



LATVIJAS  
UNIVERSITĀTE

Promocijas darba  
kopsavilkums

---

Wjatscheslav Baumung

**PROGRAMMATŪRAS  
ARHITEKTŪRA ADITĪVĀS  
RAŽOŠANAS INTEGRĒŠANAI  
UZŅĒMUMA RAŽOŠANAS  
SISTĒMĀS**

Rīga 2026



**LATVIJAS**  
UNIVERSITĀTE

---

**EKSAKTO ZINĀTŅU UN  
TEHNOĻIJU FAKULTĀTE**

**Wjatscheslav Baumung**

**PROGRAMMATŪRAS ARHITEKTŪRA  
ADITĪVĀS RAŽOŠANAS INTEGRĒŠANAI  
UZŅĒMUMA RAŽOŠANAS SISTĒMĀS**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

zinātniskā doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai  
inženierzinātnēs un tehnoloģijās  
Apakšnozare: informācijas sistēmas

Rīga 2026

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Eksakto zinātņu un tehnoloģiju fakultātes Datorikas nodaļā laika posmā no 2016. gada līdz 2026. gadam.

Darbs sastāv no ievada, 5 sadaļām, nobeiguma, rekomendācijām, literatūras saraksta un pielikumiem.

Darba forma: promocijas darbs inženierzinātņu un tehnoloģiju nozarē, informācijas sistēmu apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs:

*Dr. phil. oec. Vladislavs V. Fomins*, prof., Viļņas Gedimina Tehniskā universitāte

Recenzenti:

- 1) *Dr. sc. comp. Laila Niedrīte* prof., Latvijas Universitāte;
- 2) *Dr. sc. ing. Gatis Vītols*, prof., Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte;
- 3) *Dr. rer. soc. oec. Stefan Thalmann*, prof., Grācas universitāte.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2026. gada 13. februārī Latvijas Universitātes Datorzinātnes un informātikas un Elektrotehnikas, elektronikas un komunikāciju tehnoloģiju nozares promocijas padomes atklātā sēdē.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Raiņa bulvārī 19.

Promocijas padomes priekšsēdētājs \_\_\_\_\_ *Dr. sc. comp.* prof. Juris Borzovs

Promocijas padomes sekretāre \_\_\_\_\_ Sintija Siliņa

© Wjatscheslav Baumung, 2026

© Latvijas Universitāte, 2026

ISBN 978-9934-36-520-1

ISBN 978-9934-36-521-8 (PDF)

# ANOTĀCIJA

Šajā disertācijā tiek prezentēta programmatūras arhitektūra, kas paredzēta aditīvās ražošanas (AM) integrācijai kibernetiskajās ražošanas sistēmās. Tradicionālajām ražošanas vidēm, kuras atbalsta uzņēmuma resursu plānošanas (ERP) un ražošanas plānošanas un kontroles (PPC) sistēmas, trūkst strukturālās elastības, lai pielāgotos AM procesu nekonkrētajai un dinamiskajai būtībai. Šajā darbā tiek izstrādāta AM pielāgota ražošanas plānošanas un kontroles (PPC) sistēma, kas nodrošina vienotu koordināciju ar esošajām uzņēmuma sistēmām.

Saskaņā ar dizaina zinātnes (DS) pētījumu principiem arhitektūra tika iteratīvi izstrādāta, ieviesta un validēta, izmantojot simulāciju. Galvenie ieguldījumi ietver modulāru programmatūras arhitektūru AM specifiskai procesu kontrolei, dinamisku resursu sadales mehānismu un reāllaika ražošanas pasūtījumu ģeneratoru. Sistēma nodrošina sadarbību ar ERP sistēmām, atbalsta decentralizētus ražošanas tīklus un integrē reāllaika datu atgriezenisko saiti, lai pielāgotos mainīgiem ražošanas ierobežojumiem.

Darbs risina galvenos izaicinājumus, kas saistīti ar informācijas sistēmu izstrādi (ISD) ražošanas jomā, tostarp sistēmu projektēšanu augsti elastīgai videi, datu plūsmas integrāciju starp heterogēniem avotiem un AM-specifiskās loģikas ieviešanu esošajā rūpnieciskajā IT infrastruktūrā. Izstrādātās sistēmas arhitektūras papildu moduļi demonstrē iespēju izmantot mašīnmācīšanos prognozējamai plānošanai un blokkēdi decentralizētai pasūtījumu pārvaldībai, tādējādi paplašinot arhitektūras potenciālu Rūpniecības 4.0 (angl.: Industry 4.0) ekosistēmās.

**Atslēgvārdi:** aditīvā ražošana (AM), ražošanas vadība, darbības vadība, ražošanas plānošana un kontrole (PPC), sistēmas arhitektūra, uzņēmuma resursu plānošana (ERP), dizaina zinātnes pētījumu metodoloģija (DSRM)

# SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS .....	5
1. TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS ADITĪVĀS RAŽOŠANAS INTEGRĀCIJAI RAŽOŠANAS IT SISTĒMĀS .....	13
2. PĒTĪJUMU METODOLOĢIJA SISTĒMAS ARHITEKTŪRAS IZSTRĀDEI .....	15
3. PPC SISTĒMAS ARHITEKTŪRAS IZSTRĀDE ADITĪVĀS RAŽOŠANAS IESPĒJOŠANAI .....	17
3.1. Aditīvās ražošanas PPC sistēmas arhitektūra .....	18
3.2. Esošās PPC adaptācijas prasības .....	19
3.3. Efektīva būvniecības telpas izmantošana, ņemot vērā noteiktu laika periodu .....	20
3.4. Metožu izstrāde aditīvās ražošanas specifiskajām īpašībām .....	22
3.4.1. Mašīnmācīšanās prognozējošajai plānošanai .....	23
3.4.2. Blokkēde decentralizētai pasūtījumu koordinācijai .....	24
4. IEVIEŠANA .....	25
4.1. Ģenerators drukas darbiem .....	26
4.1.1. Informācijas vākšana, izmantojot šķēlēšanu (slicing) .....	26
4.1.2. Informācijas vākšana no 3D modeļiem .....	27
4.1.3. Secības un rindu izveide .....	28
4.1.4. Drukāšanas darbu izveidošana .....	28
4.2. Ieviešanas novērtējums ar simulācijas datiem .....	29
5. PĒTĪJUMA REZULTĀTI PAR SISTĒMAS NOVĒRTĒJUMU UN PĒTĪJUMA IZNĀKUMIEM .....	32
SECINĀJUMI .....	34
LITERATŪRAS SARAKSTS .....	36

# PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

Aditīvā ražošana (AM, angl.: Additive Manufacturing) ir galvenā atbalsta tehnoloģija rūpniecības 4.0 un uzņēmuma ražošanas sistēmu (EPS, angl.: Enterprise Production System) kontekstā. AM ir viena no tehnoloģijām, kas ļauj veikt digitālo un fizikālo transformāciju, tādējādi pārveidojot tradicionālās EPS par kiberfizikālām ražošanas sistēmām (CPPS, angl.: Cyber-Physical Production System), kas ir digitāli integrētas ražošanas sistēmas, kuras savieno fizikālos ražošanas procesus ar skaitļošanas kontroles sistēmām. Šī transformācija ir daļa no AM revolucionārās ietekmes uz ražošanu ceturtais industriālās revolūcijas kontekstā, kur digitalizācija, automatizācija un savstarpēji savienotas sistēmas ļauj izmantot jaunas pieejas produktu attīstībai un ražošanai kosmosa, automobiļu, medicīnas un patēriņa preču nozarēs [1]. Nesen veiktie sistemātiskie pārskati uzsver kiberfizikālo ražošanas sistēmu transformatīvo potenciālu, kas ļauj izmantot viedās ražošanas iespējas [2]. Tradicionālās subtraktīvās ražošanas metodes ietver materiāla noņemšanu no detaļām, izmantojot specializētus instrumentus un secīgas darbības, savukārt AM veido objektus slāni pēc slāņa tieši no digitālajiem modeļiem, neizmantojot specializētus instrumentus. Atšķirībā no šīm tradicionālajām pieejām AM piedāvā dizaina brīvību, resursu efektīvu izmantošanu. Lai gan AM integrācija tradicionālajās EPS ir vēlama plašākā digitālās transformācijas kontekstā, virzoties uz Rūpniecību 4.0, mēģinot palielināt ražošanas sistēmu un procesu potenciālu [3], praksē šo integrāciju kavē fakts, ka pašreizējās uzņēmuma resursu plānošanas (ERP) un ražošanas plānošanas un kontroles (PPC) sistēmas, kas koordinē biznesa procesus un ražošanas darbības, ir galvenokārt izstrādātas lineārām, iepriekš definētu procesu plūsmām, kas izveidotas tradicionālajās EPS. AM, savukārt, raksturīgas uzdevumiem nespecifiskas ražošanas iespējas, kas nozīmē spēju ražot dažādas detaļas bez pārveidošanas vai pārkonfigurēšanas, kā arī nelineārā darba plūsmā un augstā pārkonfigurējamībā. Tas rada būtisku arhitektūras neatbilstību starp esošajām programmatūras sistēmām un AM darbības loģiku, kas izraisa neefektivitāti, plānošanas nepilnības un manuālus risinājumus. Šajā disertācijā šī neatbilstība tiek risināta, ierosinot modulāru, paplašināmu programmatūras arhitektūru AM specifiskai PPC integrācijai EPS vidē. Arhitektūra ir izstrādāta, lai nodrošinātu dinamisku resursu pārvaldību, reāllaika atgriezeniskās saites mehānismus un vienotu sadarbību ar uzņēmuma IT sistēmām, piemēram, ERP un ražošanas izpildes sistēmu (MES, angl.: Manufacturing Execution System).

## Pētījuma problēma

AM rūpnieciskā ieviešana rada fundamentālas izmaiņas ražošanas procesu plānošanā, kontrolē un izpildē. Tradicionālās ražošanas sistēmas, kas balstās uz subtraktīviem vai formējošiem procesiem, ir strukturētas ap uzdevumiem specifiskām mašīnām, kas sakārtotas fiksētā secībā, kur katram darba posmam nepieciešami speciāli instrumenti, uzstādīšana un koordinācija. Šīs vides ir labi atbalstītas ar izveidotām PPC sistēmām un uzņēmuma programmatūras risinājumiem, piemēram, ERP. Turpretim AM tehnoloģijas darbojas ar ražošanas vienībām, kas spēj veikt vienu un to pašu vispārīgo procesu, nodrošinot ievērojamu elastību darba grafiku sastādīšanā un resursu sadalē. Šī vienveidība maina visu plānošanas loģiku: tā vietā, lai koordinētu dažādus ražošanas posmus, izmantojot specializētu aprīkojumu, AM prasa vairāku ražošanas vienību ar identiskām spējām pārvaldību, lai maksimizētu caurlaidspēju, izmantojot inteligentu grupēšanu un dinamisku darba uzdevumu piešķiršanu. Arhitektūras atšķirības starp tradicionālo un aditīvo ražošanu pārsniedz tehniskās specifikācijas un ietver fundamentāli atšķirīgas darbības paradigmas.

Esošās PPC arhitektūras bieži nespēj attēlot AM darbības uzvedību. Galvenie ierobežojumi ietver procesu balstītu maršrutēšanas mehānismu trūkumu, neelastīgu resursu piešķiršanu un nepietiekamu atbalstu lēmumu pieņemšanai vēlākā posmā, kas attiecas uz spēju mainīt ražošanas parametrus tuvu izpildei vai tās laikā, vai decentralizētu uzdevumu izpildi. Mūsdienu pētījumi uzsver nepieciešamību pēc reāllaika kontroles arhitektūrām, kas ir īpaši izstrādātas aditīvās ražošanas vidēm [4]. AM procesa īpašības, piemēram, ilgš, bet bez uzraudzības izpildes laiks, ražošana bez instrumentiem un darba uzstādīšanas atdalīšana no detaļas ģeometrijas, rada papildu izaicinājumus tradicionālajiem ražošanas modeļiem un kontroles plūsmām. Tāpēc AM integrācija uzņēmuma ražošanas vidē nav tikai jautājums par mašīnu savienošanu ar programmatūru, bet prasa fundamentāli atšķirīgu arhitektūras pieeju. Nepārveidojot pamatā esošo koordinācijas loģiku, AM paliks atdalīta no digitālās ražošanas pamata, kas izraisīs sadrumstalotas darba plūsmas, manuālus apvedceļus un nepietiekami izmantotu ražošanas potenciālu.

## Pētījuma mērķis, tēze un uzdevumi

Šī disertācija risina jautājumu par nepieciešamību pēc programmatūras arhitektūras, kas ļautu AM kļūt par pilnībā integrētu CPPS komponenti.

*Šīs disertācijas mērķis ir izstrādāt risinājumu, kas nodrošina nepārtrauktu koordināciju starp vairākām AM vienībām, atbalsta dinamisku darba organizēšanu un saglabā saderību ar esošajām ERP vidēm, netraucējot esošo ražošanas kontroles ekosistēmu.*

Tādējādi var formulēt šādu pētījuma tēzi, kas tiks izvirzīta aizstāvēšanai: *tradicionālo ražošanas tehnoloģiju (TMT, angl.: Traditional Manufacturing Technologies)*

*izveidotajā ražošanas vidē var ieviest aditīvo ražošanu (AM) rūpnieciskā mērogā, izstrādājot atbilstošus procesu vadības un procesu kontroles risinājumus.*

AM izmantošana rūpnieciskās ražošanas vidē prasa programmatūras sistēmas, kas spēj atbalstīt tās unikālās procesa īpašības, neietekmējot esošās IT infrastruktūras vai ražošanas kontroles loģiku. AM būtiski atšķiras no TMT ar to, ka tā darbībai nav nepieciešama konfigurācija, tā ir elastīga un nav saistīta ar konkrētu uzdevumu darba plūsmām. Šīs atšķirības rada izaicinājumus tradicionālajām PPC sistēmām, kas nav paredzētas tik dinamiskas, uz procesu orientētas ražošanas resursu apstrādei.

Lai sasniegtu šīs disertācijas mērķi, var formulēt vispārīgu uzdevumu: *izstrādāt programmatūras arhitektūru AM specifiskai ražošanas plānošanai un kontrolei (PPC) un tās integrācijai ar tradicionālajām uzņēmuma ražošanas sistēmām (EPS), lai nodrošinātu kontrolējamās un pārvaldāmas kiberfizikālās ražošanas sistēmas (CPPS).*

Vispārīgo uzdevumu var sadalīt konkrētākos pētniecības uzdevumos (RT):

- **RT1:** *Noteikt un aprakstīt esošo PPC sistēmu funkcionālo darbības jomu ražošanā, lai identificētu procesu kontroles uzdevumus, kas atbalsta rūpnieciskā mēroga darbības.*
- **RT2:** *Identificēt un aprakstīt AM būtiskās īpašības, kas padara šo tehnoloģiju nesaderīgu ar tradicionālo PPC loģiku un ERP integrētajām ražošanas sistēmām.*
- **RT3:** *Ierosināt risinājumu, kas ļautu pārvarēt identificētās arhitektūras un darbības nesaderības starp AM un TMT ražošanas vidēm.*
- **RT4:** *Ierosināt risinājumu, kas ļautu izmantot AM jaunās funkcijas, jo īpaši tās elastīgumu resursu piešķiršanā un reaģēšanas spēju uz izmaiņām, netraucējot esošo ražošanas sistēmu procesu kontroles funkciju.*

Kopā pētījumu uzdevumi RT1 līdz RT4 nosaka šīs disertācijas pētījuma darba apjomu. Tie virza programmatūras arhitektūras izstrādi, īstenošanas mezožu izvēli un novērtēšanas scenāriju definēšanu.

## **Pētījuma metodika**

Šajā pētījumā kā galvenā metodoloģiskā sistēma izmantota dizaina zinātnes pētījumu metodoloģija (DSRM, angl.: Design Science Research Methodology). DSRM ir īpaši piemērota programmatūras artefaktu izstrādei, jo tā atbalsta itērātīvu pilnveidošanu, konteksta apzinātu problēmu risināšanu un stingru novērtēšanu. Dizaina process atbilst sešām DSRM pamatdarbībām:

1. **Problēmas identificēšana un motivācija:** empīriskā analīze par esošo PPC sistēmu ierobežojumiem AM specifisko ražošanas darba plūsmu apstrādē.
2. **Risinājuma mērķu definēšana:** arhitektūras un funkcionālo prasību izstrāde, pamatojoties uz AM unikālajām īpašībām un rūpnieciskās IT integrācijas ierobežojumiem.

3. Dizains un attīstība: modulāras programmatūras arhitektūras izveide, kas ietver ražošanas pasūtījumu ģeneratoru un koordinācijas loģiku resursu apzinātai darba uzdevumu piešķiršanai.
4. Demonstrācija: arhitektūras īstenošana simulācijas vidē, kas atspoguļo reālus ražošanas scenārijus un ražošanas ierobežojumus.
5. Novērtēšana: sistēmas veiktspējas mērīšana, izmantojot galvenos rādītājus, piemēram, caurlaidspēju, resursu izmantošanu un reaģēšanas spēju mainīgās darba slodzēs.
6. Komunikācija: atklājumu dokumentēšana un izplatīšana gan akadēmiskajām, gan rūpnieciskajām aprindām, izmantojot šo disertāciju un saistītās publikācijas.

Izmantojot šo metodiku, pētījums nodrošina gan zinātnisko precizitāti, gan praktisko nozīmīgumu, ļaujot sistemātiski izstrādāt, ieviest un novērtēt programmatūras arhitektūru, kas risina reālās problēmas, integrējot AM CPPS.

Lai izpildītu attīstības uzdevumu, tika izmantotas vairākas modernas analīzes un datu apstrādes metodes. Simulācijas balstīta novērtēšana tika izmantota, lai pārbaudītu sistēmas veiktspēju dažādos ražošanas scenārijos. Mašīnmācīšanās metodes tika piemērotas ražošanas laika prognozēšanai, balstoties uz sensoru datiem un procesa parametriem. Optimizācijas algoritmi, tostarp ligzdošanas un iepakojšanas algoritmi, tika ieviesti, lai efektīvi izmantotu būvniecības telpu. Blokkēdes tehnoloģija tika izmantota drošai koordinācijai decentralizētos ražošanas tīklos.

## Zinātniskais ieguldījums

Šī disertācija sniedz ieguldījumu informācijas sistēmu jomā, piedāvājot programmatūras arhitektūru, kas novērš neatbilstības starp AM procesiem un uzņēmuma līmeņa PPC sistēmām. Lai gan AM ir labi pētīta no materiālu un mehāniskā viedokļa, tās integrācija rūpnieciskās IT vidēs joprojām ir nepietiekami izpētīta no programmatūras inženierijas viedokļa.

Šī darba galvenie zinātniskie ieguldījumi ir:

- Konkrētai jomai paredzēta atsauces arhitektūra AM saderīgai PPC, kas aptver procesu balstītu pasūtījumu ģenerēšanu, dinamisku resursu plānošanu un reāllaika datu integrāciju CPPS.
- Funkcionāls programmatūras prototips, kas īsteno arhitektūru un demonstrē tās dzīvotspēju, izmantojot simulētus ražošanas scenārijus, kuros iekļauta iekārtu pieejamība, darba uzdevumu apvienošana un materiālu specifiska darba uzdevumu grupēšana.
- Metodoloģiskais satvars AM integrācijai esošajās ERP vidēs, izmantojot modulāras saskarnes, kas ļauj sinhronizēt pasūtījumu un statusa datus ar minimālu sistēmas iejaukšanos.

- Simulācijas balstīta novērtēšanas stratēģija, kas pielāgota CPPS vides prasībām, ietverot galvenos veiktspējas rādītājus, piemēram, reaģēšanas spēju, izmantošanu un plānošanas elastīgumu.
- Arhitektūras paplašināmības demonstrācija, ilustrēta ar papildu moduļiem, kas izmanto mašīnmācīšanos procesu laika prognozēšanai un blokkēdi izklieātu pasūtījumu koordinē.

Risinot gan arhitektūras dizaina, gan praktiskās īstenošanas jautājumus, šis darbs nodrošina pamatu turpmākai pētniecībai un rūpnieciskām lietojumprogrammām viedo ražošanas un CPPS vadītas ražošanas kontroles jomā.

## **Autora publikācijas par promocijas darba tēmu**

Pētījumu rezultāti, kas apkopoti šajā disertācijā, publicēti sekojošos zinātniskajos rakstos, kas indeksēti Elsevier Scopus un/vai Web of Science datubāzēs:

1. Schuhmacher, Jan, Baumung, Wjatscheslav and Hummel, Vera. “An Intelligent Bin System for Decentrally Controlled Intralogistic Systems in Context of Industrie 4.0”. *Procedia Manufacturing* 9 (2017): 13542. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.005>. (Autora ieguldījums 40%: konceptualizācija, programmatūra, rakstīšana, datu apstrāde, metodoloģija, vizualizācija)
2. Baumung, Wjatscheslav, and Fomin, Vladislav V. “Optimization Model to Extend Existing Production Planning and Control Systems for the Use of Additive Manufacturing Technologies in the Industrial Production”. *Procedia Manufacturing* 24 (2018): 22228. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.035>. (Autora ieguldījums 80%: konceptualizācija, programmatūra, rakstīšana, datu apstrāde, metodoloģija, vizualizācija).
3. Baumung, Wjatscheslav, and Fomin, Vladislav V. “Increasing the utilization of Additive Manufacturing resources through the use of blockchain technology for a production network”. *c 13* (2018): 134-141. <https://hdl.handle.net/20.500.12259/36849>. (Autora ieguldījums 80%: konceptualizācija, programmatūra, rakstīšana, datu apstrāde, metodoloģija, vizualizācija).
4. Baumung, Wjatscheslav, and Fomin, Vladislav V. “Framework for Enabling Order Management Process in a Decentralized Production Network Based on the Blockchain Technology”. *Procedia CIRP* 79 (2019): 45660. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.121>. (Autora ieguldījums 80%: konceptualizācija, programmatūra, rakstīšana, datu apstrāde, metodoloģija, vizualizācija).
5. Baumung, Wjatscheslav, Glöckle, Herbert, and Fomin, Vladislav V. “Production Planning and Control (PPC) system architecture for the use in networked Additive Manufacturing (AM) facilities”. In the proceedings of the 11th scientific conference “New Challenges of Economic and Business Development: Incentives for Sustainable Economic Growth” (2019): 64-71.

<https://doi.org/10.22364/ncebd.2019>. (Autora ieguldījums 80%: konceptualizācija, programmatūra, rakstīšana, datu apstrāde, metodoloģija, vizualizācija).

6. Roth, Armin, and Baumung, Wjatscheslav. "Digitalization As Enabler for a Holistic Corporate Performance Management". *Quarterly Review of Business Disciplines (QRBD) Volume 7 May (2020): 53-63*. <https://faculty.utrgv.edu/louis.falk/qrbd/QRBDnov20.pdf>. (Autora ieguldījums 50%: konceptualizācija, programmatūra, rakstīšana, datu apstrāde, metodoloģija, vizualizācija).
7. Baumung, Wjatscheslav. "Design of an Architecture of a Production Planning and Control System (PPC) for Additive Manufacturing (AM)". *Business Information Systems (BIS) June (2020): 391-402*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53337-3\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53337-3_29)

Šajā disertācijā iekļautie pētījumu rezultāti ir publicēti arī šādās zinātniskajās publikācijās, kas nav indeksētas Elsevier Scopus vai Web of Science datubāzēs:

8. Baumung, Wjatscheslav, Glöckle, Herbert, and Fomin, Vladislav V. "Blockchain als Enabler eines dezentralen Produktionsnetzwerkes". *Industrie 4.0 Management (2019): 3942*. [https://doi.org/10.30844/I40M\\_19-1\\_S39-42](https://doi.org/10.30844/I40M_19-1_S39-42). (Autora ieguldījums 80%: konceptualizācija, programmatūra, rakstīšana, datu apstrāde, metodoloģija, vizualizācija).
9. Baumung, Wjatscheslav, and Fomin, Vladislav V. "Predicting production times through machine learning for scheduling Additive Manufacturing orders in a PPC system". *IEEE International Conference of Intelligent Applied Systems on Engineering (ICIASE) (2019): 47-50*. <https://doi.org/10.1109/ICIASE45644.2019.9074152>. (Autora ieguldījums 80%: konceptualizācija, programmatūra, rakstīšana, datu apstrāde, metodoloģija, vizualizācija).

Šajā disertācijā aprakstītie pētījumu rezultāti tika prezentēti šādās konferencēs:

1. Roth, Armin, and Baumung, Wjatscheslav (2018): "Digitalization as enabler for a holistic performance management", 30th annual Conference of the International Academy of Business Disciplines (IABD), from 6th to 8th April 2018, San Francisco, (USA)
2. Baumung, Wjatscheslav (2018): "Optimization Model to Extend Existing Production Planning and Control Systems for the Use of Additive Manufacturing Technologies in the Industrial Production", 4th International Conference on System-Integrated Intelligence: Intelligent, Flexible and Connected Systems in Products and Production, from 19th to 20th of June 2018, Hannover (Germany)

3. Baumung, Wjatscheslav (2018): "Increasing the utilization of Additive Manufacturing resources through the use of blockchain technology for a production network", Joint Proceedings of Baltic DB&IS 2018 Conference Forum and Doctoral Consortium co-located with the 13th International Baltic Conference on Databases and Information Systems (Baltic DB&IS 2018), from 1st to 4th July 2018, Trakai (Lithuania)
4. Baumung, Wjatscheslav (2018): "Framework for Enabling Order Management Process in a Decentralized Production Network Based on the Blockchain-Technology", 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, from 18th to 20th July 2018, Gulf of Naples (Italy)
5. Baumung, Wjatscheslav (2019): "Predicting production times through machine learning for scheduling Additive Manufacturing orders in a PPC system", IEEE International Conference of Intelligent Applied Systems on Engineering (ICIASE), from 27th to 30th April 2019, Fuzhou, Fujian (China)
6. Baumung, Wjatscheslav (2019): "Production Planning and Control (PPC) system architecture for the use in networked Additive Manufacturing (AM) facilities", 11th international scientific conference "New Challenges in Economic and Business Development 2019: Incentives for Sustainable Economic Growth", from 16th to 18th May 2019, Riga (Latvia)
7. Baumung, Wjatscheslav (2020): "Design of an architecture of a production planning and control system (PPC) for Additive Manufacturing (AM)", 23rd International Conference on Business Information Systems 2020 (BIS), from 8th to 10th June 2020, Colorado Springs (USA).

## Darba struktūra

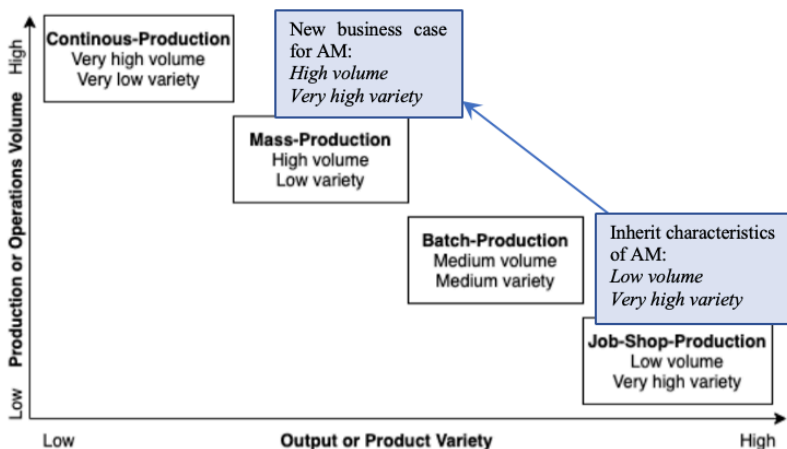
Šī disertācija ir strukturēta saskaņā ar dizaina zinātnes pētījumu principiem un loģiskā secībā virzās no pētījuma problēmas identificēšanas līdz sistēmai orientēta risinājuma izstrādei, ieviešanai un novērtēšanai. 1. nodaļā iepazīstina ar ražošanas sistēmu un AM teorētisko pamatu. Tajā izklāstīti tradicionālās PPC konceptuālie modeļi, uzsvērtas AM specifiskās īpašības un identificētas arhitektūras nesaderības, kas motivē nepieciešamību pēc sistēmas pārprojektēšanas. 2. nodaļā izklāstīta pētījuma paradigma un metodika. Tajā izklāstīti dizaina zinātnes pētījumu filozofiskie pamati, aprakstīts pieņemtais pētījuma process, kas balstīts uz dizaina zinātnes pētījumu metodiku (DSRM), un izskaidroti pētījuma mērķu un novērtēšanas kritēriju atvasināšanu. 3. nodaļā sīki izklāstīta sistēmas arhitektūras izstrāde AM integrācijai esošajās ražošanas vidēs. Tajā iekļauts konceptuāls PPC modelis, definētas procesam specifiskas plānošanas un kontroles metodes un izklāstīta stratēģija AM tehnoloģiju integrācijai. 4. nodaļā aplūkota ierosinātās sistēmas tehniskā īstenošana. Tajā

aprauktā programmatūras prototipa struktūra un darbība, kā arī izskaidrots, kā izstrādātās sastāvdaļas tika ievietotas un testētas simulācijas vidē. 5. nodaļā izklāstīti pētījuma rezultāti, apspriests ieguldījums sistēmu orientētā pētniecībā un artefaktu balstītā zināšanu attīstībā, kā arī novērtēta ierosinātās sistēmas arhitektūras īstenojamība un pielāgojamība. Darbs noslēdzas ar galveno secinājumu kopsavilkumu, praktiskiem ieteikumiem un nākotnes pētījumu virzienu perspektīvām.

# 1. TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS ADITĪVĀS RAŽOŠANAS INTEGRĀCIJAI RAŽOŠANAS IT SISTĒMĀS

Rūpnieciskā AM integrācija esošajās ražošanas vidēs rada gan konceptuālas, gan arhitektoniskas problēmas. AM tehnoloģijas nodrošina ražošanu bez instrumentiem, neatkarīgi no ģeometrijas, ar augstu procesa elastību, un šīs īpašības ir pretrunā ar tradicionālo ražošanas sistēmu strukturēto, secīgo un bieži vien no instrumentiem atkarīgo loģiku. Rezultātā AM darbības uzvedība slikti saskan ar pašreizējās ražošanas plānošanas un kontroles (PPC) un Uzņēmuma resursu plānošanas (ERP) sistēmās iestrādātajiem pieņēmumiem.

1. nodaļa nodrošina teorētisko un tehnisko pamatu AM integrācijas problēmas risināšanai no datorzinātnes perspektīvas. Tā sākas ar tradicionālo ražošanas sistēmu galveno konstruktū un darbības modeļu ieviešanu (1.1. sadaļa), kam seko uzņēmuma līmeņa informācijas sistēmu pārskats (1.2. sadaļa). 1.2.1. sadaļā tiek aplūkota ERP sistēmu struktūra un mērķi, kā arī to attīstība no uz ražošanu vērsta resursu plānošanas uz integrētām biznesa vadības platformām. 1.3. sadaļa koncentrējas uz PPC sistēmām kā ražošanas izpildes funkcionālo kodolu, izceļot plānošanas apvāršņus, kontroles loģiku un informācijas struktūras, ko tās ietver. 1.4. sadaļa nosaka konstruktū telpas konceptuālo pilnīgumu, sintezējot gan tradicionālās ražošanas, gan AM būtiskākos aspektus. Tā abstrahē AM vispārinātās procesa fāzēs un identificē prasības, kas rodas, tās kartējot uz uzņēmuma IT struktūrām. 1.5. sadaļa balstās uz šo analīzi, identificējot specifiskas arhitektoniskas nesaderības starp AM un tradicionālajām PPC sistēmām, tostarp atšķirības procesa mainīgumā, resursu sadalē, darbaspēka specializācijā un plānošanas loģikā. Lai pārvarētu identificētās nesaderības, ir jāsaprot divas šķietami pretrunīgas AM īpašības: ļoti lielā produktu daudzveidība, kas raksturīga AM, un liels ražošanas apjoms, kas raksturīgs tradicionālajām masveida ražošanas sistēmām (1. attēls).



**1. attēls.** Jauns biznesa gadījums Aditīvajai ražošanai: Aditīvās ražošanas ieviešana rūpnieciskā mērogā. Avots: Autora attēlojums, adaptēts no Anil Kumar un Suresh [5, p. 3]

Šī nodaļa noslēdzas, pozicionējot AM integrācijas izaicinājumu kā sistēmas arhitektūras problēmu, kas prasa plānošanas loģikas, datu modeļu un kontroles mehānismu pārdefinēšanu. Identificētās nesaderības nodrošina tehniskās projektēšanas prasības modulāru, integrējamu komponentu izstrādei, kas tiek risinātas ar modeļu un metožu palīdzību nākamajās nodaļās.

## 2. PĒTĪJUMU METODOLOĢIJA SISTĒMAS ARHITEKTŪRAS IZSTRĀDEI

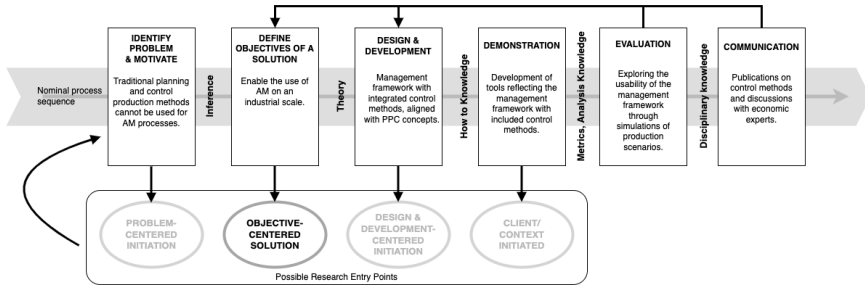
Šajā nodaļā aprakstīta pētījumu paradigma un metodoloģiskais ietvars, kas izmantots programmatūras arhitektūras izstrādei un validācijai, kura nodrošina aditīvās ražošanas integrāciju kibernetiskajās ražošanas sistēmās (CPPS). Ņemot vērā problēmas jomas sarežģītību un novitāti, tika izvēlēta dizaina zinātnes pētījumu (DSR, angl.: Design Science Research) paradigma. Dizaina zinātne radās inženierzinātnēs un datorzinātnēs un koncentrējas uz artefaktu izstrādi un novērtēšanu, kas sniedz risinājumus praktiskām un uz lietojumprogrammām orientētām problēmām [6]. Dizaina zinātnes mērķis ir radīt jaunas zināšanas, veidojot mērķtiecīgus artefaktus, piemēram, modeļus, metodes un sistēmas, un validēt tos ar stingru novērtēšanu.

Nodaļa sākas ar pētījumu paradigmas un metodoloģiskā pamata izklāstu. Tā pamato DSR piemērotību sistēmas līmeņa integrācijas izaicinājumu izpētei un formulē, kā šī paradigma atbalsta gan teorētisko abstrakciju, gan praktisko ieviešanu. Šajā nodaļā tiek izklāstīta pētījuma metodoloģija, detalizēti aprakstot dizaina fāzes, kas tika ievērotas pētījuma procesā. Katra darbība ir aprakstīta saistībā ar vispārīgajiem pētījumu mērķiem. Formalizējot pētījumu procesu ar DSR, šī nodaļa nodrošina gan metodoloģisko stingrību, gan dizaina lēmumu izsekojamību. Iegūtā programmatūras arhitektūra tiek ne tikai validēta pret definētajiem problēmu scenārijiem, bet arī pozicionēta kā vispārīgāks risinājuma ietvars aditīvajai ražošanai specifiskas loģikas ieviešanai uzņēmuma mēroga ražošanas kontroles sistēmās.

Līdz šim ir izstrādāti vairāki metodoloģiski ietvari dizaina zinātnes pētījumiem – ko parasti dēvē par dizaina zinātnes pētījumu metodoloģiju (DSRM). DSRM ietver vairākus atšķirīgus soļus (vai posmus) ar nelielām atšķirībām to nosaukumos vai secībā, kādā tie parādās [7]. Šajā disertācijā tiek pieņemts Peffer's et al. piedāvātais DSRM ietvars [8]. Šis ietvars visu pētījumu procesu sadala 6 aktivitātēs [8] (skatīt 2. attēlu):

1. “Problēmas identifikācija un motivācija” – Nosaka specifisko pētījumu problēmu un norāda nepieciešamā risinājuma palielināto vērtību.
2. “Risinājuma mērķu definēšana” – Risinājuma mērķi tiek iegūti no problēmas un analizēti to īstenojamības ziņā, pamatojoties uz specifiskām zināšanām.
3. “Dizains un izstrāde” – Artefaktu nodrošināšana mākslas struktūru, modeļu, metožu vai instanciju veidā.
4. “Demonstrācija” – Paskaidro artefaktu demonstrāciju, lai parādītu specifiskus problēmu risināšanas aspektus.

5. “Novērtēšana” – Novēro un novērtē artefaktu, lai validētu ieguldījumu problēmu risināšanas jomā.
6. “Komunikācija” – Komunicē pētījumu rezultātus, norādot problēmas nozīmi un izstrādāto artefaktu ar tā ieguldījumu problēmu risināšanā.



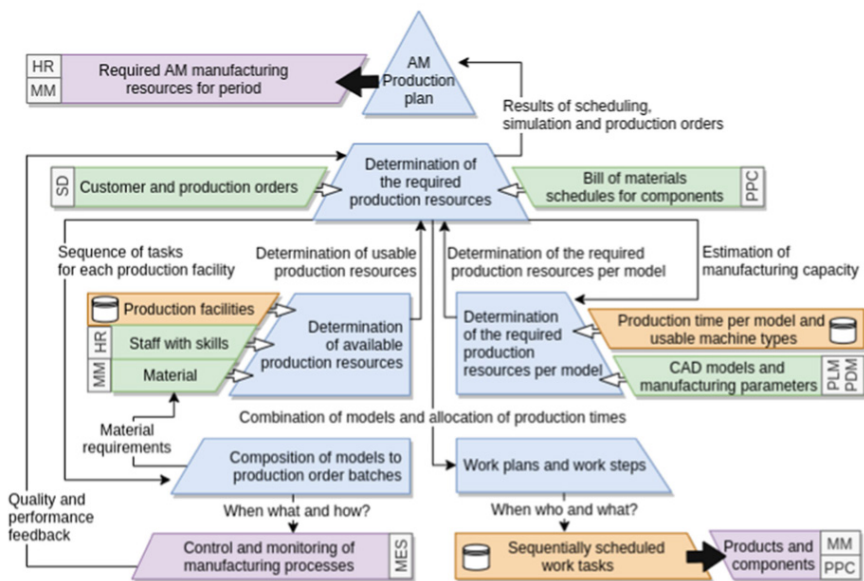
## 2. attēls. Veiktais pētījumu process saskaņā ar Peffers et al. DSRM modeli [8].

Lai gan pētījumu process paredz secīgu aktivitāšu apstrādi, Peffers et al. norāda, ka pētījuma sākuma punkts var atšķirties atkarībā no problēmas veida un risinājuma mērķa. Šī pētījuma sākumpunkts ir “mērķorientēts risinājums” (Objective-Centered Solution). Tas nozīmē, ka pētījumu motivē mērķis izstrādāt risinājumu specifiskai zināmai problēmai.

DSRM modeli definēto uzdevumu transformācija tiek veikta, izmantojot iteratīvu projektēšanas procesu, kas vērsts uz artefakta izstrādi: sistēmas arhitektūru, kas sastāv no skaitļošanas modeļa aditīvās ražošanas nodrošinātai ražošanas plānošanai un kontrolei, kopā ar domēnam specifisko loģiku, kas nepieciešama procesa koordinācijai un izpildei. Ar iterācijām pētījumu procesā tiek analizēti dažādi ražošanas plānošanas un kontroles modeļi, sniedzot visaptverošas jaunas zināšanas par PPC sistēmas stāvokli un funkcionalitāti, lai nodrošinātu aditīvo ražošanu tradicionālajā ražošanas vidē: zināšanas par to, kā dažādi biznesa scenāriji ar mainīgām pasūtījumu situācijām noved pie mainīgām ražošanas prasībām, un kā izmaiņas pieejamajos resursos noved pie mainīgas ražošanas secības. Identificējot “cēloņsakarības un izpētīt mainīgo... attiecību sekas” [9, p. 1144], šīs jaunās zināšanas veido jaunu teoriju “modeļu, metožu [un] principu abstraktā formā” [10, p. 361].

### 3. PPC SISTĒMAS ARHITEKTŪRAS IZSTRĀDE ADITĪVĀS RAŽOŠANAS IESPĒJOŠANAI

Nodaļā tiek prezentēts sistēmas arhitektūras dizains, kas nodrošina Aditīvās ražošanas integrāciju esošajās PPC vidēs. Balstoties uz 1. nodaļā aprakstītajām identificētajām prasībām un arhitektoniskajām nesaderībām, un ņemot vērā 2. nodaļā aprakstīto metodoloģisko pieeju, arhitektūra tiek izstrādāta kā strukturēts plānošanas un kontroles modeļu kopums, kas pielāgots aditīvās ražošanas specifiskajām īpašībām (3. attēls).



3. attēls. Arhitektūra Aditīvās ražošanas PPC ar plānošanas komponentēm un savstarpēji savienotiem ERP moduļiem. Avots: Autora ilustrācija, publicēta rakstā [1]

Piedāvātais arhitektūras modelis sastāv no funkcionālajām zonām, piemēram, plānošanas, grafiku veidošanas, uzraudzības un resursu koordinācijas, un katra funkcija ir saskaņota ar aditīvās ražošanas specifiskajām prasībām. Turpmākās 3. nodaļas sadaļas apraksta dizaina prasību atvasināšanu, piedāvātās arhitektūras struktūru un metožu izstrādi aditīvās ražošanas integrēšanai sistēmiski balstītās ražošanas vidēs. Rezultāti nodrošina pamatu elastīgas,

mērogojamas un kontekstam atbilstošas kontroles sistēmas ieviešanai, kas atbalsta aditīvās ražošanas rūpniecisko izmantošanu esošajās IT un organizatoriskajās infrastruktūrās.

### 3.1. Aditīvās ražošanas PPC sistēmas arhitektūra

Sakarā ar daudzajiem savstarpēji saistītajiem procesiem, kas saistīti ar produktu datiem, PPC sistēmas arhitektūras izstrāde aditīvās ražošanas iekārtām prasa daudzslāņu modeli. Šim nolūkam jāņem vērā ar produktu saistītie dati no cilvēkresursu, materiālu vadības, pārdošanas nodaļas un produktu dzīves cikla pārvaldības jomām sadarbībā ar Ražošanas vadību. Uzdevumu savstarpējā saistība šajos moduļos nozīmē, ka izmaiņas vienā jomā var ietekmēt gan pašreizējos, gan turpmākos procesus. Piedāvātais arhitektūras modelis ietver daudzas procesus ietekmējošas mainīgās. Tās ietver izmaiņas klientu un ražošanas pasūtījumos no pārdošanas nodaļas (SD, angl.: Sales Department) moduļa, darbinieku pieejamību no cilvēkresursu (HR, angl.: Human Resources) moduļa un resursus, piemēram, iekārtas un CAD (angl.: Computer Aided Design) modeļus no produkta dzīves cikla pārvaldības (PLM, angl.: Product Lifecycle Management) moduļa.

Piedāvātā aditīvās ražošanas PPC arhitektūra atbilst noteiktiem slāņu sistēmas projektēšanas principiem visaptverošai veiktspējas pārvaldībai. Šī daudzslāņu pieeja nodrošina sistemātisku datu plūsmu no iegūšanas caur analīzi līdz vizualizācijai, atbalstot gan operatīvo kontroli, gan stratēģisko lēmumu pieņemšanu [11]. Arhitektūra integrē informāciju operatīvajās procesa plūsmās un nodrošina efektīvu korporatīvo resursu izmantošanu, kur datus var apkopot, analizēt un pārbaudīt to savstarpējo saistību gan iekšēji, gan ārēji. Šis pamats ir īpaši svarīgs aditīvās ražošanas integrācijai, jo tas atbalsta sarežģītās datu atkarības un reāllaika koordinācijas prasības, kas raksturīgas kibernetiskajām ražošanas sistēmām (CPPS).

Sākotnējais plānošanas solis ir esošo ražošanas aktīvu novērtēšana, ieskaitot darbaspēku, materiālus un mašīnas. Pēc tam šie aktīvi tiek novērtēti attiecībā pret nepieciešamajiem resursiem, piemēram, CAD dizainiem un klientu pieprasījumiem. Lai noteiktu nepieciešamos resursus, katram modelim katrā iekārtas tipā tiek ģenerēts unikāls mašīnas kods. Šis kods atvieglo parametru ieguvu, simulējot ražošanas procesu, kas palīdz noteikt resursu prasības un darba laiku katrai ražošanas līnijai. Iegūtie dati, kas saistīti ar CAD modeli kā ražošanas parametri, atspoguļo parametru mainīgumu starp viena veida modeļiem. Ja modelis tiek nomainīts, piemēram, atjaunināšanas dēļ, jāreģistrē jauni ražošanas parametri. Partijas ražošanas prasības tiek atvasinātas no materiālu saraksta (PPC) un pārdošanas pasūtījumiem (SD). Tas tiek darīts, maksimāli izmantojot ražošanas telpu iekārtā, vienlaikus ņemot vērā pieejamā laika augšējo robežu.

Saderīgi modeļi tiek sakārtoti, izmantojot ligzdošanas vai iepakojšanas algoritmu. Metožu sadaļā detalizēti aprakstīti precīzi soļi laika ziņā efektīvai priekšmetu sakārtošanai. Viens ierobežojums, piemēram, ir dažādu modeļu brīva kombinācija specifiskās grupēšanas prasības dēļ. Grupēšana ietver detaļu vienlaicīgu salikšanu, kas nepieciešama atsevišķu komponentu salikšanai. Grupētās detaļas var sadalīt starp vairākiem printeriem nākamajiem posmiem, lai nodrošinātu secīgu darba plūsmu. Šiem procesiem tiek izstrādāti maršruti ar nepieciešamajiem soļiem. Darba secība tiek saglabāta, vienas līnijas pabeigšanas laiks un darba ilgums nosaka nākamās līnijas pabeigšanas grafiku. Pēc tam ražošanas līnijas vada MES, kas arī reģistrē un reagē uz anomālijām, piemēram, kļūmēm līnijā, kas potenciāli prasa tehniķa iejaukšanos un fiksē mašīnas statusa izmaiņas. Galaprodukti vai komponenti tiek identificēti kā izvades parametri, atšķirība ir atkarīga no tā, vai tie nāk no klienta vai ražošanas pasūtījuma – ražošanas pasūtījumi prasa turpmākus soļus un turpmāku plānošanu tradicionālajā PPC sistēmā. Galu galā produktu un komponentu kombinācija ražošanas pasūtījumā ir atkarīga no pieejamajiem ražošanas resursiem.

### 3.2. Esošās PPC adaptācijas prasības

PPC konkurējošie mērķi ir ražošana ar augstu grafiku ievērošanu un elastību, ar vienmērīgi augstu jaudas izmantošanu, bet ar maziem krājumiem noliktavā un darbnīcā [12]. Šie mērķi tiek sasniegti, plānojot, jaudas un daudzuma plānošanu un ražošanas kontroli [13]. Lai šos mērķus iekļautu operatīvajās atbildības jomās, Āhenes PPC [14] modelis funkcionālās grupas sadala divās pamatjomās: galvenajos uzdevumos pasūtījumu apstrādei un šķērsriezuma uzdevumos starpnodaļu uzdevumiem (1. tabula). Galvenie uzdevumi sastāv no ilgtermiņa un vidēja termiņa ražošanas un pieprasījuma plānošanas, kā arī īstermiņa un vidēja termiņa iekšējās ražošanas un ārējās iepirkumu plānošanas [15, p. 243]. Savukārt starpnodaļu uzdevumi nodarbojas ar pārklājošiem uzdevumiem, piemēram, pasūtījumu koordināciju, noliktavas vadību un PPC kontroli.

Turpmākā aditīvās ražošanas integrācijas prasību analīze katrai pamatuzdevumu jomai tika strukturēta, izmantojot divus vērtēšanas kritērijus. “Nepieciešamie datu ievadi” norādīja, vai uzdevumam nepieciešami ārēji datu ievadi no citiem sistēmas moduļiem vai reāllaika ražošanas dati. “Plānošanas loģikas komponents” identificēja uzdevumus, kuriem nepieciešami jauni vai modificēti plānošanas algoritmi, kas īpaši pielāgoti aditīvās ražošanas procesa īpašībām, piemēram, veidošanas telpas optimizācija vai laika ziņā jutīga plānošana. Lai sasniegtu mērķi integrēt aditīvo ražošanu zināmos rūpnieciskās ražošanas procesos, tika pārbaudīti PPC sistēmu pamatuzdevumi un pielāgoti aditīvās ražošanas specifiskajām procesa prasībām.

### 1. tabula. PPC pamatzudevumi un šķērsgriezuma uzdevumi

Pamatzudevumi	Šķērsgriezuma uzdevumi
Ražošanas plānošana <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pārdošanas plāns</li> <li>• Krājumu plānošana</li> <li>• Primāro vajadzību plānošana</li> <li>• Resursu aptuvena plānošana</li> </ul>	Pasūtījumu koordinācija <ul style="list-style-type: none"> <li>• Piedāvājumu apstrāde</li> <li>• Pasūtījumu precizēšana</li> <li>• Pasūtījumu aptuvena plānošana</li> <li>• Resursu aptuvena plānošana</li> <li>• Pasūtījumu vadība</li> </ul>
Ražošanas pieprasījuma plānošana <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bruto sekundārā pieprasījuma noteikšana</li> <li>• Neto sekundārā pieprasījuma noteikšana</li> <li>• Iepirkuma veida piešķiršana</li> <li>• Izpildes laika plānošana</li> <li>• Jaudas prasību noteikšana</li> <li>• Jaudas koordinācija</li> </ul>	Noliktavas vadība <ul style="list-style-type: none"> <li>• Noliktavas kustību vadība</li> <li>• Krājumu kontrole</li> <li>• Glabāšanas vietas un glabāšanas tvertnes vadība</li> <li>• Partijas vadība</li> <li>• Krājumu kontrole</li> <li>• Inventarizācija</li> </ul>
Iekšējās ražošanas plānošana un kontrole <ul style="list-style-type: none"> <li>• Partijas lieluma aprēķins</li> <li>• Smalkā plānošana</li> <li>• Detalizēta resursu plānošana</li> <li>• Secības plānošana</li> <li>• Pieejamības pārbaude</li> <li>• Pasūtījumu izdošana</li> <li>• Pasūtījumu uzraudzība</li> <li>• Resursu uzraudzība</li> </ul>	PPC-Kontrole <ul style="list-style-type: none"> <li>• Informācijas apstrāde</li> <li>• Informācijas novērtēšana</li> <li>• Konfigurācija</li> </ul>
Ārējās iepirkumu plānošana un kontrole <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pasūtījumu rēķins</li> <li>• Konkursa pieprasījums un novērtēšana</li> <li>• Piegādātāja izvēle</li> <li>• Pasūtījumu izdošana</li> <li>• Pasūtījumu uzraudzība</li> </ul>	

Avots: Autora ilustrācija, balstīta uz [16]

### 3.3. Efektīva būvniecības telpas izmantošana, ņemot vērā noteiktu laika periodu

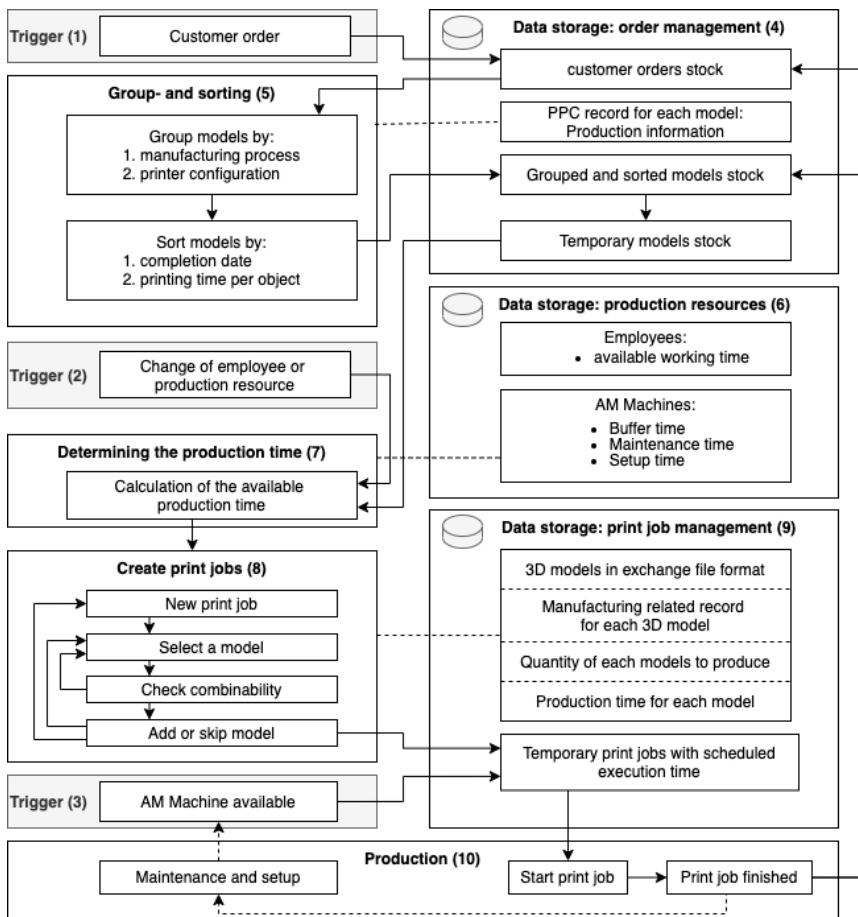
Galvenais izaicinājums aditīvās ražošanas ieviešanai rūpnieciskās ražošanas iekārtās ir daudzu procesu optimizācijas un kontroles metožu integrācija, kas pārskatītas 3. nodaļā, lai izveidotu ražošanas pasūtījumus. Ekonomiski efektīvai uzstādīšanas telpas izmantošanai aditīvajā ražošanā ražošanas pasūtījumi jāplāno tā, lai pabeigšanas laiki un vietas tiktu ņemti vērā kopā ar iekārtu un personāla pieejamību. Tam izšķiroša nozīme ir PPC detalizētās plānošanas un secības plānošanas jomām. Papildus plānošanas optimizācijai, reāllaika procesa kontroles ieviešana ražošanas laikā var vēl vairāk uzlabot būvniecības

telpas izmantošanu, novēršot būvniecības kļūmes, kas citādi prasītu atkārtotu drukāšanu, tādējādi maksimāli palielinot pieejamās ražošanas jaudas efektīvu izmantošanu [4]. Laika orientētas optimizācijas integrācija ar telpas izmantošanu ir galvenais arhitektoniskais izaicinājums aditīvās ražošanas sistēmās. Šis izaicinājums prasa sistemātiskus ietvarus aditīvās ražošanas plānošanas problēmu formalizēšanai, jo tradicionālās ligzdošanas un plānošanas koncepcijas ir jāpaplašina, lai risinātu unikālās apakšproblēmas, kas raksturīgas aditīvajai ražošanai, piemēram, pareizu detaļu orientāciju un efektīvu heterogēnu detaļu izvietojumu vienā būvniecības ciklā [17].

Lai ražošanas pasūtījumi tiktu pabeigti un sākti darba laikā, ir nepieciešams dinamiski piešķirt drukājamos objektus starp pieejamajiem printeriem. Ražošanas pasūtījumi netiek piešķirti ražošanas līnijai ar noteiktu fiksētu objektu skaitu un pēc tam izpildīti atkal un atkal, kā tas būtu tradicionālos ražošanas procesos, bet tiek pakāpeniski un dinamiski ģenerēti atbilstoši jaudas izmantošanai, pieprasījumam un ražošanas resursu pieejamībai.

Tāpēc šeit tiek prezentēts modelis, ar kuru ligzdošanas algoritmi uzstādīšanas telpas izmantošanai tiek paplašināti ar laika aspektu, tādējādi var panākt sinhronizāciju ar personāla pieejamību (4. attēls). Šis modelis nodrošina pamatu aditīvās ražošanas plānošanai un secības noteikšanai. Šis modelis ir balstīts uz autora publicēto darbu [18].

Izstrādātais optimizācijas modelis uz laiku orientētai aditīvās ražošanas pasūtījumu plānošanai parāda ražošanas pasūtījumu izveides procedūru no ievades parametriem: klientu pasūtījumiem (1), ražošanas resursu izmaiņām (2) un ražošanas iekārtu pieejamības (3). Trīs aktivizētāji liek modelim iziet cauri dažādām procesa jomām. Procesu plūsma ar dažādiem aktivizētājiem un aktivitātēm ir detalizēti aprakstīta disertācijas 3. nodaļā. Šī dinamiskā pieeja ir būtiska, jo aditīvās ražošanas ekonomiskie un vides ieguvumi ir ļoti atkarīgi no ražošanas parametriem, piemēram, apjoma, detaļu ģeometrijas un materiālu efektivitātes, tādēļ ir nepieciešamas intelektuālas plānošanas sistēmas, kas var optimizēt šos faktorus, vienlaikus ņemot vērā slēptās izmaksas, kas saistītas ar energoietilpīgu izejvielu ražošanu un lēnākiem ražošanas tempiem [19].



4. attēls. Optimizācijas modelis uz laiku orientētai aditīvās ražošanas pasūtījumu plānošanai. Avots: Autora ilustrācija, publicēta [18].

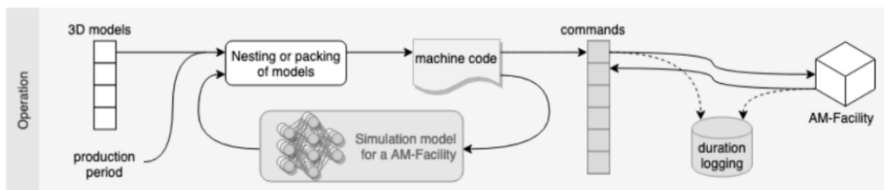
### 3.4. Metožu izstrāde aditīvās ražošanas specifiskajām īpašībām

Lai risinātu specifiskus izaicinājumus aditīvās ražošanas integrēšanā uzņēmuma līmeņa PPC sistēmās, tika izstrādātas divas papildinošas metodes, kas paplašina piedāvāto sistēmas arhitektūru. Šīs metodes koncentrējas uz prognozējošo plānošanu, izmantojot mašīnmācīšanos (ML), un decentralizētu pasūtījumu koordināciju, izmantojot blokķēdes (BC, angl.: Blockchain) tehnoloģiju.

### 3.4.1. Mašīnmācīšanās prognozējošajai plānošanai

Precīza ražošanas laiku prognozēšana ir kritiska prasība plānošanas efektivitātei aditīvās ražošanas vidēs, jo drukāšanas ilgums atšķiras atkarībā no ģeometrijas, materiāla un procesa parametriem. Lai to risinātu, tika izstrādāts un integrēts mašīnmācīšanās modulis PPC arhitektūrā. Izmantojot simulācijas un sensoru datus, tika apmācīti regresijas modeļi, lai prognozētu būvēšanas laikus, pamatojoties uz šķēlēšanas parametriem, slāņa augstumu, aizpildījuma blīvumu un materiāla veidu. Šie modeļi ļauj PPC sistēmai precīzāk paredzēt ražošanas ilgumu un dinamiski pielāgot darbu secību. Šī pieeja uzlabo sistēmas plānošanas precizitāti un nodrošina uz datiem balstītu reakciju uz mainīgām darba slodzēm.

Datu pamats prognozējošo modeļu izstrādei un validācijai ir ilustrēts 5. attēlā, kurā parādīta ražošanas pasūtījuma izpilde un visu attiecīgo apstrādes laiku reģistrēšana aditīvās ražošanas procesa ķēdē. Šis reģistrētās laika rindas nodrošināja empīrisku pamatu mašīnmācīšanās algoritmu apmācībai un testēšanai. Balstoties uz šo datu kopu, tika izveidota apmācības struktūra, kas ņēma vērā gan tiešos procesa parametrus, piemēram, ģeometriju un šķēlēšanas konfigurāciju, gan netiešos faktorus, piemēram, iekārtas noslogojumu vai vides apstākļus. Iegūtie modeļi tika validēti, izmantojot simulācijas ciklus, salīdzinot prognozētos un faktiskos būvēšanas ilgumus, ļaujot nepārtraukti pilnveidot prognozēšanas precizitāti.



5. attēls. Ražošanas pasūtījuma izpilde ar apstrādes laiku reģistrēšanu. Avots: Autora ilustrācija, publicēta rakstā [20]

Apvienojot detalizētu procesu reģistrēšanu ar uz datiem balstītu modeļu apmācību un uz simulācijām balstītu validāciju, izstrādātais mašīnmācīšanās modulis nodrošina pamatu prognozējošajai plānošanai aditīvās ražošanas PPC sistēmā. Tas ļauj pāriet no statistiskas plānošanas uz adaptīvu, pašmācīšanās ražošanas kontroli, tādējādi palielinot aditīvās ražošanas operāciju kopējo efektivitāti un uzticamību.

### 3.4.2. Blokkēde decentralizētai pasūtījumu koordinācijai

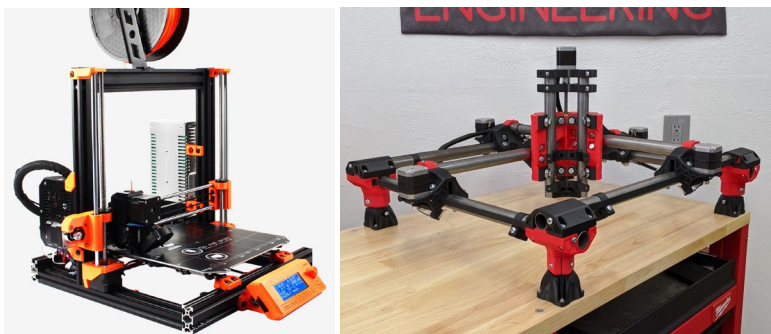
Tā kā aditīvā ražošana arvien vairāk atbalsta izplatītus un tiklotus ražošanas scenārijus, datu integritāte un uzticēšanās starp iesaistītajām iekārtām kļūst būtiska. Lai risinātu šos izaicinājumus, tika izstrādāts un integrēts blokkēdes balstīts koordinācijas modulis PPC arhitektūrā. Šis modulis nodrošina drošu, pārskatāmu un nesankcionētu ražošanas pasūtījumu un statusa datu apmaiņu starp decentralizētiem ražošanas partneriem. Gudrie līgumi tiek izmantoti, lai automatizētu pasūtījumu validāciju, apstiprināšanu un izsekošanu PPC sistēmā, nodrošinot izsekojamību, vienlaikus samazinot administratīvās izmaksas un manuālo koordinācijas piepūli.

Ieviesta koncepcija ļauj ražošanas partneriem mijiedarboties kopīgā digitālajā vidē, kur visas transakcijas un ar pasūtījumiem saistītie notikumi tiek pastāvīgi reģistrēti izklaidētajā virsrāmātā. Šī struktūra nodrošina, ka katram dalībniekam ir piekļuve konsekventai un pārbaudāmai informācijai par pasūtījuma statusu un izpildes gaitu. Izslēdzot centralizētus starpniekus, sistēma samazina komunikācijas latentumu un potenciālās kļūdas, vienlaikus palielinot atbildību un uzticību visā tīklā.

Blokkēdes modulis tika novērtēts, simulējot decentralizētu ražošanas tīklu, kas pārstāv vairākas autonomas ražošanas vietas. Rezultāti parādīja, ka decentralizēta koordinācija var uzlabot pasūtījumu pārvaldības uzticamību un efektivitāti, nodrošinot pārskatāmu izpildi un automātisku līgumisku noteikumu izpildi. Šie atklājumi apstiprina blokkēdes tehnoloģijas potenciālu kā iespējošanas mehānismu drošai un efektīvai sadarbībai izplatītās ražošanas vidēs, atbalstot plašāku mērķi — digitāli integrētas un autonomas ražošanas sistēmas.

## 4. IEVIEŠANA

4. nodaļā tiek prezentēta izstrādātā risinājuma ieviešana ražošanas darbu ģenerēšanai no strukturētiem produktu datiem, demonstrējot piedāvātās aditīvās ražošanas plānošanas un kontroles sistēmas galveno komponentu programmatūras realizāciju. Ieviestais drukas darbu ģenerators veido centrālo kontroles moduli sistēmas arhitektūrā, pārveidojot materiālu sarakstā (BOM) balstītas detaļu definīcijas izpildāmos ražošanas pasūtījumos. Šie ieraksti, kas parasti iegūti no produktu BOM, var ietvert arī klientam specifiskas vai rezerves daļas. Lai novērtētu ieviestā ģeneratora funkcionālo darbības jomu un veikspēju, tika izmantots testa datu kopums, kas sastāvēja no diviem produktiem ar kopējo 57 unikālām un 75 kopējām detaļām. Šis datu kopums kalpoja kā atsauce galveno sistēmas funkcionalitāšu demonstrēšanai un ir sīkāk aprakstīts turpmākajās sadaļās. Ieviešana parāda, kā digitālā procesa loģika var tikt operacionalizēta, lai atbalstītu mērogojamu un efektīvu aditīvās ražošanas plānošanu. Šī ieviešanas pieeja atbilst noteiktiem aditīvās ražošanas pasūtījumu ģenerēšanas principiem, kas ir validēti tiklotās ražošanas vidēs, kur dinamiska plānošana un resursu koordinācija ir būtiska optimālas caurlaidības sasniegšanai [21]. Lai veiktu simulācijas ar tuvu realitātei, kā datu kopa tika izvēlēti divi produkti ar lielu skaitu drukāto detaļu. Šie divi produkti tika izvēlēti to lielās detaļu atšķirības dēļ izmēra un ražošanas laika ziņā. Pirmais produkts ir pašreplīcjoša ātrās prototipēšanas iekārta RepRap. Otrais produkts ir Mostly Printed CNC (MPCNC), atvērta koda CNC (angl.: Computer Numerical Control) mašina, kas, kā norāda nosaukums, seko RepRap idejai un sastāv galvenokārt no drukātām detaļām un standarta materiāliem [22] (skatīt 6. attēlu).



6. attēls. 1. produkts – Prusa 3D printeris ar oranžā krāsā drukātām detaļām (pa kreisi) un 2. produkts – MPCNC frēzmašīna ar melnā un sarkanā krāsā drukātām detaļām (pa labi). Avots: PRUSA RESEARCH, 2022 un V1 Engineering 2020

Prusa 3D printeris sastāv no 32 dažādām detaļām ar kopējo skaitu 39 detaļas, no kurām lielākā ir 11,4 cm × 18,5 cm × 3,5 cm. Savukārt MPCNC frēzmašīna sastāv no 25 dažādām detaļām ar kopējo skaitu 53 detaļas, kur lielākā detaļa ir 14,8 cm × 7,5 cm × 14,0 cm.

## 4.1. Ģenerators drukas darbiem

Ģenerators ir sadalīts 4 posmos. Sākumpunkts ir materiālu saraksti ar atbilstošiem 3D modeļiem STL formātā. Pirmais un otrais posms ietver informācijas vākšanu par katru detaļu, piemēram, ražošanas laiku, izmēriem un pozicionēšanu. Trešajā posmā tiek izveidota detaļu secība, kas jāņem vērā detaļu ģenerēšanai. Ceturtais un pēdējais posms ģenerē drukas darbus.

### 4.1.1. Informācijas vākšana, izmantojot šķēlēšanu (slicing)

Lai apkopotu informāciju par katras individuālās produkta detaļas nepieciešamo ražošanas laiku, tā tiek automātiski sagriezta, pamatojoties uz izstrādāto lietojumprogrammas plūsmu. Šķēlēšanai tiek izmantots atvērtā koda PrusaSlicer [23], kas ir Slic3r [24] saraksta atzarojums. Automatizēta sagriešana tiek veikta, izmantojot komandrindas interfeisu (CLI. Angl.: Command Line Interface). CLI var izmantot, lai veiktu lielu skaitu operāciju partijas un kā daļu no sarežģītām darba plūsmām. Šķēlēšanai, izmantojot CLI, papildus 3D modelim STL formātā (angl.: Standard Triangulation Language) un mērķa direktorijai tiek norādīti trīs konfigurācijas dati. Konfigurācijas dati sastāv no paša 3D printera konfigurācijām, materiāla un drukas iestatījumiem.

Papildus jau zināmajam nosaukumam un ceļam uz STL failu, šķēlēšanas rezultātā tika pievienots ražošanas laiks sekundēs un materiālu patēriņš gramos. Skaitis nāk no aprakstītā produkta materiālu saraksta un turpmāk kalpo visu drukas darbu ģenerēšanai produktam. Automatizētā šķēlēšanas izpilde, izmantojot programmas plūsmu, noved produkta MPCNC pie šāda datu kopuma (skatīt 2. tabulu).

No 2. tabulā redzamajiem datiem tagad var iegūt precīzu priekšstatu par MCNC frēzmašīnas ražošanas piepūli. Var redzēt, ka Core detaļai ir garākais ražošanas laiks – vairāk nekā 21 stunda, un tā arī prasa visaugstāko patēriņu – vairāk nekā 197 gramus. Kopumā ražošanas laiks visām 53 frēzmašīnas detaļām ir 6 dienas, 1 stunda un 38 minūtes, ar materiāla patēriņu 1,28 kilogrami. Tāda pati aprēķinu kopa tika veikta otrajam produktam – Prusa 3D printerim, kā sīkāk aprakstīts 4. nodaļā.

**2. tabula. Ar šķelēšanu pievienotās informācijas pārskats par otro novērtēšanas datu kopu MPCNC frēzmašīnas produktam (lauki ar pelēku fonu ir pievienoti)**

Detaļa	Daudzums	Drukas laiks (hh:mm:ss)	Materiāla patēriņš (gramos)
Core	1	21:53:38	197.49
Core Clamp	3	1:53:08	15.06
Core Clamp Y	1	1:42:15	14.09
Core Z Clamp 1	2	0:43:08	3.64
Core Z Clamp 2	2	0:43:11	3.64
Corner Bottom Mirrored	2	4:47:04	43.18
Corner Bottom	2	4:47:14	43.18
Corner Leg Lock	4	1:44:20	16.59
Corner Top Mirrored	2	4:07:51	37.4
Corner Top	2	4:06:23	37.39
Feet	4	2:59:28	28.16
Lower Belt Mirrored	2	0:45:18	6.0
Lower Belt	2	0:45:22	5.99
Lower Tool Plate	1	1:02:33	7.08
Nut Trap	2	0:54:46	7.28
Stop Block	4	0:41:18	5.02
Truck Mirrored	2	9:19:40	83.48
Truck	2	9:19:35	83.47
Truck Clamp	4	0:38:02	4.64
Upper Belt Mirrored	2	0:45:42	6.28
Upper Belt	2	0:45:50	6.28
Upper Tool Plate	1	0:40:01	4.6
Wire Darryl	2	0:11:17	1.34
Z Coupler	1	3:08:03	28.04
Z Motor	1	3:15:36	29.21

Avots: Autora ilustrācija

#### 4.1.2. Informācijas vākšana no 3D modeļiem

Papildus šķelēšanas procesā iegūtajai informācijai, turpmāku ar ražošanu saistītu informāciju var iegūt no pašiem 3D modeļiem. Tās tiek izstrādātas programmas plūsmas otrajā posmā informācijas ieguvei aditīvās ražošanas PPC sistēmā un aprakstītas šajā posmā. 3D modeļi tiek nodrošināti STL faila

formātā, kas apraksta modeļus ar trīsstūrveida šķautnēm un to virsotnēm. Virsotņu apstrādei tika izmantota Python numpy-stl pakotne [25], kas nodrošina virsotņu nolaišanās metodes. No atsevišķu stūru punktu analīzes var ģenerēt divas būtiskas aditīvās ražošanas PPC svarīgas informācijas vienības, nosakot maksimālās vērtības koordinātu sistēmas pozitīvajās un negatīvajās zonās.

#### 4.1.3. Secības un rindu izveide

Kamēr pirmie divi posmi bija paredzēti tikai informācijas iegūšanai no ievades datiem, sākot ar šo un nākamajiem posmiem šie dati tiek apstrādāti paši. Šajā posmā tiek izveidota rinda ar secību, kurā modeļi tiek apskatīti pa vienam, lai veidotu drukas darbus. Šim nolūkam modeļi vispirms tiek sakārtoti pēc to ražošanas laika, sākot ar garāko ražošanas laiku. Rezultātā tiek iegūta pilnībā sakārtota rinda, kurā detaļas var izņemt pēc plānošanas drukas darbam. Šī ir tabulas teksta daļa, kas apraksta MPCNC produkta rindu pirmajām 10 detaļām, ar secību, kādā detaļas tiek apskatītas viena pēc otras, lai izveidotu drukas darbus

**3. tabula.: Rinda ar secību pirmajām un pēdējām 10 izstrādājuma MPCNC novērtēšanas detaļām**

Nr.	Detaļa	Drukšanas laiks (hh:mm:ss)	Nr.	Detaļa	Drukšanas laiks (hh:mm:ss)
1	Core	21:53:38	44	Stop Block	0:41:18
2	Truck Mirrored	9:19:40	45	Stop Block	0:41:18
3	Truck Mirrored	9:19:40	46	Stop Block	0:41:18
4	Truck	9:19:35	47	Upper Tool Plate	0:40:01
5	Truck	9:19:35	48	Truck Clamp	0:38:02
6	Corner Bottom	4:47:14	49	Truck Clamp	0:38:02
7	Corner Bottom	4:47:14	50	Truck Clamp	0:38:02
8	Corner Bottom Mirrored	4:47:04	51	Truck Clamp	0:38:02
9	Corner Bottom Mirrored	4:47:04	52	Wire Darryl	0:11:17
10	Corner Top Mirrored	4:07:51	53	Wire Darryl	0:11:17

Avots: Autora ilustrācija

#### 4.1.4. Drukāšanas darbu izveidošana

Šis posms ir visaptverošākais un noslēdzošais drukāšanas darbu ģenerēšanas posms. Tā pamatā ir galvenokārt rinda, kā arī visa iepriekšējos posmos ģenerētā informācija, piemēram, ražošanas laiks, ierobežojošais paralēlskaldnis

un absolūtā pozicionēšana koordinātu sistēmā. Turklāt ir dati par pieejamo ražošanas laiku vienam drukāšanas darbam, attālumu starp detaļām un printera izmantojamās uzstādīšanas telpas dimensiju definīciju.

Pēc tam, kad visi iepriekšējos posmos ģenerētie dati ir nolasīti, detaļas tiek ņemtas saskaņā ar rindas kārtību un pārbaudītas atbilstoši šādiem punktiem, vai tās var pievienot drukāšanas darbam:

1. Pārbaudīt, vai pieejamais ražošanas laiks ir pietiekams detaļas ražošanas laikam;
2. Taisnstūra izveide, pamatojoties uz detaļas ierobežojošo paralēlskaldni, un pārbaude, izmantojot ligzdošanas algoritmu, vai būvējamajā telpā ir pietiekami daudz vietas šai detaļai.

Ja abi punkti atbilst, detaļa tiek izņemta no rindas. Pēc tam process tiek atkārtots ar nākamo detaļu rindā. Ja viens no iepriekšējiem diviem punktiem neatbilst, detaļa netiek izņemta no rindas, un process tiek atkārtots ar nākamo detaļu. Šis process atkārtojas līdz pēdējai detaļai rindā. Šī pieeja risina AM specifiskās ražošanas plānošanas problēmas, kas identificētas nesenantos ietvaros, kuros tiek uzsvērta nepieciešamība pēc sistemātiskiem risinājumiem tehnoloģijai specifiskām problēmām, tostarp detaļu izvietojuma optimizācijai un ražošanas pasūtījumu apstrādei, kas būtiski atšķiras no tradicionālajām ražošanas plānošanas pieejām [17].

## 4.2. Ieviešanas novērtējums ar simulācijas datiem

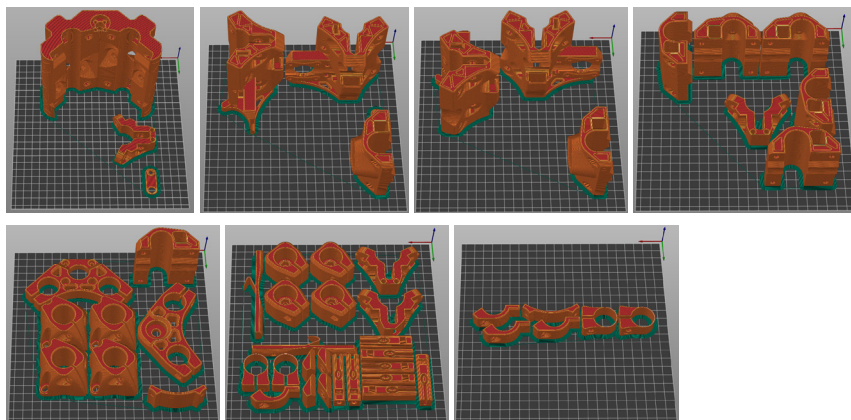
MPCNC novērtējuma produkta ieviešanas izpilde rada 7 drukāšanas darbus, kas ir uzskaitīti 4. tabulā un redzami 7. attēlā.

Acīmredzama problēma ir drukāšanas darbs ar ID 4, kur ražošanas laiks pārsniedz norādīto laiku. Lai atrisinātu šo problēmu, ir divas iespējas. No vienas puses, pēc tam, kad ir konstatēts, ka pieejamais ražošanas laiks ir pārsniegts, detaļa drukāšanas darbā būtu jāizņem un jāapmaina pret detaļu ar īsāku ražošanas laiku. Šim nolūkam ligzdošanas process var tikt pārtraukts, un detaļu var apmainīt pret detaļu ar nākamo īsāko ražošanas laiku. Tomēr apmaiņai būtu jāatkārto visi aprakstītie procesi, sākot no ligzdošanas. Alternatīvi var mēģināt apmainīt detaļu no drukāšanas darba pret detaļu ar īsāku ražošanas laiku drukāšanas darbā ar daudz vairāk atlikušā ražošanas laika, piemēram, detaļu no drukāšanas darba ar ID 7. Tam būtu priekšrocība, ka mainītos tikai detaļas drukāšanas darbos ar ID 4 un 7, un tāpēc tikai šiem diviem būtu jāveic aprakstītā procedūra, sākot no ligzdošanas. Tomēr šeit sarežģītība ir skaidri lielāka, lai izvēlētos piemērotās detaļas un drukāšanas pasūtījumus, nekā vienkārši pilnīgs jauns aprēķins. Galu galā piemērotākā risinājuma izvēli var noteikt pieejamās aprēķinu jaudas.

**4. tabula. Ģenerētie drukāšanas darbi novērtējuma produktam MPCNC frēzmašīna**

Darba ID	Iekļautās detaļas	Aprēķinātais drukas laiks (hh:mm:ss)	Drukšanas laiks no gcode (hh:mm:ss)
1	Core, Core Clamp, Wire Darryl	23:58:03	23:59:52
2	Truck Mirrored, Truck Mirrored, Corner Bottom, Wire Darryl	23:37:51	23:32:48
3	Truck, Truck, Corner Bottom	23:26:24	23:30:25
4	Corner Bottom Mirrored, Corner Bottom Mirrored, Corner Top Mirrored, Corner Top Mirrored, Corner Top, Core Clamp	23:49:21	24:30:27
5	Corner Top, Z Motor, Z Coupler, Feet, Feet, Feet, Feet, Lower Tool Plate	23:30:27	23:05:28
6	Core Clamp, Corner Leg Lock, Corner Leg Lock, Corner Leg Lock, Corner Leg Lock, Core Clamp Y, Nut Trap, Nut Trap, Upper Belt, Upper Belt, Upper Belt Mirrored, Upper Belt Mirrored, Lower Belt, Lower Belt, Lower Belt Mirrored, Lower Belt Mirrored, Core Z Clamp 2, Core Z Clamp 2, Core Z Clamp 1, Core Z Clamp 1, Stop Block 23_5, Stop Block 23_5, Truck Clamp	23:19:55	21:56:44
7	Stop Block 23_5, Stop Block 23_5, Upper Tool Plate, Truck Clamp, Truck Clamp, Truck Clamp	3:56:43	3:37:50

Avots: Autora ilustrācija



**7. attēls. Ģenerētie drukāšanas darbi ID 1 līdz 7 novērtējuma produktam MPCNC (pirmā rinda augšā pa kreisi, sākot ar ID1 līdz 4, un otrā rinda ID 5 līdz ID 7).**

Avots: Autora ilustrācija

Novērtēšanas procesā tika apskatīts aprēķinu laiks, kas nepieciešams mērogoto daudzumu ražošanai. Aprēķinu laiks tiek izveidots diviem novērtējuma produktiem daudzumiem 5, 10, 20, 50 un 100 gabali un ir sadalīts aprēķinu sekcijās, kā parādīts 5. tabulā.

Kā ir parādījis aprēķinu laika mērījums iepriekšējai drukāšanas darbu ģenerēšanai, pārejas procedūra no ligzdošanas algoritma uz 3D modeļa izvietojumu un sadalīšanu šķēlēs ir daudzārt visvairāk laikietilpīgākā.

**5. tabula. Ražoto gabalu skaita mērogošana un to aprēķinu laiks frēzmašīnas novērtējuma produktam** (ar maksimālo ražošanas laiku 24 stundas)

Izstrādājumu daudzums	Drukas darbu skaits	Aprēķinu ilgums (h:mm:ss.ms)			
		Detalju izvietojšana	Pārvietošanas izvietojšana	Failu sagatavošana (slicing)	Kopējais laiks
5	32	0:00:00.1	0:02:22.5	0:14:07.5	0:16:30.2
10	64	0:00:00.3	0:04:52.9	0:26:56.5	0:31:49.9
20	128	0:00:01.4	0:08:51.9	0:50:34.2	0:59:27.6
50	318	0:00:07.5	0:21:51.1	2:16:47.1	2:38:46.5
100	638	0:00:28.8	0:44:49.4	4:32:45.7	5:18:05.7

Avots: Autora ilustrācija

Optimizācija tam ir jau ģenerēto un šķēlēs sadalīto drukāšanas darbu atkārtota izmantošana. Šim nolūkam pēc tam, kad teorētiskie drukāšanas darbi ir izveidoti, ievērojot laika ilgumu un ligzdošanas izpildi, tiek pārbaudīts, vai drukāšanas darbs jau ir ģenerēts šī drukāšanas darba detaļu konstelācijai. Ja tas eksistē, pārejas un sadalīšanas šķēlēs soļi tiek izlaisti, un jau izveidotais drukāšanas darbs tiek izmantots atkārtoti. 6. tabula parāda ģenerētos drukāšanas darbus ar aprēķinu laiku, izmantojot šo optimizāciju.

**6. tabula. Ražošanas daudzumu mērogošana ar optimizētu aprēķinu laiku, atkārtoti izmantojot ģenerētos drukāšanas darbus un vairākpavedienu režīmu novērtējuma produktam frēzmašīna** (ar maksimālo ražošanas laiku 24 stundas)

Izstrādājumu daudzums	Drukas darbu skaits	Sagatavotie drukas darbi	Aprēķinu ilgums (h:mm:ss.ms)			
			Detalju izvietojšana	Pārvietošanas izvietojšana	Failu sagatavošana (slicing)	Kopējais laiks
5	32	18	0:00:00.1	0:00:31.9	0:05:37.9	0:06:09.9
10	64	22	0:00:00.2	0:00:44.1	0:09:24.4	0:10:08.8
20	128	29	0:00:01.0	0:00:47.2	0:11:50.0	0:12:38.3
50	318	37	0:00:06.1	0:00:55.7	0:15:55.4	0:16:51.3
100	638	37	0:00:24.4	0:00:55.7	0:15:55.4	0:17:15.6

Avots: Autora ilustrācija

## 5. PĒTĪJUMA REZULTĀTI PAR SISTĒMAS NOVĒRTĒJUMU UN PĒTĪJUMA IZNĀKUMIEM

Šajā nodaļā ir sniegti ieviešanas un novērtēšanas rezultāti piedāvātajai sistēmas arhitektūrai AM integrācijai. Izstrādātā arhitektūra tika novērtēta, realizējot vairākas sistēmas komponentes un to mijiedarbību simulētās ražošanas vidēs. Automātiskas ražošanas pasūtījumu ģenerēšanas un koordinācijas metodoloģija tika realizēta kā daudzslāņu plānošanas un kontroles sistēma, atbalstot gan centralizētu, gan decentralizētu izpildi. **Galvenais šī pētījuma zinātniskais ieguldījums ir laikam pieskaņota būvējamās telpas izmantošana, kas kalpo par aprēķinu pamatu turpmākajiem kontroles slāņiem.** Turklāt arhitektūra ietver intelektuālus un decentralizētus paplašinājumus, kas uzlabo plānošanas precizitāti un koordinācijas efektivitāti kiberfizikālu ražošanas vidu ietvaros. Šo pieeju kombinācija demonstrē piedāvātā risinājuma praktisko dzīvotspēju un tā spēju atbalstīt mērogojamu un elastīgu AM ražošanu digitāli integrētās uzņēmuma sistēmās.

Izstrādātās arhitektūras novērtējums apstiprināja, ka sistēma nodrošina augstu elastības un pielāgojamības pakāpi aditīvās ražošanas resursu pārvaldībā. Simulācijās balstīta testēšana apstiprināja piedāvāto moduļu funkcionālo pilnību, ieskaitot pasūtījumu ģenerēšanu, plānošanu un reāllaika uzraudzību. Turklāt eksperimenti atklāja būtiskus uzlabojumus AM aprīkojuma izmantošanas līmenī un ražošanas pasūtījumu ģenerēšanas efektivitātē salīdzinājumā ar statiskām PPC konfigurācijām. Mašīnmācīšanās balstītu prognozēšanas modeļu integrācija turklāt uzlaboja ražošanas laika novērtējuma precizitāti. Salīdzinot ar statistiskiem plānošanas parametriem, ML modulis samazināja novirzes starp prognozētajiem un faktiskajiem būvēšanas laikiem, nodrošinot efektīvāku resursu sadali un lielāku plānošanas elastību AM-PPC sistēmā. Prognozēšanas komponente tādējādi uzlabo visas sistēmas plānošanas precizitāti, ļaujot tai dinamiski pielāgoties mainīgām darba slodzēm un procesa ierobežojumiem. Šie rezultāti demonstrē intelektisku, uz datiem balstītu modeļu pielietojuma iespējamību, lai optimizētu darbu secību un caurlaidību aditīvās ražošanas vidēs. Turklāt blokkēdes ieviešana demonstrēja savu spēju sinhronizēt ražošanas pasūtījumus starp vairākām neatkarīgām vienībām izklīdētā tīklā. Viedlīgumu pieeja nodrošināja pārredzamu izpildi un izsekojamu procesa dokumentāciju, apstiprinot tās piemērojamību drošai pasūtījumu pārvaldībai kiberfizikālu ražošanas vidu ietvaros. Novērtēšana arī parādīja, ka decentralizēta koordinācija samazināja manuālo iejaukšanos un palielināja starporganizāciju komunikācijas uzticamību. Tas apstiprina blokkēdes tehnoloģijas piemērotību kā iespējojošu mehānismu izklīdētiem ražošanas tīkliem Rūpniecības 4.0 kontekstā.

Šī pētījuma praktiskie ieguldījumi un ieguldījumi Dizaina zinātnē tiek apspriesti 5. nodaļā. Rezumējot, šis pētījums radīja jaunas zināšanas par AM integrāciju rūpnieciska mēroga ražošanas vidē, ko kontrolē ERP sistēmas. Konkrēti, jaunas zināšanas tika radītas šādiem galvenajiem ražošanas procesa posmiem, kas ietver AM: ražošanas pasūtījumu izveidošana; ražošanas laiku prognozēšana; un resursu izmantošana decentralizētā ražošanas tīklā.

## SECINĀJUMI

Šajā disertācijā aizstāvēšanai tika izvirzīta šāda pētījuma tēze: *rūpnieciska mēroga Aditīvās ražošanas (AM) ieviešana ražošanas vidē, ko izveidojušas Tradicionālās ražošanas tehnoloģijas (TMT), var tikt nodrošināta ar atbilstošu procesu pārvaldības un procesu kontroles risinājumu izstrādi.*

Šo tēzi var uzskatīt par pierādītu, ņemot vērā, ka vispārējais pētījuma uzdevums tika izpildīts, un tika piedāvāta, *izstrādāta un novērtēta programmatūras arhitektūra, lai nodrošinātu AM specifisko Ražošanas plānošanu un kontroli (PPC) un tās integrāciju ar tradicionālajām Uzņēmuma ražošanas sistēmām (EPS).*

Papildu secinājumus var izdarīt, pamatojoties uz šajā disertācijā prezentētā pētījuma iegūtajām zināšanām.

1. AM integrācija esošajās ražošanas sistēmās prasa pārvarēt arhitektūras nesaderības starp AM procesa raksturlielumiem un tradicionālo ERP sistēmu iebūvēto kontroles loģiku. Šīs sistēmas ir optimizētas liela apjoma, zemas variabilitātes vidēm un neuztur AM darba plūsmu dinamisko un pielāgoto raksturu.
2. Tradicionālās PPC loģikas un AM procesa raksturlielumu salīdzinošā analīze atklāj konkrētas nepilnības sistēmas uzvedībā, datu integrācijā un procesa koordinācijā. Šīs nepilnības prasa jaunu aprēķinu modeļu un arhitektūras elementu izstrādi hibrīdām PPC vidēm, kas ietver gan TMT, gan AM.
3. Esošie pētījumi AM ir koncentrējušies galvenokārt uz procesa līmeņa optimizāciju un mašīnas līmeņa kontroli. Maz darbu ir veltīti AM integrācijai pilna mēroga ražošanas vidēs, ko pārvalda uzņēmuma IS. Šī disertācija demonstrē nepieciešamību pēc visaptverošas, strukturētas daudzslāņu sistēmas arhitektūras, kas pielāgota AM integrācijai uzņēmuma mēroga CPPS.
4. Piedāvātais sistēmas dizains balstās uz tradicionālo ražošanas vidu jomas zināšanām un paplašina tās, lai ievērotu AM specifiskās prasības. Galvenie apsvērumi ietver būvēšanas procesa modelēšanu, laikiem orientētu plānošanu, decentralizētu koordināciju un prognozējamu resursu sadali.
5. AM raksturīgie ierobežojumi liela apjoma ražošanai, piemēram, ilgi cikla laiki un resursietilpīga pēcapstrāde, var tikt mazināti ar dažādām optimizācijas metodēm: efektīva vairāku drukāšanas darbu ligzdošana, dinamiska plānošana, pamatojoties uz prognozētajiem pabeigšanas laikiem, un inteliģenta izklaidētu ražošanas resursu sadale.

6. AM, kad tā ir integrēta hibrīdā vidē ar TMT, palielina ražošanas elastību, atsaucību un spēju atbalstīt masveida pielāgošanu visā ražošanas ķēdē, un atver jaunas iespējas mērogojamam AM izvietojumam un sistēmas līmeņa inovācijām digitālajā ražošanā. Piemēram, raksturlielumus, kas iepriekš tika uzskatīti par trūkumiem, piemēram, ilgus drukāšanas laikus, var izmantot kā arhitektūras un organizatoriskas inovācijas: pārdomājot resursu maiņas, plānošanas logus un hibrīdražošanas stratēģijas.
7. Efektīva AM ieviešana uzņēmuma sistēmās prasa ekspertīzi ne tikai ražošanas procesos, bet arī sarežģītu IS konfigurācijā, paplašināšanā un koordinācijā. Spēja pārveidot fizikālās darbības digitālās darba plūsmās ir centrāla šim izaicinājumam.
8. Digitalizācija, kas nepieciešama AM integrācijai, rada jaunus izaicinājumus un iespējas datu apstrādē, ieskaitot reāllaika koordināciju, procesa pārredzamību un liela mēroga ražošanas datu pārvaldību. Šīs tēmas ir centrālas plašākiem Rūpniecības 4.0 mērķiem.
9. Šī disertācija parāda, ka disruptīvās tehnoloģijas var tikt integrētas esošajās ražošanas arhitektūrās, neatsakoties no tradicionālās ražošanas nostiprinātajiem kontroles principiem. Ar rūpīgi izstrādātām sistēmas komponentēm AM var papildināt tradicionālos procesus, nevis pilnībā tos aizstāt.
10. Dizaina zinātnes pētījumu metodoloģija ir pierādījusi sevi kā efektīvu paradigmu risinājumorientētu artefaktu izstrādei, kas risina arhitektūras un aprēķinu izaicinājumus modernās ražošanas sistēmās.
11. Šī darba ieguldījumi, ieskaitot modeļus, konstrukcijas, optimizācijas metodes un integrācijas loģiku, piedāvā apstiprinātu un vispārināmu pamatu turpmākiem pētījumiem un sistēmu izstrādei hibrīdās ražošanas vidēs, kas apvieno tradicionālās un AM tehnoloģijas.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] K. Kanishka and B. Acherjee, "Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments, and challenges," *J. Manuf. Process.*, vol. 107, pp. 574–619, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.10.024.
- [2] C. Zhang et al., "Towards new-generation human-centric smart manufacturing in Industry 5.0: A systematic review," *Adv. Eng. Inform.*, vol. 57, p. 102121, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.aei.2023.102121.
- [3] S. J. Oks et al., "Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook," *Inf. Syst. Front.*, vol. 26, no. 5, pp. 1731–1772, Oct. 2024, doi: 10.1007/s10796-022-10252-x.
- [4] S. Kim et al., "Real-time in-process control methods of process parameters for additive manufacturing," *J. Manuf. Syst.*, vol. 74, pp. 1067–1090, June 2024, doi: 10.1016/j.jmsy.2024.05.008.
- [5] S. Anil Kumar and N. Suresh, *Production and operations management (with skill development, caselets and cases)*. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2008.
- [6] S. Gregor and A. R. Hevner, "Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact," *MIS Q.*, vol. 37, no. 2, pp. 337–355, 2013.
- [7] R. Winter, "Design science research in Europe," *Eur. J. Inf. Syst.*, vol. 17, no. 5, pp. 470–475, Oct. 2008, doi: 10.1057/ejis.2008.44.
- [8] K. Peffers, T. Tuunanen, M. A. Rothenberger, and S. Chatterjee, "A Design Science Research Methodology for Information Systems Research," *J. Manag. Inf. Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 45–77, Dec. 2007, doi: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- [9] M. Pidd, "Tools for Thinking—Modelling in Management Science," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 48, no. 11, pp. 1150–1150, 1997, doi: 10.1057/palgrave.jors.2600969.
- [10] R. Baskerville, A. Baiyere, S. Gergor, A. Hevner, and M. Rossi, "Design Science Research Contributions: Finding a Balance between Artifact and Theory," *J. Assoc. Inf. Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 358–376, May 2018, doi: 10.17705/1jais.00495.
- [11] A. Roth and W. Baumung, "Digitilization As Enabler for a Holistic Corporate Performance Management," *QRBD Q. Rev. Bus. Discip.*, vol. 7, no. 1, pp. 53–63.
- [12] H. Luczak and W. Eversheim, Eds., *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte, 2., Korrigierte Aufl., Nachdr. in VDI-Buch*. Berlin: Springer, 2001.
- [13] W. Eversheim, *Organisation in der Produktionstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1989. doi: 10.1007/978-3-662-22685-8.
- [14] M. Schotten, "Aachener PPS-Modell," in *Produktionsplanung und -steuerung*, H. Luczak and W. Eversheim, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 9–28. doi: 10.1007/978-3-662-09474-7\_2.
- [15] P. Alpar, R. Alt, F. Bensberg, P. Weimann, and Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, *Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik strategische Planung, Entwicklung und Nutzung von Informationssystemen*. 2019.

- [16] G. Schuh and V. Stich, Eds., *Produktionsplanung und -steuerung. 1: Grundlagen der PPS, 4., Überarbeitete Auflage.* in VDI-Buch. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [17] J. De Antón, F. Villafáñez, D. Poza, and A. López-Paredes, “A framework for production planning in additive manufacturing,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 61, no. 24, pp. 8674–8691, Dec. 2023, doi: 10.1080/00207543.2022.2160026.
- [18] W. Baumung and V. V. Fomin, “Optimization Model to Extend Existing Production Planning and Control Systems for the Use of Additive Manufacturing Technologies in the Industrial Production,” *Procedia Manuf.*, vol. 24, pp. 222–228, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.06.035.
- [19] S. Jung, L. B. Kara, Z. Nie, T. W. Simpson, and K. S. Whitefoot, “Is Additive Manufacturing an Environmentally and Economically Preferred Alternative for Mass Production?,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 16, pp. 6373–6386, Apr. 2023, doi: 10.1021/acs.est.2c04927.
- [20] W. Baumung and V. V. Fomin, “Predicting production times through machine learning for scheduling additive manufacturing orders in a PPC system,” in 2019 IEEE International Conference of Intelligent Applied Systems on Engineering (ICIASE), Fuzhou, China: IEEE, Apr. 2019, pp. 47–50. doi: 10.1109/ICIASE45644.2019.9074152.
- [21] W. Baumung, “Design of an Architecture of a Production Planning and Control System (PPC) for Additive Manufacturing (AM),” in *Business Information Systems*, vol. 389, W. Abramowicz and G. Klein, Eds., in *Lecture Notes in Business Information Processing*, vol. 389. , Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 391–402. doi: 10.1007/978-3-030-53337-3\_29.
- [22] V1 Engineering Inc, “The Mostly Printed CNC.” [Online]. Available: <https://www.v1engineering.com/specifications/>
- [23] “PrusaSlicer.” [Online]. Available: <https://github.com/prusa3d/PrusaSlicer>
- [24] “Slic3r – Open source 3D printing toolbox.” Accessed: Mar. 14, 2020. [Online]. Available: <https://slic3r.org/>
- [25] R. van Hattem, *numpy-stl*. [Online]. Available: <https://github.com/WoLpH/numpy-stl>

