

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultāte

Enerģētikas institūts

Dmitrijs Boreiko

Studiju programmas “Enerģētika un elektrotehnika” doktorants

RAŽOŠANAS UZŅĒMUMU ENERGOEFEKTIVITĀTES PAAUGSTINĀŠANAS METODES UN ALGORITMI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. habil. sc. ing.*

ANTANS SAUĻUS SAUHATS,

Dr. sc. ing.

JEVGEŅIJS KOZADAJEVS

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Boreiko D. Ražošanas uzņēmumu energoefektivitātes paaugstināšanas metodes un algoritmi. Promocijas darbs – R.: RTU, 2022. – 42 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes “P-05” 2022. gada 14. jūnija lēmumu, sēdes protokols Nr. 61/22.

Šis darbs izstrādāts ar RTU doktorantūras grantu finansējumu.

Promocijas darba pētījumu finansē valsts pētījumu programmas enerģētikā “Inovātīvas viedo tīklu tehnoloģijas un to optimizācija” darbības programmas “Izaugsme un nodarbinātība” Nr. 8.2.2. specifiskā atbalsta mērķa programma “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās”, Eiropas Sociālā fonda projekts “Rīgas Tehniskās universitātes akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās” Nr. 8.2.2.0/18/A/017.

PATEICĪBAS

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātes (RTU EVIF) Enerģētikas institūtā (EI).

Autors izsaka pateicību promocijas darba vadītājiem: RTU EVIF Energosistēmu vadības un optimizācijas katedras docētājam Jevgeņijam Kozadajevam un RTU EVIF Enerģētikas institūta direktoram Antanam Sauļum Sauhatam, kā arī konsultantei asociētajai profesorei Ļubovai Petričenko.

Paldies manai ģimenei par atbalstu un iecietību visā promocijas darba izstrādes laikā!

<https://doi.org/10.7250/9789934228230>

ISBN 978-9934-22-823-0 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts RTU promocijas padomes “RTU P-05” atklātā sēdē 2022. gada 3. novembrī plkst. 12.00 Rīgas Tehniskās universitātes Elektrotehnikas un vides inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 12/1, 306. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asoc. profesore *Dr. sc. ing.* Laila Zemīte
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. ing. Deniss Bezrukovs
Banku uzraudzības eksperts, Vācija

Dr. sc. ing. Arturas Klementavičius
Lietuvas Enerģētikas institūts, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Dmitrijs Boreiko

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 56 attēli, 32 tabulas, kopā 116 lappušu, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 62 nosaukumi.

SATURS

IEVADS	5
1. PROBLĒMAS NOSTĀDNE UN LITERATŪRAS ANALĪZE	10
2. UZŅĒMUMA ELEKTROENERĢIJAS PATĒRIŅA OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMS	12
2.1. Uzdevuma matemātiskais formulējums	13
2.2. Tehnoloģisko un organizatorisko ierobežojumu varianti.....	16
2.3. Optimizācijas uzdevumu dekompozīcija	17
2.4. Šķirošana (ražošana pēc prioritātes)	18
2.5. Minimizēšanas procedūras	18
2.6. Izmantotie dati un pieņēmumi	19
2.7. Pārlases (angļu val. – <i>enumeration</i>) metodes lietojuma piemērs	20
2.8. Gadījuma pārlases metodes lietojuma piemēri.....	21
2.9. Rezultātu piemērs	22
2.10. Piemērs. Lineārās programmēšanas un gadījuma pārlases metožu salīdzinājums	23
2.11. Nodaļas secinājumi	25
3. RAŽOŠANAS UZŅĒMUMA ENERGOAPGĀDES OPTIMIZĀCIJAS PIEMĒRS.....	26
3.1. Energoefektivitātes paaugstināšanas iespējas.....	28
3.2. Stikla apstrādes ražotnes enerģijas patēriņa optimizācija	29
3.3. Nodaļas secinājumi	31
4. ELEKTROENERĢIJAS AKUMULATORI UN PAŠĢENERĀCIJA.....	31
4.1. Akumulatoru bateriju ekonomiskā efektivitāte, NPV kritērijs	32
4.2. Pašu atjaunīgās ģenerācijas uzstādīšana.....	34
SECINĀJUMI.....	36
IZMANTOTĀ LITERATŪRA	38

IEVADS

PROMOCIJAS DARBA AKTUALITĀTE

Globālā klimata izmaiņu mazināšanas problēma ietver daudzveidīgas energoefektivitātes paaugstināšanas apakšproblēmas. To vidū var izcelt daudzus un dažādus industriālās ražošanas energoefektivitātes palielināšanas uzdevumus, jo industriālie uzņēmumi patērē ap 40 % no saražotās enerģijas un rada ap 30 % Eiropas Savienības (ES) siltumnīcefekta gāzu emisiju. Tāpēc, lai sasniegtu klimata izmaiņu apturēšanas mērķus un īstenotu ES ilgtermiņa stratēģiju, kas paredz panākt klimatneitralitāti, ir ļoti svarīgi dekarbonizēt ES energosistēmu un tās enerģijas galalietotājus, jo īpaši industriālos uzņēmumus [1].

Decarbonizācijas sasniegšana notiks uz atjaunīgo energoresursu (AER) izmantošanas pamata. AER plaša un efektīva izmantošana būs iespējama, tikai ievērojami uzlabojot energosistēmas patērētāju elastību.

Arvien vairāk pētnieku pievērš uzmanību energoefektīvai (EE) ražošanas plānošanai (RP). Šī pētījumu virziena pieaugošā popularitāte iet roku rokā ar enerģijas patēriņa pieaugumu pasaulē, kas, ņemot vērā resursu ierobežotību un pieaugošās energoresursu cenas, ir viens no galvenajiem šo pētījumu virzītājspēkiem.

Energoefektivitātes jēdzienu var interpretēt divējādi atkarībā no izvirzāmā mērķa.

1. Energoefektīva ražotne ir tāda, kas ar mazāku patērētās enerģijas apjomu nodrošina tādu pašu vai labāku uzdotā produkcijas apjoma ražošanu ekonomiski efektīvā veidā.
2. Energoefektīva ražotne ir tāda, kas nodrošina produkcijas uzdotā apjoma ražošanu ar zemākām enerģijas izmaksām.

Abas minētās pieejas tiek izmantotas industriālos uzņēmumos. Taču kopā ar AER plašu izmantošanu, pieaugot elektrības cenu svārstībām, tieši otrā pieeja kļūst par dominējošo un tiks izmantota šajā darbā. Šī pieeja ļauj izmantot mazāk enerģijas elektrības cenu pīķa periodos.

Energoefektivitātes problēmas risināšanai var palīdzēt enerģijas pieprasījuma ziņā elastīgie lietotāji. Energosistēmas elastība ir tās spēja pielāgoties slodzes ģenerācijas bilances mainīgumam un nenoteiktībai.

Promocijas darbā autors analizē pasaulē uzkrāto pieredzi energoefektivitātes un pieprasījumu reakcijas jautājumos. Izmantojot šo pieredzi un mūsdienu tehnoloģijas, izstrādāta metodika, kas ļauj izmantot energoefektivitātes paaugstināšanu un pieprasījumu reakciju lieliem ražotājiem ar mērķi samazināt elektroenerģijas izmaksas, kā arī samazināt CO₂ izmešus

atmosfērā. Piedāvātā kompleksā pieeja ietver tādus jautājumus kā iekārtu izmantošanas optimizācija ražotnē, ražošanas ciklu optimizācija, balstoties uz elektroenerģijas cenām, elektroenerģijas akumulācijas izmantošana, lai pārbīdītu patēriņu laikā, apvienojumā ar iepriekš uzskaitītajiem optimizācijas pasākumiem, pašu “zaļās” ģenerācijas integrācija kopā ar iepriekš minētajiem optimizācijas pasākumiem. Visi šie piedāvājumi un pasākumi ir virtuāli aprobēti vienā no Rīgas uzņēmumiem, kas ieinteresējās par šo pētījumu un sniedza izpētei nepieciešamo informāciju.

PROMOCIJAS DARBA HIPOTĒZE, MĒRĶIS UN UZDEVUMI

Promocijas darba **hipotēze** ir: rūpniecisko uzņēmumu energoefektivitāti var uzlabot, ieviešot ražošanas vadību, kuras pamatā ir ražošanas procesu pielāgošana mainīgajām cenām un atjaunīgās enerģijas avotu jaudām.

Promocijas darba galvenais mērķis ir izstrādāt metodiku, kas nodrošina iespēju paaugstināt energoefektivitāti un pieprasījumsreakciju industriāliem produkcijas ražotājiem, samazinot elektroenerģijas izmaksas un CO₂ izmešus atmosfērā.

Šī mērķa sasniegšanai atrisināti vairāki galvenie **uzdevumi**.

1. Izmantojot konkrētas ražotnes piemēru un apkopotos datus, veikta uzņēmuma enerģijas patēriņa analīze par ražošanas iekārtu un ražošanas ķēžu optimizācijas uzdevumu formulēšanas un atrisināšanas iespējām.
2. Izmantojot konkrētas ražotnes piemēru, izveidoti ražošanas un enerģijas patēriņa modeļi, formulēta mērķa funkcija, pamatoti minimizācijas algoritmi, sintezēti programmatūras produkti un veikta ražošanas ciklu optimizācija, ņemot vērā elektroenerģijas cenu veidošanos Latvijā.
3. Izstrādāta elektroenerģijas akumulācijas izmantošanas efektivitātes novērtēšanas metodika, ko var izmantot kopā ar iepriekš minētajiem optimizācijas pasākumiem.
4. Izmantojot konkrētas ražotnes piemēru, izstrādāta metodika pašu “zaļās” ģenerācijas izmantošanas efektivitātes novērtēšanai (kopā ar iepriekš minētajiem optimizācijas pasākumiem).
5. Izmantojot izstrādāto energoefektivitātes paaugstināšanas un pieprasījumsreakcijas izmantošanas pieeju un reālos datus, sniegtas rekomendācijas Latvijas ražotājiem.

PROMOCIJAS DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

1. Veikta ražošanas uzņēmumu enerģijas patēriņa analīze un pierādītas iespējas optimizēt ražošanas iekārtas un ražošanas ķēdes ar mērķi paaugstināt energoefektivitāti.

2. Izveidots ražošanas ciklu optimizācijas matemātiskais modelis, lai samazinātu elektroenerģijas izmaksas, ņemot vērā elektroenerģijas cenas Latvijā. Izmantoti divu veidu modeļi, pierādīta modeļu efektivitāte.
3. Sintezēts elektroenerģijas akumulācijas sistēmas izvēles un tās ekonomiskās efektivitātes aprēķināšanas matemātiskais modelis, kas aprobēts konkrētā ražotnē.
4. Izveidots matemātiskais modelis pašu “zaļās” ģenerācijas jaudas (saules paneļi) izvēlei ražotnē, kā arī šīs ģenerācijas ekonomiskās efektivitātes aprēķināšanai. Modelis aprobēts konkrētā ražotnē.
5. Izstrādāta kompleksa pieeja energoefektivitātes paaugstināšanas un pieprasījumsreakcijas izmantošanas nodrošināšanai lieliem rūpnieciskiem ražotājiem, sniegtas rekomendācijas pieejas izmantošanai Latvijā.

IZMANTOTĀS METODES UN RĪKI

1. Elektroenerģijas patēriņa uzskaites un monitoringa sistēmas.
2. Ekonomiskās efektivitātes novērtēšanas metodes.
3. Inženierproblēmu risināšanas programmatūra *Matlab*.
4. Programmatūras *Matlab* modelēšanas bibliotēka *Simulink*, *Symscape*, *SymPowerSystem*.
5. Ražošanas uzņēmuma energopatēriņa apsekošana, datu vākšanas/monitoringa sistēmas.

PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ NOZĪME

Piedāvāto pieeju, izveidotos matemātiskos modeļus, sintezētos un pārbaudītos modeļus var izmantot ražošanas uzņēmumos Latvijā un ārzemēs. Pieejas izmantošana praksē samazinātu elektroenerģijas izmaksas, palielinātu ražošanas uzņēmumu konkurētspēju, sekmētu atjaunīgo energoresursu izmantošanu un tādējādi samazinātu CO₂ izmešus atmosfērā.

AUTORA PERSONĪGAIS IEGULDĪJUMS VEIKTAJOS PĒTĪJUMOS

Aizstāvamo pamattēžu pamatu veido idejas, kas radītas ciešā sadarbībā ar profesoru Antanu Sauļu Sauhatu un docētājiem Jevgeņiju Kozadajevu un Ļubovu Petričenko. Ideju pārbaude, modeļi, sintezētās programmatūras, skaitliskie eksperimenti un to analīze, rekomendācijas efektīvai lietošanai ir promocijas darba personīgais ieguldījums.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

Publicētie raksti par promocijas darba tēmu

1. Boreiko, D., Kozadajevs, J., Zālītis, I., Dolgicers, A. Load Balancing Strategy for Power Networks in Critical Power Shortage Condition. No: 2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Latvija, Rīga, 24.–25. novembris, 2017. Piscataway: IEEE, 2017, 1.–4. lpp. ISBN 978-1-5090-1201-5. e-ISBN 978-1-5386-4137-8.
2. Survilo, J., Boreiko, D., Zālītis, I., Kozadajevs, J. Primary Use of Renewable Energy Sources in Electric Power Industry. No: 2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Latvija, Rīga, 24.–25. novembris, 2017. Piscataway: IEEE, 2017, 1.–6. lpp. ISBN 978-1-5386-4138-5. e-ISBN doi:10.1109/AIEEE.2017.8270531.
3. Boreiko, D., Kozadajevs, J., Sauhats, A. Implementing Energy Efficiency and Demand-Side Management in Glasswork Company. No: 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Proceedings, Latvija, Rīga, 12.–14. oktobris, 2017. Piscataway: IEEE, 2017, 1.–6. lpp. ISBN 978-1-5386-3847-7. e-ISBN 978-1-5386-3846-0.
4. Kozadajevs, J., Zālītis, I., Boreiko, D., Varfolomejeva, R. Detailed Modelling of a Battery Energy Storage System in an Energy-Intensive Enterprise. No: 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Itālija, Palermo, 12.–15. jūnijs, 2018. Piscataway: IEEE, 2018, 1.–5. lpp. ISBN 978-1-5386-5187-2. e-ISBN 978-1-5386-5186-5.
5. Kozadajevs, J., Dolgicers, A., Boreiko, D., Zālītis, I. Heat Consumption Modelling and Optimisation for Power Substations. No: 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018), Latvija, Rīga, 12.–14. novembris, 2018. Piscataway: IEEE, 2018, 439.–443. lpp. ISBN 978-1-5386-6904-4. e-ISBN 978-1-5386-6903-7. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON.2018.8659891.
6. Sauhats, A., Kozadajevs, J., Dolgicers, A., Zālītis, I., Boreiko, D. Thermal Energy Storage for CHP in Power Market Conditions. No: 16th European Energy Market Conference (EEM 2019), Slovēnija, Ļubļana, 18.–20. septembris, 2019. Piscataway:

- IEEE, 2019, 1.–4. lpp. ISBN 978-1-7281-1258-9. e-ISBN978-1-7281-257-2. ISSN2165-4077.e-ISSN2165-4093. Pieejams: doi:10.1109/EEM.2019.8916485.
7. Sauhats, A., Dolgicers, A., Kozadajevs, J., Zālītis, I., Boreiko, D. The Impact of the District Heating System Thermal Inertia on the CHPP Operation Mode. No: 2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Conference Materials, Latvija, Rīga, 7.–9. oktobris, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, 225.–229.lpp. ISBN 978-1-7281-3943-2.e-ISBN978-1-7281-3942-5. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON48111.2019.8982254.
 8. Petričenko, R., Boreiko, D. Adaptive Detection of Battery Energy Storage System Charge/Discharge Cycles Quantity. No: 2019 IEEE 7th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE 2019): Proceedings, Latvija, Liepāja, 15.–16. novembris, 2019. Piscataway: IEEE, 2019, 118.–121. lpp. ISBN 978-1-7281-5709-2. e-ISBN 978-1-7281-6730-5.
 9. Kozadajevs, J., Boreiko, D. District Heating System Flexibility Studies Using Thermal Inertia of Buildings. No: 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2020): Conference Proceedings, Latvija, Rīga, 5.–6. novembris, 2020. Piscataway: IEEE, 2020, 367.–372. lpp. ISBN 978-1-7281-9511-7. e-ISBN 978-1-7281-9510-0. Pieejams: doi:10.1109/RTUCON 51174.2020.9316600.
 10. Kozadajevs, J., Dolgicers, A., Boreiko, D. CHPP Operation Mode Optimization under Electricity and Gas Market Conditions Using a Genetic Algorithm. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2021, Vol. 58, No. 3, 154.–168. lpp. ISSN 0868-8257. Pieejams: doi:10.2478/lpts-2021–0023.
 11. Petričenko, Ļ., Kozadajevs, J., Petričenko, R., Ozgonenel, O., Boreiko, D., Dolgicers, A. Assessment of PV Integration in the Industrial and Residential Sector under Energy Market Conditions. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2021, Vol. 58, No. 3, 82.–97. lpp. ISSN 0868-8257. Pieejams: doi:10.2478/lpts-2021–0018.

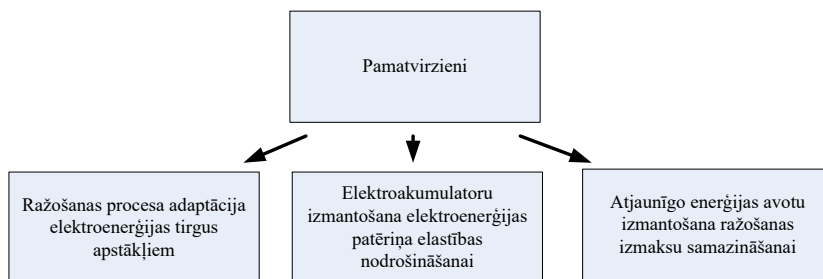
PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi un rekomendācijas turpmākam darbam, kā arī literatūras saraksts. Darba kopējais apjoms ir 115 lappuses, tajās ietverti 46 attēli un 65 formulas. Literatūras sarakstā norādīti 62 izmantotās literatūras avoti. Ievadā pamatota promocijas darba aktualitāte un formulēti darba mērķi,

aplūkoti darbā atrisinātie uzdevumi, minētas konferences un publikācijas, kurās aprobēti darba rezultāti, kā arī definētas aizmāvamās tēzes. Pirmā nodaļa ietver zinātniskās literatūras, kas veltīta dažādu rūpniecisko ražotņu energoefektivitātes paaugstināšanai un dažādiem pieprasījumu reakcijas veidiem, apkopojumu, kā arī tās analīzi un nodaļas secinājumus, izceļot pētījumu virzienu un metožu izvēli. Otrā nodaļa veltīta energoefektivitātes palielināšanas uzdevuma modeļu sintēzei, mērķa funkciju formulējumam, ierobežojumu aprakstam un optimizācijas procedūru realizācijas izvēlei. Trešajā nodaļā detalizēti aprakstīts konkrēts ražošanas uzņēmuma energoefektivitātes palielināšanas uzdevums, sniegts ražojamo produktu un nepieciešamās enerģijas izmantošanas apraksts. Ceturtajā nodaļā aprakstīta elektrisko akumulatoru un saules paneļu izmantošanas ekonomiskā pamatojuma metodika un detalizēti izmantošanas piemēri.

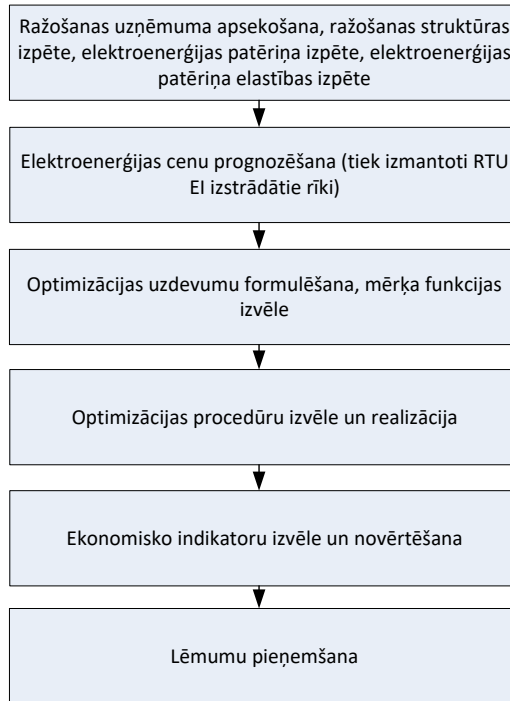
1. PROBLĒMAS NOSTĀDNE UN LITERATŪRAS ANALĪZE

Kopumā pētījumus par energoefektīvu ražošanu var iedalīt divos virzienos: (I) pētījumi ar mērķi samazināt enerģijas patēriņu, izmantojot ražošanas procesu tehnoloģiskus uzlabojumus [10, 11, 12]; (II) pētījumi, kas cenšas samazināt enerģijas patēriņu, pielāgojot ražošanas procesa organizatoriskos parametrus, ko darba autors sauc par energoefektīvu ražošanas plānošanu (EERP). Apkopojot pētījumus, var noteikt ražošanas uzņēmumu energoefektivitātes paaugstināšanas pamatvirzienus (1.1. att.):



1.1. att. Energoefektivitātes paaugstināšanas pamatvirzieni.

Katra virziena realizācijas struktūra redzama 1.2. attēlā.



1.2. att. Ražošanas uzņēmuma energoefektivitātes realizācijas struktūra.

Apkopojot visu iepriekš aprakstīto, var formulēt vairākus secinājumus.

1. Iekārtu noslodzes grafika plānošana ir īstermiņa ražošanas plānošanas uzdevums, kas sadala darbu iekārtām un nosaka vienai un tai pašai iekārtai veicamo darbu secību un izpildes laiku. Ja kādam darbam nepieciešama tikai viena operācija vai tiek pēģināta ražošanas sistēma, kas sastāv no vienas iekārtas, tad atbilstoši vienkāršojas piedāvātās kopas un mainīgie [22].
2. Pastāvīgi pieaugošais enerģijas patēriņš rūpniecībā apvienojumā ar neatjaunīgo resursu izmantošanas samazinājumu ir padarījis energoefektivitāti par nozīmīgu problēmu gan pētniekiem, gan tiem, kas darbojas praksē.
3. Augošās enerģijas cenas ir mudinājušas rūpniecisko sektoru pārdomāt savu attieksmi pret enerģijas patēriņu, savukārt sabiedrības pieaugošās bažas par vides jautājumiem ir likušas politikas veidotājiem reaģēt, izdodot atbilstošas direktīvas.
4. Pētījumu apjoms par energoefektīvu ražošanas plānošanu pēdējos gados ir ievērojami pieaudzis, un tā rezultātā izdotas daudzas publikācijas, kurās energoefektivitātes apsvērumi integrēti pašreizējos ražošanas plānošanas modeļos. Tomēr esošās

modelēšanas pieejas pašlaik vēl nevar atzīt par atbilstošām strauji pieaugušajām prasībām.

2. UZŅĒMUMA ELEKTROENERĢIJAS PATĒRĪŅA OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMS

Elektroenerģijas cenu pieaugums, tirgus mehānismu parādīšanās un elektroenerģijas cenu svārstības diennakts ietvaros nosaka patērētāju centienus pielāgoties tirgus apstākļiem un organizēt ražošanu tā, lai tiktu izpildīti divi pamatuzdevumi:

- 1) nodrošināt noteiktā produkcijas izlaides ražošanas plāna izpildi (vispārējā gadījumā runa ir par vairāku veidu produkciju);
- 2) līdz minimumam samazināt izdevumus saistībā ar elektroenerģijas izmantošanu.

Otrajam uzdevumam ir jēga tad, ja uzņēmums var mainīt ražošanas intensitāti un līdz ar to arī diennakts patēriņa grafiku.

Turklāt nepieciešams ņemt vērā trīs veidu ierobežojumus:

- ražošanas iekārtu jaudas ierobežojumu;
- maksimāli pieļaujamo patērēto jaudu ierobežojumu;
- tehnoloģiskos ierobežojumus.

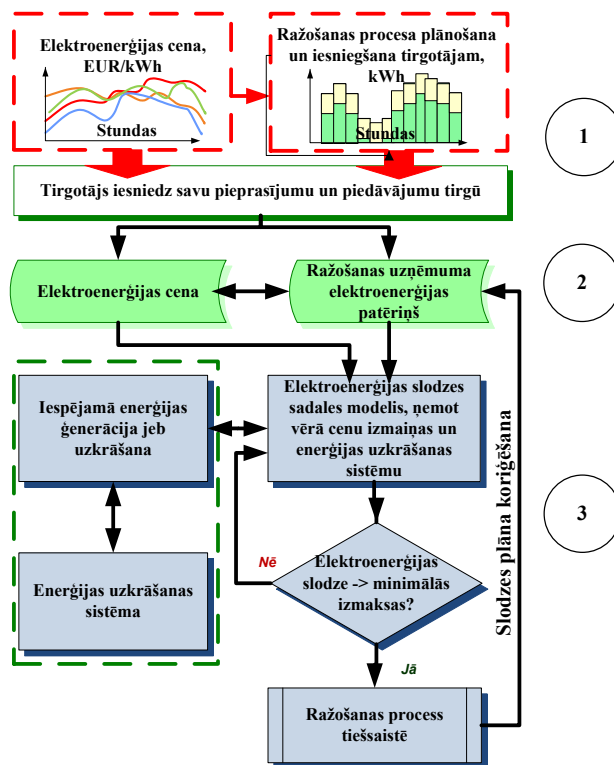
Lai paaugstinātu ražošanas elastīgumu, iespējams izmantot papildu tehniskās sistēmas (risinājumus), kas nodrošina enerģijas uzglabāšanu. Pie šādām sistēmām pieder tehnoloģijas, kas balstītas uzkrājējierīču izmantošanā, piemēram, akumulācijas baterijas (*Battery Energy Storage System, BESS*). Papildus tam promocijas darba autors izmanto šādus pieņēmumus:

- 1) patērētājs atrodas elektroenerģijas tirgus zonā un darbojas apstākļos, kad cena ir zināma diennaktij uz priekšu;
- 2) patērētājs tiešā veidā nav tirgus dalībnieks; norēķini par patērēto enerģiju tiek veikti ar elektroenerģijas tirgotāja starpniecību uz divpusējas vienošanās pamata;
- 3) patērētāja lēmums neietekmē elektroenerģijas cenas tirgū;
- 4) plānošanas periods ir ierobežots laika nākamā nedēļa posmā uz priekšu.

Ražošanas uzņēmuma energoapgādes optimizācijas algoritmu vispārējā veidā var aprakstīt ar trim apakšblokiem (2.1. att.), kas realizē šādus soļus:

- 1) ražošanas un plānošanas operators iesniedz tirgotājam savu plānoto elektroenerģijas patēriņu nedēļai uz priekšu. Pēc tam, kad notiek tirdzniecība biržā un rezultāti ir zināmi, elektroenerģijas tirgotājs, saņemot rezultātus, nosūta ražošanas operatoram nākamās dienas cenas;

- 2) ražošanas uzņēmums, zinot elektroenerģijas cenas, veic optimizāciju nākamajām 24 stundām, optimāli sadalot slodzi tā, lai mazinātu izmaksas par patērēto elektroenerģiju;
- 3) ja ir iespēja papildu elektroenerģijas ražošanai vai/un uzkrāšanai, tad optimizācijas modelis pēc slodzes sadalījuma pielāgo papildu ģenerāciju/uzkrāšanu tā, lai uzlāde notiktu pie viszemākās cenas, nepārsniedzot pieļaujamus ierobežojumus, savukārt izlāde jeb baterijas ģenerācija tiktu veikta augsto cenu stundās, izlīdzinot patēriņa izmaksas.



2.1. att. Rūpnieciskā uzņēmuma slodzes plānošanas algoritma struktūra [42].

2.1. Uzdevuma matemātiskais formulējums

Literatūras apskatā aplūkoti darbi, kas veltīti sarežģītu modeļu veidošanai ražošanas ciklu optimizācijai un ražošanas procesu plānošanai. Jāuzsver, ka šajā darbā autors neizvirza uzdevumu izstrādāt unikālu vai neparasti efektīvu optimizācijas un plānošanas metodi. Darba

mērķis ir apvienot dažādus pasākumus, tādus kā energoefektivitātes paaugstināšana, enerģijas patēriņa paaugstināšana, enerģijas patēriņa un ražošanas procesu optimizācija, akumulācijas tehnoloģiju ieviešana (pieprasījumsreakcija) un pašu “zaļās” ģenerācijas ieviešana, lai samazinātu elektroenerģijas izdevumus konkrētā uzņēmumā. Tādēļ šajā darbā sniegta optimizācijas metodiku, ko var izmantot dažādās ražotnēs. Šajā nodaļā apskatīts uzdevuma matemātiskais formulējums virtuālai ražotnei un aplūkotas dažādas tipiskas ražošanas ķēžu kombinācijas (secīgas/paralēlas) noteiktu produktu izgatavošanai. Lai šī pieeja būtu pēc iespējas universālāka, tika optimizēti 10 virtuāli scenāriji ražotnēm.

Pieņemsim, ka uzņēmums ražo I veidu produkciju apjomā q_i , attiecīgi: q_1, \dots, q_I .

Produkcija tiek ražota stundās $t = 1, \dots, T_{pl}$ (kur T_{pl} – plānošanas perioda ilgums). Attiecīgi katru produkcijas veidu q_i iespējams ražot jebkurā t -tajā stundā; i -to produkcijas veidu, kas saražots stundā t , apzīmēsim ar $q_{t,i}$; tādā gadījumā $q_{t,i}$ saražošanai patērētā enerģija būs $A_{t,i}$. Attiecīgi katras stundas enerģijas daudzums tiek iepirkts par cenu C_t .

Optimizācijas uzdevums ir sadalīt ražotnes slodzi 24 stundu laikā tā, lai tiek izpildīts ražošanas plāns un tiek saražota visa veida plānotā produkcija, lai netiek pārtraukti ražošanas procesi, netiek pārsniegti ierobežojumi attiecībā uz pieļaujamo jaudu un darba stundām, kā arī lai kopējās izmaksas elektroenerģijai būtu viszemākās. Ņemot vērā to, ka ražotnē vienlaikus var darboties vairākas ražošanas līnijas – gan savstarpēji saistītas, gan nesaistītas – ir daudz variantu, kā ražotnes līniju slodzi sakārtot dienas griezumā. Atkarībā no uzdevuma sarežģītības pat pie neliela mainīgo skaita savstarpējo kombināciju daudzums var būt ļoti liels.

Uzņēmuma ražošanas modelēšanas realizēšanai jāveic programmatūras sintēze, tās mērķis ir optimizēt elektroenerģijas patēriņu, ņemot vērā tirgus cenas. Algoritma izstrādes stadijā ir jāņem vērā tas, ka katram patērētājam ir īpaši tarifi par izmantoto elektroenerģiju, kas tiek apmaksāts, norēķinoties ar tirgotāju par izmantoto pakalpojumu. Tirgus cenas tiek prognozētas vai arī ņemtas no *Nord Pool* biržas nākamajai dienai (angļu val. – *day ahead*) un ievadītas veidojamajā programmā [43]. Otrs programmas mērķis ir optimizēt elektroenerģijas akumulatoru darbību – to uzlādi un izlādi dienas laikā. Tātad uzdevums ietver divus apakšmoduļus, t. i., elektrisko slodžu grafika sadalījums un uzkrāšanas sistēmas modelēšana. Kopējam uzdevumam var definēt elektroenerģijas izmaksu minimizēšanas mērķi.

Izmaksu funkcijas minimizācija

$$f(R) = \sum_{t=1}^T \left(C_t (A_{BC,t} - A_{BD,t}) + \sum_{i=1}^I C_t A_{t,i} \right) \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

kur: C_t – elektroenerģijas cena t -tajā stundā, EUR/kWh; $A_{i,t}$ – i -tā produkta elektroenerģijas patēriņš t -tajā stundā, kWh; $A_{BC,t}^n$ – akumulācijas baterijas uzlādes enerģijas daudzums t -tajā stundā, kWh; $A_{BD,t}$ – akumulācijas baterijas izlādes enerģijas daudzums t -tajā stundā, kWh.

Ir vairāki uzdevuma ierobežojošie nosacījumi.

1. Summārais ikstundas patēriņš visām iekārtām nedrīkst pārsniegt ražošanas uzņēmumā maksimāli pieļaujamo:

$$\sum_{i=1}^I A_{i,t} \leq A_{max}, \quad (2.2)$$

kur A_{max} – kopējā maksimāli atļautā ikstundas slodze, kWh. 2.2. nosacījumam ir jābūt spēkā visu t gadījumā

2. Katras produkcijas (iekārtas) ikstundas patēriņš nedrīkst pārsniegt šīs produkcijas ražošanas līnijas ikstundas maksimāli pieļaujamo patēriņu:

$$A_{i,t} \leq A_{imax}, \quad (2.3)$$

kur A_{imax} – i -tā produkcijas veida maksimāli atļautā ikstundas slodze, kWh. 2.3. nosacījumam ir jābūt spēkā visu t gadījumā.

3. Organizatoriskie un tehnoloģiskie ierobežojumi. Formulējot slodžu grafika optimizācijas uzdevumu, jāņem vērā ne tikai iepriekš aprakstīto iekārtu jaudas ierobežojumi. Reālā ražošanas uzņēmumā ietekme un ierobežojoša darbība ir arī daudziem citiem faktoriem, piemēram:

- ražošanas plāna izpilde, t. i., jāsarāžo visi plānotie produkcijas veidi;
- personāla darba grafiks, t. i., jāpielāgo ražošanas maiņu skaits;
- izejvielu piegādes grafiks;
- ražošanas produkcijas piegādes grafiks ir saskaņots ar pasūtītāju;
- ražošanas pārtraukumi, piemēram, kad iekārta nodota remontā vai ir nepieciešama speciālista iejaukšanās tajā vai citā tehnoloģiskajā iekārtā;
- iestatīta un nemaināma ražošanas operāciju secība un to ilgums, piemēram, izejvielu sagatavošana, apstrāde un galaproduktu ražošana;
- savstarpējo ražošanas operāciju energopatēriņa atkarība;
- savstarpējo dažādu produkcijas veidu ražošanas atkarība. Ir produkti, ko var ražot vienlaikus, ir tādi, ko nevar ražot vienlaikus.

Detalizētu nosaukto ierobežojumu matemātisku aprakstu var veikt tikai konkrētam uzņēmumam. Vispārējā gadījumā, ņemot vērā ierobežojuma būtību, var veikt to klasifikāciju un matemātisko aprakstu.

4) Ražošanas plāna izpildes ierobežojumi.

Tiek pieņemts, ka ir zināmi plānotās produkcijas daudzumi q_1, q_2, \dots, q_I (kWh). Ir zināms katra produkta īpatnējais enerģijas patēriņš p_1, p_2, \dots, p_I (kWh/gab.). Šajā gadījumā katram produktam var atrast nepieciešamo enerģijas daudzumu: $A_1=q_1 \cdot p_1; A_2=q_2 \cdot p_2; \dots, A_I=q_I \cdot p_I$. Šos enerģijas daudzumus var izmantot plānošanas periodā, tādat:

$$\sum_{t=1}^{T_{pl}} A_{t,1} = A_1; \dots \sum_{t=1}^{T_{pl}} A_{t,I} = A_I \quad (2.4)$$

Veicot ražošanas operācijas noteiktā laika posmā, daudzos gadījumos ir jānodrošina procesa nepārtrauktība. Šī prasība rada papildu ierobežojumu:

$$A_{t,i} \geq A_{i,min}, \quad (2.5)$$

kur $A_{i,min}$ – elektroenerģijas patēriņš, kas nodrošina minimālo produkcijas ražošanu, kas ir pietiekama, lai iekārtu neapstādinātu, kWh.

Apakšnodaļas nosaukumam atbilstošā uzdevuma nostādne ir vienkāršāka par to, kas aprakstīta ar 2.1. formulu, jo optimizācijas mērķa funkciju var aprakstīt šādi:

$$f(A, T_{pl}) = \sum_{t=1}^{T_{pl}} C_t(A_{t,1} + A_{t,2} + \dots + A_{t,I}) \rightarrow \min. \quad (2.6)$$

Elektroenerģijas patēriņa cenas veidošanā tiek ievērotas nepieciešamās komponentes: biržas elektroenerģijas cena (EUR/kWh), sadales tarifa mainīgā komponente – ST_{main} (EUR/kWh), obligātā iepirkuma mainīgā komponente – OIK_{main} (EUR/kWh).

$$C_{pat,t} = C_{el,t} + OIK_{main,t} + ST_{main,t} \quad (2.9)$$

Salīdzinot 2.6. un 2.1. formulu, redzams, ka otrā mērķa funkcija neietver mainīgos, kas būtu saistīti ar bateriju darbību, tādat mainīgo skaits samazinās un uzdevums vienkāršojas. Jāatzīmē, ka gadījumā, ja uzdevumā, ko apraksta 2.1. formula, bateriju jaudu pieņem vienādu ar nulli, tad šis uzdevums transformējas uz 2.6. formulu.

2.2. Tehnoloģisko un organizatorisko ierobežojumu varianti

Kā jau minēts iepriekš, ierobežojumi stipri ietekmē minimizēšanas funkcijas aprēķinu. Tālāk tekstā apskatīti dažādu ierobežojumu pamatvarianti.

1. Ražošanas maiņu esamība. Ja uzņēmums strādā vienā vai divās maiņās, tad attiecīgi plānošanas periodu var samazināt līdz astoņām vai 16 stundām. Minimizēšanas procedūra vienkāršojas. Maiņu esamība nemaina bateriju uzlādes uzdevuma būtību, jo to var veikt automātiski jebkurā diennakts stundā.

2. Ražošanas plāns ir stingri noteikts, ņemot vērā ražošanai plānoto produktu skaitu. Produktu skaits un katra produkta īpatnējais enerģijas patēriņš ir zināms. Produktu ražošanas secība un ražošanas stundas ir zināmas. Minimizācijas procedūra vienkāršojas. Optimizāciju var veikt tikai gadījumā, ja tiek izmantota enerģijas akumulēšana.
3. Ražošanas plāns ir noteikts, ņemot vērā ražošanai plānoto produktu skaitu. Produktu skaits un katra produkta īpatnējais enerģijas patēriņš ir zināms. Produktu ražošanas secība ir zināma, bet ražošanas stundas var izvēlēties, pārnēsot ražošanas sākumu uz citu laiku. Minimizēšanas procedūra vienkāršojas.
4. Savstarpēji saistītu produktu ražošana. Tiek ražoti vairāki produktu veidi, un to ražošana var notikt tikai kopā, ražošanas secība visiem produktiem ir zināma.
5. Savstarpēji nesaistītu produktu ražošana. Tiek ražoti vairāki produktu veidi, bet to ražošana var notikt jebkurā produktu veidu kombinācijā, ražošanas secību visiem produktiem var brīvi izvēlēties. Šis gadījums var dot vislielākos ietaupījumus, jo ražošana ir maksimāli elastīga.
6. Jauktā ražošana. Vispārējā gadījumā minētie ierobežojumu varianti var var būt tādi, kā aprakstīts iepriekš. Ir saistītie un nesaistītie produkti, daļa plāna ir stingri noteikta. Daļu var brīvi izvēlēties.

Tālāk, ņemot vērā teikto, apkopoti minētie varianti. Atkarībā no konkrētiem produkcijas veidiem, izmantojamām tehnoloģijām un iekārtām ražošana var būt organizēta dažādi.

1. Paralēli. Produkti tiek ražoti vienlaikus.
2. Pēc kārtas. Produkti tiek ražoti secīgi. Var izcelt divus apakšgadījumus:
 - 2.1. ražošanas secību var brīvi izvēlēties;
 - 2.2. produktu ražošanas secība ir noteikta. Šāda veida ierobežojumi var rasties, piemēram, ņemot vērā produktu piegādes nosacījumus vai saskaņojot ar izejvielu piegādes grafikiem.
3. Jaukti. Šajā gadījumā daļu produktu var ražot vienlaikus, daļu – secīgi.

2.3. Optimizācijas uzdevumu dekompozīcija

Slodzes pārvaldība ir atkarīga no iespējas regulēt un uzkrāt elektroenerģiju stundās, kad patēriņš vai enerģijas cena ir zema, un vispirms izmantot šo enerģiju stundās, kad enerģijas cena ir augstāka, tādējādi nodrošinot ietaupījumu. Mērķa funkcija ir aprakstīta ar 2.1. formulu.

Jau pie $I = 3$ mainīgo skaits pārsniedz simtu. Reālos gadījumos šis skaits var būt izteikts tūkstošos. 2.1. mērķa funkcija ir izteikta lineārā formā. Uzdevuma minimizēšanu var veikt, ievērojot daudzus ierobežojumus. Ja visus ierobežojumus būtu iespējams aprakstīt ar lineārām vienādībām vai nevienādībām, tad optimizācijas uzdevuma atrisināšana būtu iespējama, izmantojot lineāro programmēšanu. Šajā gadījumā uzdevumu var atrisināt, ja ir ļoti liels optimizācijas mainīgo skaits.

2.4. Šķirošana (ražošana pēc prioritātes)

Ar lineārās programmēšanas palīdzību atrisinātais optimizācijas uzdevums sadala elektrisko slodzi pa stundām, bet neņem vērā iespējamās ražotāja vēlmes attiecībā uz produktu ražošanas secību. Pieņemsim, ka ir veikta produktu ranžēšana, tas ir, to ražošanas kārtas numurs nosaka vēlamo prioritāti pēc produkta veida; no n produktu veidiem ir svarīgi ražot vispirms pirmā veida produktus, pēc tam – otrā utt.

Visu veidu produkcijas ikstundas jaudas prioritāru sadalīšanu iespējams veikt, izmantojot šādus galvenos soļus:

- 1) aprēķināt stundu skaitu SS1, kas nepieciešams pirmā produkta ražošanai noteiktā apjomā. Jāņem vērā tas, ka kopējais enerģijas patēriņš katrā stundā jau ir zināms (ņemts no lineārās programmēšanas rezultātiem). To mainīt nevar. Jāņem vērā arī iespējamais pirmā produkta tehnoloģijas kapacitātes ierobežojums;
- 2) pārnest pirmā produkta ražošanu no visām plānošanas perioda stundām tā, lai nevienā stundā enerģijas patēriņš nemainītos;
- 3) aprēķināt enerģijas atlikumu, kas paliek otrā produkta ražošanai pēdējā no SS1 stundām;
- 4) aprēķināt stundu skaitu SS2, sākot no pēdējās SS1 stundas;
- 5) atkārtot aprakstītos soļus visiem produktiem.

Aprakstītā procedūra tiek realizēta, izmantojot elementāras aritmētiskas un loģiskas operācijas un neprasa lielus datorresursus pat tad, ja ir liels produktu skaits.

2.5. Minimizēšanas procedūras

2.1. mērķa funkciju minimizēšanu var veikt, lietojot dažādas metodes, galvenokārt atkarībā no ierobežojuma veida, kas izriet no konkrētajiem ražošanas apstākļiem un pieejamās informācijas. Lai sagatavotos konkrētās ražotnes optimizācijai, tika izvēlētas trīs pamatmetodes.

1. Pārlases (angļu val. – *enumeration*) metode.

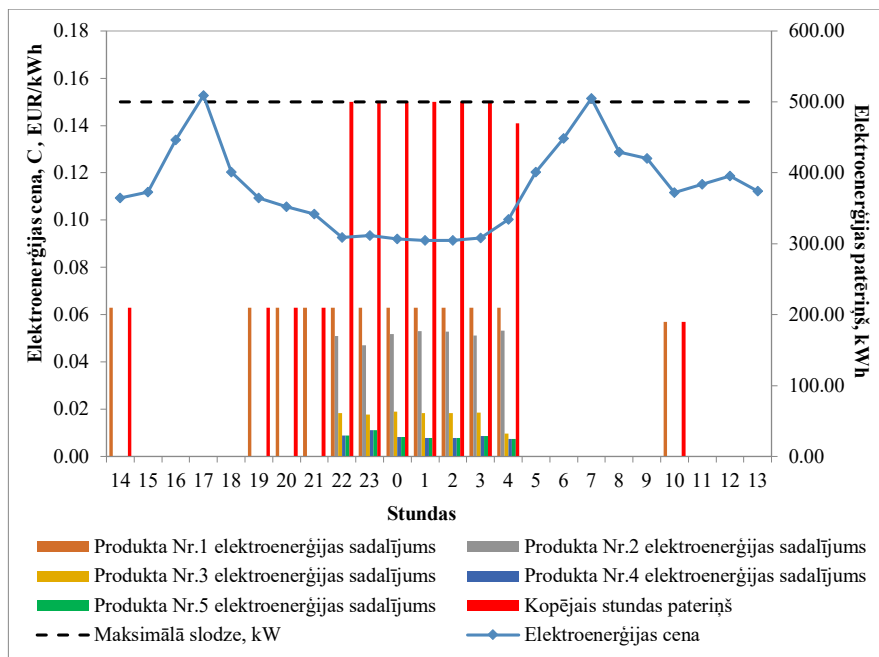
2. Gadījuma pārļases (angļu val. – *random enumeration*) metode.
3. Lineārā programmēšana un pārļases metode (angļu val. – *linear programming and enumeration*).

Pirmās divas metodes var izmantot daudzos nelineāros gadījumos. To lietojuma galvenais ierobežojums un trūkums – nepieciešami datorresursi, jo nepieciešamo iterāciju (mēģinājumu) skaits var būt milzīgs. Šīs metodes realizētas programmēšanas valodu *MATLAB* vai *C#* vidē, analizētas un verificētas, izmantojot pieņēmumus par to, ka ir zināmi ražošanas ierobežojumi. Detalizētāks procedūru un rezultātu apraksts un analīze doti tālāk tekstā, izmantojot daudzveidīgus piemērus.

2.6. Izmantotie dati un pieņēmumi

Pieņemam, ka elektroenerģijas cenas nākamajai dienai ir zināmas un ir zināmas citas patērētāja cenu komponentes: sadales tarifa mainīgā komponente, obligātā iepirkuma mainīgā komponente. 2.1. mērķa funkcijā cenu komponente ir zināma.

- Aprēķinā tiek ņemti pieci produktu veidi ($I = 5$).
- Plānošanas periods ir 24 stundas ($T_{pl} = 24$).
- Katra produkta veida daudzums (q_i), kas jāsarāžo plānošanas perioda laikā, ir mainīgs, izmantotās vērtības ir dotas.
- Elektroenerģijas cenas (C_{ei}) ir zināmas no plkst. 14.00 nākamajai dienai no *Nord Pool* biržas. Rezultātā dienas sākums ir plkst. 14.00–15.00, beigas – plkst. 13.00–14.00.
- Sadales tarifs tiek ņemts trīs laika zonām (S8): nakts zona un nedēļas nogale (0,030625 EUR/kWh), maksimumstundu zona (0,055902 EUR/kWh), dienas zona (0,039507 EUR/kWh) [49].
- OIK maksa tiek apskatīta atbilstoši esošajam 2019. gada 1. janvāra regulējumam (0,01783 EUR/kWh) [50].
- Katram produkta veidam tiek noteikts īpatnējais enerģijas patēriņš (p).
- Kopējā maksimālā atļautā ikstundas slodze (A_{max}) vienāda ar 500 kWh/h.
- Tiek apskatīti 11 scenāriji.



2.2. att. Slodzes sadalījums pa stundām.

Piemēra kopējais plānotais ražošanas apjoms ir 9 000 gabali. Kopējās izmaksas arī ir mazākas un ir vienādas ar **434,69 EUR**.

Apskatāmais modelis realizēts *MATLAB* vidē. Tiek izmantots *Optimization Toolbox* (lineārās programmēšanas funkcija).

Piecu produktu ražošanas gadījumā, realizējot programmatūru uz vidējas jaudas personālā datora (*Intel(R) Core(TM) i3-4160*, procesora frekvence 3,6 GHz, atmiņa 4 GB), izdevumu minimizācijas procedūra aizņem mazāk nekā 20 sekundes.

2.7. Pārlases (angļu val. – *enumeration*) metodes lietojuma piemērs

Pieņemsim, ka visi ražotie produkti pieder vienai grupai (secīga ražošana), tātad saistīto produktu ražošana notiek secīgi un to patēriņu stundas vienam produktam pret otru būs tieši tādā attiecībā, kā norādījis operators. Līdz ar to funkcijas minimizēšana būs atkarīga tikai no tādiem ierobežojošiem faktoriem kā stundas maksimāli pieļaujamā slodzes vērtība un darba laiks.

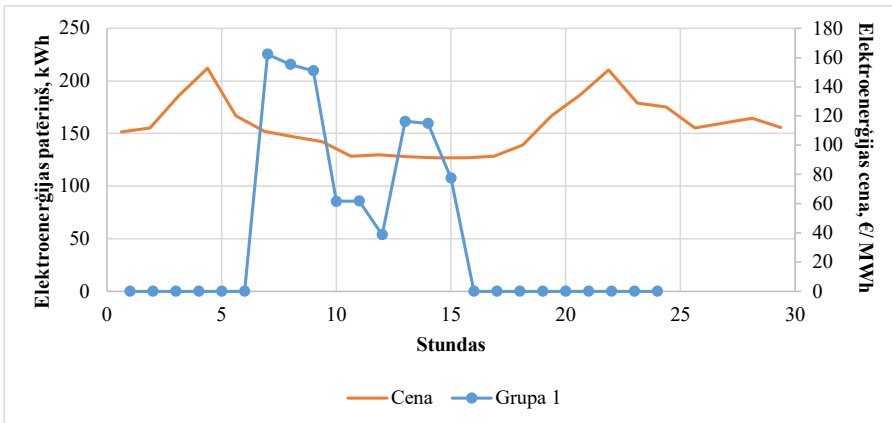
Ja ierobežojums ir pārkāpts, programma neveiks optimizāciju. Ja ražošanas periodā paredzēts ražot tikai savstarpēji saistītus produktus, katras stundas summāro slodzi aprēķina šādi:

$$A_{t\Sigma} = \sum_t^T A_{ti} \quad (2.10)$$

2.1. tabula

Realizācijas piemērs

Grupus numurs	1	1	1	1	1
	1. produkts	2. produkts	3. produkts	4. produkts	5. produkts
	gab.	gab.	gab.	gab.	gab.
Stunda	$q1$	$q2$	$q3$	$q4$	$q5$
1	25	0	80	45	0
2	25	0	80	45	0
3	25	0	80	45	0
4	0	30	0	45	0
5	0	30	0	45	0
6	0	30	0	0	100
7	0	30	0	0	100
8	0	30	0	0	100



2.3. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar pārlases metodi.

2.3. attēla grafikā viegli redzēt, ka pārlases rezultātā tiek izvēlēta salīdzinoši zema slodze mazo cenu stundās (10., 11., 12. stunda). Tas ir skaidrojams ar to, ka ir stingri noteikta ražošanas secība. Ja šo ierobežojumu var neņemt vērā, tad ražošanas sadale pa stundām varētu būt ievērojami efektīvāka.

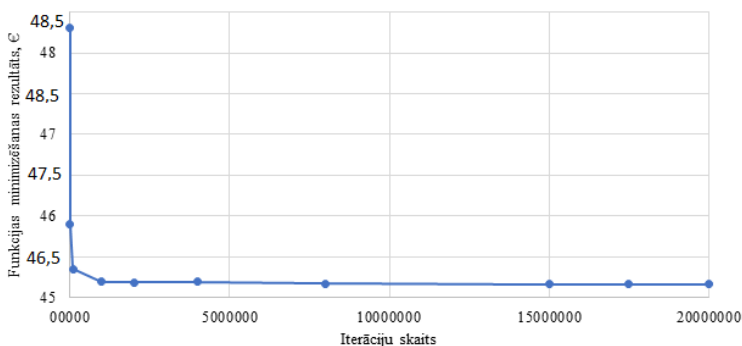
2.8. Gadījuma pārlases metodes lietojuma piemēri

Datu ievade šim gadījumam ir tāda pati kā pārlases metodei, atšķirība ir tāda, ka visi produkti vairs nav saistīti. Iepriekš izskatītā pārlases metode kļūs neefektīva, jo jāpārskata ļoti

daudz dažādu kombināciju. Izveidotā programma automātiski “saprot”, kad jāpāriet uz gadījuma pārslases metodi. Programmas modulis, kas vispirms apvienos visus savstarpēji saistītos produktus (secīga ražošana) kolonās pa grupām.

Šādā gadījumā uzdevuma atrisināšanai tiek izmantota Montekarlo metode, un ar tās palīdzību tiek realizēta gadījuma pārslases procedūra. Visu produktu (to, kas apvienoti grupās, un to, kas nav apvienoti) pirmās ražošanas stundas tiks nejaušā kārtībā piesaistītas noteiktām stundām, tad programma pārbauda, vai visās stundās netiek pārsniegta pieļaujamās slodzes (maksimālā patēriņa) robeža; ja ne, tad tiks veikta mērķa funkcijas, kas redzama 2.1. formulā, aprēķins, un, ja rezultāts ir labāks par iepriekšējo iterāciju, tad tiek saglabāta patēriņu matrica un kopējais izmaksu rezultāts, notiek nākamā iterācija. Ja kaut vienā no rindiņām slodzes ierobežojums nav ievērots, notiek nākamā iterācija.

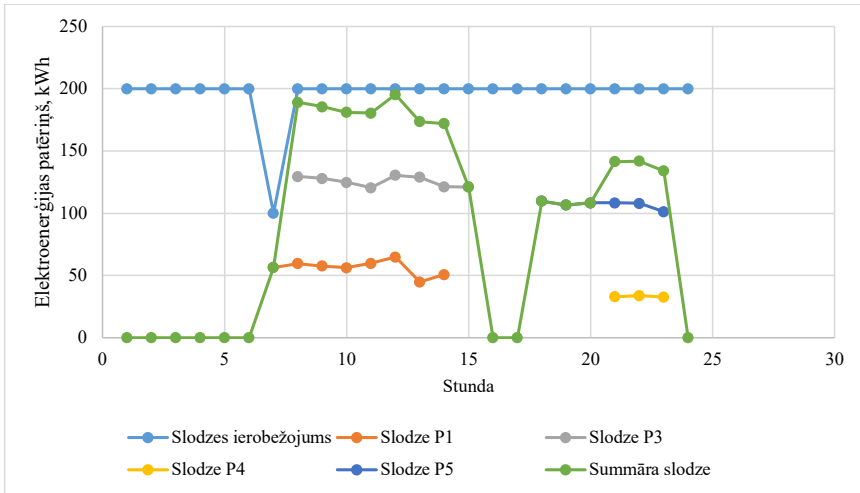
Gadījuma pārslases procedūras lietošanā noteicošais ir nepieciešamo iterāciju skaits. Iterāciju skaits ietekmē gan pareiza rezultāta sasniegšanu, gan laiku, kurā to var izdarīt. Nezināmo īpatnējo elektroenerģijas patēriņu aprēķins aizņem relatīvi maz laika. Izmantojot Montekarlo metodi, vienai uzdevuma rindai tiek patērēti līdz 1,6 sekundēm. Ja produktu elektroenerģijas patēriņš ir noteikts, tad laiks īpatnējo slodžu aprēķinam vispār netiek patērēts. Lai noteiktu nepieciešamo iterāciju skaitu gadījuma pārslases procedūras izpildei, tika veikti vairāki skaitliskie eksperimenti. To rezultāti redzami 2.4. attēlā.



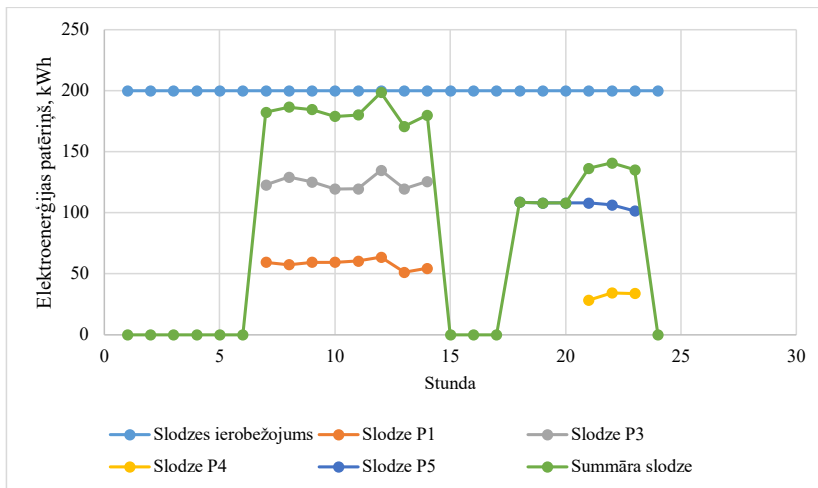
2.4. att. Optimizācijas rezultāti ar dažādu lietoto iterāciju skaitu, izmantojot Montekarlo metodi.

2.9. Rezultātu piemērs

Vienai no stundām maksimālās jaudas ierobežojums tika noteikts 100 kW, pārējām stundām – 200 kW, lai pārliecinātos, ka algoritms nostrādā korekti. Var redzēt, ka 100 kW ierobežojums 7. stundā piespiež algoritmu sameklēt nākamo izdevīgāko risinājumu; ja tāda ierobežojuma nav, 7. stunda tiek izmantota pēc iespējas vairāk (2.5.–2.6. att.).



2.5. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus un Montekarlo metodi īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai.



2.6. att. Slodzes sadalījums minimizācijas rezultātā ar gadījuma pārlases metodi, izmantojot vēsturiskos datus un Montekarlo metodi īpatnējā elektroenerģijas patēriņa noteikšanai bez 100 kW maksimālās slodzes ierobežojuma.

2.10. Piemērs. Lineārās programmēšanas un gadījuma pārlases metožu salīdzinājums

Apskatīsim piemēru, kas nav atrisināms ar pārlases metodi, ir grūti atrisināms ar gadījuma pārlases metodi un ir viegli atrisināms, lietojot lineāro programmēšanu.

Pieņemsim, ka tiek ražoti 10 produktu veidi un tiek izmantotas paralēlas ražotnes, kas var strādāt vienlaikus vai dažādos laikos. Ir zināms saražojamo produktu plānotais daudzums:

q_1, q_2, \dots, q_{10} . Ir zināms īpatnējais katra produkta enerģijas patēriņš: p_1, p_2, \dots, p_{10} . Katras ražotnes jauda ir ierobežota ar maksimāli iespējamo saražojamo produktu daudzumu: $A_{1max}, A_{2max}, \dots, A_{10max}$. Ir zināmas enerģijas cenas nākamajai dienai: C_1, C_2, \dots, C_{24} .

Konkrēta piemēra dati apkopoti 2.2. tabulā. Dati piemeklēti tā, lai uzdevuma atrisināšanas rezultāts būtu acīmredzams.

2.2. tabula

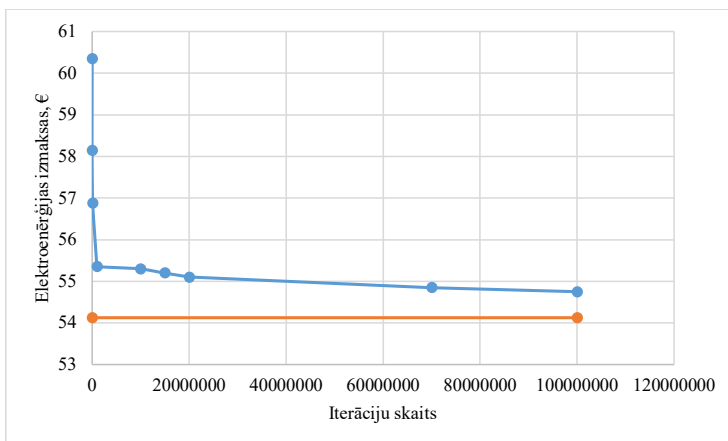
Piemēra ieejas dati

q_i	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8	q_9	q_{10}
Gab.	1000	950	900	850	800	750	700	650	600	550
p_i	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}
kWh/gab	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
A_{imax}	A_{1max}	A_{2max}	A_{3max}	A_{4max}	A_{5max}	A_{6max}	A_{7max}	A_{8max}	A_{9max}	A_{10max}
Gab.	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
C_i^*	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}
Eur/MWh	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95

* C_{11}, \dots, C_{24} ir savstarpēji vienādi ar 500; uzņēmuma atļautā jauda ir 500 kW.

Ņemot vērā noteiktos ierobežojumus, redzams, ka vienā stundā var saražot tikai vienu produktu. Minimālās enerģijas izmaksas būs tad, ja vislielākais enerģijas patēriņš būs pirmajā stundā, vismazākais – 10. stundā. Tādējādi optimālais ražošanas grafiks sakrīt ar 2.2. tabulas pirmo rindu. Turklāt enerģijas izmaksas būs 54,13 EUR. Rezultāts ir viegli sasniedzams ar lineārās programmēšanas palīdzību. Cita situācija ir tad, ja pielieto pārlases metodes, jo ir viegli aprēķināt, ka jāizvēlas vienīgais no iespējamiem 24¹⁰ variantiem. Variantu skaits ir vienāds ar 63 403 380 965 376. Gadījuma pārlases metode arī nedos garantētu rezultātu. Taču, lai to lietotu, mainīsim optimizācijas uzdevumu un mēģināsim atrast risinājumu, kas **tuvojas** optimālajam.

2.7. attēlā redzama novērtēto enerģijas izmaksu atkarība no mēģinājumu skaita. Var redzēt, ka rezultāts tuvojas 54,13 EUR vērtībai, lai arī nesasniedz to.



2.7. att. Gadījuma pārslases tuvošanās lineārās programmēšanas rezultātam.

2.11. Nodaļas secinājumi

1. Industriālā uzņēmuma energoefektīvai ražošanas plānošanai ir jāveic programmatūras sintēze, tās mērķis ir optimizēt elektroenerģijas patēriņa izmaksas, balstoties tirgus cenās. Algoritma izstrādes stadijā jāņem vērā tas, ka katram patērētājam ir īpaši tarifi par izmantoto elektroenerģiju, norēķinoties ar tirgotāju par izmantoto pakalpojumu. Tirgus cenas tiek prognozētas vai arī ņemtas no *Nord Pool* biržas datu bāzes.
2. Atkarībā no konkrētiem produkcijas veidiem, izmantojamām tehnoloģijām un iekārtām ražošana var būt organizēta dažādi:
 - paralēli; produkti tiek ražoti vienlaikus;
 - pēc kārtas; produkti tiek ražoti secīgi. Var izcelt divus apakšgadījumus:
 - produktu ražošanas secību var brīvi izvēlēties;
 - produktu ražošanas secība ir noteikta. Šāda veida ierobežojumi var rasties, piemēram, ņemot vērā produktu piegādes nosacījumus vai saskaņojot ar izejvielu piegādes grafikiem;
 - jaukti; šajā gadījumā daļa produktu var tikt ražota vienlaikus, daļa – secīgi.
3. Optimizējot enerģijas patēriņu, mērķa funkciju minimizēšanu var veikt, izmantojot dažādas metodes, atkarībā no ierobežojumu veidiem, kas izriet no konkrētajiem ražošanas apstākļiem un pieejamās informācijas. Tika izvēlētas divas pamatmetodes:
 - gadījuma pārslases (angļu val. – *random enumeration*) metode;

- lineārā programmēšana un pārslases metode (angļu val. – *linear programming and enumeration*).

Minētās metodes realizētas programmēšanas valodu *MATLAB* vai *C#* vidē, analizētas un verificētas.

4. Gadījumā, ja nav uzstādīti individuālie skaitītāji katrai ražošanas līnijai, kas ļautu izveidot precīzu sadalījumu starp ražošanas daudzumu, produkta veidu un patērēto enerģiju, var izmantot vēsturiskos ražošanas patēriņa reģistrācijas datus. Vēsturiskajiem datiem jāietver katras iekārtas saražotā produkta daudzums stundā, kā arī kopējā ražotnes patērētā elektroenerģija attiecīgajā stundā. Produktu īpatnējo patēriņu aprēķinu var veikt ar Montekarlo metodi vai mazāko kvadrātu metodi. Visos izskatītajos gadījumos patēriņa sadalījums pa stundām Montekarlo un mazāko kvadrātu metodēm sakrita.

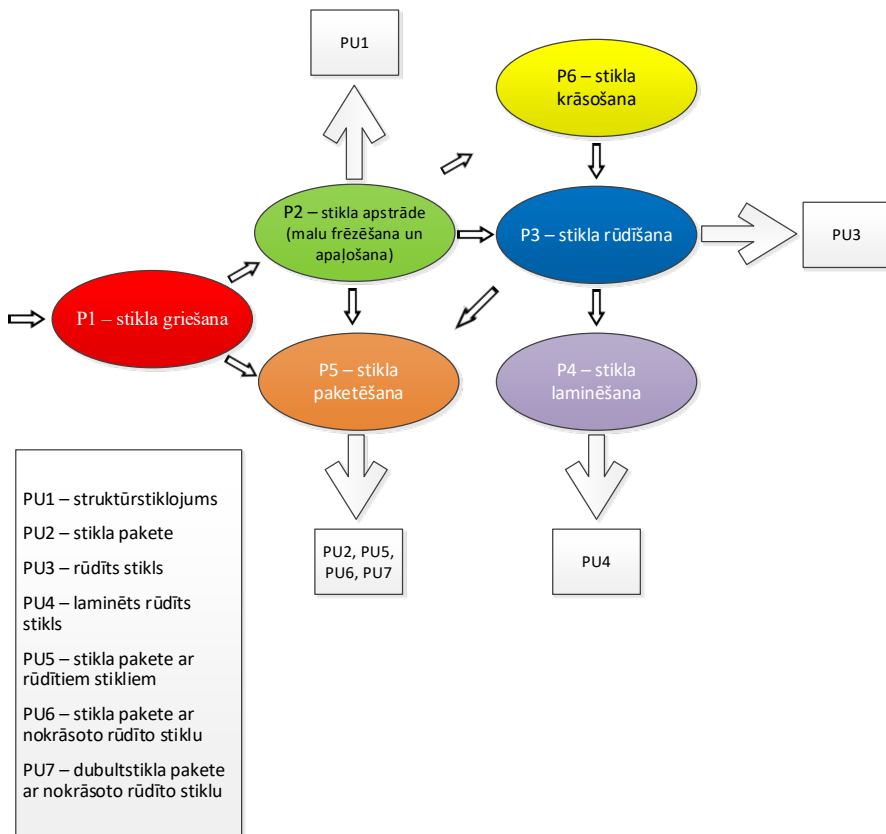
3. RAŽOŠANAS UZŅĒMUMA ENERGOAPGĀDES OPTIMIZĀCIJAS PIEMĒRS

Interesi par šo pētījumu izrādīja Rīgā strādājošs stikla apstrādes uzņēmums, sniedzot tam nepieciešamo informāciju, un tas kļuva par galveno iemeslu tieši šī uzņēmuma izvēlei tālākai analīzei.

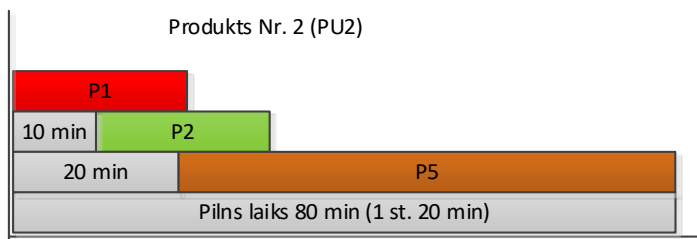
Darbā sniegtā informācija par uzņēmumu ir saskaņota ar tā īpašniekiem. Daļa aprēķinu, kur ietilpst konfidenciāla informācija, darbā nav uzrādīta, parādot tikai rezultātu.

Lai aprakstītu ražošanas procesus stikla apstrādes rūpnīcā, aplūkosim galvenos ražošanas procesus, gatavās produkcijas veidus un ražošanas procesu aprakstu pa etapiem, kas redzams 3.1. attēlā.

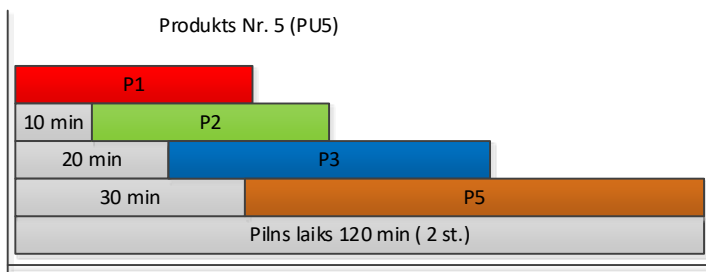
Kopā, lai izpildītu pasūtījumus 350 m² gatavās produkcijas apjomā (pa 50 m² no katra veida) nepieciešams no 140 līdz 2296 minūtēm atkarībā no iegūtās gatavās produkcijas veida. Nepieciešamie tehnoloģiskie procesi un laiks, lai saražotu galaproduktu, redzams 3.2.–3.3. attēlā.



3.1. att. Vienkāršots stikla apstrādes ražotnes ražošanas plūsmu attēlojums.



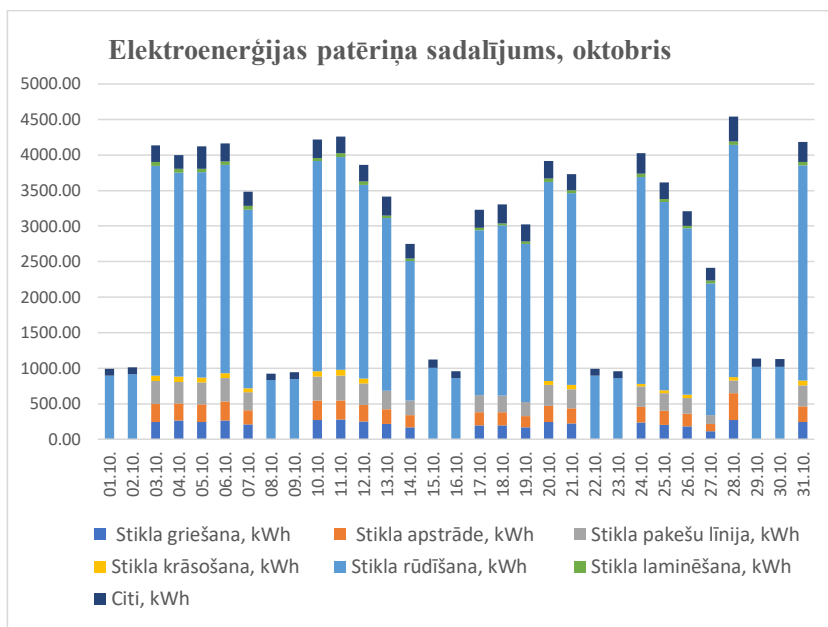
3.2. att. PU2 – stikla pakete, 50 m² stikla paketes izgatavošanai nepieciešamas 80 minūtes.



3.3. att. PU5 – stikla pakete ar rūdītiem stikliem, 50 m² stikla paketes izgatavošanai ar rūdītiem stikliem nepieciešamas 120 minūtes.

3.1. Energoefektivitātes paaugstināšanas iespējas

Lai varētu detalizēti analizēt izraudzītā uzņēmuma enerģijas patēriņu, nepieciešams uzstādīt elektroenerģijas patēriņa monitoringa sistēmu. Šāda sistēma tika uzstādīta katrai ražošanas līnijai, kas ļāva izanalizēt elektroenerģijas patēriņu kopumā, katras atsevišķas ražošanas līnijas elektroenerģijas patēriņu un tā rezultātā aprēķināt katra tehnoloģiskā procesa elektroenerģijas patēriņu un elektroenerģijas izlietojumu katram produkcijas veidam. 3.4. attēlā redzami apstrādātie elektroenerģijas patēriņa dati par katru ražošanas ķēdi 2019. gada oktobrī.



3.4. att. Elektroenerģijas patēriņa sadalījums oktobrī.

Analizējot 3.4. tabulas datus, kur attēlots elektroenerģijas patēriņš katram atsevišķam tehnoloģiskajam procesam/ražošanas ķēdei, var secināt, ka energoietilpīgākais process ir rūdīšana, un tieši šī procesa energoefektivitātes paaugstināšana var dot visjūtamāko rezultātu. Izanalizējot rūdīšanas ciklu, var secināt, ka katru dienu liels elektroenerģijas daudzums tiek patērēts, lai sakarsētu rūdīšanas krāsni, t. i., katru dienu krāsns tiek izslēgta, atdziest, un nākamā cikla darbības sākšanai nepieciešams to no jauna uzkarstēt. Pastāv arī jaunākas iekārtas, kas darbojas bez izslēgšanas, t. i., starplaikos starp rūdīšanas cikliem (kas šajā gadījumā notiek reizi dienā) krāsns pāriet zemākas temperatūras uzturēšanas režīmā, t. i., tā neatdziest.

3.4. tabula

Elektroenerģijas patēriņš katram atsevišķam tehnoloģiskam procesam/ražošanas ķēdei

	m ²	kWh,	kWh/m ²	m ² /h	max patēriņš
P1 – stikla griešana	15463,00	4666,60	0,34	90,00	30,32
P2 – stikla apstrāde	13056,00	4624,40	0,39	74,00	29,12
P3 – stikla rūdīšana	11334,00	64926,28	6,37	144,00	430,81
P4 – stikla laminēšana	233,00	893,00	4,465	2,50	11,16
P5 – stikla paketēšana	2334,00	5579,25	2,66	15,00	39,85
P6 – stikla krāsošana	223,00	919,80	4,60	4,599	11,4975

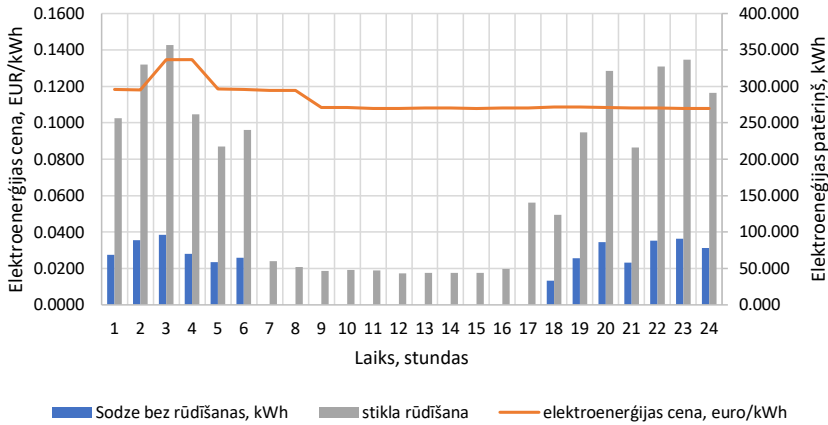
3.2. Stikla apstrādes ražotnes enerģijas patēriņa optimizācija

Aprobācijai izmantosim piedāvāto optimizāciju iepriekš aprakstītajam stikla apstrādes uzņēmumam. Sākotnējais elektroenerģijas patēriņa diennakts grafiks redzams 3.17. attēlā. Kā piemērs ņemta viena no 2019. gada oktobra dienām.

Kā redzams 3.17. attēla grafikā, elektroenerģijas patēriņa maksimums laikā sakrīt ar cenu maksimumu. Izmantojam iepriekš aprakstītos algoritmus ražotnes diennakts grafika optimizācijai. Ražošanas tehnoloģiskās ķēdes, kas nepieciešamas optimizācijas algoritmam, redzamas 3.1. attēlā.

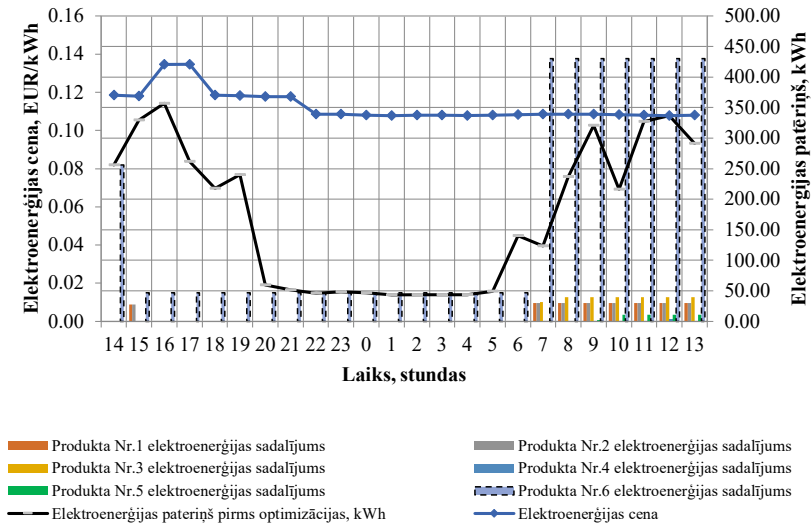
Kopā ir seši tehnoloģiskie procesi, no kuriem viens ir rūdīšana. Rūdīšana patērē daudz vairāk enerģijas nekā citi ražošanas procesi, tāpēc atainosim pārējo piecu ražošanas procesu optimizāciju atsevišķā grafikā. Dienas plāns, līniju ražīgums, kā arī ražošanas līniju elektroenerģijas patēriņš apkopots 3.5. tabulā.

Diennakts elektroenerģijas patēriņš



3.17. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš.

Diennakts elektroenerģijas patēriņš



3.19. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš bez rūdīšanas procesa.

Jāatzīmē, ka secīgās ražošanas ķēdēs cits citam sekojoši ražošanas procesi tiek palaisti tikai tad, ja ir produkts, kas izgājis caur iepriekšējo stadiju. Tādēļ šajā uzņēmumā darba process

sākas ar griešanu un pēc tam ar apstrādi, vai arī darba dienas beigās tiek veidota sagrieztā un apstrādātā stikla rezerve nākamajai dienai. Optimizācijas rezultāts redzams 3.18. attēlā.

Darba diena noslēdzas ar stikla pirmapstrādi nākamajai dienai. 2019. gadā elektroenerģijas ietaupījums, pateicoties optimizācijai, ir 25 730 EUR.

3.3. Nodaļas secinājumi

1. Izvēlētās ražotnes piemērs pierāda energoefektivitātes paaugstināšanas iespējas, pārnesot ražošanas operācijas laikā un izmantojot stundas ar lētākām enerģijas cenām.
2. 2019. gadā elektroenerģijas izmaksu ietaupījums, pateicoties optimizācijai, varēja būt 25 730 EUR.

4. ELEKTROENERĢIJAS AKUMULATORI UN PAŠĢENERĀCIJA

Vēl viens risinājums, kā samazināt elektroenerģijas izmaksas (nevis patērētās elektroenerģijas daudzumu, bet tieši izmaksas, jo patērētās elektroenerģijas daudzums nedaudz pieaug), ir dažādu elektroenerģijas uzkrājēju izmantošana. Galvenā doma šeit ir tāda, ka stundās ar viszemāko elektroenerģijas cenu uzkrājēji tiek uzpildīti, savukārt stundās ar visaugstāko elektroenerģijas cenu uzkrātā elektroenerģija tiek izmantota, tādējādi samazinot dārgās elektroenerģijas patēriņu. Līdz ar to, noņemot patēriņa pīķi “dārgajās” stundās, izlīdzinās patēriņa grafiks.

Promocijas darbā apskatīts visizplatītākais akumulatoru veids – litija jonu baterijas.

Pētījumam pieņemta mērķa funkcija:

$$f_{obj,1}(W_{apl.bat}, P_{inv}, C_{birzas}, C_{ST,var}, t) \rightarrow max, \quad (4.1)$$

kur t – laika vērtība stundās.

Mērķa funkciju, kas redzama 4.3. formulā, var pārrakstīt šādi:

$$f_{obj,1} = C_{ietaup}^d = \sum_{t=1}^{24} (W_{ch}^t \cdot (C_{birzas}^t + C_{ST,var}^t) - W_{disch}^t \cdot (C_{birzas}^t + C_{ST,var}^t)), \quad (4.2)$$

kur C_{ietaup}^d – ietaupījums no baterijas darbības dienā, EUR;

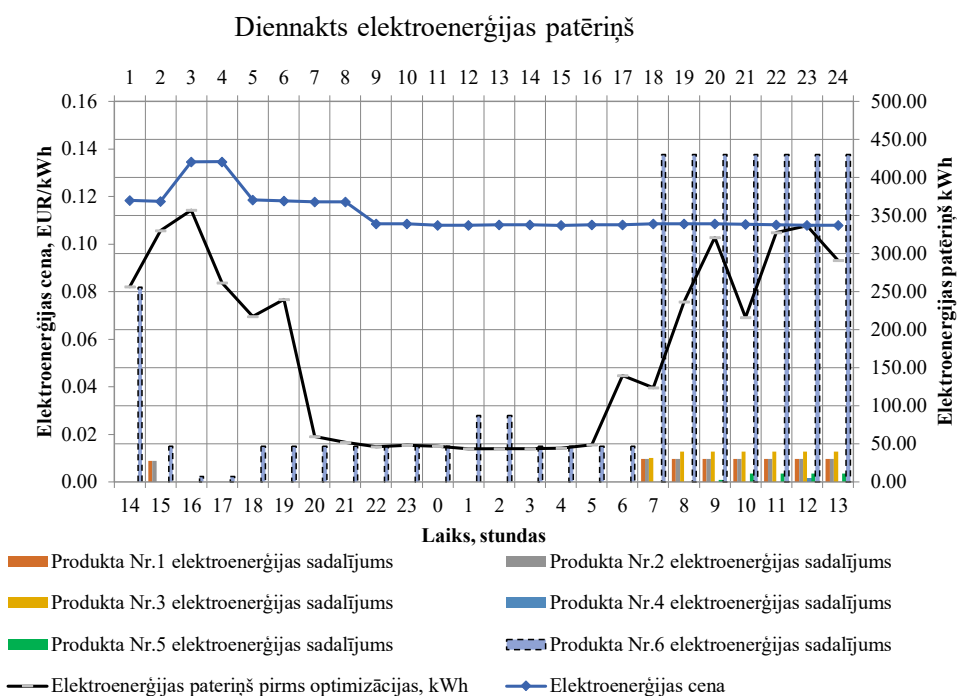
W_{ch}^t, W_{disch}^t – uzlādes un izlādes enerģija attiecīgi stundā t , kWh/h;

d – dienas indekss.

Jāatzīmē, ka šis risinājums ir divlīmeņu optimizācijas veids, kad pēc ražotnes patēriņa optimizācijas tiek izmantota nākamā optimizācija, lai izraudzītos akumulatora darbības režīmu.

Sakarā ar ražošanas specifiku, konkrēti – ar rūdīšanas krāsns darbību, ražotne patērē elektroenerģiju 24 stundas diennaktī, tāpēc ir lietderīgi ar akumulatoru bateriju palīdzību segt krāsns patēriņu stundās ar maksimālo elektroenerģijas cenu.

Ņemot vērā tālāk sniegtos neto pašreizējās vērtības aprēķinus, var secināt, ka pie pašreizējās akumulatoru baterijas cenas un pašreizējās elektroenerģijas cenu veidošanas sistēmas kapitālieguldījumi akumulatoru baterijā neatmaksājas. Tādēļ akumulatoru baterijas esamība tiek izskatīta nākotnes perspektīvā. 4.2. attēlā redzams optimizācijas piemērs, izvēloties bateriju ar 100 kWh kapacitāti un DoD 80 % apmērā. Ekonomiskā efektivitāte, izmantojot NPV kritēriju, tiks izskatīta turpmāk.



4.2. att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš, izmantojot akumulatoru baterijas.

4.1. Akumulatoru bateriju ekonomiskā efektivitāte, NPV kritērijs

Baterijas izmantošanas izmaksu un ieguvumu analīze tiek veikta, pamatojoties uz optimizēto bateriju darbības grafiku. Galalietotāju ieguvums tiek definēts kā starpība starp

enerģijas izmaksām, ja nav uzstādīta baterija, C_{izm,nav_bat}^g , un enerģijas izmaksām, izmantojot bateriju, $C_{izm,bat}^g$. Tādējādi ieguvums visa gada laikā ir šāds:

$$C_{ietaup}^g = C_{izm,nav_bat}^g - C_{izm,bat}^g \quad (4.3)$$

Kopējās izvēlētās baterijas izmaksas ir vienādas ar:

$$C_{bat_izmaksas} = W_{apl.bat} \cdot (C_{bat} + C_{transp} + C_{inst}) + C_{uztur} + C_{bat_plaukts} + C_{ekspl}, \quad (4.4)$$

kur C_{bat} – akumulatoru baterijas izmaksas par 1 kWh, EUR/kWh;

C_{transp} – akumulatoru baterijas transporta izmaksas, EUR/kWh;

C_{inst} – akumulatoru baterijas uzstādīšanas izmaksas, EUR/kWh;

C_{uztur} – akumulatoru baterijas uzturēšanas izmaksas, EUR;

$C_{bat_plaukts}$ – akumulatoru baterijas plaukta izmaksas, EUR;

C_{ekspl} – akumulatoru baterijas ekspluatācijas izmaksas, EUR.

Visbeidzot tiek aprēķināta NPV vērtība visā plānošanas periodā (25 gadi vairāku gadījumu izpētē):

- neņemot kredītu

$$NPV = - (C_{invkop}) + \sum_{g=1}^G \frac{C_{ietaup}^g}{(1 + i_{disk})^g} \quad (4.5)$$

kur i_{disk} – diskonta likme, %;

- ņemot kredītu

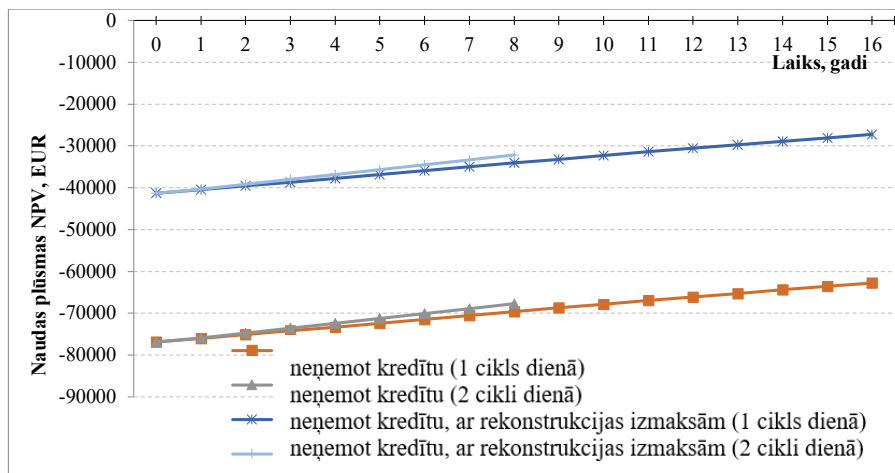
$$NPV = - (C_{invkop}) + \sum_{g=1}^G \frac{C_{ietaup}^g - \left(\frac{C_{invkop}}{G} + C_{atlik,g} \cdot i_{kred} \right)}{(1 + i_d)^g}, \quad (4.6)$$

kur $C_{atlik,g}$ – atlikusī summa par kredītu t -tajā gadā, EUR ;

i_{kred} – kredīta likme, %;

i_d – diskonta likme, %.

Jāņem vērā, ka litija baterijas kopējais ciklu skaits ir apmēram 6000. Tas nozīmē, ka, uzstādot vienu ciklu dienā, baterijas darbmūžs būs apmēram 16 gadi; ja dienā ir divi cikli, tad – astoņi gadi.



4.3. att. NPV aprēķins četriem gadījumiem.

4.2. Pašu atjaunīgās ģenerācijas uzstādīšana

Nākamais solis ir uzstādīt savu ģenerāciju no atjaunīgās enerģijas avotiem.

Šajā darbā tiek pieņemts, ka fotoelektriskajai tehnoloģijai ar 33 kW jaudu iegādes un uzstādīšanas izmaksas ir aptuveni 41 000 EUR [60]. Taču ir sagaidāms, ka tuvā nākotnē fotoelektrisko iekārtu cenas samazināsies, par to liecina jaudīgu saules elektrostaciju reālās cenas. Piemēram, Pērnavā, Igaunijā, 1 kW uzstādīšanas maksa jaunā 3,96 MW saules elektrostacijā ir 883,83 EUR [61]. Šādas jaudas izvēli nosaka iespēja izskatīt fotoelektrisko iekārtu uzstādīšanu bez akumulatoriem ar noteikumu, ka ir 100 % patēriņš, jo atdot atlikumus tīklā ir neizdevīgāk un nav jāmaksā par tīkla pakalpojumiem.

Investīcijas akumulatoru baterijās, kā parādīts iepriekšējā nodaļā, pašreiz neatmaksājas. Tāpēc apskatīsim kombināciju no ražošanas optimizācijas un saules paneļu uzstādīšanas. Saules paneļu jauda ir mazāka par minimālo patēriņu – rūdišanas krāsns darbojas 24 stundas diennaktī –, tāpēc tā neietekmēja slodzes sadalījumu. Saules paneļi ļāva ietaupīt elektroenerģiju. Aplūkosim saules paneļu uzstādīšanā veikto ieguldījumu atmaksāšanos – NPV. NPV tiek aprēķināta četriem variantiem.

1. variants – tiek ņemts kredīts, ņemot vērā kopējās novērstās izmaksas (C_{AC_total}):

$$NPV(T_{plan}) = -p_{inv} + \sum_{y=1}^{T_{plan}} \frac{C_{AC_total,y} - \left(\frac{p_{inv}}{T_{plan}} + p_{loan,y} \cdot i\right)}{(1 + i_d)^y}, \quad (4.16)$$

kur i_d – diskonta likme; p_{inv} – sākotnējās investīcijas fotoelektriskajās iekārtās, €; $C_{AC_total,y}$ – patērētāja kopējās novērstās izmaksas (AC) gadā y , EUR; $p_{loan,y}$ – atlikušais kredīta apjoms gadam y , EUR; i – kredīta likme, %.

2. variants – tiek ņemts kredīts, ņemot vērā fotoelektrisko iekārtu uzstādīšanas novērstās izmaksas (C_{ACPv}):

$$NPV(T_{plan}) = -p_{inv} + \sum_{y=1}^{T_{plan}} \frac{C_{ACPv,y} - \left(\frac{p_{inv}}{T_{plan}} + p_{loan,y} \cdot i\right)}{(1 + i_d)^y}. \quad (4.17)$$

3. variants – netiek ņemts kredīts, un tiek ņemtas vērā kopējās novērstās izmaksas (C_{AC_total}). Ja patērētājs neņem kredītu, tad 4.17. formulas augšējā daļa, $\left(\frac{p_{inv}}{T_{plan}} + p_{loan,y} \cdot i\right)$, ir vienāda ar 0.

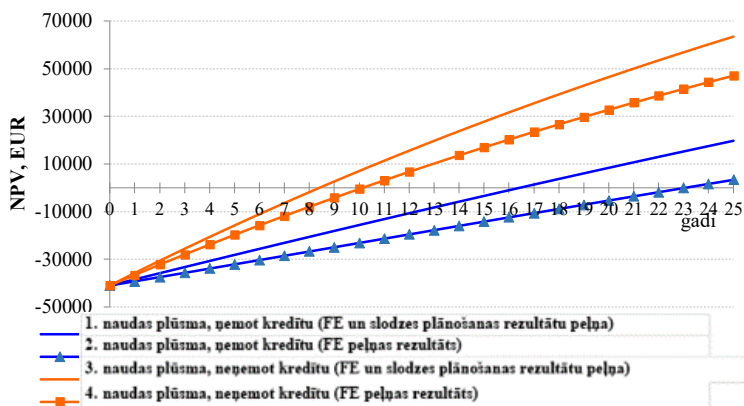
4. variants – netiek ņemts kredīts, un tiek ņemtas vērā fotoelektrisko iekārtu uzstādīšanas novērstās izmaksas (C_{ACPv}). Ja patērētājs neņem kredītu, tad 4.17. formulas augšējā daļa, $\left(\frac{p_{inv}}{T_{plan}} + p_{loan,y} \cdot i\right)$, ir vienāda ar 0.

Gada kopējais saražotās enerģijas daudzums no fotoelektriskajām iekārtām ar 33 kW jaudu ir 40 015,3 kWh.

Vērts atzīmēt, ka viss saražotais elektroenerģijas daudzums tiek izlietots ražotnes pašpatēriņam.

Ņemot vērā iepriekš sniegtos NPV aprēķinus, var secināt, ka akumulatoru ieviešanas projekta atmaksāšanās pašreiz šajā ražotnē nav investīciju ziņā pievilcīgs risinājums un prasa papildu subsīdijas. Taču šādu variantu izskatīt var, jo, ievērojami samazinoties akumulatoru bateriju sākumcenai un paaugstinoties elektroenerģijas cenai, perspektīvā šis risinājums var kļūt ekonomiski pamatotāks.

Ražotnes ikgadējie ienākumi, izmantojot fotoelektrisko iekārtu, ir 4 509,52 EUR. Šī ir maksimālā summa, kādu lietotājs var iegūt, pielāgojot enerģijas patēriņu tās ģenerācijai. Turklāt fotoelektrisko iekārtu izmantojuma orientējošā NPV uzrāda pozitīvu tendenci. Kā redzams, 3. variants atbilst visienesīgākajam gadījumam, kad kredīts netiek ņemts un NPV aprēķinam tiek izmantotas kopējās novērstās izmaksas. Šeit atmaksāšanās periods ir astoņi gadi, un kopējā NPV ir 63 430,97 EUR. Visvājākie rezultāti ir 2. variantam: atmaksāšanās periods ir 23 gadi, savukārt NPV ir tikai 3346,96 EUR. Kas attiecas uz 1. un 4. variantu, atmaksāšanās periods ir attiecīgi 16 un 10 gadi (4.6. att.).



4.6. att. NPV aprēķins.

SECINĀJUMI

Pētījumu apjoms par energoefektīvu ražošanas plānošanu pēdējos gados ir ievērojami pieaudzis, un ir daudzas publikācijas, kur energoefektivitātes apsvērumi integrēti pašreizējās ražošanas plānošanas modeļos. Tomēr esošās modelēšanas pieejas pašlaik vēl nevar atzīt par atbilstošām strauji pieaugušajām prasībām.

Industriālā uzņēmuma energoefektīvai ražošanas plānošanai ir jāveic programmatūras sintēze, tās mērķis ir optimizēt elektroenerģijas patēriņa izmaksas, balstoties tirgus cenās. Algoritma izstrādes stadijā jāņem vērā tas, ka katram patērētājam ir īpaši tarifi par izmantoto elektroenerģiju, kas tiek apmaksāts, norēķinoties ar tirgotāju par izmantoto pakalpojumu. Tirgus cenas tiek prognozētas vai arī ņemtas no *Nord Pool* biržas datubāzes. Elektroenerģijas izmantošana lētākās stundas laikā ļauj arī samazināt CO₂ izmešu daudzumu atmosfērā, jo dārgākā elektroenerģija ir no tām elektrostacijām, kas izmanto fosilo kurināmo.

Atkarībā no konkrētiem produkcijas veidiem, izmantojamām tehnoloģijām un iekārtām ražošana var būt organizēta dažādi:

- paralēli; produkti tiek ražoti vienlaikus;
- pēc kārtas; produkti tiek ražoti secīgi. Var noteikt divus apakšgadījumus:
 - produktu ražošanas secību var brīvi izvēlēties;

- produktu ražošanas secība ir noteikta. Šāda veida ierobežojumi var rasties, piemēram, ņemot vērā produktu piegādes nosacījumus vai saskaņojot ar izejvielu piegādes grafikiem;

• jaukti. Šajā gadījumā daļu produktu var ražot vienlaikus, daļu – secīgi.

Optimizējot enerģijas patēriņu, mērķa funkciju minimizēšanu var veikt, izmantojot dažādas metodes, atkarībā no ierobežojumu veidiem, kas izriet no konkrētajiem ražošanas apstākļiem un pieejamās informācijas.

Tika izvēlētas divas pamatmetodes:

- gadījuma pārlases (angļu val. – *random enumeration*) metode;
- lineārā programmēšana un pārlases metode (angļu val. – *linear programming and enumeration*).

Minētās metodes realizētas programmēšanas valodu *MATLAB* vai *C#* vidē, analizētas un verificētas.

Gadījumā, ja nav uzstādīti individuālie skaitītāji katrai ražošanas līnijai, kas ļautu izveidot precīzu sadalījumu starp ražošanas daudzumu, produkta veidu un patērēto enerģiju, var izmantot vēsturiskos ražošanas patēriņa reģistrācijas datus). Vēsturiskajiem datiem jāietver katras iekārtas saražotā produkta daudzums stundā, kā arī kopējā ražotnes patērētā elektroenerģija attiecīgajā stundā. Produktu īpatnējo patēriņu aprēķinu var veikt ar Montekarlo metodi vai mazāko kvadrātu metodi. Visos izskatītajos gadījumos patēriņa sadalījums pa stundām Montekarlo un mazāko kvadrātu metodēm sakrita.

Izvēlētais ražotnes piemērs pierāda energoefektivitātes paaugstināšanas iespējas, pārnesot ražošanas operācijas laikā un izmantojot stundas ar lētākām enerģijas cenām. 2019. gadā elektroenerģijas izmaksu ietaupījums, pateicoties optimizācijai, varēja būt 25 730 *EUR*.

Akumulatoru ieviešanas projekta atmaksāšanās pašreiz izvēlētajā ražotnē nav investīciju ziņā pievilcīgs risinājums un prasa papildu subsīdijas. Taču šādu variantu izskatīt var, jo, ievērojami samazinoties akumulatoru bateriju sākumcenai un paaugstinoties elektroenerģijas cenai, perspektīvā šis risinājums var kļūt ekonomiski pamatotāks.

Fotoelektrisko iekārtu izmantojuma orientējošā NPV uzrāda pozitīvu tendenci. Visienesīgākais ir gadījums, kad kredīts netiek ņemts un NPV aprēķinam tiek izmantotas kopējās novērtētās izmaksas. Šeit atmaksāšanās periods ir astoņi gadi.

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] «Oficiālā Eiropas Savienības tīmekļa vietne,» Septembris 2021. [Tiešsaiste]. Available: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_lv.
- [2] U. S. Energy Information Administration, International energy outlook 2013, Washington: DC, 2013.
- [3] The Electric Power Research Institute (EPRI), 2009.
- [4] United Nations, «Framework Convention on Climate Change Adoption of the Paris Agreement,» *21st Conference of the Parties*, Paris: United Nations, 2015.
- [5] European Commission, «Commission Proposes New Rules For Consumer Centred Clean Energy Transition – Energy – European Commission,» *Energy. N. p.*, 18 May 2017 [Online] – [Accessed 13.05.2017].
- [6] H. Holttinen, A. Tuohy, M. Milligan, V. Silva, S. Müller, and L. Soder, “The Flexibility Workout,” *IEEE Power Energy Mag.*, sēj. 11 no. 6, pp. 53–62, 2013.
- [7] Smart Grid Task Force, “Regulatory Recommendations for the employment of Flexibility – EG3 REPORT,” 2015.
- [8] N. G. Paterakis, O. Erdinç, and J. P. S. Catalão, “An overview of emand Response: Key-elements and international experience,» *Renew. Sustain. Energy Rev.*, sēj. 69, pp. 871–891, 2017.
- [9] ISO Central Secretariat, “ISO 50001 Energy management systems,” ISO, Geneva, Switzerland, July 2018.
- [10] ISO, <https://www.iso.org/standard/69426.html>.
- [11] A. Hasanbeigi un L. Price, A review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012.
- [12] R. Neugebauer, M. Wabner, H. Rentzsch un S. Ihlenfeldt, Structure principles of energy efficient machine tools, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2011.
- [13] L. Zhou, J. Li, F. Li, Q. Meng, J. Li un X. Xu, Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: A comprehensive literature review, *Journal of Cleaner Production*, 2016.
- [14] J. Dufloy, J. Sutherland, D. Dornfeld, C. Herrmann, J. Jeswiet, S. Kara, M. Hauschild un K. Kellens, Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2012.

- [15] M. Albadi un E. El-Saadany, Demand Response in Electricity Markets: An Overview, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007.
- [16] C. Su un D. Kirschen, Quantifying the Effect of Demand Response on Electricity Markets, sēj. 24 (3), IEEE Trans. Power Syst., Aug. 2009, pp. 1199–1207.
- [17] A. Khodaei, M. Shahidehpour un S. Bahramirad, SCUC With Hourly Demand Response Considering Intertemporal Load Characteristics, sēj. 2 (3), IEEE Trans. On Smart Grid, Sep 2011, pp. 564–571.
- [18] K. Dietrich, J. Latorre, L. Olmos un A. Ramos, Demand Response in an Isolated System With High Wind Integration, sēj. 27 (1), IEEE Trans. Power Syst., Feb 2012, pp. 20–29.
- [19] M. Klobasa, Analysis of demand response and wind integration in Germany’s electricity market, sēj. 4 (1), IET Renewable Power Generation, June 2009, pp. 55–63.
- [20] B. Zeng, J. Zhang, X. Yang, J. Wang, J. Dong un a. Y. Zhang, Integrated Planning for Transition to Low-Carbon Distribution System With Renewable Energy Generation and Demand Response, sēj. 29 (3), IEEE Trans. Power Syst., May 2014, pp. 1153–1165.
- [21] S. Madaeni un R. Sioshansi, Using Demand Response to Improve the Emission Benefits of Wind, sēj. 28 (2), IEEE Trans. Power Syst, May 2013, pp. 1385–1394.
- [22] S. Pourmousavi un M. Nehrir, Introducing Dynamic Demand Response in the LFC Model, sēj. 29 (4), IEEE Trans. Power Syst., Jul 2014, pp. 1562–1572.
- [23] F. Denton, K. Jefferies, D. Mountain, A. Robb un B. Spencer, The response of an industrial firm to alternative electricity rate structures: An optimization model for simulation applications, Resources and Energy, 1987.
- [24] G. Fethke un A. Tishler, The optimal choice of inputs under time-of-use pricing and fixedproportions technology: An application to industrial firms, Resources and Energy, 1989.
- [25] K. Bakhrankova, Planning, productivity and quality in continuous non discrete production, International Journal of Management & Enterprise Development, 2009.
- [26] E. Kondili, C. Pantelides un R. Sargent, A general algorithm for short-term scheduling of batch operations,I. MILP formulation, Computers & Chemical Engineering, 1993.
- [27] P. Castro, I. Harjunkoski un I. Grossmann, New continuous-time scheduling formulation for continuous plants under variable electricity cost, Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009.
- [28] P. Castro, I. Harjunkoski un I. Grossmann, Optimal scheduling of continuous plants with energy constraints, Computers & Chemical Engineering, 2011.
- [29] K. Nilsson un M. Söderström, Industrial applications of production planning with optimal electricity demand, Applied Energy, 1993.

- [30] K. Nilsson, Industrial production planning with optimal electricity cost, *Energy Conversion and Management*, 1993.
- [31] M. Karwan un M. Kebblis, Operations planning with real time pricing of a primary input, *Computers & Operations Research*, 2007.
- [32] S. Mitra, I. Grossmann, J. Pinto un N. Arora, *Computers & Chemical*, 38, 2012, pp. 171–184.
- [33] S. Mitra, I. Grossmann, J. Pinto un N. Arora, Optimal production planning under timesensitive electricity prices for continuous power-intensive processes, *Computers & Chemical Engineering*, 2012.
- [34] S. Mitra, J. Pinto un I. Grossmann, Optimal multi-scale capacity planning for powerintensive continuous processes under time-sensitive electricity prices and demand uncertainty. Part II: Enhanced hybrid bi-level decomposition, *Computers & Chemical Engineering*, 2014.
- [35] C. Latifoğlu, P. Belotti un L. Snyder, Models for production planning under power interruptions, *Naval Research Logistics*, 2013.
- [36] Y.-C. Choi un P. Xirouchakis, A production planning in highly automated manufacturing system considering multiple process plans with different energy requirements, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014.
- [37] Y.-C. Choi un P. Xirouchakis, A holistic production planning approach in a reconfigurable manufacturing system with energy consumption and environmental effects, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2015.
- [38] S. Zanoni, L. Bettoni un C. Glock, Energy implications in a two-stage production system with controllable production rates, *International Journal of Production Economics*, 2014.
- [39] E. Bazan, M. Jaber un S. Zanoni, Supply chain models with greenhouse gases emissions, energy usage and different coordination decisions, *Applied Mathematical Modelling*, 2015.
- [40] J. Neubauer un M. Simpson, Deployment of behind-the-meter energy storage for demand charge reduction, National Renewable Energy Laboratory, Tech. Rep. NREL/TP-5400-63162, January, 2015.
- [41] A. Oudalov, R. Cherkaoui un A. Beguin, Sizing and Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Peak Shaving Application, Lausanne: IEEE Lausanne Power Tech, 2007, pp. 621–625.
- [42] E. Telaretti, M. Ippolito un L. Dusonchet, A Simple Operating Strategy of Small-Scale Battery Energy Storages for Energy Arbitrage under Dynamic Pricing Tariffs, *Energies*, Available online: <https://doi.org/10.3390>, 2016.

- [43] T. Makalska, R. Varfolomejeva un R. Oleksijs, The Impact of Wind Generation on the Spot Market Electricity Pricing, (Europe), Red., Palermo: 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, Piscataway, NJ: IEEE, 2018.
- [44] Nord Pool, Nord Pool electrical energy price statistics., Available online: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/LV/Hourly/?view=table>.
- [45] W. Powell un S. Miesel, Tutorial on Stochastic Optimisation in Energy-Part II: An Energy Storage Illustration, Sēj. no Volume 31, Issue 2, IEEE Transactions on Power Systems., March 2018, pp. 1468–1475.
- [46] W. B. Powell, Clearing the Jungle of Stochastic Optimisation. In INFORMS Tutorials in Operations Research., Published online: 27 Oct 2014, 2014, pp. 109–137.
- [47] W. B. Powell un S. Meisel, Tutorial on Stochastic Optimisation in Energy Part I: Models and Policies, sēj. 31, IEEE Trans. on Power Systems , 2016, pp. 1459–1467.
- [48] K. Cahill, Monte Carlo Methods, 2019.
- [49] M. Huber, Adaptive Monte Carlo Integration, 2019.
- [50] AS “Sadales tīkls” elektroenerģijas sadales sistēmas pakalpojumu diferencētie tarifi, https://www.sadalestikls.lv/uploads/2018/01/ST_tarifi_2017.pdf.
- [51] Tarifi, <https://sprk.gov.lv/content/tarifi-1>, tiešsaite 2019.
- [52] E. Cagno, E. Worrell, A. Trianni un G. Pugliese, A novel approach for barriers to industrial energy efficiency. *Renew. Sustain., Energy Rev.* 19, 290e308, 2013.
- [53] European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques in the Food. Drink and Milk Industries., 2006., pp. 682.
- [54] K. Baltputnis, Elektroenerģijas akumulācijas tehnoloģijas Baltijas valstu kontekstā, *Enerģija un Pasaule*, 2017, pp. 37–41.
- [55] W. Bögel, J. Büchel un H. Katz, Real-life EV battery cycling on the test bench, *Journal of Power Sources*, 72 (1), 1998, pp. 37–42.
- [56] C. C. K. Amine, J. Liu, M. Hammond, A. Jansen, D. Dees, I. Bloom, D. Vissers un G. Henriksen, Factors responsible for impedance rise in high power lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 97–98, 2001, pp. 684–687.

- [57] S. Zhang, K. Xu un T. Jow, Electrochemical impedance study on the low temperature of Li-ion batteries, *Electrochimica Acta*, 49 (7), 2004, pp. 1057–1061.
- [58] H. C. Hesse, R. Martins, P. Musilek, M. Naumann, C. N. Truong un A. Jossen, *Economic Optimization of Component Sizing for Residential Battery Storage Systems*, MDPI, 2017.
- [59] P.-I. Hwang, S.-C. Kwon un S.-Y. Yun, Schedule-Based Operation Method Using Market Data for an Energy Storage System of a Customer in the Ontario Electricity Market, *Energies* 2018, 11 (10), 2683, 2018.
- [60] https://www.em.gov.lv/files/nozares_politika/ELIS_NETO_10.08.2018_nodevums.pdf
- [61] <https://www.gaas.ee/en/estonia-s-largest-solar-power-plant-started-operating-in-parnu/>.
- [62] U. S. Energy Information Administration, *Annual energy outlook with projections to 2040.*, Washington: DC, 2015.
- [63] Tri-Service Electrical Working Group (TSEWG), 2009.