po proizvodu

	Električna energija (kWh) po proizvodu	Prosjek električne energije (kWh)	Komprimirani zrak (m ³)	Prosjek komprimiranog zraka (m ³)	Vodena para (kg)	Prosjek vodene pare (kg)
Proizvod A (m ³)	4,444	2,8498	71,333	43,7832	154,204	98,9976
Proizvod B (m ³)	3,667	2,8498	54,967	43,7832	112,868	98,9976
Proizvod C (m ³)	2,2	2,8498	38,053	43,7832	90,961	98,9976
Proizvod D (m ³)	2,4	2,8498	33,567	43,7832	75,612	98,9976
Proizvod E (m ³)	1,538	2,8498	20,996	43,7832	61,343	98,9976

Izvor: 1 Izrada autora

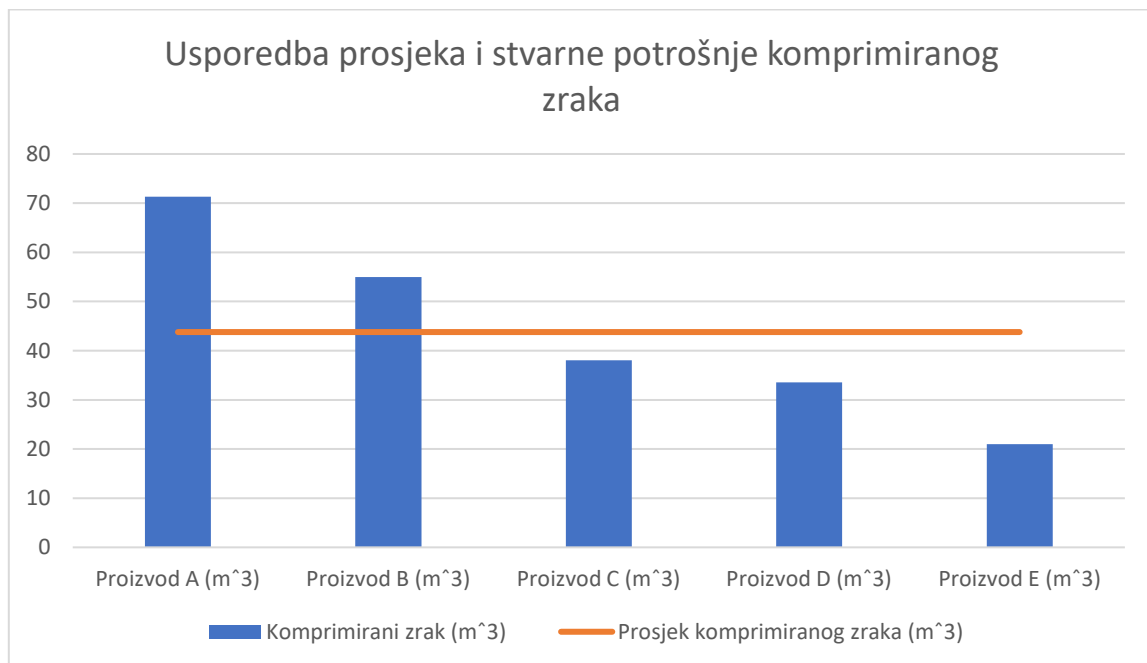
Grafikoni od 2 do 4 jasno pokazuju problem raspoređivanja prosječnih troškova po proizvodu kako bi se naposljetku računala cijena. U slučaj proizvoda A i B troškovi se podcjenjuju što dovodi do kreiranja preniske cijene te posljedično gubitka dobiti na ta dva proizvoda. U slučaju proizvoda C, D i E troškovi se precjenjuju i na njima se ostvari nešto više dobiti, ali problem nastaje kad se ta praksa primjenjuje na cjelokupan pogon. Naime, u scenariju u kojem neko poduzeće raspiše natječaj za kupovinu veće količine proizvoda poput kontejnera za presadnice koji se proizvode u pogonu u kojem se proizvode i EPS ploče kao u ovom slučaju, a za njih je potrošnja energenata manja od EPS ploča, događa se neprecizna kalkulacija u kojoj se troškovi precjenjuju. Posljedično to utječe na cijenu proizvoda i ponudu koja se šalje na natječaj te ga proizvođač kontejnera gubi jer je konkurent svoje troškove preciznije računao i time ponudio bolju cijenu za proizvod sličnih performansi. Oportunitetni trošak u tom slučaju raste na iznos izgubljenog posla zbog nepreciznih kalkulacija te je podcjenjivanje troškova A i B čak i manji problem. Ovaj primjer jasno dokazuje zašto MES i precizno praćenje troškova u proizvodnji donosi konkurentne prednosti. Kontakt iz poduzeća XY tvrdi da su sada s MES-om kalkulacije troškova približno 95% točne pri računanju troškova po pojedinom proizvodu.

Grafikon 2 Grafički prikaz usporedbe prosjeka i stvarne potrošnje električne energija



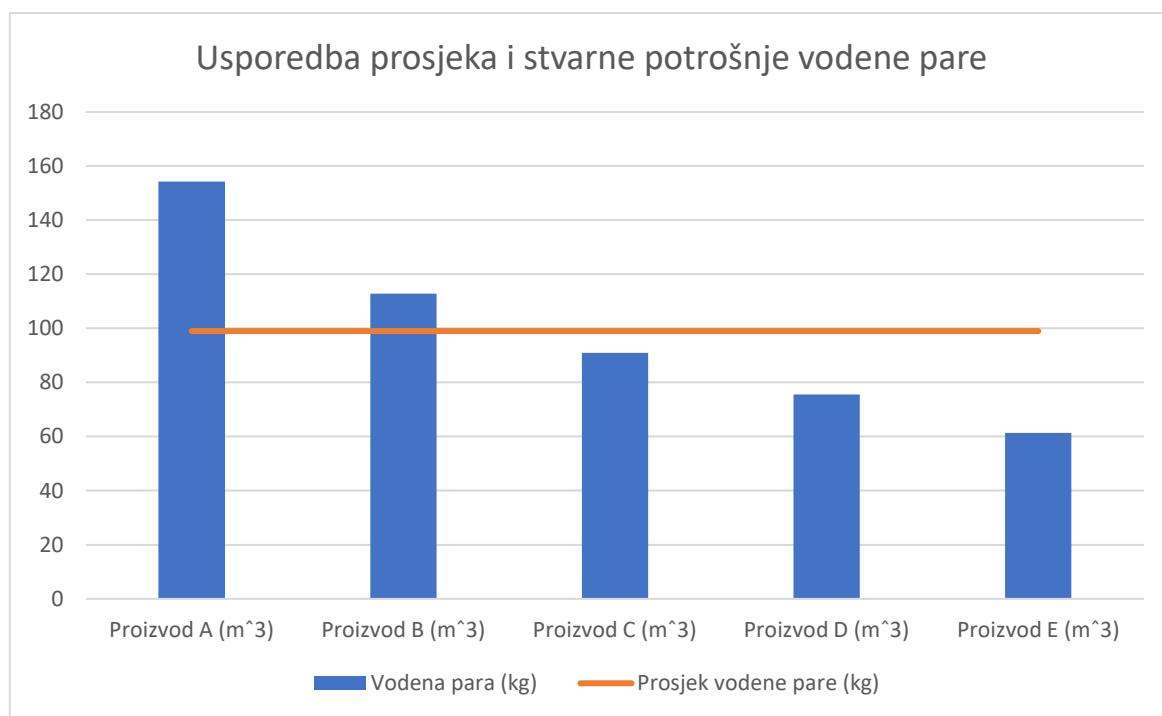
Izvor: 2 Izrada autora

Grafikon 3 Grafički prikaz usporedbe prosjeka i stvarne potrošnje komprimiranog zraka



Izvor: 3 Izrada autora

Grafikon 4 Grafički prikaz usporedbe prosjeka i stvarne potrošnje vodene pare



Izvor: 4 Izrada autora

5 ZAKLJUČAK

Industrija 4.0 je sa sobom donijela neviđene novitete. Kroz pregled literature bilo je moguće vidjeti teorijski koncept i metode kojima se ostvaruju najbolji rezultati pri implementaciji, s naglaskom na sustave izvršenja proizvodnje. Usporedbom teorijskog koncepta iz trećeg poglavlja u kojem autori daju jasne smjernice za implementaciju MES-a i praktičnog primjera implementacije u poduzeće XY vidljivo je da stvarnost ne odstupa previše od prakse. Standard isa-95 ispoštovan je pri izradi softvera dok su koraci implementacije prilagođeni iskustvom pružatelja usluga YZ. Ono što je karakteristično za praksu jest da se implementacija vrši u dva tijeka, u prvom prilagodbi mekih komponenti te u drugom postavljanju tvrdih komponenti sustava. Važno je naglasiti da implementacija rješenja ne teče uvijek besprijekorno. Kontakt iz poduzeća XY naglašava da su poteškoće u integraciji MES-a i postojećih sustava bile očekivane, konkretno u slučaju integracije ERP-a, ali su sve prepreke uspjeli nadići upravo oslanjajući se na stručnjake iz područja. U tome leži ključ kvalitetnog sustava koji će služiti poduzeću u svim njegovim zahtjevima, kvalitetna usluga pružena od strane vrhunskih stručnjaka koji razumiju problematiku i koji govore istim jezikom kao i klijent. Proces implementacije traje blizu 12 mjeseci i njegove dorade u vrijeme pisanja još uvijek traju, ali funkcionalnosti koje su trenutno omogućene daju jasnu sliku o korisnosti ove tehnologije u proizvodnji. Zahtjevi poduzeća XY prema sustavu su bili praćenje potrošnje svih energenata u proizvodnji, digitalizacija radnih naloga, praćenje i analiza grešaka i odstupanja u proizvodnji, opterećenje strojeva u pogonu te prikupljanje i analiza podataka iz pogona u stvarnom vremenu. Kontakt iz poduzeća XY je nakon implementacije MES-a u proizvodnji primijetio povećanje produktivnosti, smanjene proizvodnih troškova koje je ostvareno praćenjem stanja proizvodnje električne energije na solarnim panelima te prilagođavanju proizvodnje kako bi se potrošio jeftiniji izvor energenta te praćenje rada kotlovnice i proizvodnje vodene pare. Osim toga za poduzeće je važno povećanje kvalitete proizvoda koja se postiže konstantnim praćenjem kvalitete te prilagođavanjem recepture ovisno o uvjetima o pogonu čije podatke omogućuje IoT. Donošenje pravovremenih, brzih i ispravnih odluka na temelju prikupljenih podataka u stvarnom vremenu također predstavlja veliku prednost u korištenju sustava. Najveća promjena nakon uvođenja MES-a bilježi se jasno i egzaktno u praćenju utroška energenata po proizvodu koji su se neprecizno kalkulirali prije nego li je sustav upogonjen. U četvrtom poglavlju rada prikazane su stare i nove kalkulacije koje su pokazale neefikasnosti u proizvodnji proizvoda A i B te preporuke poduzeću za nastavak proizvodnje. Problemi u prilagodbi cijena tržištu su uvelike olakšani te sad poduzeće vrlo lako može na temelju troškova prilagođavati svoje marže za ostvarivanje najveće moguće dobiti. Kombinacija automatizacije procesa, uvođenjem u

pogon novih strojeva, povećanjem energetske učinkovitosti te implementacijom IoT rješenja i MES-a ovom su poduzeću donijele konkurentske prednosti i koristi za održavanje svog mjesta pod suncem tržišta. Zaključno, kad je vodstvo poduzeća otvoreno za napredak i nove tehnologije i pri tome angažira stručnjake u području kako bi se razvila rješenja potrebna za optimizaciju proizvodnih procesa, onda je poslovni uspjeh zagarantiran. Nada autora je da će ovaj rad poslužiti u svrhu priručnika za upoznavanje s novim tehnologijama svim sličnim poduzećima te da će ih izvrstan primjer poduzeća XY potaknuti da dublje istraže svijet novina u tehnologiji koje im mogu pomoći u kreiranju konkurentnijeg proizvoda koji će biti proizveden efikasno. San o čvrstom gospodarstvu koje će budućim generacijama osigurati miran i lijep život ostaje na ovoj generaciji da ga ostvare, nove tehnologije su izvrstan alat da se hrvatski proizvod bilo koje grane gospodarstva progura dalje u svijet.

Literatura

1. Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Sattarpanah Karganroudi, S., Dhouib, R., Ibrahim, H., & Adda, M. (2022). On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges. *Applied Sciences*, 12(16), 8081.
2. AI, H. (2019). High-level expert group on artificial intelligence. *Ethics guidelines for trustworthy AI*, 6.
3. Allen, J. F. (2003). Natural language processing. In *Encyclopedia of computer science* (pp. 1218-1222).
4. Arnold, C., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2016). How Industry 4.0 changes business models in different manufacturing industries. In *ISPIM Conference Proceedings* (p. 1). The International Society for Professional Innovation Management (ISPIM).
5. Aslanova, I. V., & Kulichkina, A. I. (2020, May). Digital maturity: Definition and model. In *2nd International Scientific and Practical Conference "Modern Management Trends and the Digital Economy: from Regional Development to Global Economic Growth" (MTDE 2020)* (pp. 443-449). Atlantis Press.
6. Bajpai, P., & Kumar, M. (2010). Genetic algorithm—an approach to solve global optimization problems. *Indian Journal of computer science and engineering*, 1(3), 199-206.
7. Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (Eds.). (2019). Additive manufacturing. CRC press.
8. Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization. *Wireless personal communications*, 58, 49-69.
9. Banks, J. (Ed.). (1998). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. John Wiley & Sons.
10. Benešová, A., Hirman, M., Steiner, F., & Tupa, J. (2019). Determination of changes in process management within industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 38, 1691-1696.
11. Berghaus, S., & Back, A. (2016). Stages in digital business transformation: Results of an empirical maturity study.
12. Bertsekas, D. (2009). *Convex optimization theory* (Vol. 1). Athena Scientific.
13. Cambini, A., & Martein, L. (2008). *Generalized convexity and optimization: Theory and applications* (Vol. 616). Springer Science & Business Media.
14. Carvalho, Núbia Gabriela Pereira, and Edson Walimir Cazarini. "Industry 4.0-What Is It?." *Industry 4.0-Current Status and Future Trends*. IntechOpen, 2020.
15. Craig, A. B. (2013). *Understanding augmented reality: Concepts and applications*.

16. Daneels, A., & Salter, W. (1999). What is SCADA?. International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, 1999, Trieste, Italy, 339-343.
17. Dantzig, G. B. (2002). Linear programming. *Operations research*, 50(1), 42-47.
18. Diwekar, U. M. (2020). *Introduction to applied optimization* (Vol. 22). Springer Nature.
19. El-Mihoub, T. A., Hopgood, A. A., Nolle, L., & Battersby, A. (2006). Hybrid Genetic Algorithms: A Review. *Eng. Lett.*, 13(2), 124-137.
20. Enrique, D. V., Druczkoski, J. C. M., Lima, T. M., & Charrua-Santos, F. (2021). Advantages and difficulties of implementing Industry 4.0 technologies for labor flexibility. *Procedia Computer Science*, 181, 347-352.
21. Erboz, G. (2017). How to define industry 4.0: main pillars of industry 4.0. Managerial trends in the development of enterprises in globalization era, 761, 767.
22. Ernst, D., & Louette, A. (2024). Introduction to reinforcement learning.
23. Flasiński, M. (2016). *Introduction to artificial intelligence*. Springer.
24. Fragapane, G., Ivanov, D., Peron, M., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2022). Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics. *Annals of operations research*, 308(1), 125-143.
25. Ghelani, D. (2022). Cyber security, cyber threats, implications and future perspectives: A Review. Authorea Preprints.
26. Goecks, L. S., Habekost, A. F., Coruzzolo, A. M., & Sellitto, M. A. (2024). Industry 4.0 and Smart Systems in Manufacturing: Guidelines for the Implementation of a Smart Statistical Process Control. *Applied System Innovation*, 7(2), 24.
27. Gokhare, V. G., Raut, D. N., & Shinde, D. K. (2017). A review paper on 3D-printing aspects and various processes used in the 3D-printing. *Int. J. Eng. Res. Technol*, 6(06), 953-958.
28. Govindaraju, R., & Putra, K. (2016, February). A methodology for Manufacturing Execution Systems (MES) implementation. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 114, No. 1, p. 012094). IOP Publishing.
29. Hagedorff, T. (2020). The ethics of AI ethics: An evaluation of guidelines. *Minds and machines*, 30(1), 99-120.
30. Hansen, R. C. (2001). *Overall equipment effectiveness: a powerful production/maintenance tool for increased profits*. Industrial Press Inc..

31. Hauder, V. A., Beham, A., Wagner, S., & Affenzeller, M. (2017, July). Optimization networks for real-world production and logistics problems. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion* (pp. 1411-1414).
32. Hrvatski jezični portal (b.d.). Optimiranje. Preuzeto 15. srpnja 2024. s https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=eFluUBY%3D
33. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2021). Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International*, 2, 100110.
34. Jazdi, N. (2014, May). Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. In *2014 IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics* (pp. 1-4). IEEE.
35. Kane, G. C., Palmer, D., & Phillips, A. N. (2017). *Achieving digital maturity*. MIT Sloan Management Review.
36. Kane, G. C., Palmer, D., & Phillips, A. N. (2017). *Achieving digital maturity*. MIT Sloan Management Review.
37. Koch, A. (b.d. a). Definition(s) of Effectiveness: Efficiency – Effectiveness – Productivity. Preuzeto 18. srpnja 2024. s <https://oe.academy/oe-standard/effectiveness-definition/>
38. Koch, A. (b.d. b). The Correct Way to Calculate OEE. Preuzeto 15. rujna 2024. s <https://oe.academy/oe-standard/oe-calculation-definition/>
39. Koch, A. (b.d. c). OEE Standard Definitions: The OEE Industry Standard. Preuzeto 18. rujna 2024. s <https://oe.academy/oe-standard/>
40. Kovács, G., Benotsmane, R., & Dudás, L. (2018). The concept of autonomous systems in industry 4.0. *Advanced Logistic Systems-Theory and Practice*, 12(1), 77-87.
41. Kreitner, R., & Kinicki, A. (2014). *Perilaku Organisasi*. Jakarta: Salemba Empat.
42. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *Ifac-PapersOnline*, 51(11), 1016-1022.
43. Krushnan, J., Patel, V., Dawoud, A., Vaghani, C., Patil, S., & Schrödel, F. (2023, June). Concept Design of a Self Optimized Industry 4.0 Benchmark Plant. In *2023 European Control Conference (ECC)* (pp. 1-6). IEEE.
44. Li, W., Wang, G. G., & Gandomi, A. H. (2021). A survey of learning-based intelligent optimization algorithms. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(5), 3781-3799.

45. Mantravadi, S., & Møller, C. (2019). An overview of next-generation manufacturing execution systems: How important is MES for industry 4.0?. *Procedia manufacturing*, 30, 588-595.
46. Marston, S., Li, Z., Bandyopadhyay, S., Zhang, J., & Ghalsasi, A. (2011). Cloud computing—The business perspective. *Decision support systems*, 51(1), 176-189.
47. Mendes, L., & Machado, J. (2015). Employees' skills, manufacturing flexibility and performance: a structural equation modelling applied to the automotive industry. *International Journal of Production Research*, 53(13), 4087-4101.
48. MESA International. (1997). *MESA White Paper #01: The Benefits of MES: A Report from the Field* (Vol. 3, p. 3).
49. Mohammadi, A., & Sheikholeslam, F. (2023). Intelligent optimization: Literature review and state-of-the-art algorithms (1965–2022). *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 106959.
50. Natalia, I., & Ellitan, L. (2019). STRATEGIES TO ACHIEVE COMPETITIVE ADVANTAGE IN INDUSTRIAL REVOLUTION 4.0. *International Journal of Research Culture Society*, 3(6), 10-16.
51. Nowotniak, R. (2010). Survey of quantum-inspired evolutionary algorithms. In *Materialy konferencyjne Forum Innowacji Młodych Badaczy*.
52. Parviainen, P., Tihinen, M., Kääriäinen, J., & Teppola, S. (2017). Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice. *International journal of information systems and project management*, 5(1), 63-77.
53. Raßfeld, C., Rößle, D., & Jochem, R. (2013). Integrated and modular design of an optimized process architecture. *International Journal of Production Management and Engineering*, 1(1), 63-75.
54. Regalado, A. (2011). Who Coined 'Cloud Computing'?. Preuzeto 15. rujna 2024. s <https://www.technologyreview.com/2011/10/31/257406/who-coined-cloud-computing/>,
55. Ribeiro, J., Lima, R., Eckhardt, T., & Paiva, S. (2021). Robotic process automation and artificial intelligence in industry 4.0—a literature review. *Procedia Computer Science*, 181, 51-58.
56. Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (2015). The internet of things: An overview. *The internet society (ISOC)*, 80(15), 1-53.
57. Sakarovitch, M. (2013). *Linear programming*. Springer Science & Business Media.
58. SCADA (b.d.). History of SCADA. Preuzeto 17. srpnja 2024. s <https://www.scadainfo.com/history-of-scada/>

59. Schmitt, L. M. (2001). Theory of genetic algorithms. *Theoretical Computer Science*, 259(1-2), 1-61.
60. Spremić, M. (2020). Sigurnost i reviza informacijskih sustava u digitalnom okruženju
61. Tohanean, D., Sorin-George, T. O. M. A., & Dumitru, I. (2018). Organizational performance and digitalization in industry 4.0. *Journal of Emerging Trends in Marketing and Management*, 1(1), 282-288.
62. Topčić, A. (2020). Izazovi i mogućnosti implementacije pojedinih tehnoloških nosilaca koncepta industrije 4.0. INNTECH, Naučno. stručni časopis za promociju tehnike, tehnologije, inovatorstva, inovativnosti i IT tehnologija.
63. Umbarkar, A. J., & Sheth, P. D. (2015). Crossover operators in genetic algorithms: a review. *ICTACT journal on soft computing*, 6(1).
64. Wu, Q., Wang, X., Liang, G., Luo, X., Zhou, M., Deng, H., ... & Yang, Q. (2023). Advances in image-based artificial intelligence in otorhinolaryngology–head and neck surgery: a systematic review. *Otolaryngology–Head and Neck Surgery*, 169(5), 1132-1142.

Popis slika

Slika 1 Povijesni pregled razvoja industrije	3
Slika 2 Elementi industrije 4.0	5
Slika 3 Horizontalna i vertikalna integracija	7
Slika 4 Slojevi oblaka.....	9
Slika 5 Slika zaslona razgovora s umjetnom inteligencijom.....	12
Slika 6 NL sustav upita baze podataka	18
Slika 7 Koraci implementacije MES-a	33
Slika 8 Ekranski prikaz korisničkog sučelja MES-a za proizvod A.....	42
Slika 9 Ekranski prikaz korisničkog sučelja MES-a za proizvod B.....	43
Slika 10 Ekranski prikaz korisničkog sučelja za proizvod C	43
Slika 11 Ekranski prikaz korisničkog sučelja za proizvod D	44
Slika 12 Ekranski prikaz korisničkog sučelja MES-a za proizvod E	45

Popis tablica

Tablica 1 Prikaz utroška energenata po metru kubnom proizvoda	45
Tablica 2 Prikaz potrošnje energenata uprosječenih vrijednosti po proizvodu	48

Popis grafikona

Grafikon 1 Grafički prikaz udjela proizvoda u potrošnji energenata	46
Grafikon 2 Grafički prikaz usporedbe prosjeka i stvarne potrošnje električne energija	49
Grafikon 3 Grafički prikaz usporedbe prosjeka i stvarne potrošnje komprimiranog zraka	49
Grafikon 4 Grafički prikaz usporedbe prosjeka i stvarne potrošnje vodene pare	50

Životopis



KARLA ALVIR

KONTAKT

✉ karla.alvir@gmail.com

ŠKOLOVANJE

2010-2014

**NNADBISKUPSKA KLASIČNA
GIMNAZIJA**

2019-2024

**EKONOMSKI FAKULTET U
ZAGREBU**

Poslovna ekonomija
smijer: menadžerska
informatika

VJEŠTINE

- Poznavanje rada u MS Office-u
- Poznavanje rada u SQL developeru
- Poznavanje rada u Weka-i
- Poznavanje C# jezika

JEZIK

English

French

O MENI

Odgovorna i svestrana osoba s naglašenim osjećajem za timski rad i preciznost u obavljanju zadataka. Uvijek otvorena za učenje i usavršavanje, vodena znatiželjnošću i željom za stjecanjem novih znanja. Smatram da doprinosim kroz pažljiv pristup detaljima i volju da se prilagodim raznim izazovima kako bih podržala ciljeve tima.

EXPERIENCE

2018- Trenutno

Alvitom d.o.o.

Administrator

Krovni naziv ovog radnog mjesta zvuči vrlo općenito, no jedino je koje može obuhvatiti sve odgovornosti i zadatke koje obuhvaća. Imala sam priliku biti "katica za sve" što mi je donijelo detaljno poznavanje svih proizvodnih i poslovnih procesa u poduzeću te spremnost na još važnije i odgovornije zadatke koji slijede.

2015-2018

A1 Telekom

Prodajni agent

Kao mlada osoba bez iskustva, na ovom radnom mjestu stekla sam vještine u poslovnoj i profesionalnoj komunikaciji koju smatram izrazito bitnom u bilo kojoj vrsti posla. Također sam uvidjela važnost timskog rada kao i kontinuiranog rada vlastitoj produktivnosti koja utječe na kompletan kolektiv.

REFERENCE

Tomislav Alvir

Alvitom d.o.o./direktor

Email : tomislav@alvitom.hr